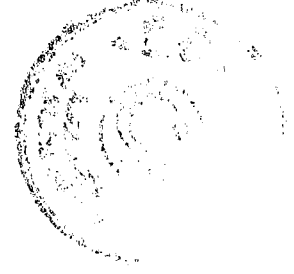


T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



83681

AKUSTİK YALITIM MALZEMELERİNİN
SAYISAL VE DENEYSEL YÖNDEN ANALİZİ
VE
GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Hüray CAN

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMAN YAYINLARI

Balıkesir, Şubat- 1999

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



AKUSTİK YALITIM MALZEMELERİNİN
SAYISAL VE DENEYSEL YÖNDEN ANALİZİ
VE
GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Hüray CAN

Tez Danışmanı : Prof.Dr.Erdal EMEL

83681

Sınav Tarihi : 19.02.1999

Jüri Üyeleri : Prof.Dr.Erdal EMEL (Danışman)

Prof.Dr.Fatih BABALIK

Yard.Doç.Dr.Mehmet İREN

Erdal Emel
Fatih Babalik
Mehmet İren

Balıkesir, Şubat-1999

ÖZ



**AKUSTİK YALITIM MALZEMELERİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL YÖNDE ANALİZİ
VE
GELİŞTİRİLMESİ**

Hüray CAN
Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

(Ph.D. Tezi / Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erdal EMEL)

Balıkesir, 1998

Frekansa bağlı akustik yutma katsayısının en büyük değere ulaşması için, akustik yalıtım malzemeleri deneysel ve sayısal yönden incelenmiştir.

Akustik yalıtım malzemesi olarak lifli ve süngerimsi malzemeler kullanılmış olup, homojen olarak alınan malzemelerin akustik empedans modelleri kurularak yutma katsayıları bulunmuştur. Malzemelerin modellenmesinde birçok parametre göz önüne alınmış ve yutma katsayısının frekansa bağlı optimizasyonu bu parametrelerin en uygun değerleri için yapılmıştır.

Hesaplanarak elde edilen yutma katsayısı iki mikrofona empedans tüpü ile yapılan deneysel ölçümlerle karşılaştırılıp, sonuçlar değerlendirilmiştir.

Böylelikle yutma katsayısını malzemelerdeki parametrelerin nasıl etkilediği ortaya çıkarılmış ve daha iyi yutma kapasitesine sahip akustik yalıtım malzemeleri geliştirilmeye çalışılmıştır.

Anahtar sözcükler = Yutma katsayısı / Akustik yalıtım malzemeler / Optimizasyon / Empedans

ABSTRACT

EMPIRICAL AND NUMERICAL ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF ACOUSTIC ISOLATION MATERIALS



Hüray CAN

Balıkesir University, Institute of Science, Department of Mechanical
Engineering

Ph.D. Thesis / Supervisor : Prof. Dr. Erdal EMEL

In this study, acoustic insulation materials are analysed empirically and numerically in order to obtain the highest acoustic absorption coefficient value dependent on frequency.

Fibrous and elastic polyurethane foams have been used as acoustic materials and absorption coefficients are determined by establishing acoustic impedance models of homogenous materials. In modelling of materials, many parameters have been taken into account and the optimisation of the absorption coefficient according to frequency have been done for the most suitable values of these parameters. Absorption coefficient obtained by calculation has been compared to empirical measurements done with a double microphoned impedance tube and results are assessed.

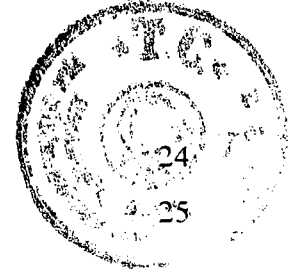
Thus, it is revealed that how the materials parameters effected the absorption coefficient and some methods are proposed in order to developpe new acoustic insulation materials, which have better absorption capacity.

KEY WORDS: Absorbtion coefficient / Acoustic isolation materials / Optimisation /Impedance

İÇİNDEKİLER



ÖZ, ANAHTAR SÖZCÜKLER	ii
ABSTRACT, KEYWORDS	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SEMBOL LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
1. GİRİŞ	I
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. AKUSTİK TEORİSİ	10
3.1 Giriş	10
3.2 Genel Akustik Dalga Denklemi	10
3.3 Dalga Denklemine Türetilmesi	11
3.3.1 Hareket Denklemi	11
3.3.1.1 Tek-Boyutlu Hareket Denklemi	11
3.3.1.2 Üç-Boyutlu Hareket Denklemi	12
3.3.2 Gaz Denklemi	13
3.3.3 Süreklilik Denklemi (Kütlenin Korunumu Kanunu)	15
3.3.3.1 Tek-Boyutlu Süreklilik Denklemi	16
3.3.3.2 Üç-Boyutlu Süreklilik Denklemi	16
3.3.4 Kartezyen Koordinatlarda Dalga Denklemi	17
3.3.4.1 Tek-Boyutlu Dalga Denklemi	17
3.3.4.2 Üç-Boyutlu Dalga Denklemi	18
3.4 Yutma Katsayısı	20
3.4.1 Geliş Açısına Bağlı Yutma Katsayısı	21
3.5 Empedans	23

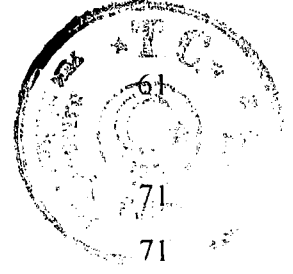


3.5.1 Akustik Empedans

3.5.2 Spesifik Akustik Empedans

4. EMPEDANS MODELLERİ	26
4.1 Giriş	26
4.2 Sınırsız Akışkanlardaki Düzlem Dalgalar	26
4.2.1 Kompleks Notasyon	28
4.3 Empedansın Belirli Özellikleri	30
4.3.1 Bir Yayınım Yönü Boyunca Empedans Değişimi	30
4.3.2 Arkası Rijit Duvarlı Bir Akışkan Tabakanın Empedansı	31
4.3.3 Çok Tabakalı Bir Akışkanın Empedansı	32
4.4 Normal Gelişteki Yutma Katsayısı ve Yansıma Katsayısı	32
4.4.1 Yansıma Katsayısı	32
4.4.2 Yutma Katsayısı	33
4.5 Gözenekli Malzemenin Empedansı	33
4.6 Gözenekli Malzemeler Tarafından Sesin Yutulması	33
4.7 Çeşitli Empedans Modelleri	39
4.7.1 $Z_2=Z$ Durumu	39
4.7.2 $Z_2=\infty$ Durumu	41
4.7.3 $Z_2=0$ Durumu	42
4.8 Süngerimsi Malzemelerin Empedans Modeli	44
4.9 Süngerimsi Malzemenin Yüzey Empedansının Belirlenmesi	44
4.10 Ses Dalgasının Malzemeye Dik Yönde Gelme Durumunda Yüzey	45
4.11 Basınç Dalgaları	48
4.12 Lifli Malzemelerin Empedans Modeli	53
4.13 Lifli Malzemelerde Yüzey Empedansının Belirlenmesi	54
5.YUTMA KATSAYISININ OPTİMİZASYONU	56
5.1 Giriş	56
5.2 Akustik Yalıtım Malzemelerinin Optimizasyonu	56
5.2.1 Süngerimsi Malzemelerin Optimizasyonu	56

5.2.2 Lifli Malzemelerin Optimizasyonu



6. DENEYSEL YÖNTEMLER

6.1 Giriş	71
6.2 Akustik Akış Direncinin Ölçümü	71
6.3 Ölçüm Metodu	72
6.4 Kesme Modülünün Bulunması	75
6.4.1 Kesme Modülünün Hesaplanması	75
6.5 Yapısal Şekil Faktörünün Ölçümü	77
6.6 Gözeneklilik	79
6.7 Yoğunluk (ρ_1)	79
6.8 Empedans Tüpü	79
6.8.1 İki Mikrofonlu Metod	79
6.8.2 Kalibrasyon Metodu	80

7. UYGULAMALAR

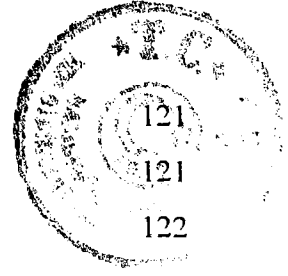
7.1 Deneysel Yöntemin Uygulanması	84
7.1.1 Akış Direnci	84
7.1.2 Kesme Modülü	89
7.1.3 Gözeneklilik	89
7.1.4 İskelet Yoğunluğu	90
7.1.5 Yapı Şekil Faktörü	90
7.2 Yutma Katsayısının Hesabı	91
7.2.1 Süngerimsi Malzemelerin Yutma Katsayısının Belirlenmesi	92
7.2.2 Lifli Malzemelerde Yutma Katsayısının Belirlenmesi	95
7.2.3 Deneysel Yutma Katsayısının Belirlenmesi	99
7.2.4 Sayısal ve Deneysel Yutma Katsayılarının Karşılaştırılması	102
7.3 Optimizasyon	114
7.3.1 Süngerimsi Malzemelerin Optimizasyonu	114
7.3.2 Lifli Malzemelerin Optimizasyonu	116
7.3.3 Optimizasyon Sonucunun Sayısal Değerler ile Karşılaştırılması	119

8 SONUÇLAR ve ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

8.2 Öneriler

EK A. Süngerimsi Malzemelerin Optimizasyonu	123
EK B. Lifli Malzemelerin Optimizasyonu	127
EK C. Lifli Malzemelerin Optimizasyonu	130
EK D. Süngerimsi Malzemelerin Yutma Katsayısının Hesaplanması	133
EK E. Lifli Malzemelerin Yutma Katsayısının Hesaplanması	135
EK F. Lifli Malzemelerin Yutma Katsayısının Hesaplanması	136
EK G. Kısıtlı Minimizasyon Çözümü	137
EK H. Biot Teorisi	140
KAYNAKÇA	143



