

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**REZONATÖR TİP SUSTURUCULARIN AKUSTİK
ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Cem MERİÇ**

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONSTRÜKSİYON

HAZİRAN 2008

**REZONATÖR TİP SUSTURUCULARIN AKUSTİK
ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Cem MERİÇ
(503051203)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Haluk EROL
Diğer Jüri Üyeleri Y. Doç.Dr. Vedat TEMİZ
Doç.Dr. Rahmi GÜÇLÜ (Y.T.Ü.)**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasını yöneten, kendisiyle çalışmaktan mutluluk duyduğum kıymetli hocam Doç. Dr. Haluk EROL'a verdiği tavsiyeler, yaptığı eleştiriler ve tüm yardımları için teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarında, bana yardımcı olan arkadaşlarıma, eğitimim boyunca üstümde emeği geçmiş tüm hocalarıma ve maddi desteğinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ford Otomotiv Sanayi A. Ş.'ye (Ford Otosan) de verdiği destek için ayrıca teşekkür ederim.

Manevi desteklerini esirgemeyen değerli dostlarıma ve en önemlisi hayatım boyunca her zaman yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkürler.

Haziran 2008

Cem MERİÇ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2
1.2. Amaç Ve İçerik	4
2. ANALİTİK MODEL	6
2.1. Düzlem Dalga Yayılımı	6
2.2. Transfer Matris Metodu (TMM)	11
2.2.1. TMM'den İletim Kaybı	13
2.3. Analitik Model	14
3. SAYISAL ÇALIŞMALAR	30
3.1. Sayısal Modelleme	30
3.1.1. Sayısal Analizler	31
3.2. Amaca Uygun Tasarımlar	53
4. GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER	58
4.1. Genel Değerlendirme	58
4.2. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	64

KISALTMALAR

SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
HQ	: Herschel-Quincke
TMM	: Transfer Matrisi Metodu.

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1: Rijit, Düz Boruda Dalga Yayılımı.....	9
Şekil 2.2: Bir Susturucu Sisteminin Şematik Gösterimi.....	12
Şekil 2.3: Bir Susturucu Sisteme Giren ve İletilen Güçler.	13
Şekil 2.4: Bir Susturucu Sistemin Şematik Gösterimi	14
Şekil 2.5: Analitik Modeli Oluşturulan Susturucu Sistemin Şematik Gösterimi	15
Şekil 2.6: İndirgenmiş Sistemin Şematik Gösterimi.	28
Şekil 3.1: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$).....	31
Şekil 3.2: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, _ _ _ Matematiksel Analiz.....	32
Şekil 3.3: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$).....	32
Şekil 3.4: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, _ _ _ Matematiksel Analiz ...	33
Şekil 3.5: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$).....	33
Şekil 3.6: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, _ _ _ Matematiksel Analiz.....	34
Şekil 3.7: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Tüp Çıkışına Yerleştirilmiş Bir Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik	

Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$).....	35
Şekil 3.8: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Tüp Çıkışına Yerleştirilmiş Bir Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, _ _ _ Matematiksel Analiz.....	36
Şekil 3.9: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü Ve Tüp Giriş-Çıkışına Yerleştirilmiş İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$).....	36
Şekil 3.10: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü Ve Tüp Giriş-Çıkışına Yerleştirilmiş İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, _ _ _ Matematiksel Analiz.....	37
Şekil 3.11: HQ Tüpü ($h_{hq}=18\text{mm}$), HQ Tüpü ve Bir Adet Helmholtz Rezonatörü, HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri _ _ _ HQ Tüpü, _ _ _ HQ Tüpü ve Bir Adet Helmholtz Rezonatörü, _ _ _ HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatörü.....	38
Şekil 3.12: HQ Tüpü Ve Bir Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan ve $h_{hq,hr}=18\text{mm}$ ve $h_{hq,hr}=27\text{ mm}$ Olan İki Ayrı Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrileri _ _ _ $h_{hq,hr}=18\text{mm}$, _ _ _ $h_{hq,hr}=27$	39
Şekil 3.13: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Tüp Üzerine Yerleştirilmiş Genişleme Odasından Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $h_{ec}=6\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$).....	40
Şekil 3.14: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Tüp Üzerine Yerleştirilmiş Genişleme Odasından Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $h_{ec}=6\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, _ _ _ Matematiksel Analiz.....	40
Şekil 3.15: Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $h_{ec}=6\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=3\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$).....	41

- Şekil 3.16:** Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi
(Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $h_{ec}=6\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=3\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) __ _ Sayısal Analiz, __ _ Matematiksel Analiz.....42
- Şekil 3.17:** Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi
(Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=9\text{mm}$, $h_{ec}=18\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=9\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$)42
- Şekil 3.18:** Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi
(Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=9\text{mm}$, $h_{ec}=18\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=9\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) __ _ Sayısal Analiz, __ _ Matematiksel Analiz.....43
- Şekil 3.19:** Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri
(Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=9\text{mm}$, $h_{ec}=18\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=9\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=40\text{mm}$, 60mm , 80mm , $l_{hq}=200\text{mm}$) __ _ $l_{ec}=40\text{ mm}$, __ _ $l_{ec}=60\text{ mm}$, __ _ $l_{ec}=80\text{ mm}$ 44
- Şekil 3.20:** Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri
(Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=9\text{mm}$, $h_{ec}=18\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=9\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=40\text{mm}$, 60mm , 80mm , $l_{hq}=200\text{mm}$) __ _ $l_{c1}=20\text{ mm}$, __ _ $l_{c1}=40\text{ mm}$, __ _ $l_{c1}=60\text{ mm}$, __ _ $l_{c1}=80\text{ mm}$, __ _ $l_{c1}=100\text{ mm}$45
- Şekil 3.21:** Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistem
(Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{ec}=24\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $h_{cp1,cp2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{cp1,cp2}=12\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$).....46
- Şekil 3.22:** Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{ec}=24\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=12\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$) __ _ Sayısal Analiz, __ _ Matematiksel Analiz.....46

- Şekil 3.23:** Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$).....47
- Şekil 3.24:** Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, _ _ _ Matematiksel Analiz.....48
- Şekil 3.25:** Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$, $l_{hq}=198\text{mm}$, 204mm , 210mm , 216mm , 222mm) _ _ _ $l_{hq}=198\text{ mm}$, _ _ _ $l_{hq}=204\text{ mm}$, _ _ _ $l_{hq}=210\text{ mm}$, _ _ _ $l_{hq}=216\text{ mm}$, _ _ _ $l_{hq}=222\text{ mm}$ 49
- Şekil 3.26:** Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_1=36\text{mm}$, $h_2=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $l_{n1,n2}=5\text{mm}$, 10mm , 15mm , 20mm , 25mm) _ _ _ $l_{n1,n2}=5\text{ mm}$, _ _ _ $l_{n1,n2}=10\text{ mm}$, _ _ _ $l_{n1,n2}=15\text{ mm}$, _ _ _ $l_{n1,n2}=20\text{ mm}$, _ _ _ $l_{n1,n2}=25\text{ mm}$ 50
- Şekil 3.27:** Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$) _ _ _ $l_{hr1,hr2}=35\text{ mm}$, _ _ _ $l_{hr1,hr2}=40\text{ mm}$, _ _ _ $l_{hr1,hr2}=45\text{ mm}$, _ _ _ $l_{hr1,hr2}=50\text{ mm}$, _ _ _ $l_{hr1,hr2}=55\text{ mm}$ 51
- Şekil 3.28:** Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{ mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$) _ _ _ $h_{n1,n2}=6\text{ mm}$, _ _ _ $h_{n1,n2}=12\text{ mm}$, _ _ _ $h_{n1,n2}=18\text{ mm}$, _ _ _ $h_{n1,n2}=27\text{ mm}$, _ _ _ $h_{n1,n2}=36\text{ mm}$ 52
- Şekil 3.29:** Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$,

$l_{hq}=200\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{ mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{ mm}$, $l_d=100\text{mm}$, 110mm , 120mm) ____ $l_c=100\text{ mm}$, ____ $l_d=110\text{ mm}$, ____ $l_d=120\text{ mm}$	53
Şekil 3.30: Ana Boruya Bağlı İki Adet HQ Tüpü ve Dört Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistem	54
Şekil 3.31: Ana Boruya Bağlı İki Adet HQ Tüpü ve Dört Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi	55
Şekil 3.32: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Altı Adet Helmholtz Rezonatöründen (Elips) Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $h_{hr1, hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1, hr2}=30\text{mm}$, $l_{hq}=125\text{mm}$, $l_d=60\text{mm}$).....	55
Şekil 3.33: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Altı Adet Helmholtz Rezonatöründen (Elips) Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=30\text{mm}$, $l_{hq}=125\text{mm}$, $l_d=60\text{mm}$)	56
Şekil 3.34: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Dört Adet Helmholtz Rezonatöründen (Elips) Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $h_{hr1, hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1, hr2}=30\text{mm}$, $l_{hq}=125\text{mm}$, $l_d=60\text{mm}$).....	56
Şekil 3.35: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Dört Adet Helmholtz Rezonatöründen (Elips) Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $h_{hr1, hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1, hr2}=30\text{mm}$, $l_{hq}=125\text{mm}$, $l_d=60\text{mm}$).....	57

SEMBOL LİSTESİ

ρ_0	: Ortam yoğunluğu
u	: Hız
p_0	: Havanın basıncı
γ	: Özgül ısıların oranı
s	: Entropi
C	: Genlik
L	: Birinci dereceden dalga operatörü
k	: Dalga numarası
λ	: Dalga boyu
Z	: Karakteristik empedans
v	: Hacim hızı
g	: Kütle hızı
S	: Kesit alanı
p^+	: Yayılan dalga genliği
p^-	: Yansıyan dalga genliği
T	: Transfer matrisi
TL	: İletim kaybı
M	: Mach sayısı
c	: Sesin havadaki hızı
h_{md}	: Ana boru çapı
l_{md1}	: a elemanının uzunluğu
h_{n1}	: b_1 (boyun) elemanının çapı
l_{n1}	: b_1 (boyun) elemanının çapı
l_{c1}	: c_1 elemanının uzunluğu
l_{c2}	: Genişleme odası uzunluğu
l_{c3}	: c_3 elemanının uzunluğu
l_c	: HQ tüpünün uzunluğu
h_{hq}	: HQ tüpünün çapı
h_{ec}	: Genişleme odasının çapı
l_{md2}	: d elemanının uzunluğu
l_{md3}	: f elemanının uzunluğu
h_{n2}	: b_2 (boyun) elemanının çapı
l_{n2}	: b_2 (boyun) elemanının çapı
l_{hr1}	: e_1 elemanının (Helmholtz rezonatörü) uzunluğu
h_{hr1}	: e_1 elemanının (Helmholtz rezonatörü) çapı

l_{hr2} : e_2 elemanının (Helmholtz rezonatörü) uzunluğu
 h_{hr2} : e_2 elemanının (Helmholtz rezonatörü) çapı
 l_{md3} : f elemanının uzunluğu

REZONATÖR TİP SUSTURUCULARIN AKUSTİK ANALİZİ

ÖZET

Herschel-Quincke tüpü ve Helmholtz rezonatörleri genellikle fan gürültüsü ve turbocharger gibi otomobil emiş sistemi gürültü kontrolü uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Turbocharger çalışması sırasında iki çeşit gürültü oluşmaktadır. Bunlar akış sesi ve kanat geçiş sesidir. Genişleme odası ise çoğunlukla otomobil egzoz sistemleri uygulamalarında kullanılmaktadır. Herschel-Quincke tüp kavramı günümüze kadar araştırılmış ve turbocharger gürültü kontrolü uygulamaları için bir çok çözüm üretilmiştir.

Bu tezde, Herschel-Quincke tüpü, genişleme odası ve Helmholtz rezonatörlerinden oluşan bir susturucu sistemin tek boyutlu, parametrik bir analitik modeli oluşturulmuştur. Sistemdeki Helmholtz rezonatörleri ana boruya boyun bağlantısı ile bağlıdır. Boyun bağlantısının çapları Helmholtz rezonatörlerinin çaplarına eşitlenerek rezonatörler ana boruya doğrudan bağlı bir hale dönüştürülebilir. Bu analitik model kullanılarak, Herschel-Quincke tüpü, genişleme odası, Helmholtz rezonatörleri ve boyun bağlantısının, ayrıca bu elemanlara ait geometrik parametrelerin (çap, uzunluk, konum) iletim kaybı eğrisine olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla değişik geometrik kombinasyonlara sahip birçok susturucu sistemin analizi gerçekleştirilmiştir.

Bunun yanında, Herschel-Quincke tüpü, genişleme odası, Helmholtz rezonatörleri ve boyun bağlantısının, ayrıca bu elemanlara ait geometrik parametrelerin (çap, uzunluk, konum) iletim kaybı eğrisine olan etkileri incelenmiştir.

Çalışmalar sonucunda görülmüştür ki geliştirilen analitik modelin başarısı düşük frekanslarda ve küçük boru çaplarında daha yüksektir. Genişleme odasının sisteme eklenmesi sistemi karmaşık bir hale sokmaktadır. Genişleme odasının uzunluk, çap

ve konum parametreleri ile iletim kaybı değerlerinde bir yükselme olmasa da rezonans frekanslarını öteleme imkanı vardır. Genel olarak sistem elemanlarının çaplarındaki artış, iletim kaybı değerlerini arttırmakta, bununla birlikte iletim kaybı frekans bandını genişletmektedir. Helmholtz rezonatrlerini ana boruya doğrudan değil de bir boyun bağlantısıyla bağlamak sisteme bir rezonans frekansı eklemektedir. Bu düşük frekanslarda gerçekleşmektedir. HQ tüpünün ve Helmholtz rezonatörlerinin ana boruya bağlandığı noktalar arasındaki mesafenin değişimi, sisteme ait tm rezonans frekanslarının birlikte telenmesine imkan sağlamaktadır.

THE ACOUSTIC ANALYSIS OF REZONATOR TYPE SILENCERS

SUMMARY

Herschel-Quincke tube and Helmholtz resonators are being used commonly in fan noise control and in intake systems such as turbocharger noise control. Two types of noise occur in turbochargers which are commonly called blow or whoosh noise and pulsation noise. Herschel-Quincke tube concept has been investigated up until now, having being developed different solutions for turbocharger noise control. Expansion chambers are mostly used in automobiles in exhaust noise control.

In this study, an expansion chamber is adapted to the Herschel-Quincke tube concept. A 1D general parametric analytical model is developed including Herschel-Quincke tube, an expansion chamber placed on the tube and Helmholtz resonators. Helmholtz resonators, in this analytical model, are connected to the main duct with necks, however by setting the diameter and length of the neck, the analytical model can be converted for direct connection. This analytical model is used to analyze various silencer systems to have transmission loss curves as an output, investigating the effects of the geometric parameters as diameters of the main duct, Herschel-Quincke tube, Helmholtz resonators, expansion chamber; length of the Herschel-Quincke tube, Helmholtz resonators, expansion chamber; the diameter and length of the neck, the distance between the junction points of Herschel-Quincke tube and main duct and the effects of the existence system elements which were mentioned before as HQ tube, expansion chamber and Helmholtz resonator.

The performance of the analytical model is better in lower frequencies and with small duct diameters. Adding the expansion chamber to the silencer system, it becomes more complex. The length, diameter and position parameters of the expansion chamber can be set for moving the resonance frequencies of the system. Transmission loss values increases and the transmission loss band width extends with the increasing duct diameters. Connecting the Helmholtz resonators to the main duct

adds an extra resonance in lower frequencies. All the system resonance frequencies can be moved with the change of the distance between the connection points.

1. GİRİŞ

Boru akustiği ses dalgalarının sınırlı bir uzayda yayılmasını inceler. Bir ses kaynağından yayılan ses dalgasının karakteristik özelliklerini öncelikle boru geometrisi, boru çevresinin akustik özellikleri ve frekans belirler. Standart boru geometrisi sonsuz rijit-duvarlı borudur. Birinci “cut-off” frekansının altındaki düşük frekanslarda ses alanı tek boyutludur ve ses dalgaları düzlem dalga modundadırlar. “Cut-off” frekansının üstündeki frekanslarda yüksek modlardan dolayı ses alanı daha karmaşık bir hal alır.

Susturucu uygulamaları genellikle dört tiptedir. Bunlar, yutucu (dissipative) susturucu, yansıtıcı (reactive, reflective) susturucu, melez (hybrid) susturucu ve aktif (active) susturucu tipleridir. Yutucu susturucular, gözenekli ses yutucu malzemelerle kaplanmış ve ses enerjisini, ısıya dönüştürerek yok eden susturuculardır. Literatürde bu tipte susturuculara ilişkin yapılmış birçok çalışma vardır. Yutucu tipteki susturucuların en belirgin özelliği yüksek frekanslarda akustik performanslarının yüksek olmasıdır. Ayrıca, yüksek frekans bölgelerinde, rezonans etkilerini yok ederek düzgün ve yüksek ses iletim kaybı değerlerinin oluşmasını sağlamaktadırlar. Ancak, düşük frekans bölgelerinde etkisiz kalmaktadırlar.

Yansıtıcı susturucular, gözenekli ses yutucu malzemeler içermezler. Delikli borular ile akışı yönlendirerek çalışmaktadırlar. Delikli borular ve akışın yönlendirilmesiyle belirli frekans bölgeleri etkilenecek susturucunun istenilen frekans bölgelerinde etkin çalışması sağlanmaktadır. Uygulamada bu tip susturucular, daha çok belirgin bazı frekanslardan oluşan gürültülerin azaltılması için kullanılırlar. Bu tipteki susturucular, yutucu tipteki susturucuların tam tersi olarak genellikle düşük frekans bölgelerinde etkindirler. Bazı iyi tasarımların orta frekans bölgelerini etkilemesi de olasıdır.

Melez susturucular, yukarıda açıklanan yutucu ve yansıtıcı tipteki susturucuların birleştirilmesi ile elde edilirler. Bu tipteki susturucular hem delikli borular ve akışın yönlendirilmesi hem de gözenekli ses yutucu malzemelerin kullanılması prensiplerine göre çalışmaktadırlar. Bu nedenle, melez susturucular, hem yüksek frekans bölgeleri üzerinde, hem de düşük frekans bölgeleri üzerinde etkilidirler. Bu susturucular tüm frekans bantlarında iyi sonuçlar verebilmektedir. Akustik açıdan

oldukça performanslı olan bu susturucular, düşük frekans bantları için iyi bir susturucu tasarımına gerek duymaktadırlar. Daha sonra belirli hacimlere ses yutucu gözenekli malzemeler yerleştirilerek orta ve yüksek frekans bölgeleri de etkinleştirilmektedir. Bu tipteki susturucular tasarım açısından en zor ama akustik performans açısından en yüksek susturucu tipidir. Mümkün olduğunca ve motor özelliklerine bağlı olarak dizayn aşamasında her iki tipteki susturucunun en iyi özellikleri optimum şekilde kullanılmalıdır.

Aktif susturucular, aktif kontrol sağlayan otomatik kontrol sistemlerine dayanmaktadır. Bu tip susturucular, özellikle çok düşük frekansları kontrol altına alabilmek için kullanılmaktadır. Literatürde ve pratikte bir çok uygulamaları olmakla beraber, diğer susturucu tiplerine göre oldukça az kullanılmaktadırlar. Bunun sebebi, maliyetlerin yüksek, uygulamanın zor olmasıdır. Ama gelişen ve ucuzlayan teknolojilerle birlikte bu tipteki susturucuların uygulamasının yaygınlaşması beklenmektedir.

Reaktif susturucu uygulamalarında orijinal ses alanının bir kısmı ses kaynağına geri yansıtmak amacıyla boru geometrisinde değişiklikler yapılır. Bu reaktif susturucular arasında Genişleme Odası, Helmholtz rezonatörleri ve Herschel Quincke tüpleri sayılabilir. Tüm bu teknikler genellikle düzlem dalganın geçerli olduğu düşük frekanslı uygulamalarda kullanılırlar.

Herschel-Quincke tüpü ve Helmholtz rezonatörleri genellikle fan gürültüsü ve turbocharger gibi otomobil emiş sistemi gürültü kontrolü uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Turbocharger çalışması sırasında iki çeşit gürültü oluşmaktadır. Bunlar akış sesi ve kanat geçiş sesidir. Genişleme odası ise çoğunlukla otomobil egzoz sistemleri uygulamalarında kullanılmaktadır. Herschel-Quincke tüp kavramı günümüze kadar araştırılmış ve turbocharger gürültü kontrolü uygulamaları için bir çok çözüm üretilmiştir.