SEMBOL LİSTESİ

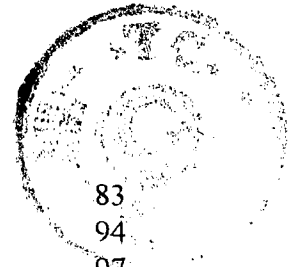


<u>Simge</u>	<u>Adı</u>	<u>Tanım/Değeri</u>	<u>Birimi</u>
σ	Akış direnci		Nsm^{-4}
N	Kesme modülü		Nm^{-2}
α_r	Yapı şekil faktörü		-
ϕ	Gözeneklilik	$V_{göz}/V_{top}$	-
ρ_1	İskelet yoğunluğu		kgm^{-3}
α	Yutma katsayısı		-
R	Yansıma katsayısı		-
ρ_0	Havanın yoğunluğu		kgm^{-3}
Z	Empedans		-
u	Parçacık hızı		ms^{-1}
ε	Yer değiştirme vektörü		-
c_0	Sesin havada yayılma hızı		ms^{-1}
φ	Deplasman potansiyeli		-
ω	Açısal frekans		rads^{-1}
k	Dalga sayısı		-
d	Malzemenin kalınlığı		m
Z_c	Karakteristik empedans		-
η	Havanın viskozitesi		poise
p	Ses basıncı		Pa
R	Elastik biot katsayısı		-
Q	Elastik biot katsayısı		-
P	Elastik biot katsayısı		-
K_f	Hacim modülü		
K_b	Hacim modülü		
Z^s	Havadaki empedans		
Z^f	İskeletteki empedans		

ŞEKİL LİSTESİ



Şekil Numarası	Adı	Sayfa
Şekil 2.1	Gözenekli malzemelerde akustik empedans	7
Şekil 2.2	Sert bir duvarla desteklenen malzemenin empedansı	7
Şekil 3.1	Gaz ortamda sonsuz küçüklükte bir hacim elemanı	10
Şekil 3.2	Pozisyondaki değişim ile kutunun hacmindeki değişim	15
Şekil 3.3	θ açısında gelen bir dalga için parçacık hızının normal bileşenleri	21
Şekil 4.1	Hem zıt yönde hem de x yönünde yayılan düzlem dalgalar	30
Şekil 4.2	Arka yüzü rijit duvarlı diğer yüzü akışkan (2) ile temas halinde olan bir akışkan tabaka	31
Şekil 4.3	Çok tabakalı akışkan	32
Şekil 4.4	Malzeme ve rijit duvar arasında hava boşluklu gözenekli malzeme tabakası	33
Şekil 4.5	l kalınlığındaki malzemenin empedansı	38
Şekil 4.6	Son derece kalın ses yutucu malzeme	39
Şekil 4.7	Rijit duvarlı ses yutucu malzeme	41
Şekil 4.8	Elektriksel analogi	42
Şekil 4.9	Normal akustik alanda; etki altında kalmayan rijit duvara dayalı birleşik süngerimsi malzeme	45
Şekil 4.10	Sınırları dahil olmak üzere süngerimsi malzeme ve havanın ince bir tabakası	46
Şekil 4.11	Rijit duvara dayalı bir lifli malzeme tabakası	54
Şekil 5.1	Süngerimsi malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu için kullanılan ana programın akış diyagramı	65
Şekil 5.2	Süngerimsi malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu sırasında kullanılan alt programın akış diyagramı	66
Şekil 5.3	Lifli malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu için kullanılan ana programın akış diyagramı (fun 22r.m)	67
Şekil 5.4	Lifli malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu sırasında kullanılan alt programın akış diyagramı (fun 22.m)	68
Şekil 5.5	Lifli malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu sırasında kullanılan ana programın akış diyagramı (fun 2r.m)	69
Şekil 5.6	Lifli malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu sırasında kullanılan alt programın akış diyagramı (fun 2.m)	70
Şekil 6.1	Gözenekli malzemenin akış empedansının ölçümü için deneysel düzenek	74
Şekil 6.2	Kesme modülünün ölçülmesi için kullanılan aparat	75
Şekil 6.3	Çeşitli modüllerin vektörel gösterilmesi	77
Şekil 6.4	Yapı şekil faktörünün ölçümü	78



Şekil 6.5	Empedans tüpü	83
Şekil 7.1	Süngerimsi malzemelerde yutma katsayıları	94
Şekil 7.2	Lifli malzemelerde yutma katsayıları	97
Şekil 7.3	Lifli malzemelerde yutma katsayıları	98
Şekil 7.4	Süngerimsi malzemelerin deneysel yutma katsayıları	100
Şekil 7.5	Lifli malzemelerin deneysel yutma katsayıları	101
Şekil 7.6	Sayısal ve deneysel yutma katsayılarının karşılaştırılması	105
Şekil 7.7	Sayısal ve deneysel yutma katsayılarının karşılaştırılması	106
Şekil 7.8	Sayısal ve deneysel yutma katsayılarının karşılaştırılması	107
Şekil 7.9	Sayısal ve deneysel yutma katsayılarının karşılaştırılması	108
Şekil 7.10	Sayısal ve deneysel yutma katsayılarının karşılaştırılması	109
Şekil 7.11	Sayısal ve deneysel yutma katsayılarının karşılaştırılması	110
Şekil 7.12	Sayısal ve deneysel yutma katsayılarının karşılaştırılması	111
Şekil 7.13	Sayısal ve deneysel yutma katsayılarının karşılaştırılması	112
Şekil 7.14	Sayısal ve deneysel yutma katsayılarının karşılaştırılması	113
Şekil 7.15	Süngerimsi malzemelerin optimizasyonu sonucunda elde edilen yutma katsayısı	115
Şekil 7.16	Lifli malzemelerin optimizasyonu sonucunda elde edilen yutma katsayısı	117
Şekil 7.17	Lifli malzemelerin optimizasyonu sonucunda elde edilen yutma katsayısı	118

ÇİZELGE LİSTESİ



Çizelge Numarası	Adı	Sayfa
Çizelge 4.1	Süngerimsi malzemelerin modellenmesinde kullanılan sabit parametreler	44
Çizelge 4.2	Süngerimsi malzemelerin deneysel parametreleri	44
Çizelge 4.3	Lifli malzemelerin modellenmesinde kullanılan sabit parametreler	53
Çizelge 4.4	Lifli malzemelerin deneysel parametreleri	53
Çizelge 6.1	Deneysel olarak belirlenen parametreler	71
Çizelge 7.1	Süngerimsi malzemelerin normalize edilmiş akış direnci verileri	85
Çizelge 7.2	Lifli malzemelerin normalize edilmiş akış direnci verileri	86
Çizelge 7.3	Deney düzeneğinde malzeme olmadığında elde edilen sonuçlar	86
Çizelge 7.4	Süngerimsi malzemelerin akış direnci verileri	87
Çizelge 7.5	Lifli malzemelerin akış direnci verileri	88
Çizelge 7.6	Malzeme olmadığında akış direnci verileri	88
Çizelge 7.7	Kesme modülü verileri	89
Çizelge 7.8	Süngerimsi malzemelerin gözeneklilik verileri	89
Çizelge 7.9	Lifli malzemelerin gözeneklilik verileri	89
Çizelge 7.10	Süngerimsi malzemelerin yoğunluk verileri	90
Çizelge 7.11	Lifli malzemelerin yoğunluk verileri	90
Çizelge 7.12	Doyurulmuş süngerimsi malzemelerin direnci	90
Çizelge 7.13	Doyurulmuş lifli malzemelerin direnci	91
Çizelge 7.14	Süngerimsi malzemelerin yapı şekil faktörü verileri	91
Çizelge 7.15	Lifli malzemelerin yapı şekil faktörü verileri	91
Çizelge 7.16	Süngerimsi malzemelerde sabit parametrelerin değeri	92
Çizelge 7.17	Süngerimsi malzemelerde deneysel parametrelerin referans değerleri	92
Çizelge 7.18	Süngerimsi malzemelerde deneysel parametrelerin ölçüm değerleri	93
Çizelge 7.19	Lifli malzemelerde sabit parametrelerin değerleri	95
Çizelge 7.20	Lifli malzemelerde deneysel parametrelerin referans değerleri	95
Çizelge 7.21	Lifli malzemelerde deneysel parametrelerin ölçüm değerleri	96
Çizelge 7.22	Süngerimsi malzemelerin yutma katsayılarının karşılaştırılması	102
Çizelge 7.23	Lifli malzemelerin yutma katsayılarının karşılaştırılması(alfa 3-98)	103
Çizelge 7.24	Lifli malzemelerin yutma katsayılarının karşılaştırılması(alfa 2298.m)	103



ÖNSÖZ

Öncelikle, araştırmam süresince yönlendirmeleri ve eleştirileriyle çalışmanın hedefini belirleyen sayın hocam Prof. Dr. Erdal EMEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarından faydalandığım U.Ü. Mühendislik Fakültesi teknisyenlerine, TOFAŞ A.Ş. otomobil fabrikasının "Akustik Laboratuvarı" çalışanlarına da ayrıca teşekkür ederim.

Tezin sayısal çözümlmelerinde yardımcı olan Y. Doç. Dr. Mustafa GÜNEŞ'e, yazımı sırasında ise yardımcı olan Arş. Gör. Ayhan ARIK ve Arş. Gör. Gülcan ZEYTİN'e ve yetişmemde emeği geçen tüm öğretim üyelerine teşekkürü borç bilirim.