1.1 Literatür Araştırması

Dizel motorların otomobillerde daha çok kullanılmaya başlamasıyla birlikte turbocharger gürültü kontrolü araştırmalarda daha çok yer bulmaktadır. Literatürde, özellikle bu tip uygulamalarda kullanılan Herschel-Quincke tüp kavramı ve Helmholtz rezonatörleri ile ilgili çokça çalışma mevcuttur.

Herschel (1833), ilk defa müzik seslerinin akustik girişimi fikrini ortaya atmıştır. Yeniden birleşen sinyallerin yol uzunlukları arasındaki fark $(2m+1)(\lambda/2)$ olduğu zaman seslerin kaybolacağını iddia etmiştir. Burada λ akustik dalga boyu ve m herhangi bir tamsayıdır. **Quincke (1866)**, daha sonra Herschel'in sisteminin etkin bir biçimde sesi yok ettiğini deneysel olarak doğrulamıştır.

Stewart (1928), Herschel'in teorik açıklamasının elde ettiği deneysel verileri yorumlamak için yetersiz olduğunu buldu. Stewart düzlem dalga analizini kullanarak iletilen ve giren ses yoğunluğunun oranını ifade eden bir analitik model geliştirdi. Herschel'in öngördüğü gibi ses silinmesinin yol uzunlukları arasındaki fark $(2m+1)(\lambda/2)$ olduğunda oluşmadığını kanıtladı. Bunun yanında, azalmanın yol farkının $m\lambda$ olduğunda da oluştuğunu buldu.

Selamet (1997), standart HQ tüp sistemi üzerinde bir başka geometrik değişikliği inceleyen bir makale yayınlamıştır. Bu çalışma çoklu HQ tüp sistemini modellemektedir. HQ tüp sayısının artmasıyla ses azalma karakteristiği daha da karmaşık hale gelmektedir.

Trochon (2005) turbocharger gürültüsünü azaltmak amacıyla Herschel-Quincke tüpü ve iki adet Helmholtz rezonatöründen oluşan bir susturucu sistem tasarlamıştır. Bu susturucu ile 1640–3400 [Hz] frekans aralığında 15 [dB] ve üzerinde iletim kaybı elde etmiştir.

Graefenstein ve Wenzel (2003), Herschel-Quincke tüp kavramına dayanan ve Herschel-Quincke Spirali adını verdikleri tasarımlarıyla ilgili çalışmalarını yayınlamışlardır. Bu tasarım Herschel-Quincke tüp kavramında olduğu gibi “girişim” prensibiyle çalışmakta ve ses iki veya daha fazla paralel boruya ayrılmaktadır. Farklı uzunluktaki paralel borular, ayrılan ses dalgaları arasında faz farkı yaratarak gürültünün azalmasını sağlamaktadır.

Susturucu sistemler genellikle sonlu elemanlar yöntemi ve sınır elemanlar metodu gibi sayısal yöntemler ile analiz edilmekle birlikte, analitik modelleme üzerine çalışmalar da mevcuttur. **Gerges ve diğ. (2005)**, transfer matrisi yöntemiyle susturucu sistemlerin iletim kaybı eğrilerinin elde edilmesi üzerinde çalışmışlardır.

Düzlem dalga varsayımının geçerli olması için susturucu sistem boru çaplarının sesin dalga boyunun yarısından küçük olması gerekir (Trochon, 2005). 36 [mm] çaplı boruda düzlem dalga modeli $f = c/\lambda/2 = 4722$ [Hz] frekansa kadar geçerlidir.

1.2 Amaç Ve İçerik

Dizel motorların otomobillerde daha çok kullanılmaya başlamasıyla birlikte turbocharger gürültü kontrolü araştırmalarda daha çok yer bulmaktadır. Bu amaçla yürütülen çalışmaların hemen hepsi Herschel-Quincke tüpü ve Helmholtz rezonatörü üzerinedir.

Bu tezin amacı, Herschel-Quincke tüpü ve iki adet Helmholtz rezonatöründen oluşan bir susturucu sistemde Herschel-Quincke tüpü üzerine genişleme odası ekleyerek sistemin analitik modelinin oluşturulmasıdır. Helmholtz rezonatörleri yapıya genellikle doğrudan bağlanmaktadır. Geliştirilmesi amaçlanan analitik model parametrik ve Helmholtz rezonatörleri yapıya bir boyun bağlantısıyla bağlanmışlardır. Analitik modeldeki susturucu sistem elemanlarının uzunluk, çap, konum parametrelerini değiştirerek, bir çok farklı geometriyi analiz etme imkanı oluşmaktadır. Örneğin boyun bağlantısının çap parametresi ile Helmholtz rezonatörleri ana boruya doğrudan bağlanır hale getirilebilir. Herschel-Quincke tüpü üzerine yerleştirilen genişleme odasının çap parametresi ile genişleme odası yapıya dâhil edilebilir ve yapıdan çıkartılabilir. Geliştirilmesi amaçlanan bu analitik model değişik geometrik kombinasyonlara sahip susturucu sistemlerin iletim kaybı eğrilerini elde etmek için kullanılacaktır. Bununla birlikte ana borunun, Herschel-Quincke tüpünün, genişleme odasının, Helmholtz rezonatörlerinin, boyun bağlantısının çapları ve uzunlukları gibi sisteme ait geometrik parametrelerin ve sistem elemanlarının yapıdaki varlıklarının iletim kaybı eğrisi üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Tez çalışmasının bir diğer amacı ise edinilen bilgi birikimi ile nispeten geniş bir frekans bandında 10 dB ve üzeri iletim kaybı veren rezonatör tipi susturucu tasarlamaktır.

Bu tezin kapsamında, rezonatör tip susturucular üzerine bir literatür araştırması yapılmış, daha önce bu alanda yapılan araştırmalar ve susturucu sistemlerin analitik modellemesiyle ilgili yaklaşımlar incelenmiştir. İncelenen metotlar arasından uygun

olanlar seçilmiş ve çalışmalara başlanmıştır. Parametrik hale getirilmiş bir analitik model oluşturulmuştur. Daha sonra sistemin değişik geometrik kombinasyonları sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal analizlerde Patran ve Actran programları kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan katı modeller Unigraphics-Nx4 adlı program ile oluşturulmuştur. Katı model; ağ oluşturmak, sınır şartlarını, malzeme özelliklerini ve elemanların özelliklerini belirlemek üzere Patran'a aktarılmıştır. Bu işlemlerin ardından Actran çözücüsü ile analizler tamamlanmış, analiz sonuçları Excel'de işlenerek iletim kaybı eğrisi elde edilmiştir. Sayısal analizde oluşabilecek hataları kabul etmekle birlikte, sayısal analiz sonuçları analitik modelin başarısını anlamak amacıyla kullanılmıştır.

Tezin ilk bölümünde amaç, literatür araştırması ve literatür araştırmalarının sonuçlarına yer verilmiştir.

İkinci bölümde analitik model oluşturma çalışmalarıyla ilgili bilgiye yer verildikten sonra rezonatör tipi susturucunun analitik modeli bulunmaktadır.

Üçüncü bölümde yapılan sayısal çalışmalar anlatılmıştır. Sayısal çalışmalar, değişik geometrik kombinasyonlara ait susturucu sistemlerin sayısal analiz sonuçları, bu sonuçların analitik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmasını içermektedir. Bunun yanında, Herschel-Quincke tüpü, genişleme odası, Helmholtz rezonatörleri ve boyun bağlantısının, ayrıca bu elemanlara ait geometrik parametrelerin (çap, uzunluk, konum) iletim kaybı eğrisine olan etkileri incelenmiştir.

Dördüncü bölümde tezin genel değerlendirilmesi ve gelecek çalışmalar için öneriler belirtilmiştir.

2. ANALİTİK MODEL

Susturucu sistemin analitik modeli, ses alanının düzlem dalga olarak yayıldığı kabulü ile, transfer matrisi yöntemi kullanılarak oluşturulacaktır.

2.1 Düzlem Dalga Yayılımı

Durgun haldeki ideal (nonviscous) akışkana sahip yeterince küçük çaplı ve rijit duvarlı borularda, küçük genlikli ses dalgaları düzlem dalga olarak yayılır. Bu durumdaki temel denklemler;

Kütlenin korunumu; (mass continuity)

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (2.1)$$

olur.

Dinamik eşitlik; (dynamical equilibrium)

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

ve Enerji denklemi; (energy equation)

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \frac{\gamma (p_0 + p)}{\rho_0 + p} \quad \frac{\gamma \rho_0}{\rho_0} = a_0^2, \quad (2.3)$$

olacaktır.

z eksenel koordinat, p_0 ve ρ_0 ortamın basıncı ve yoğunluğu, s ise entropidir,

$$p/p_0 = 1, \quad \rho/\rho_0 = 1.$$

Denklem (2.3)'ten,

$$\rho = \frac{p}{a_0^2}; \quad \frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial p}{\partial z}; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial p}{\partial t}; \quad (2.4)$$

yazılır.

Denklem (2.4)'ü Denklem (2.1)'de yerine koyup Denklem (2.1) ve Denklem (2.2)'nin sırasıyla t 'ye ve z 'ye göre türevlerini alırsak;

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] p = 0, \quad (2.5)$$

olur.

Bu lineer homojen birinci dereceden kısmi diferansiyel denklemin çözümü;

$$p(z, t) = C_1 f(z - a_0 t) + C_2 g(z + a_0 t), \quad (2.6)$$

olacaktır.

Zamana bağlılık $e^{j\omega t}$ gibi bir üstel fonksiyon olarak varsayılırsa eğer Denklem (2.6);

$$p(z, t) = C_1 e^{j\omega(t-z/a_0)} + C_2 e^{j\omega(t+z/a_0)}, \quad (2.7)$$

formunu alır. $(i^2 = -1)$.

Çözümün birinci kısmı $z = t = 0$ da ve $z = a_0 t$ de C_1 'e eşittir. Bu nedenle çözüm a_0 hızıyla ilerleyen bir ses dalgasını temsil eder. Benzer şekilde incelendiğinde çözümün ikinci kısmı, aynı a_0 hızıyla zıt yönde ilerleyen bir ses dalgasını temsil eder. a_0 , yayılan dalga hızı ve Denklem (2.5)'te gösterilen ifade dalga denklemdir. Denklem (2.7) ise bu dalga denkleminin çözümüdür ve birbirine zıt yönde ilerleyen C_1 ve C_2 genlikli iki dalgayı ifade eder.

Burada Denklem (2.5) bir boyutlu dalga denklemi ve dalga yayılım hızı a_0 faz hızı veya ses hızı olarak adlandırılır.

$$L \equiv \frac{\partial^2}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (2.8)$$

birinci dereceden dalga operatörü olarak adlandırılır.

Bu dalga operatörü çarpanlarına ayrılırsa;

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + a_0 \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} - a_0 \frac{\partial}{\partial z} \right), \quad (2.9)$$

olur.

$k = \omega/a_0 = 2\pi/\lambda$ olmak üzere Denklem (2.7) düzenlenirse;

$$p(z, t) = \left[C_1 e^{-ikz} + C_2 e^{+ikz} \right] e^{i\omega t}, \quad (2.10)$$

elde edilir.

Burada k dalga numarası ve λ dalga boyudur.

$$u(z, t) = \left[C_3 e^{-ikz} + C_4 e^{+ikz} \right] e^{i\omega t}, \quad (2.11)$$

parçacık hızı olmakla birlikte aynı dalga denklemini sağlamaktadır.

Denklem (2.10) ve Denklem (2.11) “Dynamical equilibrium” denkleminde yerine konursa eğer;

$$C_3 = C_1/\rho_0 a_0, \quad C_4 = -C_2/\rho_0 a_0, \quad (2.12)$$

olur.

Böylelikle parçacık hızı;

$$u(z, t) = \frac{1}{Z_0} [C_1 e^{-ikz} + C_2 e^{+ikz}] e^{i\omega t}, \quad (2.13)$$

olarak yazılabilir.

Burada, $Z_0 = \rho_0 a_0$, ortamın karakteristik empedansıdır.

Bir boru boyunca ilerleyen düzlem dalga için hacim hızı;

$$v = Su \quad (2.14)$$

ve kütle hızı

$$\mathcal{G} = \rho_0 Su, \quad (2.15)$$

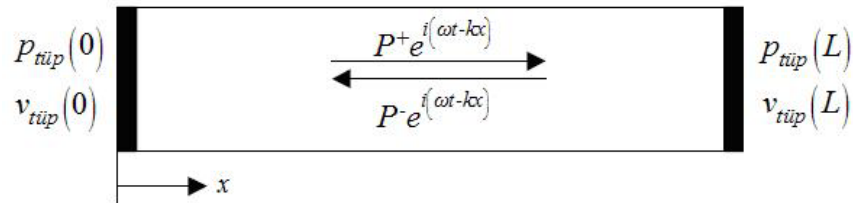
olarak yazılabilir. Burada S borunun kesit alanıdır.

Karakteristik empedans değerleri bu üç durum için şöyle yazılır: **(Munjal, 1987)**

$$\text{Parçacık hızı, } u : \rho_0 a_0. \quad (2.16)$$

$$\text{Hacim hızı, } v : \rho_0 a_0 / S. \quad (2.17)$$

$$\text{Kütle hızı, } \mathcal{G} : a_0 / S. \quad (2.18)$$



Şekil 2.1: Rijit, Düz Boruda Dalga Yayılımı.

Tüpün içindeki ses alanı;

$$p_{tüp}(x, t) = p^+ e^{i(\omega t - kx)} + p^- e^{i(\omega t + kx)}, \quad (2.19)$$

olarak ifade edilir. Borunun giriş ve çıkışındaki basınç ve hızlar ise;

$$p_{tüp}(0,t) = (p^+ + p^-)e^{i\omega t}, \quad (2.20)$$

$$v_{tüp}(0,t) = \frac{(p^+ - p^-)e^{i\omega t}}{\rho c}, \quad (2.21)$$

$$p_{tüp}(L,t) = (p^+ e^{-ikL} + p^- e^{ikL})e^{i\omega t}, \quad (2.22)$$

$$v_{tüp}(L,t) = \frac{(p^+ e^{-ikL} - p^- e^{ikL})e^{i\omega t}}{\rho c}, \quad (2.23)$$

şeklindedir.

Böyle bir sistem dört kutup parametresi ile

$$\begin{bmatrix} p_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_o \\ v_o \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada p_i , v_i girişteki, p_o , v_o ise çıkıştaki ses basıncı ve hacim hızlarını göstermektedir.

Denklem (2.20), Denklem (2.21), Denklem (2.22) ve Denklem (2.23) birlikte matris formda ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} p_{tüp}(L) \\ v_{tüp}(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kL) & -i \cdot \frac{\rho c}{S} \sin(kL) \\ -i \cdot \frac{S}{\rho c} \sin(kL) & -\cos(kL) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{tüp}(0) \\ v_{tüp}(0) \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

Denklem (2.25)'i yeniden düzenlersek;

$$\begin{bmatrix} p_{tüp}(0) \\ v_{tüp}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l) & i.\frac{\rho c}{S}.\sin(k.l) \\ i.\frac{S}{\rho c}\sin(kL) & \cos(k.l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{tüp}(L) \\ v_{tüp}(L) \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l) & i.\frac{\rho c}{S}.\sin(k.l) \\ i.\frac{S}{\rho c}\sin(kL) & \cos(k.l) \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

Burada T matrisi Şekil 2.1’de gösterilen rijit duvarlı düz borunun transfer matrisi olarak adlandırılır.

2.2 Transfer Matris Metodu (TMM)

Transfer matrisi ya da dört kutup parametresi gösterimi uzun zamandır bilinmektedir (**Munjal, 1987**). Uygulamada, gerçek bir susturucu birbirine bağlı değişik elemanlardan oluşmaktadır (**Munjal, 1987**). Empedans analogisini kullanarak, birinci konumdaki (giriş ucu) ve ikinci konumdaki (çıkış ucu) ses basıncı p ve hacim hızı v (Şekil 2.1’de sırayla $x = 0$ ve $x = L$);

$$p_1 = A.p_2 + B.v_2 \quad (2.28)$$

ve

$$v_1 = C.p_2 + D.v_2, \quad (2.29)$$

olarak yazılabilir.

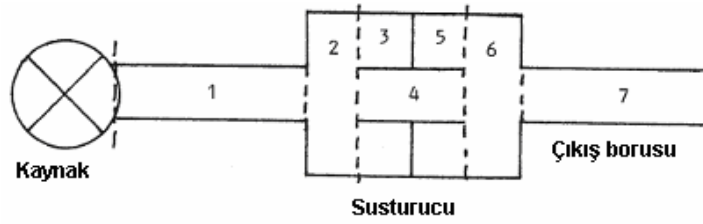
Bu metot, eşit matris formunda yazılabilen Denklem (2.28) ve Denklem (2.29) ile aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$q_1 = T_1.q_2. \quad (2.30)$$

Burada $q_i = [p_i \quad v_i]^T$ durum değişkenlerine ($i=1,2$) bağlı bir vektör ve

$$T_1 = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

durum değişkenlerine bağlı bir 2×2 bir kare matristir. Bu matris toplam ses basıncına ve hacim hızına bağlıdır. Transfer matrisi sistemin frekansa bağlı bir özelliğidir. Çapraz kontrol kuralı transfer matrisinin determinantının 1 olmasını gerektirir. Ayrıca, simetrik susturucu için A ve D eşit olmalıdır. Pratikte, gerçek bir susturucuda, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi birlikte bağlanmış farklı elemanlar vardır. Ayrıca, sistem elemanları lineer ve pasif kabul edilirse, her bir elemanın dört kutup sabitlerinin değerleri giriş ve çıkış elemanlarıyla olan bağlantılardan etkilenmezler. Böylece her bir eleman, geometrisine ve akış durumuna bağlı bir transfer matrisi ile karakterize edilir. Bu yüzden, susturucunun akustik özelliğini elde etmek için her elemanı modellemek ve sonra hepsini birbirleriyle ilişkilendirmek gerekir.



Şekil 2.2: Bir Susturucu Sisteminin Şematik Gösterimi

Eğer çok sayıda susturucu elemanı, örneğin ani genişlemeler, ani daralmalar, genişletilmiş tüpler ve/veya delikli tüpler seri halinde birlikte bağlanmışlarsa, tüm sistemin toplam transfer matrisi, her bir eleman matrisinin çarpımı ile verilir. Örneğin, Şekil 2.4’te gösterilen susturucu düz bir genişletilmiş tüp, ani genişleme ve genişletilmiş giriş, düzenli tüp, ani daralma, delikli tüplü eşmerkezli rezonatör ve düz bir kuyruk boru içerir. Bu özel susturucu için,

$$q_0 = T_0 \cdot q_1, \quad (2.32)$$

yazılabilir. $q_1 = T_1 \cdot q_2$ olduğundan denklem

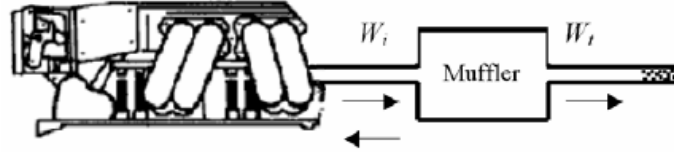
$$q_0 = T_0 \cdot T_1 \cdot q_2, \quad (2.33)$$

şeklinde yazılabilir. $0 \leq n \leq 6$ için $q_n = T_n \cdot q_{n+1}$ 'dir. Sonuç olarak, bir susturucudaki iki noktadaki (giriş ve çıkış) durum değişkenlerine bağlı son bir ifade elde edilir (Gerges ve diğ., 2005).

$$q_0 = T_0 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6 \cdot q_7 = \prod_{i=0}^6 T_i \cdot q_7 . \quad (2.34)$$

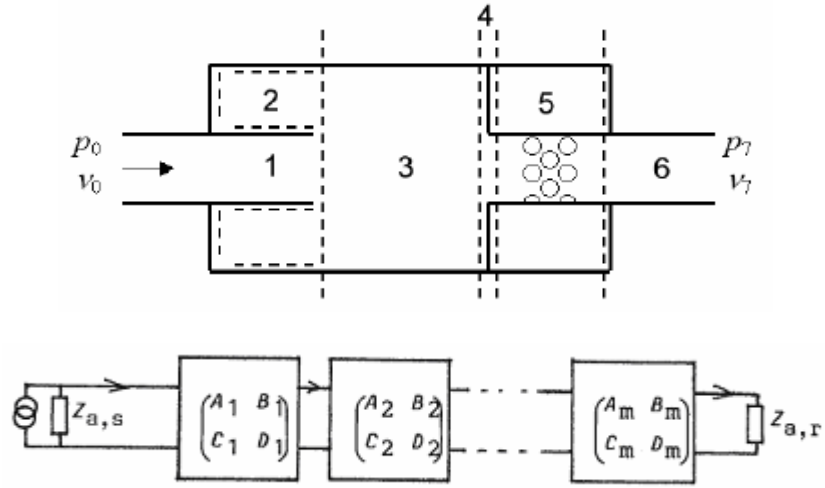
2.2.1 TMM'den İletim Kaybı

Gürültü kontrolü uygulamaları için kullanılan bir susturucu; azalma (attenuation), ekleme kaybı, iletim kaybı ve gürültü azaltma terimleri ile tanımlanabilir. İletim kaybı, TL, kaynaktan bağımsızdır ve çıkış ucunda bir anekoik ortamı gerektirir. İletim kaybı “the muffler proper” olarak adlandırılan özelliği tanımlar. Susturucuya gelen güç ile susturucu çıkışındaki anekoik ortama iletilen gücün oranının logaritmasının 10 katıdır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3: Bir Susturucu Sisteme Giren ve İletilen Güçler.