Balıkesir

Hüray CAN



1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerle birlikte artan gürültü, her geçen gün biraz daha yaşamı zorlaştırmaktadır. Bir tür çevre kirliliği sayılan gürültü, önlem alınmazsa, uzun süreli devam ettiğinde insan sağlığı üzerinde kalıcı hasarlara neden olmaktadır. Gürültünün insanlar üzerindeki olumsuz etkilerini iki grupta inceleyebiliriz:

1. İşitme duyusuna yaptığı olumsuz etkiler
2. Bunun dışındaki fizyolojik ve psikolojik etkiler.

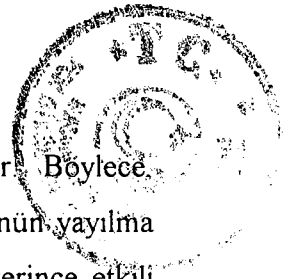
Gürültü, “istenmeyen, rahatsız edici ses” olarak tanımlandığı için, sağlığa zarar verecek düzeyde olmasa bile rahatsız edici özelliğinden dolayı yok edilmeli ya da azaltılmalıdır. Bu gürültünün rahatsız ediciliği, gürültünün

1. yüksekliğinden
2. cinsinden
3. değişkenliğinden

kaynaklanabilir. Gürültünün azaltılma gereği, genellikle, rahatsız etmesinin ötesinde sağlığa zararlı olmasından kaynaklanmaktadır. Gürültünün, çevresindekilere verdiği zararı engellemek amacıyla; gürültünün yaratıldığı ortamın özelliğine, çevredeki kişilerin gürültülü ortamda bulunma sürelerine ve koşullarına bağlı olarak, değişik gürültü düzeyleri sınır değer olarak belirlenmiştir. Belirlenen değerler çeşitli standartlarda belirtilmiş, bazı ülkelerde bu değerler kanun ya da tüzüklere girmişlerdir. Endüstride, çalışanların bulunduğu ortamlarda gürültü bu düzeylere indirilmelidir. Gürültüyü yok etmek ya da azaltmak olanaksızsa, gürültüden etkilenen kişileri her hangi bir şekilde gürültüden korumak gerekir.

Kişileri gürültüden korumak için alınabilecek önlemlerin tümüne gürültü kontrolü adı verilir. Gürültü kontrolü genel olarak üç şekilde sağlanabilir:

1. Gürültüyü kaynağında azaltmak.
2. Gürültüyü yayılma alanında (kaynakla alıcı arasındaki yolda) azaltmak.
3. Gürültünün algılandığı noktada (alıcıda) önlemler almak.



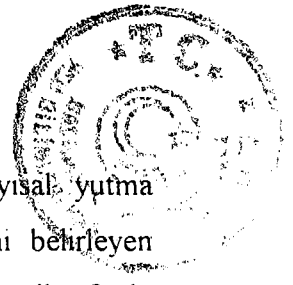
Temel kural, olanak varsa gürültünün kaynaktan azaltılmasıdır. Böylece, kaynağın gürültüsünden tüm çevre korunmuş olur. İkinci olarak gürültünün yayılma alanında azaltılması gelir. Her iki yolun da yarar sağlamadığı ya da yeterince etkili olmadığı durumlarda, kişisel koruyucular kullanılarak, gürültü algılandığı noktada(alıcıda) azaltılır.

Gürültüyü yayılma alanında(kaynakla alıcı arasındaki yolda) azaltılmasının bir çok yolu olmakla birlikte ilk önlemlerden biri ses yalıtımıdır. Bunun içinde öncelikle ses kaynağı ya da kaynaklarının belirlenerek uygun malzemeler ile yalıtımın sağlanması gerekir. Bu nedenle yalıtım malzemelerindeki akustik iletimin tanımlanabilmesi önem kazanmaktadır. Düzlemsel Akustik dalgalar, rijit duvarlar ile gözenekli malzemenin hava dolu gözeneklerinde yayılabilir. Malzemenin kalınlığı içinde ses yutma işlemi, dalga denklemi yardımı ile analiz edilebilir ve malzeme içindeki titreşimleri için uygulanabilir.

Malzemelerdeki ses enerji kayıpları “ses yutma katsayısı” (α) ile karakterize edilir. Böylece bir malzemenin yutma kapasitesi:

1. Belirli bir frekansta “yutma katsayısı”,
2. Ses dalgasının geliş açısına bağlı, olarak bulunur. Malzemenin yutma özelliklerini bulmak için; malzemenin normal akustik empedansını kullanmak çok daha uygundur. Akustik empedans; ses dalgalarına karşı gösterilen direnç olarak tanımlanabilir toplanabilir.

Bölüm 4’de açıklandığı gibi; bir veya birkaç akışkan tabakanın ses dalgasının normal gelişindeki empedans, eşdeğer akışkan tabaka gözenekli malzeme yerine konularak hesaplanır. Ayrıca; hava boşluklu ya da boşluksuz arkası rijit duvarlı bir gözenekli malzeme tabakası için yüzey empedansı bulunur. Daha sonra lifli ve süngerimsi malzemelerdeki empedans modelleri incelendikten sonra yutma katsayıları hesaplanır. Ayrıca empedansı etkileyen malzemelerin deneysel parametreleri hazırlanan deneysel düzeneklerde akustik ölçümleri bulunur ve literatürlerdeki değerler ile karşılaştırılır..



Bu çalışmada akustik yalıtım malzemelerinin deneysel ve sayısal yutma katsayıları bulunmuştur. Akustik malzemelerde ses yutma kapasitesini belirleyen “yutma katsayısı” malzemelerin çeşitli parametreleri dikkate alınarak iki mikrofona empedans tüp ile deneysel olarak ölçülmüştür. Daha sonra sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak malzemeler için en iyi yutma katsayısı hangi parametrelere bağlı olduğu ortaya çıkarılmış ve yeni akustik yalıtım malzemeleri geliştirilmeye çalışılmıştır.





2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kinsler ve Frey[1], basit harmonik hareket, çeşitli sistemlerin titreşim analizi, akustik düzlem dalgalar, küresel akustik dalgaların davranışı, sesin iletilmesi, tek ve üç boyutlu dalga denklemlerinin çözümü ve ses dalgalarının yutulmasını incelemiştir.

Beranek[2], dalga denklemlerinin tek ve üç boyutlu türetilmesi, dikdörtgen kesitli koordinatlarda dalga denkleminin oluşturulmasını belirtmiştir.

Pierce[11], ses yutma kapasitesinin; malzemenin yüzeyi üzerinde veya malzeme içinde ses enerjisindeki kayıplara neden olabileceğini ve ses yutma kapasitesinin malzemenin yapısına, yoğunluğuna, elastikiyetine ve diğer özelliklere bağlı olduğunu belirtmiştir. Ses yutma kapasitesi ve malzemenin fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiyi de ortaya koymuş ve malzemedeki enerji kayıplarını da şu şekilde gruplandırmıştır.

Malzemedeki enerji kayıpları:

1. Gözeneklerin duvarlarındaki sürtünme,
2. Malzemenin ısı iletkenliği,
3. Elementlerin birbirine benzemeyen deformasyonu,
4. Residual (Fazla, artık) deformasyon.

Bruneau[12], malzemenin gözenekleri içinde hava titreşirken gözenek duvarlarındaki parçacıkların sürtünmesinin daha önemli olduğunu, fazla sürtünmenin; malzemenin içine giren ses enerjisinin bir kısmının ısıya dönüşümü ile sonuçlanabileceğini ve sürtünmeden oluşan kayıpların akustik empedans terimlerinde ifade edilebileceğini belirtmiştir.

Gray[10], malzemenin gözenekleri içindeki havanın periyodik olarak ses dalgası etkisi altında sıkıştığını ve bu havanın ısınmasına neden olduğunu, ısının gözeneklerin duvarlarına iletildiğini ve basıncın azaldığını vurgulamıştır. Bu nedenle, basıncın, bu indirgenmesinden dolayı ses enerjisi kaybolur. Bununla birlikte bazı



kayıplar ortamın viskozitesi ve ısı iletkenliğinden dolayı sonuçlanır ki bu değerler ses titreşimlerinin frekansı ile değişebilir. Malzemelerdeki ses enerji kayıpları ses yutma katsayısı (α) ile karakterize edilir. Malzemenin yutma kapasitesi çeşitli parametrelere bağlılık gösterir. Bu nedenle, yutma katsayısı şu şekilde gruplandırılır:

1. Belirli bir frekansta yutma katsayısı (α),
2. Yutma katsayısının frekansa olan bağlılığı,
3. Ses dalgasının geliş açısına olan bağlılığıdır.

Yutma katsayısı; açıya bağlı ve açı ($\theta=0^\circ$) olduğunda belirlenmiştir. Bu ifadeler; spesifik akustik empedanslı bir malzemenin yüzeyine θ açısında gelen düzlem ses dalgası göz önüne alınarak yapılmıştır. Ayrıca; malzeme üzerine gelen ve yansıyan dalganın toplam ses basıncı geçen (iletlen) dalganın basıncı ile dengelenmiştir. Bir düzlem dalga için; ses basıncı; parçacık hızı ve akustik empedansının çarpımı olarak ifade edilerek ($P=V.Z$) denklemlerde kullanılmıştır.