İletim kaybı ne kaynak ne de yayılım empedansını içerir. Bu nedenle elemanın değişmez özelliğidir. Geçmişte, bir dalga alanındaki gelen dalganın ölçümü, çok zahmetli deneylere yol açan empedans tüpü teknolojisinin kullanımını gerektirirdi ancak modern alet düzeni ile iki mikrofon kullanımı bugün daha hızlı ve kesin sonuçlar sağlamaktadır.



Şekil 2.4: Bir Susturucu Sistemin Şematik Gösterimi

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_7 & B_7 \\ C_7 & D_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_7 \\ v_7 \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

Şekil 2.4’te gösterilen susturucu sistemi düşünülürse ve ortalama akışın etkisi göz önünde bulundurulursa, iletim kaybı dört kutup sabitleriyle,

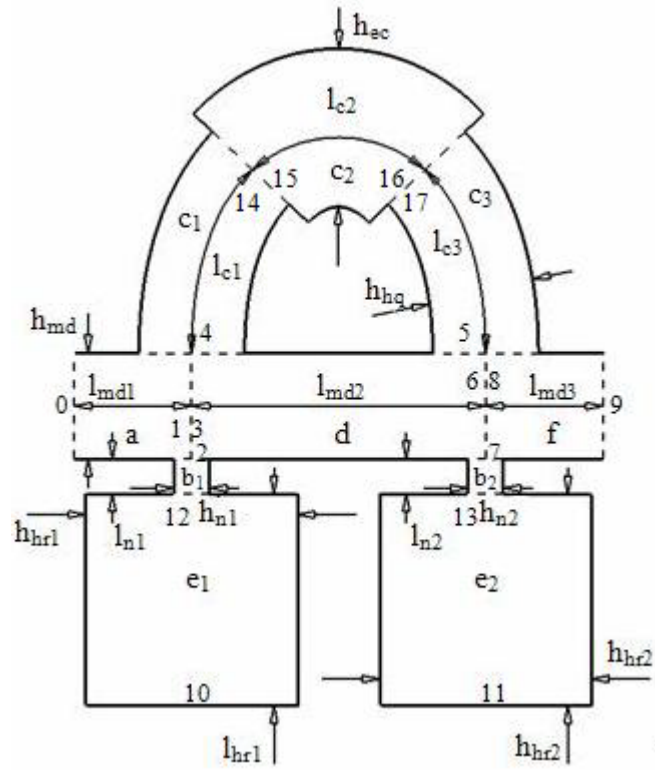
$$TL = 20 * \text{Log} \left\{ \frac{1 + M_1 \left(\frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot S_1}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot S_2} \right)^{1/2}}{1 + M_2} \gamma \right\}, \quad (2.36)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \left| A + \frac{B \cdot S_2}{\rho_2 \cdot c_2} + \frac{C \cdot \rho_1 \cdot c_1}{S_1} + \frac{D \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot S_1}{\rho_2 \cdot c_2 \cdot S_1} \right|, \quad (2.37)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Burada M_i ortalama akış Mach sayısı ($M_i < 0.2$), ρ_i akışkan yoğunluğu, c_i ses hızı, S_i kesit alanı, $i = 1$ giriş borusunu gösterirken, $i = 2$ çıkış borusunu işaret eder (Gerges ve diğ., 2005).

2.3 Analitik Model

Analitik modeli oluşturulan, Herschel-Quincke tüpü, bir adet genişleme odası, ve iki adet boyun bağlantılı Helmholtz rezonatöründen oluşan susturucu sistem Şekil 2.5’te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Analitik Modeli Oluşturulan Susturucu Sistemin Şematik Gösterimi

Matematik modelin oluşturulması aşamasında transfer matrisi yöntemi kullanılmıştır. Burada genişleme odası, Herschel-Quincke tüpü üzerinde konumlandırılmıştır. Herschel-Quincke tüpünün ana boruya bağlandığı iki nokta sırasıyla birinci bağlantı noktası veya tüp girişi (1, 2, 3 ve 4 noktalarına karşılık gelen konum) ve ikinci bağlantı noktası veya tüp çıkışı (5, 6, 7 ve 8 noktalarına karşılık gelen konum) olarak adlandırılır. Helmholtz rezonatörleri Herschel-Quincke tüpünün ana boru üzerinde giriş ve çıkış noktalarına bağlanmıştır. Matematik model parametriktr. Her bir elemanın uzunluğu ve çapına birer değişken atanmıştır. Böylelikle elemanların sistem içindeki varlıklarının ve sistem elemanlarına ait bu büyüklüklerinin değişiminin iletim kaybı eğrisi üzerindeki etkileri incelenebilmektedir.

Susturucu sistem a , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 , c_3 , d , e_1 , e_2 ve f olarak adlandırılmış on adet elemana bölünmüştür. Bu elemanların giriş-çıkış basınç ve hızları arasındaki bağıntılar yazılmıştır ve bu bağıntılar matris formda ifade edilmişlerdir. Daha sonra sınır koşulları yazılmış ve susturucu sistemin girişi olan 0 noktası ve çıkışı olan 9 noktalarındaki basınç ve hız ilişkileri TMM yöntemiyle bulunmuştur.

Her bir eleman içindeki ses alanları matris formda aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

a elemanı:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{md1}) & i.\frac{\rho c}{S_a}.\sin(k.l_{md1}) \\ i.\frac{S_a}{\rho c}\sin(k.l_{md1}) & \cos(k.l_{md1}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

b_1 elemanı:

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{n1}) & i.\frac{\rho c}{S_{b1}}.\sin(k.l_{n1}) \\ i.\frac{S_{b1}}{\rho c}\sin(k.l_{n1}) & \cos(k.l_{n1}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{12} \\ v_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

c_1 elemanı:

$$\begin{bmatrix} p_4 \\ v_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{c1}) & i.\frac{\rho c}{S_{c1}}.\sin(k.l_{c1}) \\ i.\frac{S_{c1}}{\rho c}\sin(k.l_{c1}) & \cos(k.l_{c1}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_4 \\ v_{14} \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

c_2 elemanı:

$$\begin{bmatrix} p_{15} \\ v_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{c2}) & i.\frac{\rho c}{S_{c2}}.\sin(k.l_{c2}) \\ i.\frac{S_{c2}}{\rho c}\sin(k.l_{c2}) & \cos(k.l_{c2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{16} \\ v_{16} \end{bmatrix}. \quad (2.41)$$

c_3 elemanı:

$$\begin{bmatrix} p_{17} \\ v_{17} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{c3}) & i.\frac{\rho c}{S_{c3}}.\sin(k.l_{c3}) \\ i.\frac{S_{c3}}{\rho c}\sin(k.l_{c3}) & \cos(k.l_{c3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_5 \\ v_5 \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

d elemanı:

$$\begin{bmatrix} p_3 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{md2}) & i.\frac{\rho c}{S_d}.\sin(k.l_{md2}) \\ i.\frac{S_d}{\rho c}\sin(k.l_{md2}) & \cos(k.l_{md2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_6 \\ v_6 \end{bmatrix}. \quad (2.43)$$

e_1 elemanı:

$$\begin{bmatrix} p_{12} \\ v_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{hr1}) & i.\frac{\rho c}{S_{e1}}.\sin(k.l_{hr1}) \\ i.\frac{S_{e1}}{\rho c}\sin(k.l_{hr1}) & \cos(k.l_{hr1}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{10} \\ v_{10} \end{bmatrix}. \quad (2.44)$$

e_2 elemanı:

$$\begin{bmatrix} p_{13} \\ v_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{hr2}) & i.\frac{\rho c}{S_{e2}}.\sin(k.l_{hr2}) \\ i.\frac{S_{e2}}{\rho c}\sin(k.l_{hr2}) & \cos(k.l_{hr2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{11} \\ v_{11} \end{bmatrix}. \quad (2.45)$$

f elemanı:

$$\begin{bmatrix} p_8 \\ v_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{md3}) & i.\frac{\rho c}{S_f}.\sin(k.l_{md3}) \\ i.\frac{S_f}{\rho c}\sin(k.l_{md3}) & \cos(k.l_{md3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_9 \\ v_9 \end{bmatrix}. \quad (2.46)$$

Her bir elemana ait transfer matrisleri;

$$T_a = \begin{bmatrix} A_a & B_a \\ C_a & D_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{md1}) & i.\sin(k.l_{md1}).Z_a \\ i.\sin(k.l_{md1})/Z_a & \cos(k.l_{md1}) \end{bmatrix}, \quad (2.47)$$

$$T_{b1} = \begin{bmatrix} A_{b1} & B_{b1} \\ C_{b1} & D_{b1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{n1}) & i.\sin(k.l_{n1}).Z_{b1} \\ i.\sin(k.l_{n1})/Z_{b1} & \cos(k.l_{n1}) \end{bmatrix}, \quad (2.48)$$

$$T_{b2} = \begin{bmatrix} A_{b2} & B_{b2} \\ C_{b2} & D_{b2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{n2}) & i.\sin(k.l_{n2}).Z_{b2} \\ i.\sin(k.l_{n2})/Z_{b2} & \cos(k.l_{n2}) \end{bmatrix}, \quad (2.49)$$

$$T_{c1} = \begin{bmatrix} A_{c1} & B_{c1} \\ C_{c1} & D_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{c1}) & i.\sin(k.l_{c1}).Z_{c1} \\ i.\sin(k.l_{c1})/Z_{c1} & \cos(k.l_{c1}) \end{bmatrix}, \quad (2.50)$$

$$T_{c2} = \begin{bmatrix} A_{c2} & B_{c2} \\ C_{c2} & D_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{c2}) & i.\sin(k.l_{c2}).Z_{c2} \\ i.\sin(k.l_{c2})/Z_{c2} & \cos(k.l_{c2}) \end{bmatrix}, \quad (2.51)$$

$$T_{c3} = \begin{bmatrix} A_{c3} & B_{c3} \\ C_{c3} & D_{c3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{c3}) & i.\sin(k.l_{c3}).Z_{c3} \\ i.\sin(k.l_{c3})/Z_{c3} & \cos(k.l_{c3}) \end{bmatrix}, \quad (2.52)$$

$$T_d = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ C_d & D_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{md2}) & i.\sin(k.l_{md2}).Z_d \\ i.\sin(k.l_{md2})/Z_d & \cos(k.l_{md2}) \end{bmatrix}, \quad (2.53)$$

$$T_{e1} = \begin{bmatrix} A_{e1} & B_{e1} \\ C_{e1} & D_{e1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{hr1}) & i.\sin(k.l_{hr1}).Z_{e1} \\ i.\sin(k.l_{hr1})/Z_{e1} & \cos(k.l_{hr1}) \end{bmatrix}, \quad (2.54)$$

$$T_{e2} = \begin{bmatrix} A_{e2} & B_{e2} \\ C_{e2} & D_{e2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{hr1}) & i.\sin(k.l_{hr1}).Z_{e2} \\ i.\sin(k.l_{hr1})/Z_{e2} & \cos(k.l_{hr1}) \end{bmatrix}, \quad (2.55)$$

$$T_f = \begin{bmatrix} A_f & B_f \\ C_f & D_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k.l_{md3}) & i.\sin(k.l_{md3}).Z_f \\ i.\sin(k.l_{md3})/Z_f & \cos(k.l_{md3}) \end{bmatrix}, \quad (2.56)$$

olarak yazılır.

Burada sistem elemanlarının karakteristik empedansları,

$$Z_a = (\rho.c)/S_a, \quad (2.57)$$

$$Z_{b1} = (\rho.c)/S_{b1} , \quad (2.58)$$

$$Z_{b2} = (\rho.c)/S_{b2} , \quad (2.59)$$

$$Z_{c1} = (\rho.c)/S_{c1} , \quad (2.60)$$

$$Z_{c2} = (\rho.c)/S_{c2} , \quad (2.61)$$

$$Z_{c3} = (\rho.c)/S_{c3} , \quad (2.62)$$

$$Z_d = (\rho.c)/S_d , \quad (2.63)$$

$$Z_{e1} = (\rho.c)/S_{e1} , \quad (2.64)$$

$$Z_{e2} = (\rho.c)/S_{e2} , \quad (2.65)$$

$$Z_f = (\rho.c)/S_f \quad (2.66)$$

ve kesit alanları

$$S_a = \pi.h_{md}^2/4 , \quad (2.67)$$

$$S_{b1} = \pi.h_{n1}^2/4 , \quad (2.68)$$

$$S_{b2} = \pi.h_{n2}^2/4 , \quad (2.69)$$

$$S_{c1} = \pi.h_{hq}^2/4 , \quad (2.70)$$

$$S_{c2} = \pi.h_{ec}^2/4, \quad (2.71)$$

$$S_{c3} = \pi.h_{hq}^2/4, \quad (2.72)$$

$$S_d = \pi.h_{md}^2/4, \quad (2.73)$$

$$S_{e1} = \pi.h_{hr1}^2/4, \quad (2.74)$$

$$S_{e2} = \pi.h_{hr2}^2/4, \quad (2.75)$$

$$S_f = \pi.h_{md}^2/4 \quad (2.76)$$

şeklinde ifade edilir.

b_1 ve e_1 elemanlarından oluşan girişteki boyun bağlantılı Helmholtz rezonatörüne $hr1$, benzer şekilde b_2 ve e_2 elemanlarında oluşan çıkıştaki boyun bağlantılı Helmholtz rezonatörüne $hr2$ elemanı adını verirsek eğer; $hr1$ elemanına ait transfer matrisi b_1 ve e_1 ’e ait transfer matrislerinin çarpımıyla, $hr2$ elemanına ait transfer matrisi ise b_2 ve e_2 ’ye ait transfer matrislerinin çarpımıyla elde edilir.

$$T_{hr1} = T_{b1}.T_{e1}, \quad (2.77)$$

$$T_{hr1} = \begin{bmatrix} A_{hr1} & B_{hr1} \\ C_{hr1} & D_{hr1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{e1}.A_{b1} + B_{b1}.C_{e1} & A_{b1}.B_{e1} + B_{b1}.D_{e1} \\ A_{e1}.C_{b1} + C_{e1}.D_{b1} & B_{e1}.C_{b1} + D_{e1}.D_{b1} \end{bmatrix}. \quad (2.78)$$

Benzer şekilde,

$$T_{hr2} = T_{b2}.T_{e2}, \quad (2.79)$$

$$T_{hr2} = \begin{bmatrix} A_{hr2} & B_{hr2} \\ C_{hr2} & D_{hr2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{e2} \cdot A_{b2} + B_{b2} \cdot C_{e2} & A_{b2} \cdot B_{e2} + B_{b2} \cdot D_{e2} \\ A_{e2} \cdot C_{b2} + C_{e2} \cdot D_{b2} & B_{e2} \cdot C_{b2} + D_{e2} \cdot D_{b2} \end{bmatrix}, \quad (2.80)$$

olur.

Aynı yöntemle Herschel-Quincke tüpü ve genişleme odasından oluşan gruba c elemanı adını verirken eğer; c elemanına ait transfer matrisi ise c_1 , c_2 ve c_3 elemanlarına ait transfer matrislerinin çarpımıyla elde edilir.

$$T_c = T_{c1} \cdot T_{c2} \cdot T_{c3} = \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix}, \quad (2.81)$$

$$A_c = A_{c1} \cdot A_{c2} \cdot A_{c3} + A_{c3} \cdot B_{c1} \cdot C_{c2} + A_{c1} \cdot B_{c2} \cdot C_{c3} + B_{c1} \cdot C_{c3} \cdot D_{c2}, \quad (2.82)$$

$$B_c = A_{c1} \cdot A_{c2} \cdot B_{c3} + B_{c1} \cdot B_{c3} \cdot C_{c2} + A_{c1} \cdot B_{c2} \cdot D_{c3} + B_{c1} \cdot D_{c2} \cdot D_{c3}, \quad (2.83)$$

$$C_c = A_{c2} \cdot A_{c3} \cdot C_{c1} + B_{c2} \cdot C_{c1} \cdot C_{c3} + A_{c3} \cdot C_{c2} \cdot D_{c1} + C_{c3} \cdot D_{c1} \cdot D_{c2}, \quad (2.84)$$

$$D_c = A_{c2} \cdot B_{c3} \cdot C_{c1} + B_{c3} \cdot C_{c2} \cdot D_{c1} + B_{c2} \cdot C_{c1} \cdot D_{c3} + C_{c1} \cdot D_{c2} \cdot D_{c3}. \quad (2.85)$$

Birinci bağlantı noktasındaki sınır koşulları,

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4. \quad (2.86)$$

$$v_1 = v_2 + v_3 + v_4. \quad (2.87)$$

şeklinde ifade edilir. Burada p_1, p_2, p_3, p_4 sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 noktalarındaki ses basınçlarını ve v_1, v_2, v_3, v_4 ise bu noktalardaki hacim hızlarını göstermektedir.

İkinci bağlantı noktasındaki sınır koşulları ise,

$$p_5 = p_6 = p_7 = p_8, \quad (2.88)$$

$$v_5 + v_6 = v_7 + v_8, \quad (2.89)$$

şeklinde ifade edilir. Benzer biçimde p_5, p_6, p_7, p_8 sırasıyla 5, 6, 7 ve 8 noktalarındaki ses basınçlarını ve v_5, v_6, v_7, v_8 ise bu noktalardaki hacim hızlarını göstermektedir.

Denklem (2.38) ve Denklem (2.47) kullanılarak 0 ve 1 noktaları arasındaki ses basıncı ve hacim hızı arasındaki ilişki açık formda yazılırsa;

$$p_0 = A_a \cdot p_1 + B_a \cdot v_1, \quad (2.90)$$

$$v_0 = C_a \cdot p_1 + D_a \cdot v_1, \quad (2.91)$$

olur. Benzer olarak sistemin giriş kısmındaki Helmholtz rezonatörü ve boyun bağlantısı çiftinin 2 ve 10 noktaları arasındaki ses basıncı ve hacim hızı ilişkisi

$$p_2 = A_{hr1} \cdot p_{10}, \quad (2.92)$$

$$v_2 = C_{hr1} \cdot p_{10}, \quad (2.93)$$

olarak yazılır.

4 ve 5 noktaları sırasıyla Herschel-Quincke tüpü ve genişleme odası çiftinin giriş ve çıkışını sembolize eder. 4 ve 5 noktaları arasındaki basınç ve hız ilişkisi,

$$p_4 = A_c \cdot p_5 + B_c \cdot v_5, \quad (2.94)$$

$$v_4 = C_c \cdot p_5 + D_c \cdot v_5, \quad (2.95)$$

olur.

d elemanı incelenirse, 3 ve 6 noktaları arasındaki basınç ve hız ilişkisi,

$$p_3 = A_d \cdot p_6 + B_d \cdot v_6, \quad (2.96)$$

$$v_3 = C_d \cdot p_6 + D_d \cdot v_6, \quad (2.97)$$

olarak yazılır. Sistemin çıkışındaki Helmholtz rezonatörü ve boyun bağlantısı çiftinin 7 ve 11 noktaları arasındaki ses basıncı ve hacim hızı ilişkisi ise;

$$p_7 = A_{hr2} \cdot p_{11}, \quad (2.98)$$

$$v_7 = C_{hr2} \cdot p_{11}, \quad (2.99)$$

olarak yazılır. $p_7 = p_8$ sınır koşulunu, Denklem (2.98)'de yerine koyarsak f elemanının giriş noktası olan 8 noktası ile $hr2$ elemanının bitiş noktası olan 11 noktasındaki basınç ilişkisi,

$$p_8 = A_{hr2} \cdot p_{11}, \quad (2.100)$$

olarak yazılır.

Buradan 11 noktasındaki ses basıncı p_8 cinsinden yazılabilir.

$$p_{11} = \frac{p_8}{A_{hr2}}. \quad (2.101)$$

Denklem (2.101) Denklem (2.99)'da yerine konursa 7 noktasındaki hacim hızı v_7 , 8 noktasındaki ses basıncı p_8 cinsinden,

$$v_7 = \frac{C_{hr2}}{A_{hr2}} \cdot p_8, \quad (2.102)$$

şeklinde yazılır.

8 ve 9 noktaları sırasıyla f elemanının giriş ve çıkışını göstermektedir. Bu noktalar arasındaki basınç-hız ilişkisi;

$$p_8 = A_f \cdot p_9 + B_f \cdot v_9, \quad (2.103)$$

$$v_8 = C_f \cdot p_9 + D_f \cdot v_9, \quad (2.104)$$

şeklinde ifade edilir.

$p_3 = p_4$, Denklem (2.94) ve Denklem (2.96) birlikte çözülürse;

$$A_d \cdot p_6 + B_d \cdot v_6 = A_c \cdot p_5 + B_c \cdot v_5, \quad (2.105)$$

elde edilir.

$p_5 = p_6 = p_8$ sınır koşulu Denklem (2.105)'te yerine konursa;

$$A_d \cdot p_8 - A_c \cdot p_8 + B_d \cdot v_6 = B_c \cdot v_5, \quad (2.106)$$

yazılır. Böylece 5 noktasındaki hacim hızı v_5 , p_8 ve v_6 cinsinden,

$$v_5 = \frac{A_d - A_c}{B_c} \cdot p_8 + \frac{B_d}{B_c} \cdot v_6, \quad (2.107)$$

şeklinde yazılır. Denklem (2.107), Denklem (2.89)'da yerine konursa d elemanının çıkışındaki hacim hızı v_6 , p_8 ve v_8 cinsinden,

$$\frac{A_d - A_c}{B_c} \cdot p_8 + \frac{B_d}{B_c} \cdot v_6 + v_6 = \frac{C_{hr2}}{A_{hr2}} \cdot p_8 + v_8, \quad (2.108)$$

$$\left(\frac{B_d}{B_c} + 1 \right) \cdot v_6 = \left(\frac{C_{hr2}}{A_{hr2}} - \frac{(A_d - A_c)}{B_c} \right) \cdot p_8 + v_8, \quad (2.109)$$

$$\left(\frac{B_c + B_d}{B_c} \right) \cdot v_6 = \left(\frac{B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c)}{A_{hr2} \cdot B_c} \right) \cdot p_8 + v_8, \quad (2.110)$$

$$v_6 = \left(\frac{B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c)}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} \right) \cdot p_8 + \left(\frac{B_c}{B_c + B_d} \right) \cdot v_8, \quad (2.111)$$

olarak yazılır.

Denklem (2.92) ve Denklem (2.96) birlikte çözülürse,

$$A_{hr1} \cdot p_{10} = A_d \cdot p_6 + B_d \cdot v_6, \quad (2.112)$$

olur.

$p_8 = p_6$, Denklem (2.112)'de yerine konursa,

$$p_{10} = \frac{A_d}{A_{hr1}} \cdot p_8 + \frac{B_d}{A_{hr1}} \cdot v_6, \quad (2.113)$$

olarak yazılır.

Denklem (2.93), Denklem (2.95) ve Denklem (2.97), Denklem (2.87)'de yerine konursa

$$v_1 = C_{hr1} \cdot p_{10} + C_d \cdot p_8 + D_d \cdot v_6 + C_c \cdot p_5 + D_c \cdot v_5, \quad (2.114)$$

olacaktır. Elde edilen v_5 , v_6 ve p_{10} ifadeleri Denklem (2.114)'te yerine konursa 1 noktasındaki hacim hızı v_1 , p_8 ve v_8 cinsinden,

$$v_1 = C_{hr1} \cdot \left(\frac{A_d}{A_{hr1}} \cdot p_8 + \frac{B_d}{A_{hr1}} \cdot v_6 \right) + C_d \cdot p_8 + D_d \cdot v_6 + C_c \cdot p_5 + D_c \cdot v_5, \quad (2.115)$$

$$v_1 = \frac{A_d \cdot C_{hr1}}{A_{hr1}} \cdot p_8 + C_d \cdot p_8 + C_c \cdot p_8 + \frac{B_d \cdot C_{hr1}}{A_{hr1}} \cdot v_6 + D_d \cdot v_6 + D_c \cdot v_5, \quad (2.116)$$

$$v_1 = \frac{A_d \cdot C_{hr1}}{A_{hr1}} \cdot p_8 + C_d \cdot p_8 + C_c \cdot p_8 + \frac{B_d \cdot C_{hr1}}{A_{hr1}} \cdot \left(\left(\frac{B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c)}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} \right) \cdot p_8 + \left(\frac{B_c}{B_c + B_d} \right) \cdot v_8 \right)$$

$$\begin{aligned}
& +D_d \cdot \left(\left(\frac{B_c \cdot C_e - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c)}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} \right) \cdot p_8 + \left(\frac{B_c}{B_c + B_d} \right) \cdot v_8 \right) \\
& +D_c \cdot \left(\frac{A_d - A_c}{B_c} \cdot p_8 + \frac{B_d}{B_c} \cdot \left(\left(\frac{B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c)}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} \right) \cdot p_8 + \left(\frac{B_c}{B_c + B_d} \right) \cdot v_8 \right) \right), \quad (2.117)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_1 &= \frac{A_d \cdot C_{hr1}}{A_{hr1}} \cdot p_8 + C_d \cdot p_8 + C_c \cdot p_8 + \frac{B_d \cdot C_{hr1}}{A_{hr1}} \cdot \frac{B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c)}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} \cdot p_8 \\
& + \frac{D_d \cdot (B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c))}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} \cdot p_8 + \frac{D_c \cdot (A_d - A_c)}{B_c} \cdot p_8 + \frac{D_c \cdot B_d}{B_c} \cdot \frac{(B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c))}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} \cdot p_8 \\
& + \frac{B_d \cdot C_{hr1} \cdot B_c}{A_{hr1} \cdot (B_c + B_d)} \cdot v_8 + \frac{D_d \cdot B_c}{(B_c + B_d)} \cdot v_8 + \frac{D_c \cdot B_d \cdot B_c}{B_c \cdot (B_c + B_d)} \cdot v_8, \quad (2.118)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_1 &= \left(\frac{\frac{A_d \cdot C_{hr1}}{A_{hr1}} + C_d + C_c + \frac{B_d \cdot C_{hr1}}{A_{hr1}} \cdot \frac{B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c)}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} + \frac{D_d \cdot (B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c))}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}}}{\frac{D_c \cdot (A_d - A_c)}{B_c} + \frac{D_c \cdot B_d}{B_c} \cdot \frac{(B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c))}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}}} \right) \cdot p_8 \\
& + \left(\frac{B_d \cdot C_{hr1} \cdot B_c}{A_{hr1} \cdot (B_c + B_d)} + \frac{D_d \cdot B_c}{(B_c + B_d)} + \frac{D_c \cdot B_d \cdot B_c}{B_c \cdot (B_c + B_d)} \right) \cdot v_8, \quad (2.119)
\end{aligned}$$

olarak elde edilir.

İkinci bağlantı noktasında,

$$v_5 = v_7 + v_8 - v_6 = \frac{C_{hr2}}{A_{hr2}} \cdot p_8 + v_8 - \left(\left(\frac{B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c)}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} \right) \cdot p_8 + \left(\frac{B_c}{B_c + B_d} \right) \cdot v_8 \right), \quad (2.120)$$

şeklinde yazılır.

$p_1 = p_4$ ve $p_5 = p_8$, Denklem (2.94)'te yerine konursa,

$$p_1 = A_c \cdot p_8 + B_c \cdot v_5, \quad (2.121)$$

olacaktır.

Denklem (2.120)'de elde edilen v_5 ifadesi Denklem (2.121)'de yerine konursa a elemanın çıkışı olan 1 noktasındaki hacim hızı v_1 , p_8 ve v_8 cinsinden,

$$p_1 = A_c \cdot p_8 + \frac{B_c \cdot C_{hr2}}{A_{hr2}} \cdot p_8 + B_c \cdot v_8 - \frac{B_c \cdot (B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c))}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} \cdot p_8 - \frac{B_c^2}{B_c + B_d} \cdot v_8, \quad (2.122)$$

$$p_1 = A_c \cdot p_8 + \frac{B_c \cdot C_{hr2}}{A_{hr2}} \cdot p_8 - \frac{B_c \cdot (B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c))}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} \cdot p_8 + B_c \cdot v_8 - \frac{B_c^2}{B_c + B_d} \cdot v_8, \quad (2.123)$$

olarak elde edilir.

1 ve 8 noktalarındaki ses basıncı ve hacim hızları arasındaki ilişki Denklem (2.119) ve Denklem (2.123) 'de elde edilmiştir. Bu basınç ve hızlar arasındaki ilişki matris formda,

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = T_{18} \begin{bmatrix} p_8 \\ v_8 \end{bmatrix}, \quad (2.124)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

$$T_{18} = \begin{bmatrix} A_{18} & B_{18} \\ C_{18} & D_{18} \end{bmatrix}, \quad (2.125)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (2.119) ve Denklem (2.123) yardımıyla T_{18} transfer matrisinin elemanları yazılabilir.

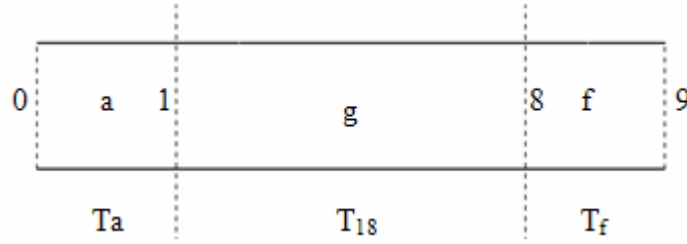
$$A_{18} = A_c + \frac{B_c \cdot C_{hr2}}{A_{hr2}} - \frac{B_c \cdot (B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c))}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}}. \quad (2.126)$$

$$B_{18} = B_c - \frac{B_c^2}{B_c + B_d} = \frac{B_c^2 + B_c \cdot B_d - B_c^2}{B_c + B_d} = \frac{B_c \cdot B_d}{B_c + B_d}. \quad (2.127)$$

$$C_{18} = \frac{A_d \cdot C_{hr1}}{A_{hr1}} + C_d + C_c + \frac{B_d \cdot C_{hr1}}{A_{hr1}} \cdot \frac{B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c)}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} + \frac{D_c \cdot (A_d - A_c)}{B_c} \\ + \frac{D_d \cdot (B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c))}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}} + \frac{D_c \cdot B_d}{B_c} \cdot \frac{(B_c \cdot C_{hr2} - A_{hr2} \cdot (A_d - A_c))}{(B_c + B_d) \cdot A_{hr2}}. \quad (2.128)$$

$$D_{18} = \frac{B_d \cdot C_{hr1} \cdot B_c}{A_{hr1} \cdot (B_c + B_d)} + \frac{D_d \cdot B_c}{(B_c + B_d)} + \frac{D_c \cdot B_d \cdot B_c}{B_c \cdot (B_c + B_d)}. \quad (2.129)$$

Şekil 2.5'te gösterilen susturucu sistemi Şekil 2.6'daki gibi indirgenebilir.



Şekil 2.6: İndirgenmiş Sistemin Şematik Gösterimi.

Toplam sistemin girişi 0 noktası ve çıkışı 9 noktası arasındaki basınç ve hız ilişkisi a , g ve f elemanlarının transfer matrislerinin çarpımı ile bulunur.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = T_a \cdot T_{18} \cdot T_f \cdot \begin{bmatrix} p_9 \\ v_9 \end{bmatrix}. \quad (2.130)$$

Buradan toplam sistemin transfer matrisi,

$$T_{sis} = T_a \cdot T_{18} \cdot T_f = \begin{bmatrix} A_{sis} & B_{sis} \\ C_{sis} & D_{sis} \end{bmatrix}, \quad (2.131)$$

olarak elde edilir. Sistemin transfer matrisi elde edildikten sonra iletim kaybı eğrisi Denklem (2.36) ve Denklem (2.37) yardımıyla bulunur. Analitik çözüm yöntemiyle sistemin iletim kaybı eğrisi Mathematica adlı program kullanılarak elde edilmiştir.

3. SAYISAL ÇALIŞMALAR

3.1 Sayısal Modelleme

Bu bölümde, sayısal çalışmalar açıklanmıştır. Sayısal çalışmalar kısmı, değişik geometrik kombinasyonlara ait susturucu sistemlerin sayısal ve analitik analiz sonuçlarını içermektedir. Bu analitik model kullanılarak, Herschel-Quincke tüpü, genişleme odası, Helmholtz rezonatörleri ve boyun bağlantısının; ayrıca bu elemanlara ait geometrik parametrelerin (çap, uzunluk, konum) iletim kaybı eğrisine olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla değişik geometrik kombinasyonlara sahip bir çok susturucu sistemin analizi gerçekleştirilmiştir.

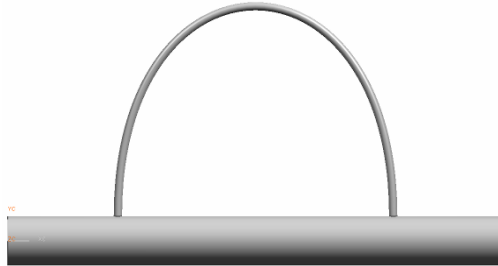
Sayısal analizler MSC. Patran ve Actran programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, analiz edilecek olan susturucu sistemlerin katı modelleri Unigraphics-Nx4 adlı 3D CAD programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan bu katı model, parasolid (.x_t) formatında MSC. Patran'a aktarılmıştır. Katı model, tezde kavite olarak adı geçen ve susturucu sistemdeki boruların içindeki havayı modellemektedir. MSC. Patran'a aktarılan kavite modelin ağ yapısı, birinci dereceden "tetrahedral" "Solid" elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemiyle akustik analiz yapılırken ağ elemanlarının boyutu dalga boyunun altıda birinden küçük olmalıdır. Çalışmalarda incelenen frekans aralığı 0–3000 Hz'dir. Bu doğrultuda en küçük dalga boyu $\lambda = c / f = 340 / 3000 = 0.113m$ ve en büyük ağ boyutu $0.01883m$ 'dir. Sayısal analizlerde ağ boyutu $0.012m$ 'dir. Kavitenin ağ yapısı "solid" elemanlarla oluşturulduktan sonra kavitenin giriş ve çıkış yüzeylerinin ağ yapısı birinci dereceden üçgen elemanlarla oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yeni yüzeylere x-koordinatları girişten çıkışa doğru olacak şekilde iki yerel koordinat atanmıştır. Bunun amacı FFT analizden sonra sistem giriş ve çıkışındaki ses basınç değerlerinin elde edilmesidir. Kavitenin giriş yüzeyindeki düğüm noktalarına $1Pa$ 'lık ses basıncı atanmıştır. Sınır koşullarının oluşturulmasından sonra yapıya malzeme olarak hava atanmıştır. Hava yoğunluğu $1.225kg/m^3$, ses hızı ise

340m/s alınmıştır. Havanın sönüm etkisini dikkate alınmamıştır. Analitik model oluşturulurken de bu etki göz önünde bulundurulmamıştır. Çözücü seçeneklerinden Krylov çözücüsü seçilmiştir. “.nod” uzantılı sonuç dosyası ismi ve FFT analiz sonucunda istenilen büyüklüklerin okunacağı “.plt” uzantılı dosya ismi girilmiştir. Bu işlemlerden sonra Actran için bir giriş dosyası yazılmıştır. Bu giriş dosyası ile Actran’da koşturularak akustik analiz gerçekleştirilmiştir. Sistem giriş ve çıkışındaki ses basınç değerleri frekansa bağlı olarak iki ayrı “.txt” uzantılı dosyaya yazdırılmıştır.. Son olarak analiz sonuçları susturucu sistemin iletim kaybını elde etmek için Excel programı kullanılarak işlenmiştir.

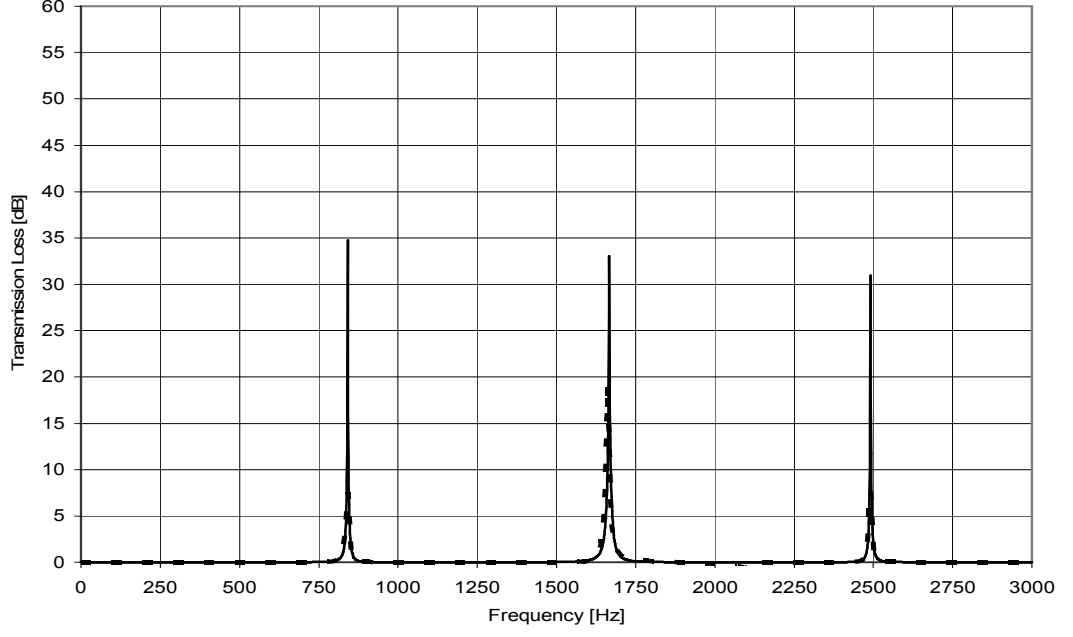
Sayısal analiz sonuçları analitik modelin başarısını anlamak açısından önemlidir.

3.1.1 Sayısal Analizler

Şekil 3.1’de 18 mm çaplı ana borunun üzerine yerleştirilmiş 3 mm çaplı Herschel-Quincke tüpü görülmektedir. HQ tüp uzunluğu 200 mm ve tüpün girişi ile çıkışı arasındaki mesafe 100 mm’dir.



Şekil 3.1: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$)



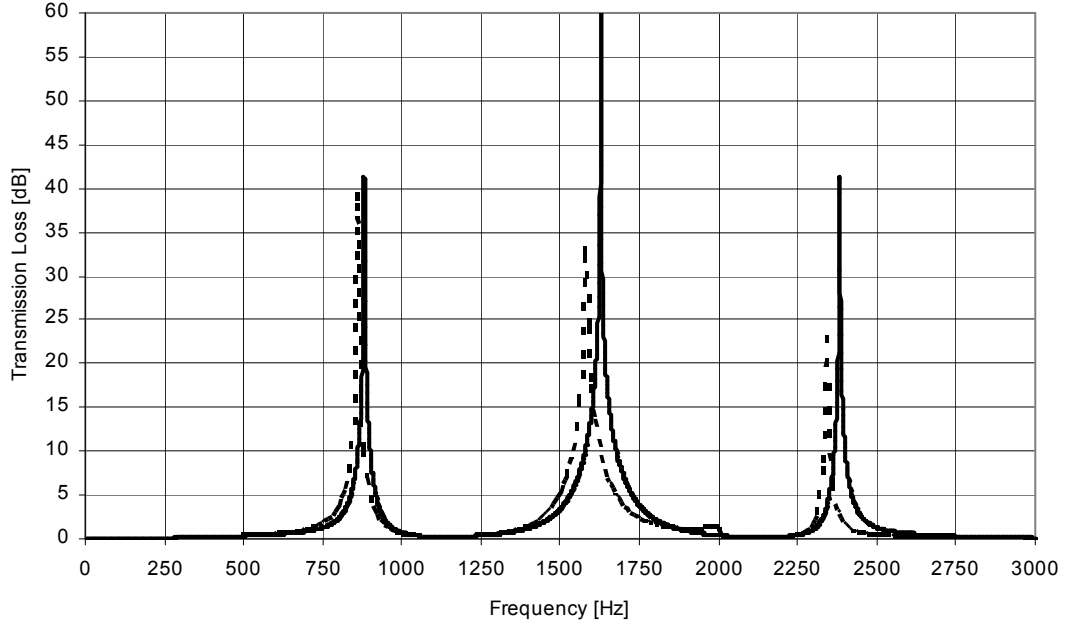
Şekil 3.2: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susuturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, ___ Matematiksel Analiz

Şekil 3.1’de görülen susturucu sistemin sayısal ve matematiksel analizi sonucunda elde edilen iletim kaybı eğrileri Şekil 3.2’de birlikte gösterilmiştir. Şekilde görülen tepe noktalarının frekansları sırasıyla 841 Hz, 1665 Hz ve 2491 Hz’dir. Matematiksel ve sayısal analiz sonuçları tam bir uyum içindedir.