Malzemenin yüzeyine ses dalgası belirli bir açıda geldiğinde yutma katsayısı (α):

$$\alpha_\theta = 1 - \frac{(c_1\rho_1 - c_0\rho_0)^2 \cos^2 \theta}{(c_1\rho_1 \cos\theta + c_0\rho_0)^2} \quad (2.1)$$

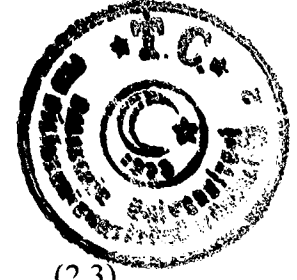
$\theta=0$ olduğunda;

$$\alpha_\perp = 1 - \left(\frac{c_1\rho_1 - c_0\rho_0}{c_1\rho_1 + c_0\rho_0} \right)^2 \quad (2.2)$$

$Z_1=c_1\rho_1$ =Malzemenin empedansı

$Z_0=c_0\rho_0$ =Havanın empedansı

Stinson[17], yutma katsayısı, ses dalgasının geliş açısına bağlı olduğundan dolayı sabit olamayacağını belirtmiştir. Bununla birlikte; ses yutma katsayısını belirli bir katsayı ile vermiştir. Bu katsayı; gelen dalganın tüm açıları olduğu zaman elde edilir. Bu; diffuse ses yutma katsayısı olarak adlandırmıştır.



Diffuse ses yutma katsayısı:

$$\alpha = \int_0^{\pi/2} \alpha_{\theta} \sin 2\theta d\theta \quad (2.3)$$

Diffuse alan için yutma katsayısı; formül (2.3)'den bulunabilir. Bu durumda; yutma katsayısı, malzemenin fiziksel özellikleri ile bulunur ve malzemenin akustik karakteristiği belirlenmiş olur.

Fakat; ses alanı; diffuse değilde kapalı (çevrilmiş) bir alan ise; Morse ve Bolt[9], Polack[15], yapmış olduğu deneysel çalışmalarında göstermiştir ki; çevrilmiş (kapatılmış) sınırlanan yüzeylerin akustik özelliklerini malzemenin normal akustik empedansı olarak bilinen ifadeyle hesaplamak daha uygundur.

Akustik empedans; ses basıncı ile hava parçacıklarının normal hız bileşeni arasındaki orandır. Basınç ve hız malzemenin yüzeyinde ölçülebilir. Akustik empedans iki kısımdan oluşur: aktif bileşen (R), gözenek duvarlarındaki parçacıkların sürtünme empedansıdır. Reaktans bileşen X ise; ses dalgasını etkisi ile titreşen malzemenin atalet empedansıdır. Bir malzemenin akustik empedansı şu şekilde yazılabilir:

$$Z = R + j X \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'ü kullanarak tekrar ses yutma katsayılarını yazabiliriz.

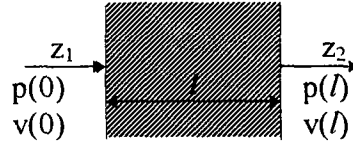
$$\alpha_{\perp} = 1 - \left| \frac{(R + jX) - c_0 \rho_0}{(R + jX) + c_0 \rho_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{(R - c_0 \rho_0) + jX}{(R + c_0 \rho_0) + jX} \right|^2 \quad (2.5)$$

$$\alpha_{\theta} = 1 - \left| \frac{[(R + jX) - c_0 \rho_0] \cos \theta}{(R + jX) \cos \theta + c_0 \rho_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{[R - c_0 \rho_0 + jX] \cos \theta}{(R \cos \theta + c_0 \rho_0) + jX \cos \theta} \right|^2 \quad (2.6)$$



Craggs[16], Mankovsky[3], Attenborough[18], gözenekli malzemelerde ses yutma katsayısı için, çoğunlukla akustik empedans vasıtasıyla ifade edileceğini belirtmişlerdir.

Düzlemsel dalga, rijit duvarlar ile gözenekli malzemenin hava dolu gözeneklerinde yayılabilir. Malzemenin kalınlığı içinde enerji yutma işlemi, dalga denklemi yardımıyla analiz edilebilir ve malzeme içindeki havanın titreşimleri için uygulanabilir. Rijit iskeletli gözenekli malzemelerde genel akustik empedans ifadesi şu şekildedir:



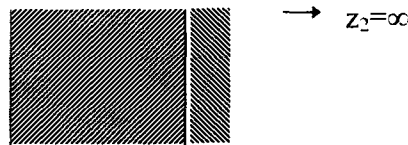
Şekil 2.1 Gözenekli malzemelerde akustik empedans

$$z_1 = z \frac{z_2 \cosh b\ell + z \sinh b\ell}{z_2 \sinh b\ell + z \cosh b\ell} \quad (2.7)$$

ℓ = Malzemenin kalınlığı,

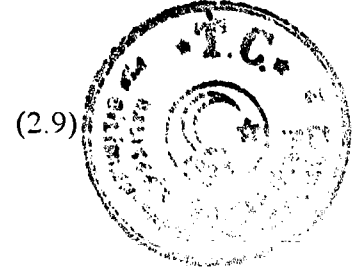
b = Yayınım sabiti.

Sert bir duvarla desteklenen bir yutma malzemesinin empedansı şu şekildedir:



Şekil 2.2 Sert bir duvarla desteklenen malzemenin empedansı

$$z_1 = z \coth b\ell \quad (2.8)$$



$$z_1 = \frac{K}{\phi} \sqrt{\rho_0 + \frac{R\phi}{j\omega K}} \coth j\omega \ell \sqrt{\rho_0 + \frac{R\phi}{j\omega K}} \quad (2.9)$$

Gözenekli malzemenin yutma kabiliyeti:

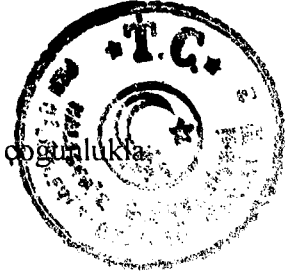
- ϕ gözeneklilik artışı ile artar,
- Ses frekansının artışı ile artar,
- R direncindeki bir artış ile azalır,
- k (yapısal katsayı)'nın artışı ile azalır,
- Malzemenin kalınlığında azalma, z (empedans)'daki artış ve α (yutma katsayısı)'nda bir azalmaya sebep olur,
- Malzeme ve duvar arasındaki hava boşluğu düşük frekansta yutmayı artırır,
- Yutma katsayısı (α) her zaman akustik empedansın azalışı ile artar.

Ingard ve Dear[4], lifli ve süngerimsi malzemelerde; sesin etkilenmesinin büyük ölçüde malzemenin akış direnci ile belirleneceğini belirterek akış direncinin ölçüm metodunu sunmuştur.

Allard ve çalışma arkadaşları(ç.a),[5], Brüel ve Kjaer[6], süngerimsi malzemelerde kesme modülünün ölçümü ve serbest alanda normal yüzey empedansının hesaplanmasını yapmış, ayrıca deneysel çalışmalarda elde edilen verilerin uygulanması için, kesme modülünün teorik olarak bulunmasını sağlamıştır.

Nicolas ve Berry[20], akustik empedans kavramının ses yutma alanında kullanmışlardır. Bir veya birkaç tabakalı akışkanın normal gelişteki empedansı hesaplanmıştır.

Delany ve Bazley[9], denk(eşdeğer) akışkan tabakasının yerine geçen gözenekli malzeme kullanır. Hava boşluklu yada hava boşluğu olmayan arkası rijit duvarlı gözenekli malzeme için normal gelişteki yüzey empedansı hesaplanmıştır. Kompleks dalga sayısı (k) ve karakteristik empedans (z_c) gözeneklilik (porosity) 1'e yakın durumda birçok lifli malzemelerde geniş frekans aralıkları için



Delany ve Bazley[9] tarafından ölçülmüştür. Bu ölçümlere göre k ve z_c çoğunlukla açısal frekansa (ω) ve malzemenin akış direncine (σ) bağlıdır.

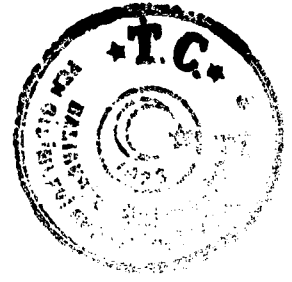
Burke[19], çeşitli kesit-alan şekillerine sahip silindirik tüplerdeki ses yayılımının basit modellemesini yapmıştır. Bu model, silindirik gözenekli malzemelerin akustik özelliklerinin bulunmasında kullanılmıştır.

Zwikker ve Kosten[13] yapmış olduğu çalışmada, termik ve viskoz etkilerin ayrı ayrı ele alındığı basitleştirilmiş model kullanmış ve dairesel kesit alanı için çalışmıştır.

Mechel[23], Bu modelin yarıklarda ve dairesel kesit alanına sahip silindirik tüplerdeki viskozite etkilerini tanımlamak için kullanılabileceğini belirtmiştir. Viskoz etkiler ile ilişkide olan termal etkiler Stinson tarafından çalışılmıştır[17]. Efektif yoğunluk sonlu elemanlar metodu kullanılarak Craggs ve Hildebrandt tarafından hesaplanmıştır [14]. Bu hesaplama, yarıklar, dairesel kesit alanına sahip silindirik tüpler için yapılmıştır. Johnson ve arkadaşları; silindirik gözenekli malzemeler için sınırlamadan; gözeneklerdeki akışkanın efektif yoğunluğunun eşitliği için bir model çalışmışlardır [7].

Brüel ve Kjaer[8], iki mikrofona empedans ölçüm tüpünü akustik yutma katsayısı, akustik yansıtma katsayısı ve normal empedans ölçümlerinde kullanmıştır. Böylelikle lifli ve süngerimsi malzemelerin frekansa bağlı yutma katsayıları belirlenebilir.

Burke[19], gözenekli malzemelerin akustik özellikleri ve rijit gözenekli malzemede empedansın bulunması çeşitli parametreler yardımıyla elde etmiştir. Son otuz yıldır Biot modeli geniş bir şekilde uygulanmıştır[5]. Bu makalede Biot teorisinden elde edilen basitleştirilmiş denklemler, ses yutucu malzemelerin akustik özelliklerini tahmin etmek için kullanılan süreklilik denklemleri ile karşılaştırılmış ve ayrıca yüksek gözenekli, açık-hücreli elastik süngerimsi malzemelerde yutma katsayısının teorik ve deneysel olarak incelenmesi sunulmuştur.