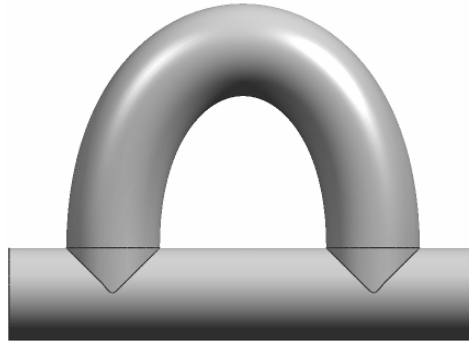
Şekil 3.3: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$)

Şekil 3.3’te 36 mm çaplı ana borunun üzerine yerleştirilmiş 18 mm çaplı Herschel-Quincke tüpü görülmektedir. HQ tüp uzunluğu 200 mm ve tüpün girişi ile çıkışı arasındaki mesafe 100 mm’dir.



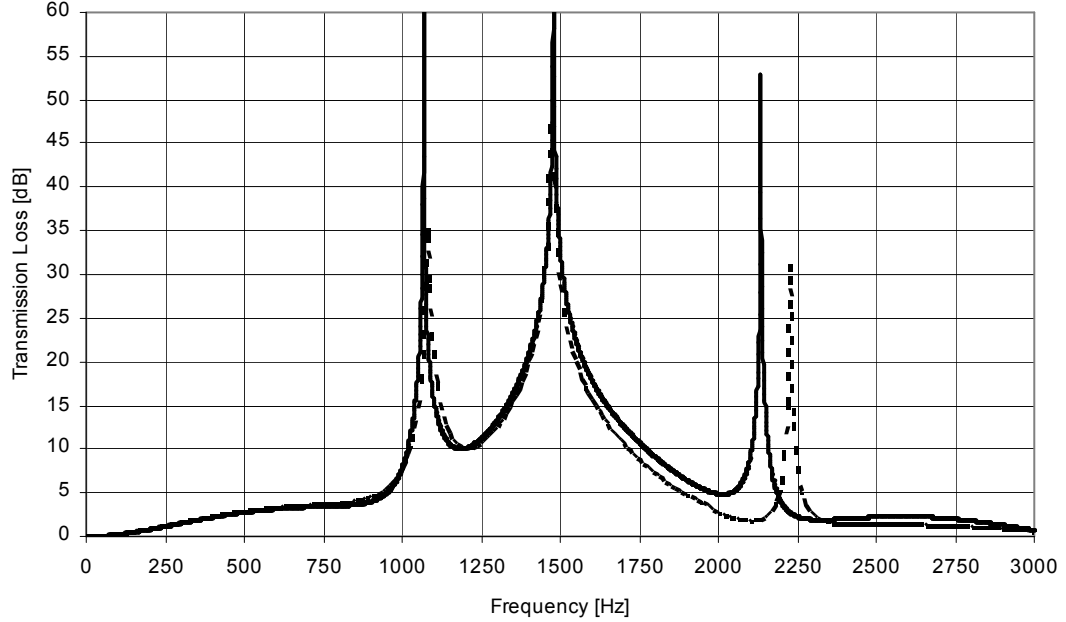
Şekil 3.4: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, _ _ _ Matematiksel Analiz

Şekil 3.3'te görülen susturucu sistemin sayısal ve matematiksel analizi sonucunda elde edilen iletim kaybı eğrileri Şekil 3.4'te birlikte gösterilmiştir. Şekilde görülen tepe noktalarının frekansları sayısal analiz için 861 Hz, 1580 Hz ve 2340 Hz ve matematiksel analiz için 882 Hz, 1630 Hz ve 2383 Hz'dir. Matematiksel ve sayısal analiz sonuçları uyumludur.



Şekil 3.5: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$)

Şekil 3.5'te 36 mm çaplı ana borunun üzerine yerleştirilmiş 36 mm çaplı Herschel-Quincke tüpü görülmektedir. HQ tüp uzunluğu 200 mm ve tüpün girişi ile çıkışı arasındaki mesafe 100 mm'dir.

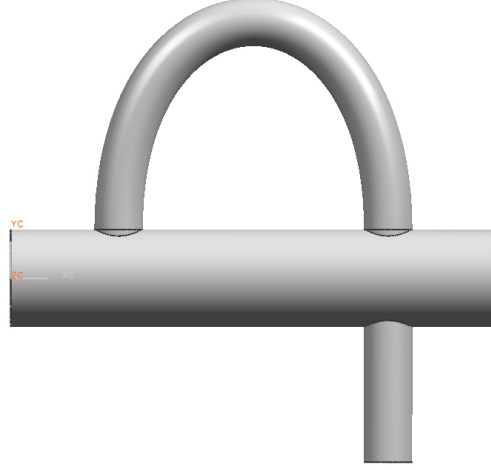


Şekil 3.6: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpünden Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, ___ Matematiksel Analiz

Şekil 3.5'te görülen susturucu sistemin sayısal ve matematiksel analizi sonucunda elde edilen iletim kaybı eğrileri Şekil 3.6'da birlikte gösterilmiştir. Şekilde görülen tepe noktalarının frekansları sayısal analiz için 1065 Hz, 1475 Hz ve 2231 Hz ve matematiksel analiz için 1067 Hz, 1478 Hz ve 2135 Hz'dir. Matematiksel ve sayısal analiz sonuçları arasındaki uyum düşük frekanslarda yüksek frekanslara göre daha iyidir.

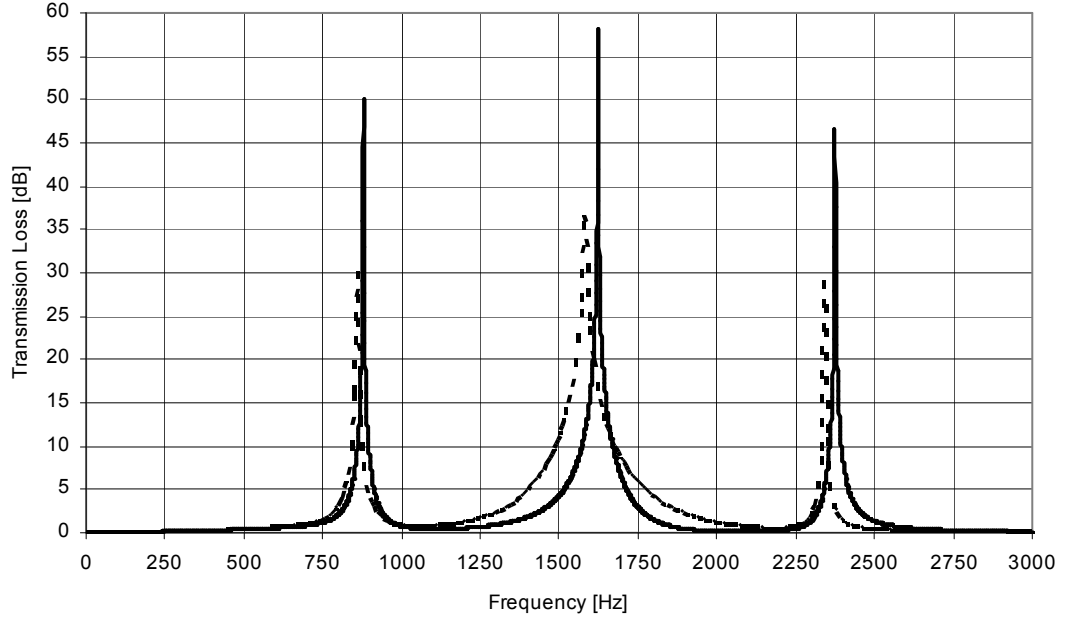
Ana boruya bağlı bir adet HQ tüpünden oluşan üç ayrı susturucu sistemin iletim kaybı eğrileri incelendiğinde, HQ tüpünün çapındaki artışla birlikte iletim kaybı değerleri artmaktadır. Bununla birlikte eğri karakterleri üç rezonans frekanslı yapılarını korumaktadır. Çap arttıkça bu rezonans frekansları arasındaki fark azalmakta, buna rağmen iletim kaybı değerlerindeki yükselişin etkisiyle iletim kaybı frekans bandı genişlemektedir.

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de görülen susturucu sistemler ile Helmholtz rezonatörü sayısının etkisi incelenmektedir. Şekil 3.7’de 36 mm çaplı ana borunun üzerine yerleştirilmiş 18 mm çaplı Herschel-Quincke tüpü görülmektedir. HQ tüp uzunluğu 200 mm, tüpün girişi ile çıkışı arasındaki mesafe 100 mm, Helmholtz rezonatörü çapı 18 mm ve uzunluğu 50 mm’dir.

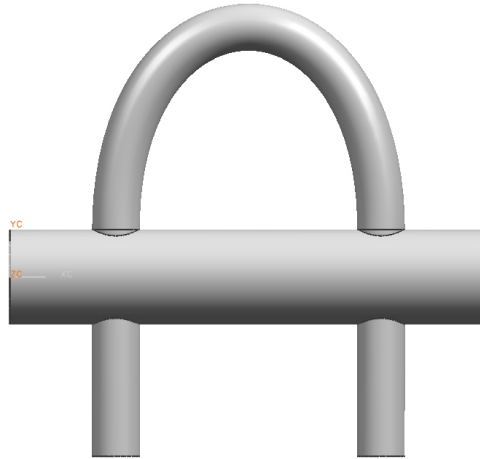


Şekil 3.7: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Tüp Çıkışına Yerleştirilmiş Bir Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$)

Şekil 3.7’de görülen susturucu sistemin sayısal ve matematiksel analizi sonucunda elde edilen iletim kaybı eğrileri Şekil 3.8’de birlikte gösterilmiştir. Şekilde görülen tepe noktalarının frekansları sayısal analiz için 861 Hz, 1580 Hz ve 2340 Hz ve matematiksel analiz için 879 Hz, 1623 Hz ve 2375 Hz’dir. Matematiksel ve sayısal analiz sonuçları uyumludur.

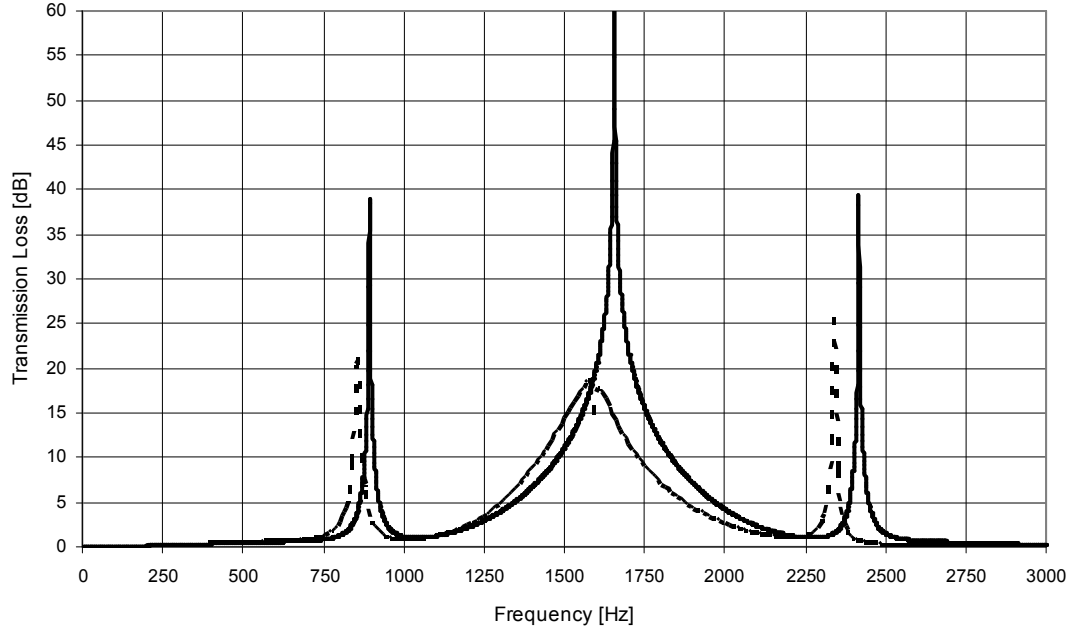


Şekil 3.8: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Tüp Çıkışına Yerleştirilmiş Bir Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, ____ Matematiksel Analiz



Şekil 3.9: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü Ve Tüp Giriş-Çıkışına Yerleştirilmiş İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$)

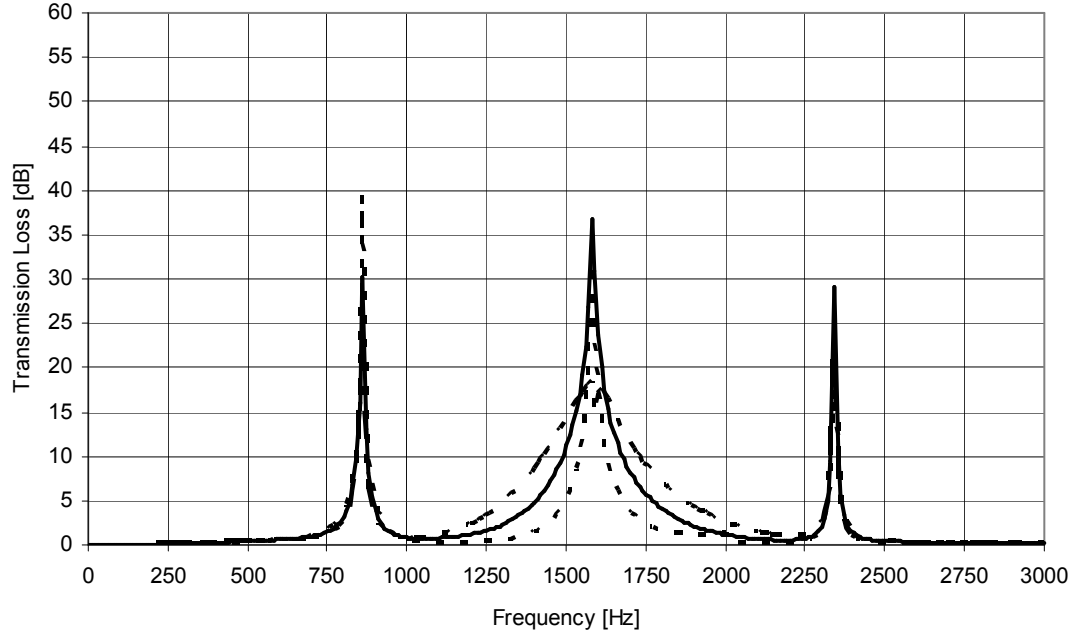
Şekil 3.9’da, 36 mm çaplı ana borunun üzerine yerleştirilmiş 18 mm çaplı HQ tüpü, yine 18 mm çap ve 50 mm uzunluklu Helmholtz rezonatörleri görülmektedir. HQ tüp uzunluğu 200 mm ve tüpün girişi ile çıkışı arasındaki mesafe 100 mm’dir.



Şekil 3.10: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü Ve Tüp Giriş-Çıkışına Yerleştirilmiş İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, ___ Matematiksel Analiz

Şekil 3.9’de görülen susturucu sistemin sayısal ve matematiksel analizi sonucunda elde edilen iletim kaybı eğrileri Şekil 3.10’da birlikte gösterilmiştir. Şekilde görülen tepe noktalarının frekansları sayısal analiz için 861 Hz, 1596 Hz ve 2340 Hz ve matematiksel analiz için 895 Hz, 1664 Hz ve 2481 Hz’dir. Matematiksel ve sayısal analiz sonuçları uyumludur.

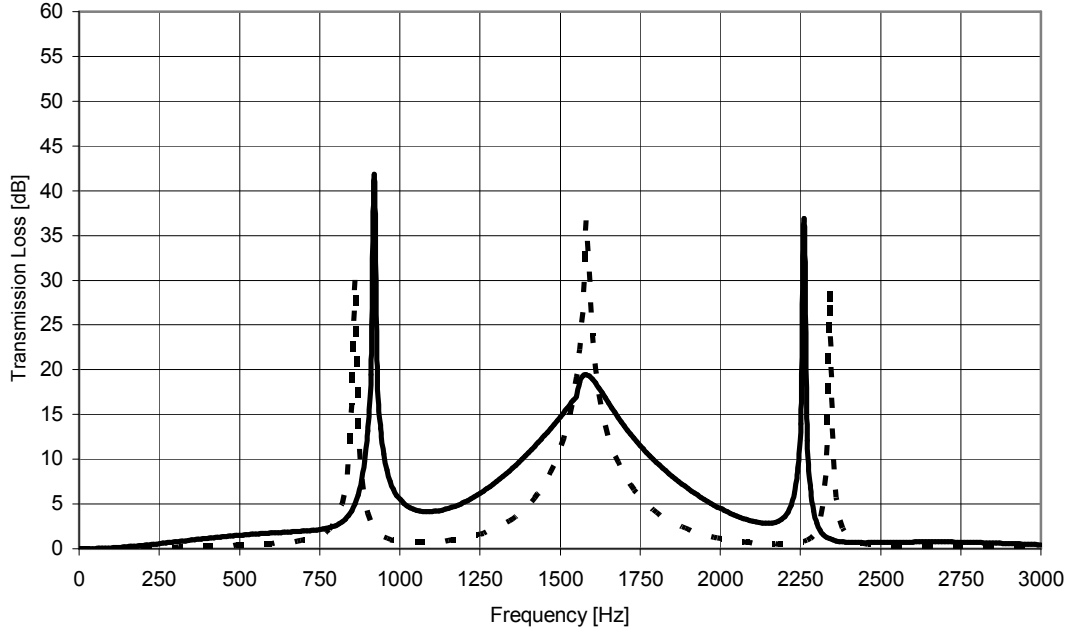
Sırasıyla Şekil 3.3, Şekil 3.7 ve Şekil 3.9’da gösterilmiş, HQ tüpü , HQ tüpü ve bir adet Helmholtz rezonatörü, HQ tüpü ve iki adet Helmholtz rezonatöründen oluşan susturucu sistemlerin iletim kaybı eğrileri Şekil 3.11’de birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.11: HQ Tüpü ($h_{hq}=18\text{mm}$), HQ Tüpü ve Bir Adet Helmholtz Rezonatörü, HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri _ _ _ HQ Tüpü, ___ HQ Tüpü ve Bir Adet Helmholtz Rezonatörü, _ _ _ HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatörü

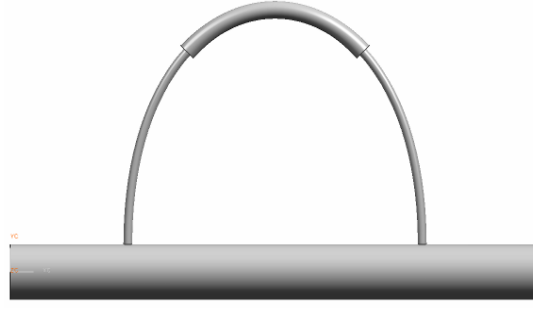
Şekil 3.11’de görülmektedir ki sistemdeki boru çaplarını değiştirmeksizin ana boruya bağlı bir adet HQ tüpü içeren susturucu sisteme eklenen Helmholtz rezonatörleri rezonans frekanslarını değiştirmemektedir. İlk sistemde 5 dB’lık bir iletim kaybı 1500–1600 Hz arasında elde edilebilirken bir adet Helmholtz rezonatörü bu aralığı 1400–1800 Hz bandına çıkarmaktadır. Eklenen ikinci Helmholtz rezonatörü ise bu bandı 1300–1900 Hz aralığına genişletmektedir.