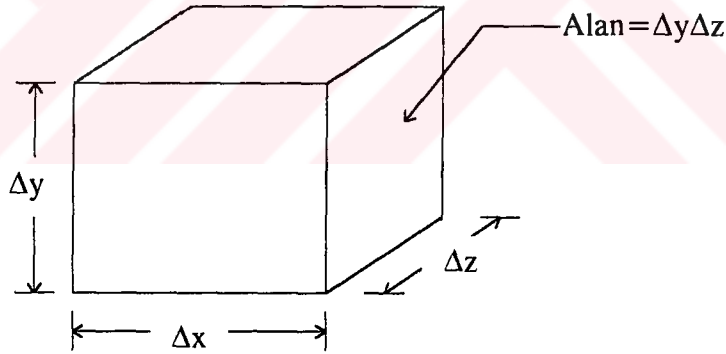
3. AKUSTİK TEORİSİ

3.1 Giriş

Dalga hareketinin en basit tipi olan düzlem dalgalar, akışkan ortam içinde yayılır. Uniform bir akışkan ortam içinde düzlem dalgalarının yayımını modelleyen dalga denklemini türetmek mümkündür. Türetilmiş olan “genel akustik dalga denklemi” sadece düzlem dalgalar için geçerli değil aynı zamanda çeşitli dalga tipleri içinde geçerlidir [1].

3.2 Genel Akustik Dalga Denklemi

İlk önce; Newton’un ikinci hareket kanunu, gaz kanunu ve kütle korunumu kanunları tanıtılacak, daha sonra dalga denklemini türetmek için bu kanunlar kullanılacaktır.



Şekil 3.1 Gaz ortamda sonsuz küçüklükte bir hacim elemanı

Şekil 3.1’ de ses basıncı; $\frac{\partial p}{\partial x}$ oranında soldan sağa artar. (veya, vektör olarak, grad p).



3.3 Dalga Denkleminin Türetilmesi

3.3.1 Hareket Kanunu

3.3.1.1 Tek Boyutlu Hareket Denklemi

Eğer; homojen bir ortamda belirtilen küçük gaz hacmi için Newton'un ikinci kanununu yazarsak "hareket denklemini" veya bazen kuvvet denklemi olarak adlandırılan denklemi elde ederiz. Küçük gaz hacminin ağırlıksız sabit kenarlı bir kutuda hapsedildiği farzedilir. $\frac{\partial p}{\partial x}$ oranında soldan sağa artan ses basıncı olan bir ortama "kutu" yerleştirilir (Şekil 3.1). Kutunun kenarları tamamen sürtünmesiz kabul edilir. Kutu içindeki ve dışındaki gaz parçacıkları arasındaki viskoz sürtünme ihmal edilir. Böylece; hapsedilmiş gaz üzerine etki eden kuvvetler, kutunun yüzeylerindeki basınçlara uygundur. Küçük gaz kutunun iki kenarı üzerine etki eden kuvvetler arasındaki fark; uzaklık ile kutu boyutunun çarpımına eşittir..

Pozitif x yönünde küçük gaz hacmine etki eden kuvvet:

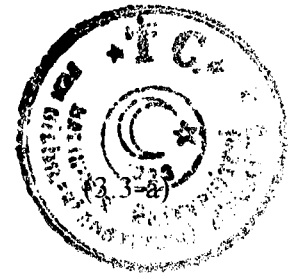
$$f = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z \quad (3.1-a)$$

Pozitif gradyan; negatif x yönünde kutunun hareketlenmesine sebep olur.

Denklem üzerindeki her iki tarafın $\Delta x \Delta y \Delta z = V$ ile bölünmesi kutuyu hızlandırmak için etki eden birim hacim başına düşen kuvveti verir.

$$\frac{f}{V} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.2-a)$$

Newton'un kanunu ile, birim hacim başına düşen kuvvet (f / V) kutunun birim hacim başına düşen momentumun zamanla değişim oranına eşit olmalıdır. Kutunun şekli değişebilir bu yüzden gaz kütlesi her zaman sabittir.



$$\frac{f}{V} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{M}{V} \frac{\partial u}{\partial t} = \rho' \frac{\partial u}{\partial t}$$

$u = x$ yönünde kutudaki gazın ortalama hızı

$\rho' =$ Kutudaki gazın ortalama anlık yoğunluğu

$M = \rho'V$ Kutudaki gazın toplam kütlesi

Eğer; ses dalgası için gazın yoğunluğundaki değişim yeterince küçük ise o zaman anlık yoğunluk (ρ') yaklaşık olarak ortalama yoğunluğa (ρ_0)'a eşittir.

Tek boyutlu hareket denklemi;

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.4-a)$$

3.3.1.2 Üç Boyutlu Hareket Denklemi

Kutunun, grad $p = i \frac{\partial p}{\partial x} + j \frac{\partial p}{\partial y} + k \frac{\partial p}{\partial z}$ oranında değişen ses basıncının olduğu

bir ortama konulduğu farzedilir (Şekil 3.2). Burada;

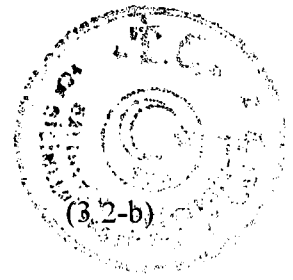
$i, j, k = x, y, z$ yönlerindeki birim vektörler

$p =$ Bir noktadaki basınçtır.

Pozitif yönde kutuyu hareket ettirmek için etki eden kuvvet :

$$= - \left[i \left(\frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z + j \left(\frac{\partial p}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x \Delta z + k \left(\frac{\partial p}{\partial z} \Delta z \right) \Delta x \Delta y \right] \quad (3.1-b)$$

Her iki kenarın $\Delta x \Delta y \Delta z = V$ ile bölünmesi kutuyu hareketlendirmek için etki eden birim hacim başına düşen kuvveti verir.



$$\frac{f}{V} = -\text{grad } p$$

$$\frac{f}{V} = -\text{grad } p = \frac{M}{V} \frac{Dq}{Dt} = \rho' \frac{Dq}{Dt}$$

(3.3-b)

q = Kutudaki gazın ortalama hız vektörü

ρ' = Kutudaki gazın ortalama yoğunluğu

$M = \rho' V$ Kutudaki gazın toplam kütlesi

$\frac{D}{Dt}$ = Parçacık hızının toplam değişim oranı

$$\frac{Dq}{Dt} = \frac{\partial q}{\partial t} + q_x \frac{\partial q}{\partial x} + q_y \frac{\partial q}{\partial y} + q_z \frac{\partial q}{\partial z}$$

q_x, q_y, q_z = Parçacık hız vektör bileşenleridir.

Eğer; parçacık hız vektörü yeterince küçük ise kutudaki parçacıkların momentum değişim oranı yaklaşık olarak sabit noktada momentumun değişim oranına eşit olabilir.

$$\frac{Dq}{Dt} = \frac{\partial q}{\partial t}$$

Ayrıca; anlık yoğunluk (ρ') yaklaşık olarak ortalama yoğunluğa (ρ_0)' a eşit olabilir.

$$-\text{grad } p = \rho_0 \frac{\partial q}{\partial t} \quad (3.4-b)$$

3.3.2 Gaz Denklemi

Eğer kutunun içindeki gaz ideal gaz farzedilirse, "Charles - Boyles gaz kanunu" kutuya uygulanır.

Charles - Boyles gaz kanunu:

$$PV = RT \quad (3.5)$$

P = Kutudaki toplam basınç



$$V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \text{ Hacim}$$

T = Kelvin (°K) derecesindeki mutlak sıcaklık

R = Gaz kütlesine bağlı gaz sabitidir.

Bu denklemi kullanarak ses basıncı ve kutunun hacmindeki artan değişim arasındaki ilişki bulunabilir. Bu ilişki tayin edilmeden önce, P (basınç) ve V (hacim) değişimleri ile T sıcaklığının nasıl değiştiği, olayın ya adyabatik ya da izotermal olduğunun bilinmesi gerekir.

Adyabatik genişleme için, toplam basınç ve hacim arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$PV^\gamma = \text{sabit} \quad (3.6)$$

γ = Gaz için; sabit basınçtaki spesifik ısının, sabit hacimdeki gazın spesifik ısısına oranıdır.