HQ tüpü ve bir adet Helmholtz rezonatöründen oluşan ve $h_{hq,hr}=18\text{mm}$ ve $h_{hq,hr}=27\text{mm}$ olan iki ayrı susturucu sistem Şekil 3.12’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.12: HQ Tüpü Ve Bir Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan ve $h_{hq,hr}=18\text{mm}$ ve $h_{hq,hr}=27\text{ mm}$ Olan İki Ayrı Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrileri _ _ _ $h_{hq,hr}=18\text{mm}$, ____ $h_{hq,hr}=27$

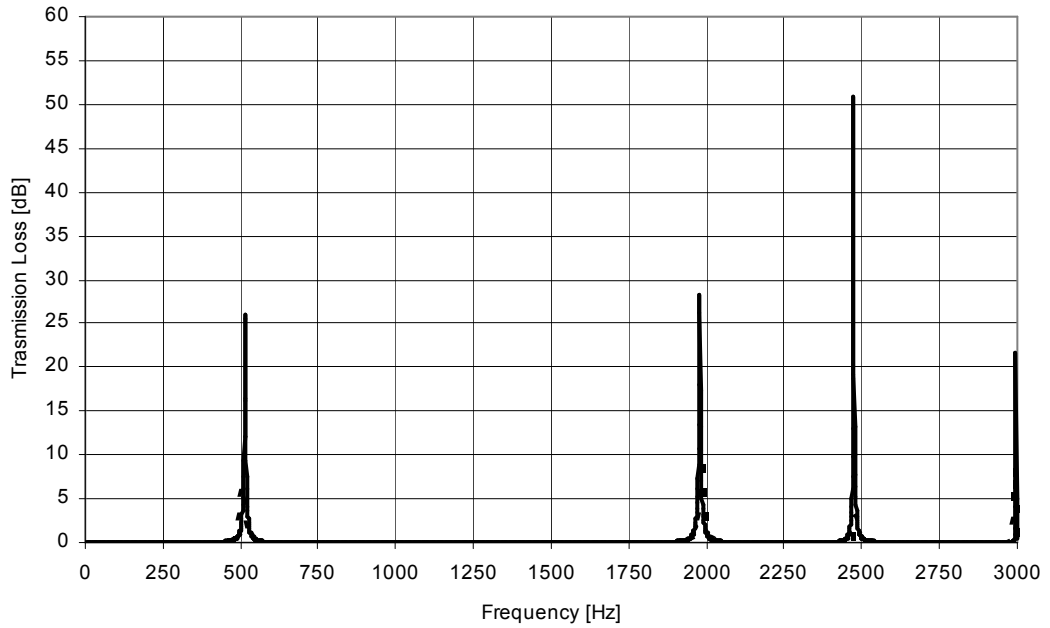
Şekil 3.12 HQ tüpü ve Helmholtz rezonatörleri çapları sırasıyla 18 mm ve 27 mm olan iki ayrı sistemin iletim kaybı eğrilerini göstermektedir. Bu susturucu sistemler Şekil 3.7’de gösterildiği gibi ana boruya bağlı bir adet HQ tüpü ve tüp çıkışına yerleştirilmiş bir adet Helmholtz rezonatöründen oluşmaktadır. İletim kaybı eğrilerinin karakterleri aynıdır. İkinci rezonans frekansının değişmediği, bunu yanında birinci ve üçüncü rezonans frekansları arasındaki farkın azaldığı görülmektedir. Çap değerinin artışıyla birlikte iletim kaybı değerleri 920-2250 Hz aralığında yaklaşık 5 dB artmıştır.



Şekil 3.13: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Tüp Üzerine Yerleştirilmiş Genişleme Odasından Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $h_{ec}=6\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$)

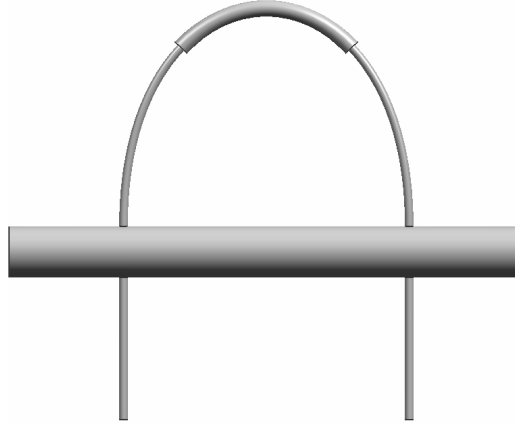
Şekil 13'te gösterilen susturucu sistemin geometrik parametreleri $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $h_{ec}=6\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$ 'dir.

Genişleme odasının susturucu sistemin iletim kaybı eğrisine olan etkisi Şekil 3.14'te görülmektedir.



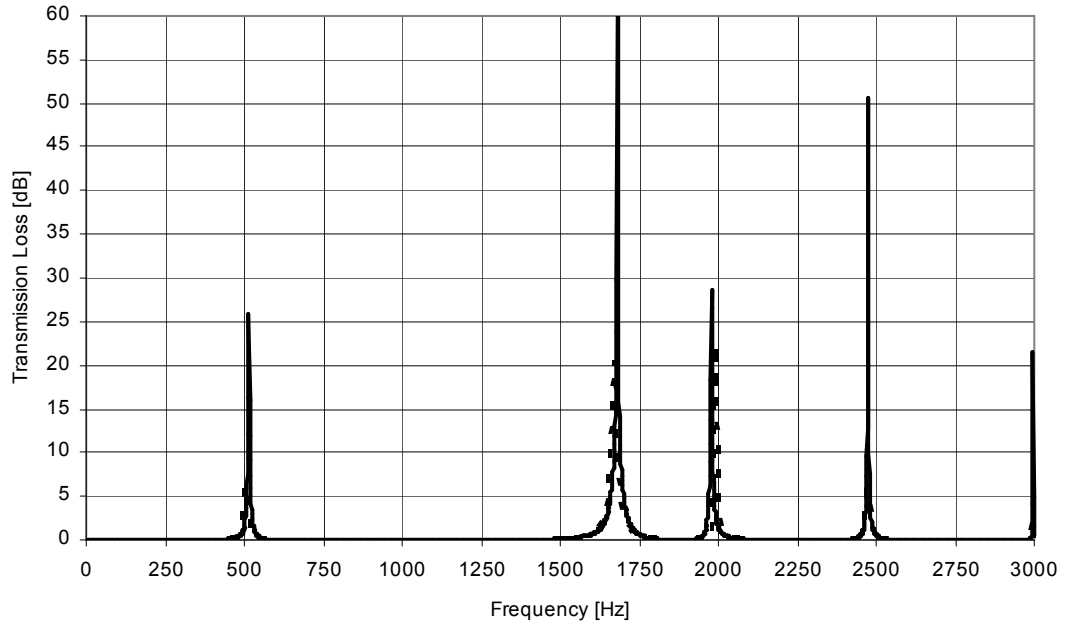
Şekil 3.14: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Tüp Üzerine Yerleştirilmiş Genişleme Odasından Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $h_{ec}=6\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, _ _ _ Matematiksel Analiz

Şekil 3.13'te görülen susturucu sistemin sayısal ve matematiksel analizi sonucunda elde edilen iletim kaybı eğrileri Şekil 3.14'de birlikte gösterilmiştir. Şekilde görülen tepe noktalarının frekansları 514 Hz, 1978 Hz, 2474 Hz ve 2996 Hz'dir. Matematiksel ve sayısal analiz sonuçları uyumludur.



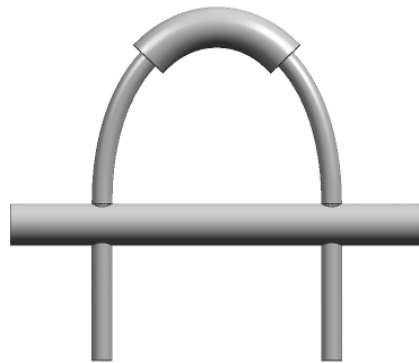
Şekil 3.15: Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $h_{ec}=6\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=3\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$)

Şekil 3.15'te Hershel-Quincke tüpü, genişleme odası ve iki adet Helmholtz rezonatöründen oluşan susturucu sistem görülmektedir. Sistemin geometrik parametreleri $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $h_{ec}=6\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=3\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$ 'dir.



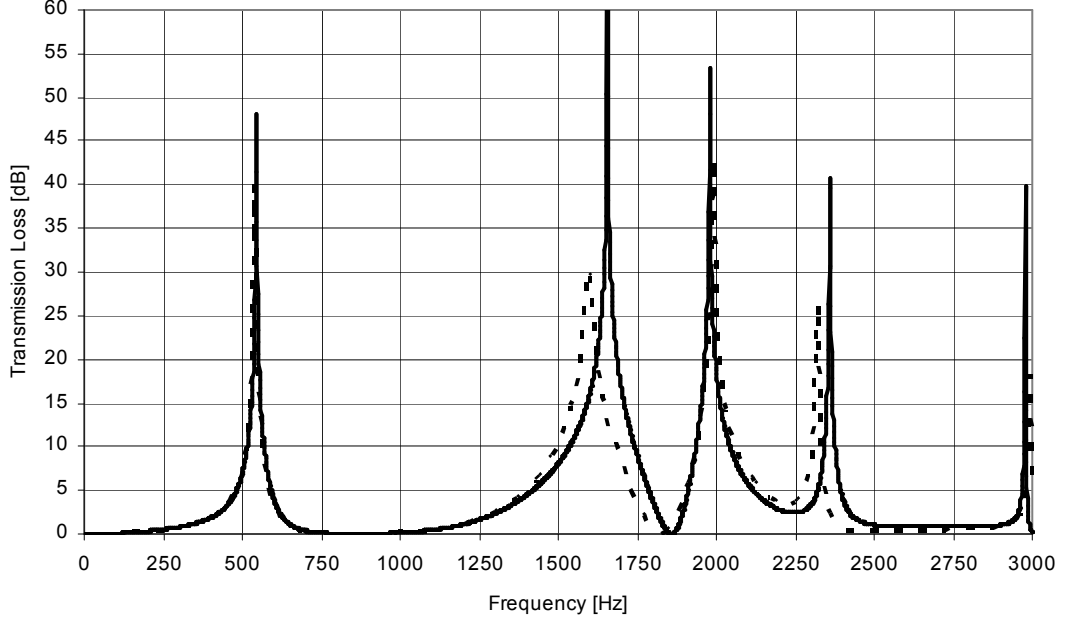
Şekil 3.16: Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=3\text{mm}$, $h_{ec}=6\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=3\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, ___ Matematiksel Analiz

Şekil 3.15'te görülen susturucu sistemin sayısal ve matematiksel analizi sonucunda elde edilen iletim kaybı eğrileri Şekil 3.16'de birlikte gösterilmiştir. Şekilde görülen tepe noktalarının frekansları 514 Hz, 1681 Hz, 1978 Hz, 2474 Hz ve 2996 Hz'dir. Matematiksel ve sayısal analiz sonuçları uyumludur.



Şekil 3.17: Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=9\text{mm}$, $h_{ec}=18\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=9\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$)

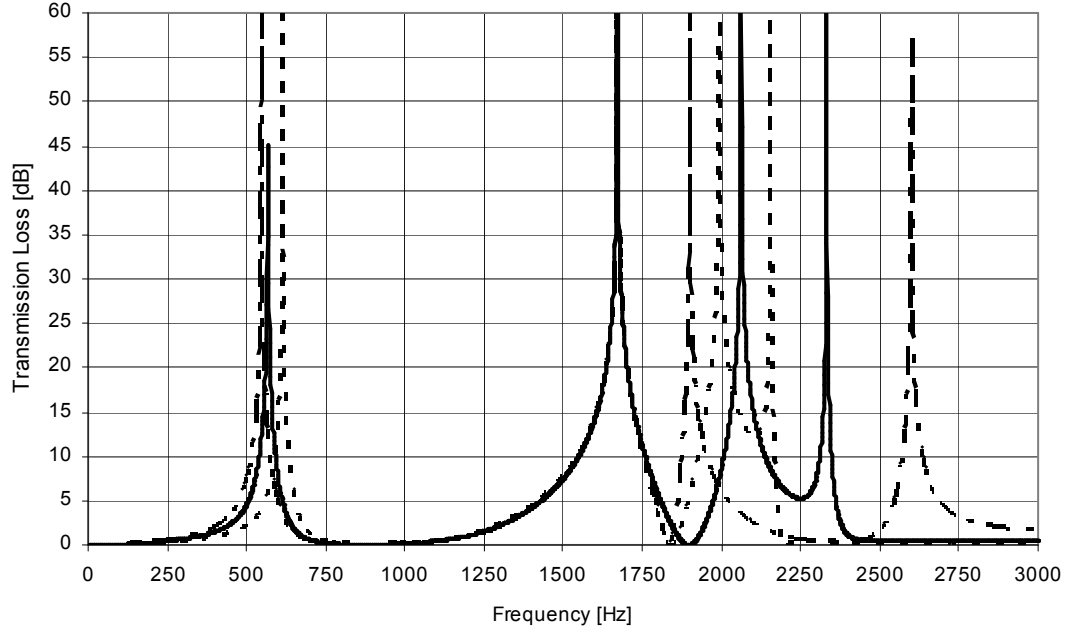
Şekil 3.17’te Hershel-Quincke tüpü, genişleme odası ve iki adet Helmholtz rezonatöründen oluşan susturucu sistem görülmektedir. Sistemin geometrik parametreleri $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=9\text{mm}$, $h_{ec}=18\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=9\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$ ’dir.



Şekil 3.18: Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=9\text{mm}$, $h_{ec}=18\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=9\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, ___ Matematiksel Analiz

Susturucu sistemlerde HQ tüpü üzerine bir genişleme odasının eklenmesiyle birlikte daha önce elde edilen üç rezonans frekansı iletim kaybı eğrisinin karakteri değişmektedir. Eğriye yeni rezonans frekansları eklenmektedir. Şekil 3.14 ve Şekil 3.2 karşılaştırıldığında görülmektedir ki birinci rezonans 840 Hz yerine 510 Hz’de, ikinci rezonans frekansı ise 1664 Hz yerine 1999 Hz’de oluşmaktadır. Genişleme odasının varlığı susturucu sistemi daha karmaşık bir hale sokmaktadır.

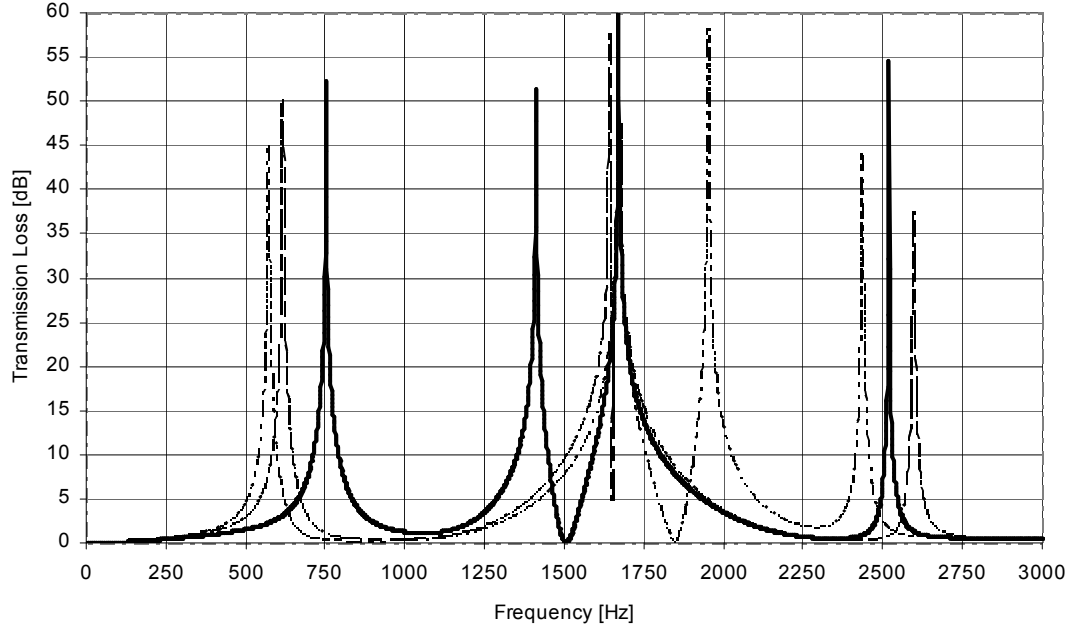
Genişleme odası uzunluğunun susturucu sistemin iletim kaybı eğrisine olan etkisi Şekil 3.19’da görülmektedir.



Şekil 3.19: Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=9\text{mm}$, $h_{ec}=18\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=9\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=40\text{mm}$, 60mm , 80mm , $l_{hq}=200\text{mm}$) — — — $l_{ec}=40\text{ mm}$, — — — $l_{ec}=60\text{ mm}$, — — — $l_{ec}=80\text{ mm}$

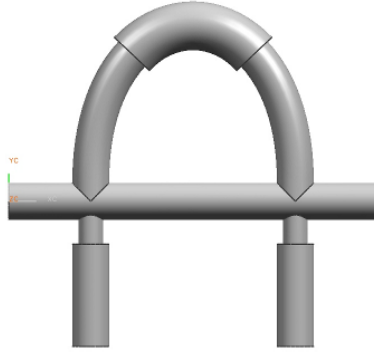
Şekil 3.19’da görülmektedir ki genişleme odasının uzunluğundaki değişme iletim kaybı değerlerinde belirli bir yükselme oluşturmamakla birlikte rezonans frekanslarının ötelenmesini sağlamaktadır ve sistemi nispeten yüksek frekanslarda etkilemektedir.

Genişleme odasının HQ tüpü üzerindeki konumunun susturucu sistemin iletim kaybı eğrisine olan etkisi Şekil 3.20’de görülmektedir.



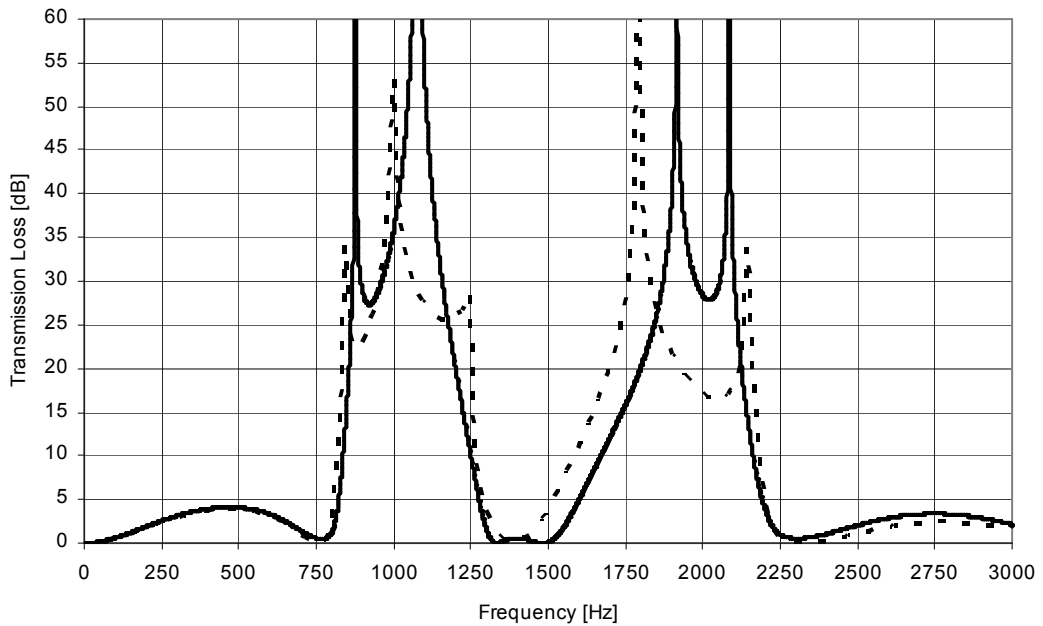
Şekil 3.20: Ana Boruya Bağlı HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=9\text{mm}$, $h_{ec}=18\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=9\text{mm}$, $l_{hr}=50\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{ec}=40\text{mm}$, 60mm , 80mm , $l_{hq}=200\text{mm}$) ___ $lc1=20\text{ mm}$, __ __ $lc1=40\text{ mm}$, __ __ __ $lc1=60\text{ mm}$, __ __ __ $lc1=80\text{ mm}$, __ __ __ $lc1=100\text{ mm}$

Genişleme odasının uzunluğunun ve HQ tüpü üzerindeki konumunun iletim kaybı eğrisine olan etkileri sırasıyla Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde görülmektedir ki bu iki parametre sistemin iletim kaybı değerlerinde fark edilir bir artışa ya da azalışa neden olmamaktadır. Genişleme odasının uzunluk ve konum parametrelerinin işlevi rezonans frekanslarının ötelenmesidir.



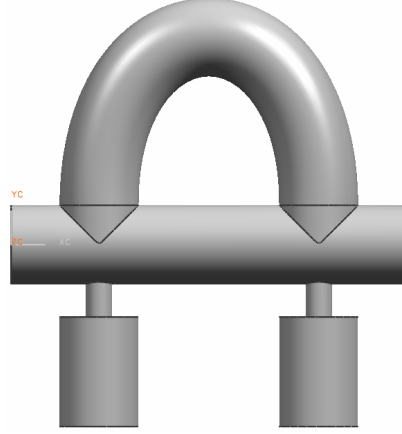
Şekil 3.21: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{ec}=24\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $h_{cp1,cp2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{cp1,cp2}=12\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$)

Şekil 3.21’de görülen sistemin geometrik parametreleri $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{ec}=24\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $h_{cp1,cp2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{cp1,cp2}=12\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$ ’dir.