Bu denklem; adyabatik şartlar altında (3.5) denklemi şeklinde gaz kanundan elde edilir. Hava, hidrojen, nitrojen ve oksijen gibi iki atomlu moleküllü gazlar için:

$$\gamma = 1.4 \text{ d\u00fcr.}$$

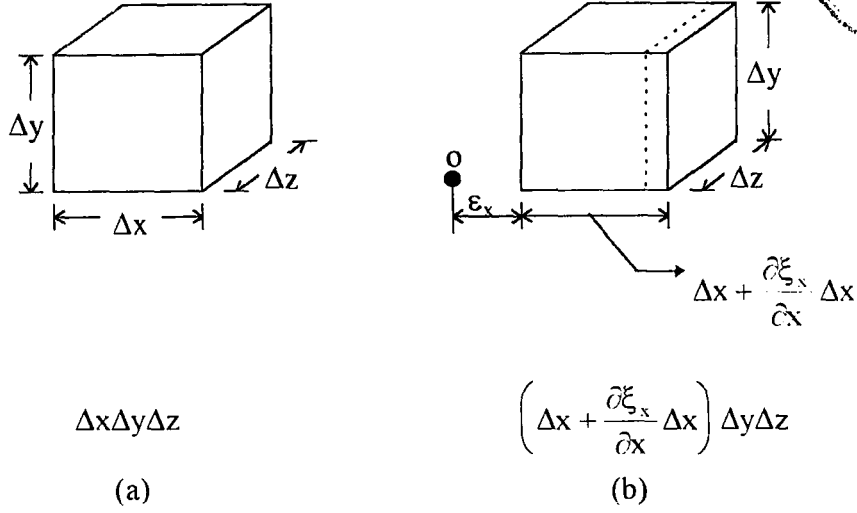
Ses dalgası nedeni ile, basınç ve hacim artışını bulmak için (3.6) denklemi diferansiyel şeklinde şu şekilde yazılır:

$$\frac{dp}{p} = \frac{-\gamma dv}{v} \quad (3.7)$$

$$P = P_o + p \quad V = V_o + \tau \quad (3.8)$$

P_o, V_o = Rahatsız edilmemiş basınç ve hacim

p, τ = ses dalgası nedeni ile basınç ve hacim artışı



Şekil 3.2 Pozisyondaki değişim ile kutunun hacmindeki değişim [2]

$P \ll P_0$ ve $\tau \ll V_0$ şartları göz önüne alınarak:

$$\frac{P}{P_0} = -\frac{\gamma \tau}{V_0} \quad (3.9)$$

Bu denklemin zamana göre türevi alınarak “gaz denklemi” elde edilir:

$$\frac{1}{P_0} \frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{\gamma}{V_0} \frac{\partial \tau}{\partial t} \quad (3.10)$$

3.3.3 Süreklilik Denklemi (Kütlenin Korunumu Kanunu)

Süreklilik denklemi, deforme edilebilir kutudaki toplam gaz kütlesinin sabit kalmasını söyleyen matematiksel ifadedir. Kütlenin korunumu kanundan dolayı, kutunun yüzeylerindeki hız artışlarının zamanla değişim oranı arasında tek bir denklem yazılabilir [2].



3.3.3.1 Tek Boyutlu Süreklilik Denklemi

Eğer kutunun içinde sabit kalan gaz kütlesi ise; hacmindeki (τ) değişim sadece kutunun karşılıklı kenarları üzerinde hava parçacıklarının deplasman farkına bağlıdır. Kutunun herhangi bir kenarına bitişik hava parçacıkları kutuyu kendi kendine aynı hızda hareket ettirmedikçe bazısı kutunun içine bazısı da dışına geçecektir ve kütlenin iç yüzeyi değişecektir.

Kutunun sol tarafındaki hava parçacıkları verilen zaman aralığında ξ_x yer değiştirilecektir(Şekil 3.2). Aynı zamanda hava parçacıkları sağ taraftan

$$\xi_x + \frac{\partial \xi_x}{\partial x} \Delta x \quad \text{yer değiştirecektir.}$$

$\Delta y \Delta z$ alanı ile çarpılmış iki büyüklüğün farkı τ hacmindeki artışı verir:

$$\tau = \frac{\partial \xi_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.11-a)$$

veya

$$\tau = V_0 \frac{\partial \xi_x}{\partial x} \quad (3.12)$$

Tek boyutlu süreklilik (kütlenin korunumu) kanunu:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = V_0 \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.13-a)$$

u =anlık parçacık hızı

3.3.3.2 Üç Boyutlu Süreklilik Denklemi

Eğer kutu içindeki gaz kütlesi sabit kalırsa; artan hacimdeki (τ) değişim sadece vektör deplasmanının diverjansına bağlıdır. Kutunun herhangi bir kenarına bitişik



hava parçacıkları kutu kenarı kendi kendine aynı hızda hareket etmedikçe bazıları kutunun içine bazıları da dışına geçecektir ve kütlelerin iç yüzeyi değişecektir. Bu yüzden:

$$\tau = V_0 \operatorname{div} \xi \quad (3.11-b)$$

(3.11-b) denklemin zamana göre diferansiyeli alındığında üç boyutlu süreklilik (kütlelerin korunumu) kanunu elde edilir:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = V_0 \operatorname{div} q \quad (3.13-b)$$

q = anlık parçacık hızı

3.3.4 Kartezyen Koordinatlarda Dalga Denklemi

3.3.4.1 Tek Boyutlu Dalga Denklemi

Tek boyutlu dalga denklemi; hareket denklemi (3.4-a), gaz denklemi (3.10) ve süreklilik denkleminin (3.13-a) birleşiminden elde edilir.

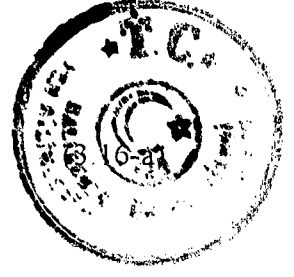
Gaz denklemi (3.10) ve süreklilik denkleminin (3.13-a) birleşiminden aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\gamma P_0 \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.14-a)$$

(3.14-a) denkleminin t 'ye göre diferansiyeli alınırsa:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\gamma P_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} \quad (3.15-a)$$

Hareket denklemi (3.4-a)'nın x 'e göre diferansiyeli alınırsa:



$$-\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \rho_o \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$$

(3.15-a) ve (3.16-a) denklemlerinin birleşiminden şu denklemi elde ederiz:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{\rho_o}{\gamma P_o} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (3.18-a)$$

$$c^2 = \frac{\gamma P_o}{\rho_o} \quad (3.19)$$

c = Ortamdaki ses dalgasının yayılım hızı

Tek boyutlu dalga denklemi :

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (3.20-a)$$

P'nin yerine u konularak dalga denklemi şu hale gelecektir :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

3.3.4.2 Üç Boyutlu Dalga Denklemi

Üç boyutlu dalga denklemi; hareket denklemi (3.4-b), gaz denklemi (3.10) ve süreklilik denkleminin (3.13-b) birleşiminden elde edilir. (3.10) ve (3.13-b) denklemlerinin birleşiminden aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\gamma P_o \text{div } q \quad (3.14-b)$$

(3.14-b)'nin t'ye göre diferansiyeli alınırsa:



$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\gamma P_0 \operatorname{div} \mathbf{q} \frac{\partial q}{\partial t}$$

Denklem (3.4-b)'nin her iki tarafının diverjansı alınırsa:

$$-\operatorname{div}(\operatorname{grad} p) = \rho_0 \operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} \quad (3.16-b)$$

(grad p) = $\nabla^2 p$ yazılırsa;

$$-\nabla^2 p = \rho_0 \operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} \quad (3.17)$$

∇^2 = Laplace operatörü

(3.15-b) ve (3.17) denklemlerinin birleşiminden aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\nabla^2 p = \frac{\rho_0}{\gamma P_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.18-b)$$

$$c^2 = \frac{\gamma P_0}{\rho_0} \quad (3.19)$$

Üç boyutlu dalga denklemini elde ederiz:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.20-b)$$

Kartezyen koordinatlarda:

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (3.21)$$

P'nin yerine q konularak "üç boyutlu dalga denklemi" ni elde ederiz:



$$\nabla^2 q = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2}$$

Burada;

$$\nabla^2 q = \text{grad} (\text{div } q) \text{ 'dur.}$$

Akustik düzlem dalga, rijit duvarlar ile gözenekli bir malzemenin hava dolu gözeneklerinde yayılabilir. Malzemenin kalınlığı içinde ses yutma işlemi, dalga denklemleri yardımı ile analiz edilebilir ve malzeme içindeki havanın titreşimleri için uygulanabilir [3].

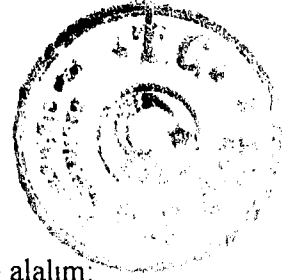
Akustik yalıtım malzemelerindeki yutma katsayısı, 4.Bölüm'de açıklandığı gibi empedans modelleri kurularak bulunur. Bu nedenle, α yutma katsayısı ve z akustik empedans terimlerinden kısaca aşağıda bahsedilmiştir.

3.4 Yutma Katsayısı (α)

Malzemelerdeki ses enerji kayıpları "ses yutma katsayısı" (α) ile karakterize edilir. Böylece bir malzemenin yutma kapasitesi:

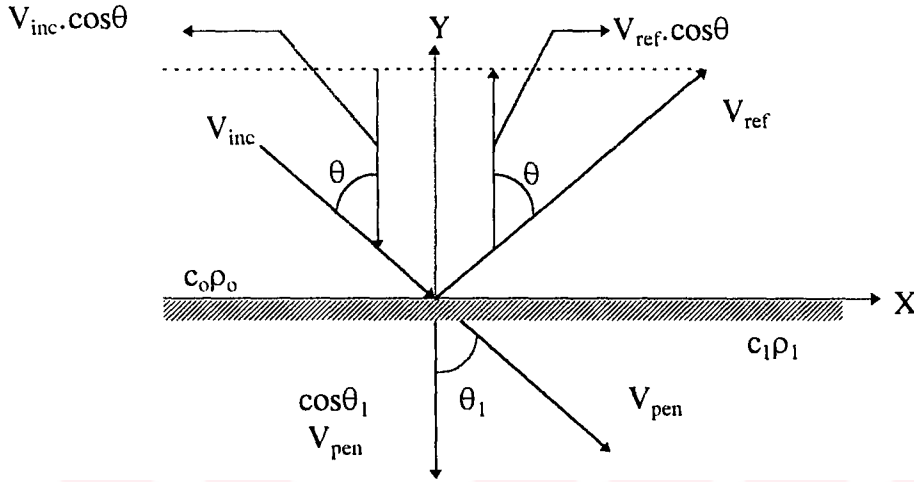
1. Belirli bir frekansta "yutma katsayısı" ,
2. Ses dalgasının geliş açısına bağlı,

olarak bulunur.