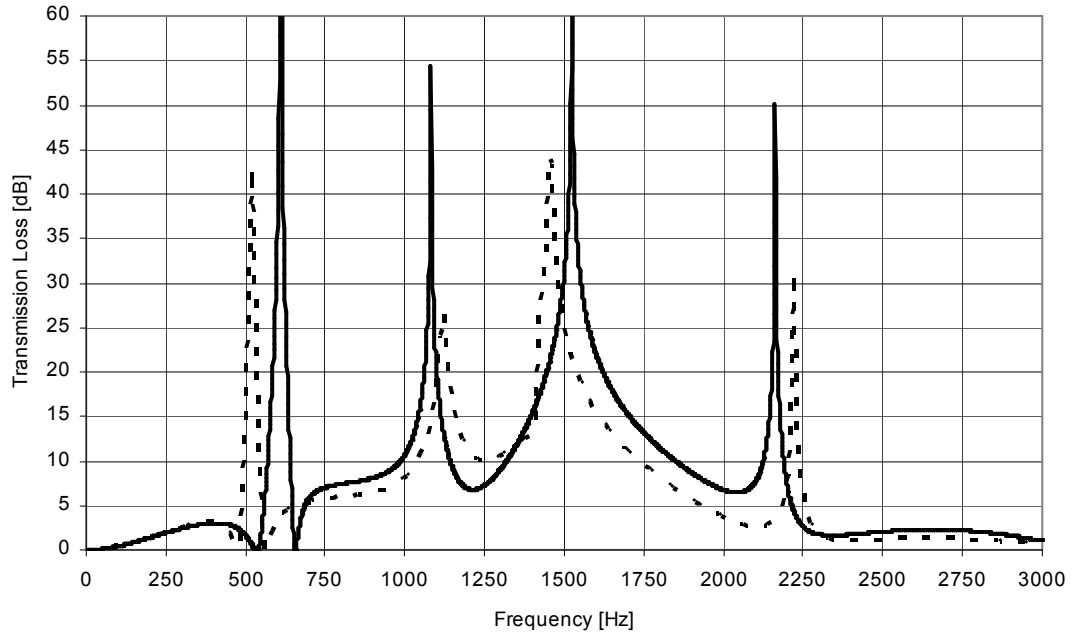
Şekil 3.22: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü, Genişleme Odası ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=18\text{mm}$, $h_{hq}=18\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{ec}=24\text{mm}$, $l_{ec}=67\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=12\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=50\text{mm}$) _ _ _ Sayısal Analiz, ___ Matematiksel Analiz

Şekil 3.21’de görülen susturucu sistemin sayısal ve matematiksel analizi sonucunda elde edilen iletim kaybı eğrileri Şekil 3.14’de birlikte gösterilmiştir. Şekilde görülen tepe noktalarının frekansları sayısal analiz için 841 Hz, 1000 Hz, 1790 Hz, 2140 Hz ve matematiksel analiz için 877 Hz, 1083 Hz, 1916 Hz ve 2086 Hz’dir. Matematiksel ve sayısal analiz sonuçları uyumludur.



Şekil 3.23: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$)

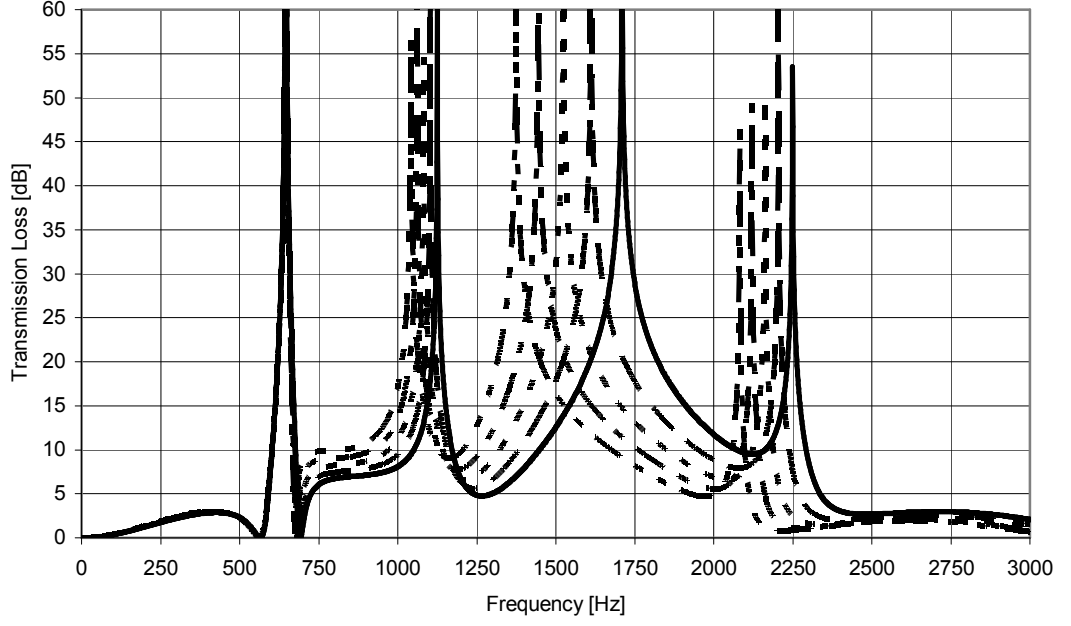
Şekil 3.23’te ana boruya bağlı bir adet Herschel-Quincke tüpü ve boyun bağlantılı iki adet Helmholtz rezonatöründen oluşan susturucu sistem görülmektedir. Sistemin geometrik parametreleri $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$ ’dir.



Şekil 3.24: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$) _ _ Sayısal Analiz, ____ Matematiksel Analiz

Şekil 3.23'teki susturucu sistemde Şekil 3.5'tekine ek olarak boyun bağlantılı iki adet Helmholtz rezonatörü bulunmaktadır. Sistemlerin iletim kaybı eğrileri incelendiğinde Helmholtz rezonatörleriyle birlikte eğriye düşük frekanslarda bir rezonans frekansı eklendiği, eğrinin geri kalan kısmının değişmediği görülmektedir.

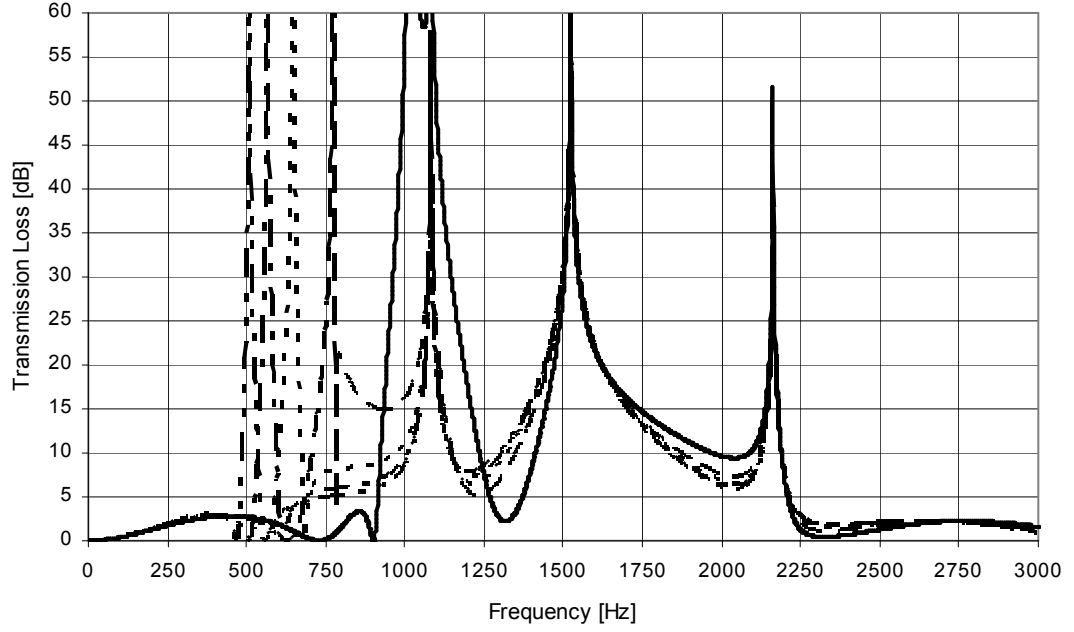
HQ tüp uzunluğunun sistemin iletim kaybı eğrisine olan etkisi Şekil 3.25'te görülmektedir.



Şekil 3.25: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$, $l_{hq}=198\text{mm}$, 204mm , 210mm , 216mm , 222mm) — $l_{hq}=198\text{ mm}$, — — $l_{hq}=204\text{ mm}$, — — — $l_{hq}=210\text{ mm}$, — — — $l_{hq}=216\text{ mm}$, — — — $l_{hq}=222\text{ mm}$

Şekil 3.21'deki sistem referans alınarak HQ tüp uzunluğunun değişimi Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Sistemin düşük frekanslardaki birinci rezonans frekansı ve bu frekansa ait iletim kaybı değerleri değişmemektedir. İletim kaybı değerlerinde artış ve azalışlar gözlenmekle birlikte HQ tüp uzunluğundaki artışın temel etkisi sistemin diğer rezonans frekanslarını düşük frekanslara doğru ötelenmesidir.

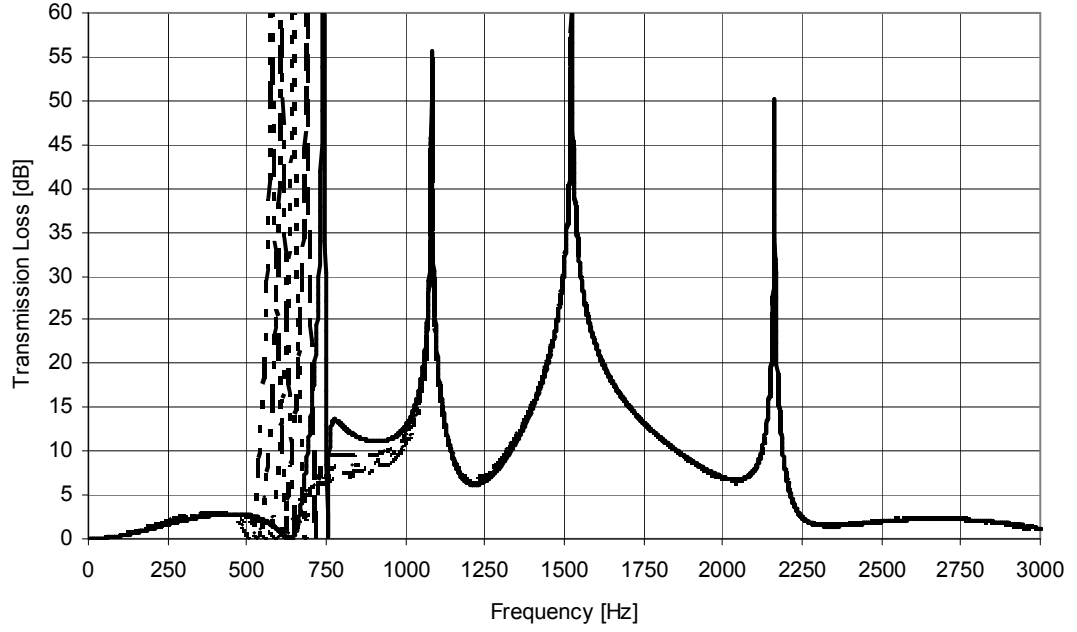
Boyun bağlantısının uzunluğunun susturucu sistemin iletim kaybı eğrisine olan etkisi Şekil 3.26'da görülmektedir.



Şekil 3.26: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_1=36\text{mm}$, $h_2=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $l_{n1,n2}=5\text{mm}$, 10mm , 15mm , 20mm , 25mm) $l_{n1,n2}=5\text{ mm}$, $l_{n1,n2}=10\text{ mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{ mm}$, $l_{n1,n2}=20\text{ mm}$, $l_{n1,n2}=25\text{ mm}$

Helmholtz rezonatörlerine ait boyun bağlantısının uzunluğu sistemi düşük frekanslarda etkilemektedir. Boyun bağlantısının uzunluğu arttıkça birinci rezonans frekansının daha da düşük frekanslara doğru ötelendiği gözlenmektedir. İletim kaybı değerlerinde kayda değer değişimler oluşmamakla birlikte birinci rezonans frekansının ötelenmesiyle birlikte iletim kaybı frekans aralığı düşük frekanslara doğru genişlemektedir.

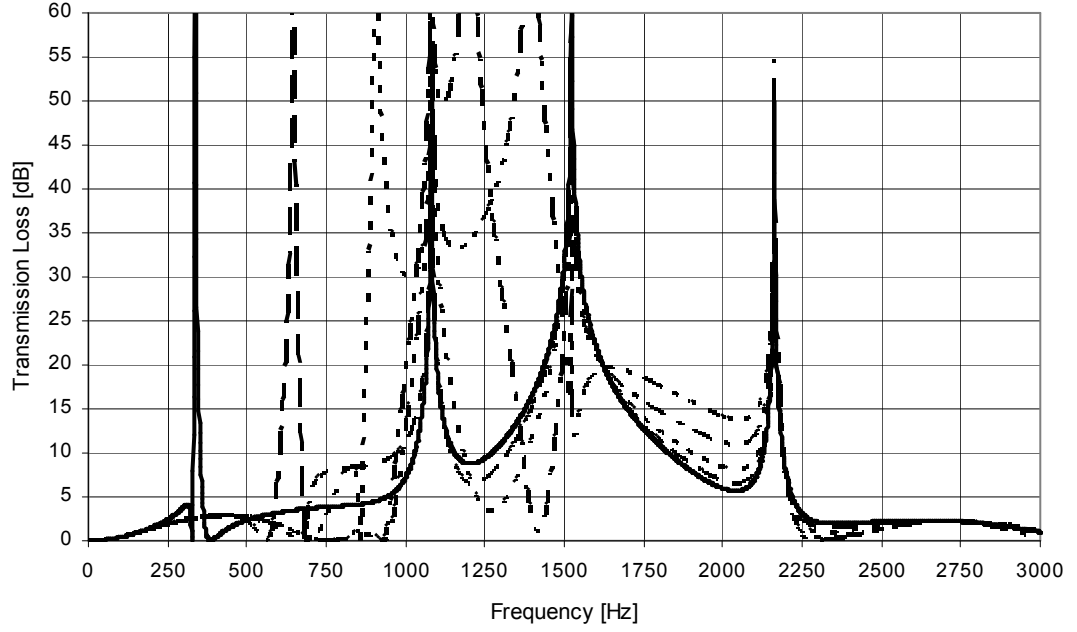
Helmholtz rezonatör uzunluğunun susturucu sistemin iletim kaybına olan etkisi Şekil 3.27'de görülmektedir.



Şekil 3.27: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$) ____ $l_{hr1,hr2}=35\text{ mm}$, ____ $l_{hr1,hr2}=40\text{ mm}$, _ _ _ $l_{hr1,hr2}=45\text{ mm}$, ____ $l_{hr1,hr2}=50\text{ mm}$, ____ $l_{hr1,hr2}=55\text{ mm}$

Helmholtz rezonatörünün uzunluğu sistemi yine düşük frekanslarda etkilemektedir. Uzunluktaki artış iletim kaybı frekans bandını düşük frekanslara doğru genişletmektedir. 1000 Hz'den büyük frekanslarda iletim kaybı eğrisi değişmemektedir.

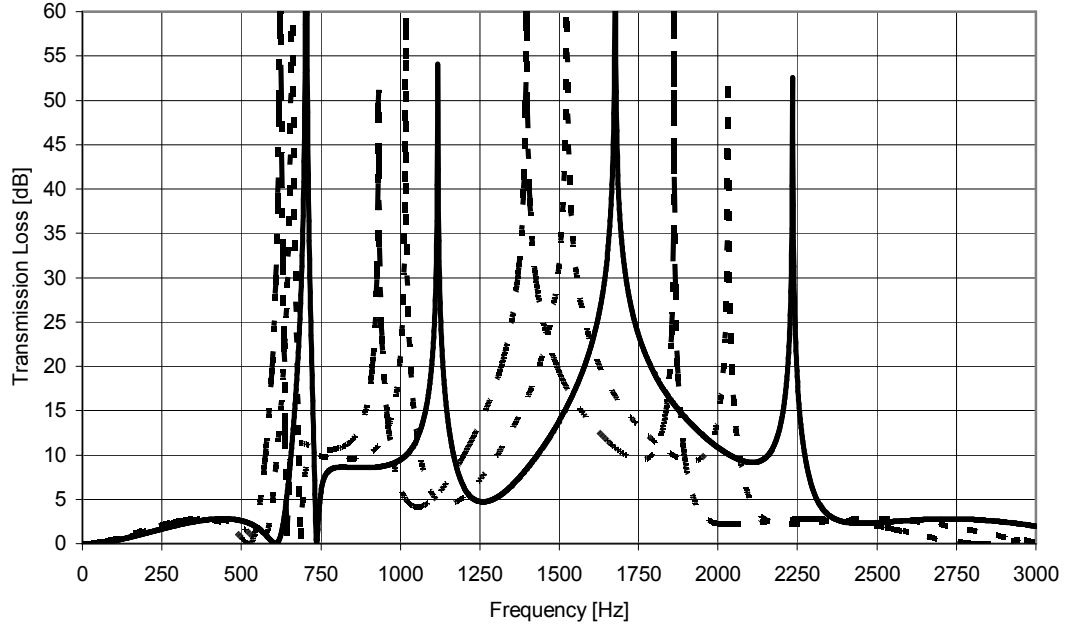
Boyun bağlantısı çapının susturucu sistemin iletim kaybı eğrisine olan etkisi Şekil 3.28'de görülmektedir.



Şekil 3.28: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{ mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{mm}$) _____ $h_{n1,n2}=6\text{ mm}$, _____ $h_{n1,n2}=12\text{ mm}$, _____ $h_{n1,n2}=18\text{ mm}$, _____ $h_{n1,n2}=27\text{ mm}$, _____ $h_{n1,n2}=36\text{ mm}$

Boyun çapının azalmasıyla iletim kaybı bandı düşük frekanslara doğru genişlemektedir. Çaptaki artışla birlikte iletim kaybında 1000–1500 Hz arasında azalma, 1500–2200 Hz arasında ise artma görülmektedir. Bununla birlikte çap değişiminin asıl etkisi birinci rezonans frekansının ötelenmesidir.

Bağlantı noktaları arasındaki mesafenin susturucu sistemin iletim kaybı eğrisine olan etkisi Şekil 3.29’da görülmektedir.

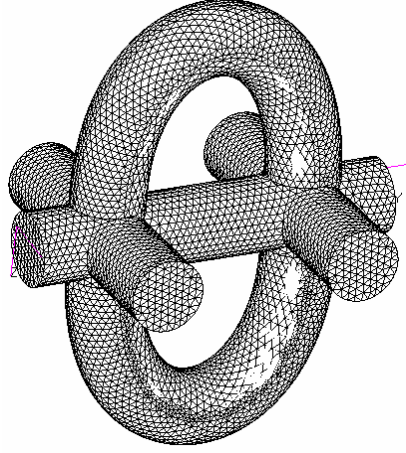


Şekil 3.29: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve İki Adet Helmholtz Rezonatöründen (Boyun Bağlantısı) Oluşan Susturucu Sistemlerin İletim Kaybı Eğrileri (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $l_{hq}=200\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=45\text{ mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{n1,n2}=15\text{mm}$, $h_{n1,n2}=12\text{ mm}$, $l_d=100\text{mm}$, 110mm , 120mm) — $l_c=100\text{ mm}$, _ _ _ $l_d=110\text{ mm}$, _ _ _ $l_d=120\text{ mm}$

Bağlantı noktaları arasındaki uzaklığın değişimiyle ise iletim kaybı eğrisinin karakteri aynı kalmaktadır. Mesafenin artışıyla tüm rezonans frekanslarının düşük frekanslara doğru ötelendiği görülmektedir. İletim kaybı değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmemektedir.