3.4.1 Geliş Açısına Bağlı Yutma Katsayısı

Malzeme üzerine θ açısı ile gelen düzlem ses dalgasını göz önüne alalım:



Şekil 3.3 θ açısında gelen bir dalga için parçacık hızının normal bileşenleri [3]

İki ortam arasındaki sınırdaki gelen ve yansıyan dalgaların toplam ses basıncı transfer (geçen) olan ses basıncı ile dengelenir.

$$P_{inc} + P_{ref} = P_{tr} \quad (3.23)$$

$V_{inc} \cdot \cos\theta$ = Gelen ses dalgasının parçacık hızının dikey bileşeni

$V_{ref} \cdot \cos\theta$ = Yansıyan ses dalgasının parçacık hızının dikey bileşeni

$V_{tr} \cdot \cos\theta$ = Transfer olan (geçen) ses dalgasının parçacık hızının dikey bileşeni

İlk ve üçüncü bileşen aynı yönde diğer ikinci bileşen ise ters yöndedir. Bu nedenle; dengeleme şartı şu şekilde ifade edilir:

$$V_{inc} \cdot \cos\theta - V_{ref} \cdot \cos\theta = V_{tr} \cdot \cos\theta_1$$

Burada; V_{ref} yalnız bırakılırsa denklem şu şekilde gelecektir:



$$V_{ref} = \frac{V_{inc} \cdot \cos\theta - V_{tr} \cdot \cos\theta_1}{\cos\theta}$$

Düzlem dalga ses basıncı [3];

$$P = V \cdot z \text{ 'dir.}$$

V = Parçacık hızı

z = Dalga empedansı ($z = \rho c$)

Denklem (3.23) tekrar yazıldığında;

$$V_{inc} c_o \rho_o + V_{ref} c_o \rho_o = V_{tr} c_1 \rho_1 \quad (3.25)$$

Denklem (3.24), denklem (3.25)'de yerine konulursa aşağıdaki denklemi elde ederiz:

$$V_{inc} c_o \rho_o + \frac{V_{inc} \cos\theta - V_{tr} \cos\theta}{\cos\theta} c_o \rho_o = V_{tr} c_1 \rho_1 \quad (3.26)$$

Tekrar düzenlendiğinde denklem (3.26) şöyle yazılabilir:

$$2V_{inc} c_o \rho_o \cos\theta = V_{tr} (c_1 \rho_1 \cos\theta + c_o \rho_o \cos\theta_1) \quad (3.27)$$

Denklem (3.26) ile (3.27) birbirleriyle bölündüğünde parçacık hızlarının oranını $\left(\frac{V_{tr}}{V_{inc}}\right)$ buluruz:

$$\frac{V_{tr}}{V_{inc}} = \frac{2c_o \rho_o \cos\theta}{c_1 \rho_1 \cos\theta + c_o \rho_o \cos\theta_1} \quad (3.28)$$

Geliş açısı (θ) ile bir ses dalgası için yutma katsayısı şöyle yazılabilir:

$$\alpha_\theta = \frac{I_{tr}}{I_{inc}} = \frac{V_{tr}^2 c_1 \rho_1}{V_{inc}^2 c_o \rho_o} = \frac{4c_o \rho_o c_1 \rho_1 \cos^2 \theta}{(c_1 \rho_1 \cos\theta + c_o \rho_o \cos\theta_1)^2} \quad (3.29)$$



Eğer ses dalgasının yutucu malzemenin kalınlığı boyunca yayıldığı farzedilirse; $\theta_1 = 0$ olur. Bu durumda denklem şu şekilde gelecektir:

$$\alpha_{\theta} = \frac{4c_o\rho_o c_1\rho_1 \cos^2 \theta}{(c_1\rho_1 \cos\theta + c_o\rho_o)^2} \quad (3.30)$$

(3.30) ifadesi yeniden düzenlendiğinde geliş açısına bağlı “yutma katsayısı” şu şekilde elde edilir:

$$\alpha_{\theta} = 1 - \frac{(c_1\rho_1 - c_o\rho_o)^2 \cos^2 \theta}{(c_1\rho_1 \cos\theta + c_o\rho_o)^2} \quad (3.31)$$

Son olarak; $\theta = 0$ ise yani ses dalgası malzeme yüzeyine dik doğrultuda gelirse “yutma katsayısı” şu şekildedir:

$$\alpha_{\perp} = \frac{4c_o\rho_o c_1\rho_1}{(c_1\rho_1 + c_o\rho_o)^2} \quad (3.32)$$

$$\alpha_{\perp} = 1 - \left(\frac{c_1\rho_1 - c_o\rho_o}{c_1\rho_1 + c_o\rho_o} \right)^2 \quad (3.33)$$

$z_1 = c_1\rho_1$ (Malzemenin empedansı)

$z_o = c_o\rho_o$ (Havanın empedansı)

c = Ses hızı [m/s]

ρ = Yoğunluk [kg/m^3]

3.5 Empedans (z)

Yutma katsayısı (α); yoğunlukla akustik empedans vasıtasıyla ifade edilir. Akustik empedans; ses dalgalarına karşı gösterilen direnç olarak tanımlanabilir ve iki başlık altında toplanabilir:



1. Akustik empedans
2. Spesifik Akustik empedans

3.5.1 Akustik Empedans

Malzemenin yutma özelliklerini bulmak için; malzemenin normal akustik empedansını kullanmak çok daha uygundur. Empedans; ses basıncı ile hava parçacıklarının normal hız bileşeni arasındaki oran olarak tanımlanır.

$$\text{Empedans } (z) = \frac{\text{Basınç}}{\text{Hız}} = \frac{p}{u} = \frac{[N/m^2]}{[m/s]} \quad (3.34)$$

Hava parçacıkları gözenekler boyunca ya da malzemenin titreşimleri ile birlikte hareket ederek dalganın hareketine neden olur. Bundan dolayı; akustik empedans iki kısımdan oluşur:

$$Z = R + j X \quad (3.35)$$

R = Bir ses ortamının akustik direnci; akustik empedansın gerçel bileşenidir.

Gözenek duvarlarına karşı hava parçacıkların sürtünme empedansı olarak tanımladığı gibi enerjinin dağılması olarak da tanımlanabilir.

X = Bir ses ortamının akustik reaktans; akustik empedansın sanal kısmıdır.

Ses dalgasının hareketi ile titreşim durumunda meydana gelen malzemenin atalet empedansıdır. Ayrıca, akustik reaktans ortamın elastikiyet ve efektif külesinden meydana gelir.



3.5.2 Spesifik Akustik Empedans

Spesifik akustik empedans şu şekilde tanımlanır:

$$Z_s = \frac{p}{u} = \rho_o c \text{ mks rayls} \quad (3.36)$$

Serbest olarak hareket eden bir düzlem dalgada; spesifik akustik empedans yalnızca gerçeldir ve ortamın (gazın) ortalama yoğunluğu ile ses hızının çarpımıdır. Bu büyüklük; gazın (ortamın) karakteristik empedansı olarak adlandırılır. Çünkü yalnızca gazın (ortamın) özelliklerine bağlıdır.

$$Z = \rho_o c \quad (3.37)$$

ρ_o = Ortamın ortalama yoğunluğu [kg/m^3]

c = Ortamda sesin yayılma hızı [m/s]



4. EMPEDANS MODELLERİ

4.1 Giriş

Akustik yalıtım malzemesi olarak kullanılmış lifli ve süngerimsi malzemelerin akustik empedans modelleri kurularak yutma katsayıları bulunmuştur. Bu bölümde; bir veya birkaç akışkan tabakanın ses dalgasının normal gelişindeki empedans, eşdeğer akışkan tabaka gözenekli malzeme yerine konularak hesaplanır. Ayrıca; hava boşluklu ya da boşluksuz arkası rijit duvarlı bir gözenekli malzeme tabakası için yüzey empedansı bulunur [9]. Daha sonra; gözenekli malzemelerdeki empedans modelleri incelendikten sonra yutma katsayıları hesaplanır.

4.2 Sınırsız Akışkanlardaki Düzlem Dalgalar

Dalga denklemi; (3.22-b) denkleminde verildiği gibi şu şekildedir[10]:

$$\nabla^2 q = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \quad (3.22-b)$$

Burada notasyon değişikliği yaparak dalga denklemini tekrar yazabiliriz:

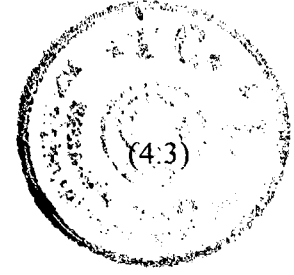
$$\nabla^2 \varphi = \rho \frac{\partial^2 \varphi}{K \partial t^2} \quad (4.1)$$

$q = \varphi$ (Yer değiştirme potansiyeli)

$$c = (K/\rho)^{1/2} \text{ dir.} \quad (4.2)$$

$K =$ Hacim modülü

(4.1) Dalga denkleminin çözümü; (4.3) denklemi ile verilmiştir:



$$\varphi(x, t) = \frac{A}{\rho\omega^2} \cos[\omega(t - x/c) + \alpha] \quad (4.3)$$

Burada;

ρ = Akışkanın yoğunluğu

α = x orijinine ve zamana bağlı olan faz

A = Akustik basıncın amplitüdü

ω = Açısal frekans ($\omega = 2\pi f$)

c = Yayınım hızı

\mathbf{r} = Yer değiştirme vektörü ($\mathbf{r} = \nabla\varphi$)

Akustik basınç (p) ve yerdeğiştirme vektörü bileşenleri (\mathbf{r}) sırasıyla şöyledir[11]:

$$\theta = \nabla r$$

$$p = -K\theta = -K\nabla^2\varphi \quad (4.4)$$

(4.1) denkleminde, p ve θ denklemlerini kullanarak p akustik basınç elde edilir:

$$p = -\rho \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} \quad (4.5)$$

$$p = -\rho \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = p(x, t) = \cos[\omega(t - x/c) + \alpha] \quad (4.6)$$

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2 = 0 \quad (\mathbf{r}_1 = \frac{\partial\varphi}{\partial x_1}, \mathbf{r}_2 = \frac{\partial\varphi}{\partial x_2}, \mathbf{r}_3 = \frac{\partial\varphi}{\partial x_3}) \quad (4.7)$$

$$\mathbf{r}_3 = \frac{\partial\varphi}{\partial x} = \mathbf{r}_3(x, t) = \frac{A}{\rho c \omega} \sin[\omega(t - x/c) + \alpha] \quad (4.8)$$

Yalnızca hızın üçüncü bileşeni (v_3) sıfıra eşit değildir:



$$v_3(x, t) = \frac{A}{\rho c} \cos[\omega(t - x/c) + \alpha] \quad (4.9)$$

Dalga sayısı, k şöyle ifade edilir:

$$k = \omega / c \quad (4.10)$$

Denklemler (4.6) ve (4.9) x yönü boyunca hareket eden harmonik düzlem dalga yayılımını ifade eder[12].