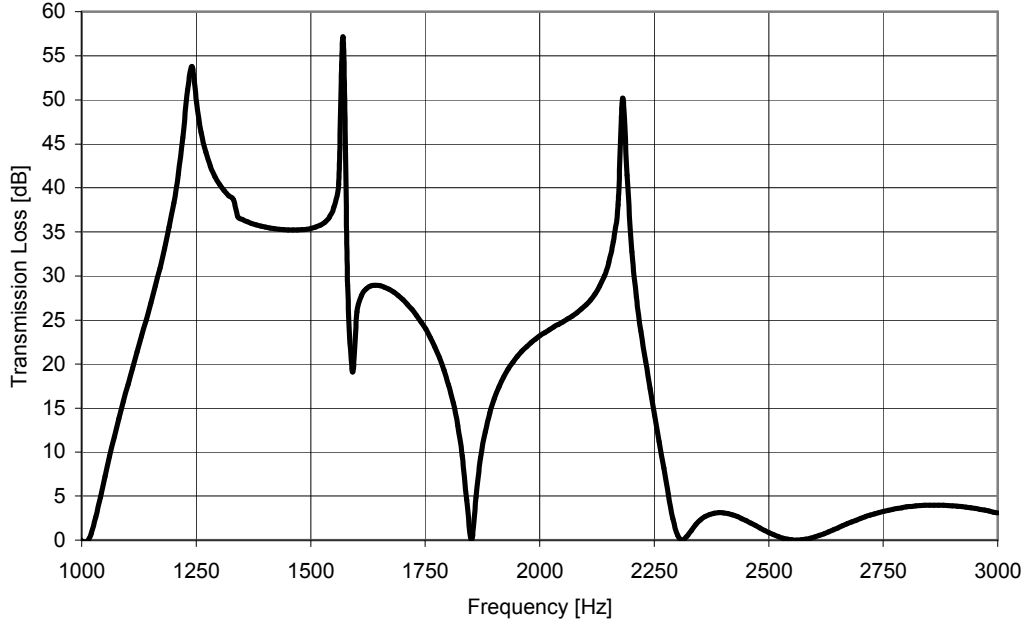
3.2 Amaca Uygun Tasarımlar

Bu bölümde gösterilen tasarımlarda amaç geniş frekans bandında yüksek iletim kaybı elde etmektir. İletim kaybı değerlerinde ani iniş çıkışlar olmaması, iletim kaybı değerinin 0 dB değerine inmemesi tasarım kriterleri arasındadır.



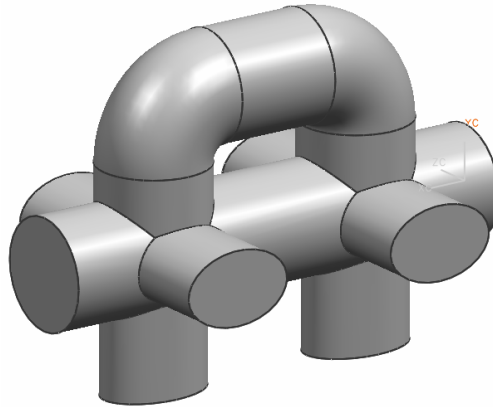
Şekil 3.30: Ana Boruya Bağlı İki Adet HQ Tüpü ve Dört Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistem

Şekil 3.30’da iki adet Herschel Quincke tüpü ve dört adet yana bağlanmış Helmholtz rezonatörü grubundan oluşan susturucu sistem görülmektedir. Sistemin geometrik parametreleri $l_d = 100mm$, tüp uzunluğu $l_{hq} = 203mm$, Helmholtz rezonatörleri uzunlukları $l_{hr} = 67mm$, ana boru çapı $h_{md} = 36mm$, tüp çapı $h_{md} = 36mm$ ve Helmholtz rezonatörleri çapı $h_{hr} = 36mm$ ’dir.

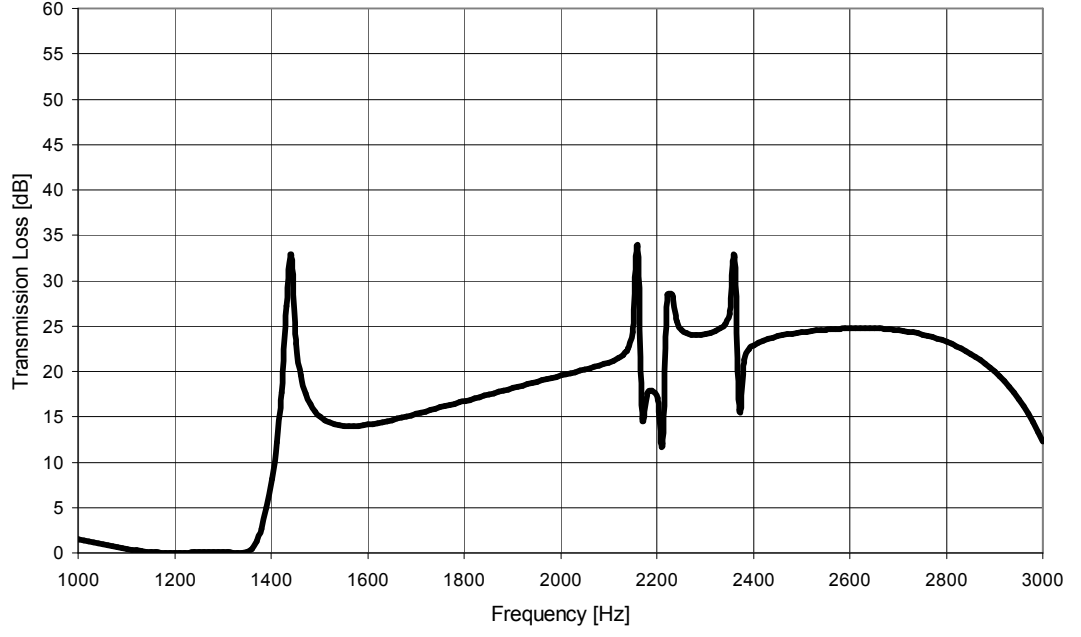


Şekil 3.31: Ana Boruya Bağlı İki Adet HQ Tüpü ve Dört Adet Helmholtz Rezonatöründen Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi

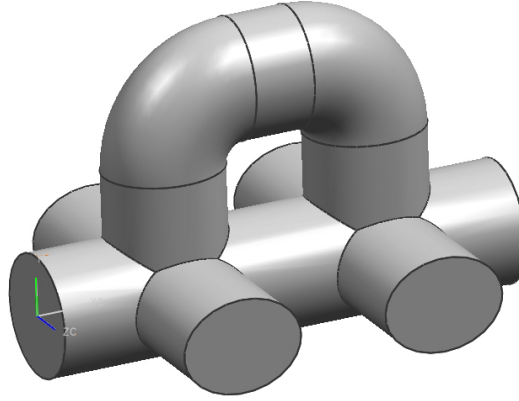
Şekil 3.31'deki iletim kaybı eğrisinde üç adet tepe noktası görülmektedir. Bu tepe noktalarına karşılık gelen frekans değerleri 1240 Hz, 1570 Hz, 2180 Hz ve iletim kaybı değerleri sırasıyla 53,8 dB, 57 dB ve 50,2 dB'dir. İkinci ve üçüncü tepe noktaları arasında iletim kaybında düşüş meydana gelmekte ve 1850 Hz'de iletim kaybı değeri 0 dB olmaktadır. 1100-1800 Hz ve 1800-2250 Hz frekans aralıklarında 15 dB'lik iletim kaybı elde edildiği görülmektedir.



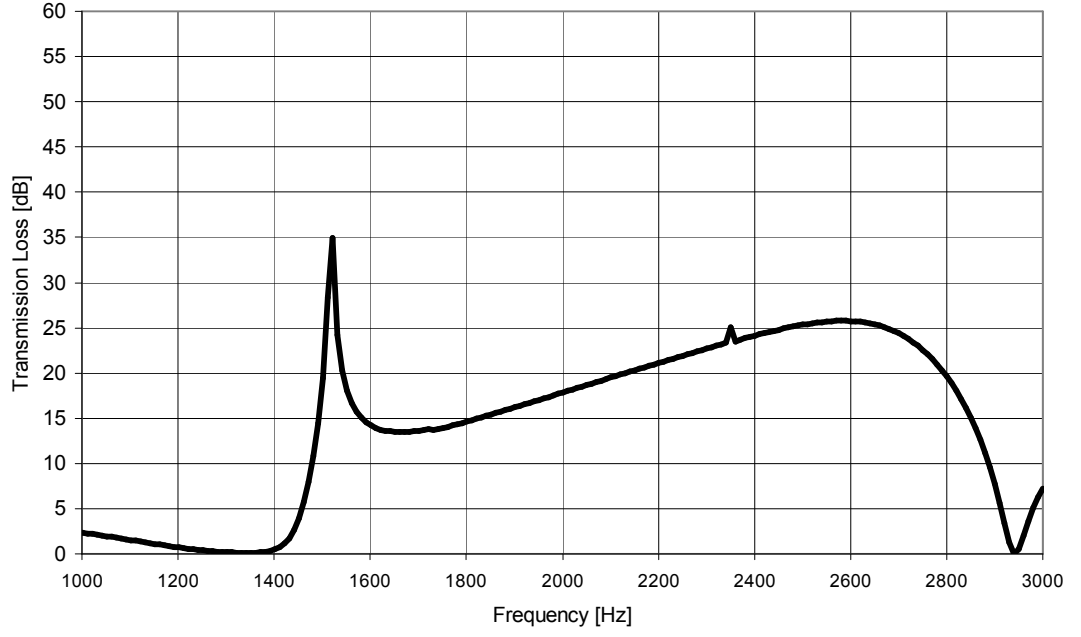
Şekil 3.32: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Altı Adet Helmholtz Rezonatöründen (Elips) Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $h_{hr1}, h_{hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1}, l_{hr2}=30\text{mm}$, $l_{hq}=125\text{mm}$, $l_d=60\text{mm}$)



Şekil 3.33: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Altı Adet Helmholtz Rezonatöründen (Elips) Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $h_{hr1,hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1,hr2}=30\text{mm}$, $l_{hq}=125\text{mm}$, $l_d=60\text{mm}$)



Şekil 3.34: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Dört Adet Helmholtz Rezonatöründen (Elips) Oluşan Susturucu Sistem (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $h_{hr1, hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1, hr2}=30\text{mm}$, $l_{hq}=125\text{mm}$, $l_d=60\text{mm}$)



Şekil 3.35: Ana Boruya Bağlı Bir Adet HQ Tüpü ve Dört Adet Helmholtz Rezonatöründen (Elips) Oluşan Susturucu Sistemin İletim Kaybı Eğrisi (Geometrik Parametreler: $h_{md}=36\text{mm}$, $h_{hq}=36\text{mm}$, $h_{hr1}, h_{hr2}=36\text{mm}$, $l_{hr1}, l_{hr2}=30\text{mm}$, $l_{hq}=125\text{mm}$, $l_d=60\text{mm}$)

Şekil 3.34’te gösterilen sistemin geometrik parametreleri:

Ana boru ve HQ tüpü iç çapı: 36 mm

HQ tüpü uzunluğu: 125 mm

Helmholtz rezonatörlerinin uzunlukları: 30 mm

İki Helmholtz rezonatörü arasında kalan mesafe: 60 mm

Helmholtz rezonatörlerinin (elips) iç çapları: 18mm ve 12mm.

Sayısal analiz neticesinden görüldüğü gibi 1350–2950 Hz frekans aralığında kesintisiz bir iletim kaybı elde edilmektedir. Bu aralıkta sağlanan en düşük iletim kaybı değeri, 1640–1680 Hz frekans aralığında, 13.5 dB’dir. En yüksek iletim kaybı değeri ise, 2570–2600 Hz frekans aralığında 25.8 dB’dir. Bununla birlikte iletim kaybı değerlerinde ani düşüşler meydana gelmemesi tasarım kısıtları arasındadır.

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

4.1 Genel Değerlendirme

Tez kapsamında rezonatör tipi susturucuların incelenmesi amacıyla analitik ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Analitik çalışmalar kapsamında transfer matrisi metodu kullanılarak Herschel-Quincke tüpü, tüp üzerine yerleştirilmiş bir genişleme odası ve boyun bağlantılı iki adet Helmholtz rezonatöründen oluşan bir susturucu sistemin parametrik analitik modeli oluşturulmuştur.

Sayısal çalışmalar kapsamında değişik geometrik kombinasyonlara ait susturucu sistemleri sonlu elemanlar metoduyla analizleri gerçekleştirilmiş, bu sonuçlar analitik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Herschel-Quincke tüpü, genişleme odası, Helmholtz rezonatörleri ve boyun bağlantısının, ayrıca bu elemanlara ait geometrik parametrelerin (çap, uzunluk, konum) iletim kaybı eğrisine olan etkileri incelenmiştir.

Tez boyunca yapılan çalışmalardan çıkarılan en önemli sonuçlar şunlardır:

- Herschel-Quincke tüp çapının artmasıyla iletim kaybı frekans bandının genişliği artmaktadır. Şekil 3.5'te gösterilen susturucu sistem ile 1050-1600 Hz aralığında en düşük 10 dB'lik bir iletim kaybı elde edilmektedir.
- Ana boruya bağlı bir adet HQ tüpünden oluşan susturucu sisteme Helmholtz rezonatörünün eklenmesiyle, sistem rezonans frekansları değişmemekte, ikinci rezonans frekansı civarında iletim kaybı değerleri yükselmektedir.
- HQ tüpü ve Helmholtz rezonatörlerinin çaplarındaki artış iletim kaybı değerlerini yükseltmekle birlikte rezonans frekanslarını ötelemektedir. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi iletim kaybı eğrilerinin karakterleri aynı kalmaktadır. İkinci

rezonans frekansının değişmediği, bunu yanında birinci ve üçüncü rezonans frekansları arasındaki farkın azaldığı görülmüştür. Çap değerinin artışıyla birlikte iletim kaybı değerleri 920-2250 Hz aralığında yaklaşık 5 dB artmıştır.

- Genişleme odası sistemin iletim kaybı değerlerini ve frekans bandı genişliğini arttırmamakla birlikte sistemi karmaşık bir hale getirmektedir. Genişleme odası çap parametresi olan h_{ec} , konum ve uzunluk parametreleri olan l_{c1} ve l_{c2} değiştirilerek sistemin rezonans frekansların ötelenmesi mümkündür.
- Boyun bağlantısının çap ve uzunluğu sistemi düşük frekanslarda etkilemektedir. $h_{n1,n2}$ ve $l_{n1,n2}$ parametreleri ile birinci rezonans frekansı ötelenebilir ve iletim kaybı frekans bandı düşük frekanslara doğru genişletilebilir.
- Helmholtz rezonatörü de boyun bağlantısıyla birlikte sistemi düşük frekanslarda etkilemektedir. Boyun bağlantısının uzunluğu arttıkça birinci rezonans frekansının daha da düşük frekanslara doğru ötelendiği gözlenmiştir. İletim kaybı değerlerinde kayda değer değişimler oluşmamakla birlikte birinci rezonans frekansının ötelenmesiyle birlikte iletim kaybı frekans aralığı düşük frekanslara doğru genişlemektedir.
- Herschel-Quincke tüpü ve Helmholtz rezonatörünün ana boruya bağlandığı noktalar arasındaki uzaklığın değişimi sistemin bütün rezonans frekanslarını etkilemektedir. l_d parametresinin değişimi ile iletim kaybı eğrisi frekans bandı boyunca ötelenmesi mümkün olmaktadır.
- Şekil 3.34'teki susturucu sistem iyi bir sonuç vermektedir. Daha geniş frekans bandında yüksek iletim kaybı değerleri elde edilmiştir.
- Sayısal analiz sonuçları analitik modelin başarısı açısından önemlidir. Analitik modelin başarısından bahsetmek gerekirse; modelleme başarısı küçük boru çaplarında daha yüksektir. Çap arttıkça ve yüksek frekanslarda başarı düşmektedir.

4.2 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Yapılan çalışma boyunca, Herschel-Quincke tüpü, genişleme odası ve Helmholtz rezonatöründen oluşan rezonatör tipi bir susturucunun analitik modeli oluşturulmuştur.

Analitik modelin başarısı düşük frekanslarda ve küçük boru çaplarında çok yüksektir. Boru çapları arttıkça ve yüksek frekanslarda başarı düşmektedir. Kullanılan transfer matrisi metoduyla birlikte düzlem dalga kabulü yapılmıştır. Yüksek frekanslarda ve büyük boru çaplarında modelleme başarısının düşmesi bu kabulün geçerliliğini yitirmesinden kaynaklanmaktadır.

Sistem modellenirken on adet eleman kullanılmıştır. Ayrıca HQ tüpü ve genişleme odasının düz borular olduğu kabulü yapılmıştır. Dolayısıyla eleman sayısını arttırmak modelleme başarısını arttırabilir.

Şekil 3.34'te gösterilen susturucu sistem geliştirilerek daha geniş frekans bandında daha yüksek iletim kaybı sağlayan bir susturucu tasarlanabilir.

KAYNAKLAR

- Beranek, L.L.**, 1971. Noise and Vibration Control, Mc-Graw-Hill, New York.
- Brady, L.A.**, 2002. Application of the Herschel-Quincke Tube Concept to Higher-Order Acoustic Modes in Two-Dimensional Ducts, *M.S. Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- Chen, K.T. et. al.**, 1998. The improvement on the transmission loss of a duct by adding Helmholtz resonators, *Applied Acoustics*, **54**, 71-82.
- Daly et. al.**, 2005. Herschel-Quincke tube arrangements for motor vehicles, *USA Patent*, No: US2005/0000743 A1, Dated 6.1.2005.
- Desantes, J.M., Torregrosa, A.J., Climent, H. and Moya, D.**, 2005. Acoustical performance of a Herschel-Quincke tube modified with an interconnecting pipe, *Journal of Sound and Vibration*, **284**, 283-298.
- Evans, D. and Ward, A.**, 2005. Minimizing Turbocharger Whoosh Noise for Diesel Powertrains, *SAE Paper*, 2005-01-2485.
- Gerges, S.N.Y. et al**, 2005. Muffler Modeling by Transfer Matrix Method and Experimental Verification, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering*, **27**, 132-140.
- Graefenstein, A.J. and Wenzel, W.**, 2003. Herschel-Quincke Spiral: A New Interference Silencer, *SAE Paper*, 2003-01-1722.
- Herchel, Sir John F.W.**, 1833. On the Absorbtion of Light by Coloured Media, viewed in connexion with the Undulatory Theory, *The Philosophical Magazine*, **3**, 401-412.
- Jacobsen, F.**, 2006. Propagation of Sound Waves in Ducts, Technical University of Denmark, Denmark.

- James, M.M.**, 2005. Fundamental Studies of the Herschel-Quincke Tube Concept with Mode Measurements, *M.S. Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. and Sanders, J.V.**, 1982. Fundamentals of Acoustics, John Wiley&Sons, USA.
- Morse, P.M. and Ingard, K.U.**, 1986. Theoretical Acoustics, Princeton University Press, New Jersey.
- Munjal, M.L.**, 1987. Ducts and Mufflers with Application to Exhaust and Ventilation System Design, Wiley-Interscience Publication, Canada.
- Panigrahi, S.N. and Munjal, M.J.**, 2005. Plane wave propagation in generalized multiply connected acoustic filters, *Journal of Acoustical Society of America*, **118**, 2860-2868.
- Panton, R.L. and Miller J.M.**, 1975. Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz resonators, *Journal of Acoustical Society of America*, **57**, 1533-1535.
- Quincke, G.**, 1866. Ueber interferenzapparate für schallwellen, *Annalen der Physik und Chemie*, **128**, 177-192.
- Selamet, A., Dickey, N.S. and Novak, J.M.**, 1993. The Herschel-Quincke Tube: A Theoretical, Computational, and Experimental Investigation, *The American Society of Mechanical Engineers Winter Annual Meeting*, USA, Nov. 28-Dec. 3.
- Selamet, A. and Easwaran, V.**, 1997. Modified Herschel-Quincke tube: Attenuation and resonance for n-duct configuration, *Journal of Acoustical Society of America*, **102**, 164-169.
- Singh, S.**, 2006. Tonal noise attenuation in ducts by optimising adaptive Helmholtz resonators, *M.S. Thesis*, The University of Adelaide, Australia.
- Stewart, G.W.**, 1928. The Theory of the Herschel-Quincke Tube, *Physical Review*, **31**, 696-698.
- Torregros, A. J., Broatch, A. and Moreno, D.**, 2007. Acoustic performance of Herschel-Quincke tubes with gradually variable cross-section ducts, *Inter-Noise*, Istanbul, Turkey, August 28-31.

Trochon, Eric P., 2001. A New Type of Silencers for Turbocharger Noise Control,
SAE Paper, 2001-01-1436.

ÖZGEÇMİŞ

Cem Meriç, 1983 yılında Bursa’da doğdu. 2001 yılında Şükrü Şankaya Anadolu Lisesi’ni bitirdi. 2005’te İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi’nden mezun oldu ve aynı yıl İTÜ Makine Mühendisliği Anabilim Dalı “Konstrüksiyon” Programı’nda yüksek lisans öğretimine başladı. Halen bu programda yüksek lisans öğrencisi olup Ford Otosan’da Ürün Geliştirme Mühendisi olarak görev yapmaktadır.