4.2.1 Kompleks Notasyon

Denklemler (4.3) ve (4.6); kompleks notasyonda şu şekilde yazılabilir[13]:

$$\varphi(x, t) = \frac{a}{\rho \omega^2} \exp[j(-kx + \omega t)] \quad (4.11)$$

$$p(x, t) = a \exp[j(-kx + \omega t)] \quad (4.12)$$

Bu denklemlerde;

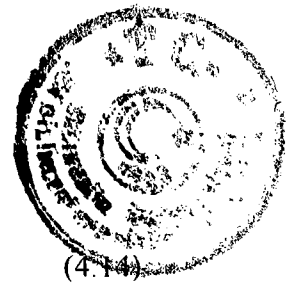
$$j^2 = -1$$

$A \exp(j\alpha) = a'$ dir.

Hız bileşeni aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$v(x, t) = \frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \varphi(x, t) = \frac{a}{\rho c} \exp[j(-kx + \omega t)] \quad (4.13)$$

Basınç ile hız arasındaki bağlantı şöyledir:



$$v(x, t) = \frac{1}{Z_c} p(x, t)$$

Akışkanın karakteristik empedansı (Z_c):

$$Z_c = (\rho K)^{1/2} \text{ dir.} \quad (4.15)$$

Dalga sayısı (k) ve karakteristik empedans (Z_c) kompleks ifade olarak aşağıdaki denklemler halinde yazılabilir[14].

$$\left. \begin{aligned} k &= \text{Re}(k) + j \text{Im}(k) \\ Z_c &= \text{Re}(Z_c) + j \text{Im}(Z_c) \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

Negatif doğrultuda yayınan bir dalga için basınç ve hız ifadeleri şöyledir:[15]

$$p'(x, t) = a' \exp[j(kx + \omega t)] \quad (4.17)$$

$$v'(x, t) = -a'/Z_c \exp[j(kx + \omega t)] \quad (4.18)$$

Eğer, iki dalganın akustik alanda süperpozisyonu (4.12); (4.13), (4.17)ve (4.18) denklemleri ile tanımlanırsa; toplam basınç (p_T), toplam hız (v_T) şu şekilde bulunur[16]:

$$p_T(x, t) = a \exp[j(-kx + \omega t)] + a' \exp[j(kx + \omega t)] \quad (4.19)$$

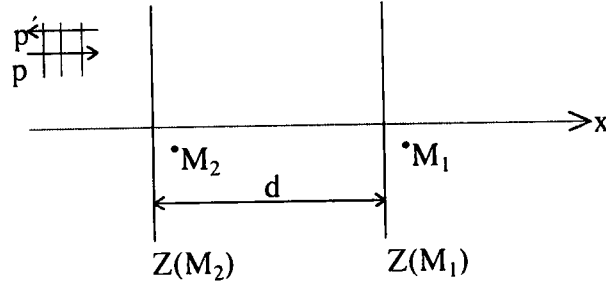
$$v_T(x, t) = a/Z_c \exp[j(-kx + \omega t)] - a'/Z_c \exp[j(kx + \omega t)] \quad (4.20)$$

$\frac{p_T(x, t)}{v_T(x, t)}$ oranı x konumundaki empedans olarak adlandırılır.



4.3 Empedansın Belirli Özellikleri

4.3.1 Bir Yayınım Doğrultusu Boyunca Empedans Değişimi



Şekil 4.1 Hem zıt yönde hem de x yönünde yayılan düzlem dalgalar [17]

Şekil 4.1’de x yönüne paralel ve zıt yönlerde iki dalga gösterilmiştir. M_1 noktasındaki empedans $Z(M_1)$ olarak bilinir. Denklemler (4.19) ve (4.20) ‘yi kullanarak ($Z(M_1)$) empedansını yazabiliriz[18].

$$Z(M_1) = \frac{p_r(x, t)}{v_r(x, t)} = Z_c \frac{a \exp[-jkx(M_1)] + a' \exp[jkx(M_1)]}{a \exp[-jkx(M_1)] + a' \exp[jkx(M_1)]} \quad (4.21)$$

M_2 noktasındaki empedans $Z(M_2)$ şu şekilde bulunur:

$$Z(M_2) = Z_c \frac{a \exp[-jkx(M_2)] + a' \exp[jkx(M_2)]}{a \exp[-jkx(M_2)] + a' \exp[jkx(M_2)]} \quad (4.22)$$

Denklem (4.21) düzenlenerek aşağıdaki denklem oluşturulur:

$$\frac{a}{a'} = \frac{Z(M_1) - Z_c}{Z(M_1) + Z_c} \exp[-2jkx(M_1)] \quad (4.23)$$

(4.22) ve (4.23) denklemlerini kullanarak sonuçta $Z(M_2)$ elde edilir:

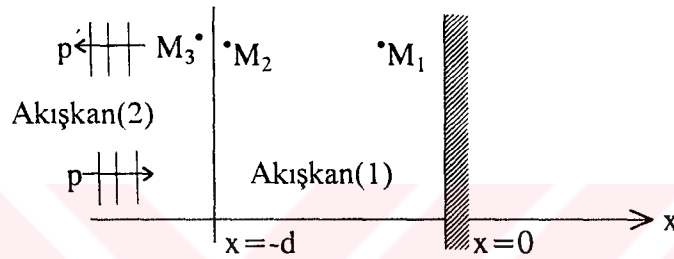


$$Z(M_2) = Z_c \frac{-jZ(M_1) \cotg kd + Z_c}{Z(M_1) - jZ_c \cotg kd}$$

d uzaklığı ise şu şekilde hesaplanır:

$$d = x(M_1) - x(M_2)$$

4.3.2 Arkası Rijit Duvarlı Bir Akışkan Tabakanın Empedansı



Şekil 4.2 Arka yüzü rijit duvarlı diğer yüzü akışkan(2) ile temas halinde olan bir akışkan tabaka

M_2 ve M_3 noktaları; 1 ve 2 nolu akışkanların sınırlarında; akışkan(2)'deki M_3 , akışkan(1)'deki M_2 olarak ifade edilir.(1) nolu akışkan tabakasının yüzeyindeki M_2 empedansı denklem (4.24)'den bulunur[20].

$$Z(M_2) = -jZ_c \cotg kd \quad (4.25)$$

Z_c = Akışkan(1)'in karakteristik empedansı

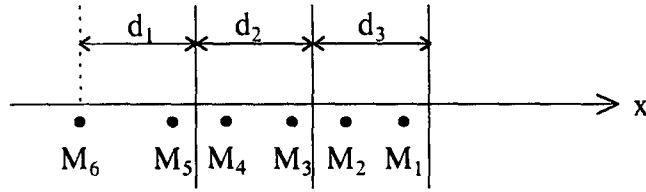
k = Akışkan(1)'deki dalga sayısı

Sınırdaki basınç ve hız süreklidir. Hız ve basınçlar aynı olduğundan M_3 'teki empedans M_2 'deki empedansa eşittir.

$$Z(M_3) = Z(M_2) \quad (4.26)$$



4.3.3 Çok Tabakalı Bir Akışkanın Empedansı



Şekil 4.3 Çok tabakalı akışkan [21]

Eğer $Z(M_1)$ empedansı biliniyor ise; akışkan (1) içindeki $Z(M_2)$ empedansı denklem (4.24)'den elde edilir. $Z(M_3)$ empedansı M_2 'deki empedansa eşittir. M_4 , M_5 , ve M_6 'daki empedans sırasıyla aynı yolla bulunabilir.

4.4 Normal Gelişteki Yutma Katsayısı ve Yansıma Katsayısı

4.4.1 Yansıma Katsayısı

Tabakanın yüzeyindeki yansıma katsayısı; tabakanın yüzeyine gelen ve yansıyan dalgaların meydana getirmiş olduğu p' ve p basınçlarının oranıdır. Örneğin; Şekil 4.2'de M_3 noktasındaki yansıma katsayısı $R(M_3)$ şu şekilde bulunur:

$$R(M_3) = p'(M_3, t) / p(M_3, t) \quad (4.27)$$

Denklem (4.23)'yi kullanarak M_3 noktasındaki yansıma katsayısı tekrar yazılabilir:

$$R(M_3) = (Z(M_3) - Z_c') / (Z(M_3) + Z_c') \quad (4.28)$$

Z_c' : Akışkan(2)'deki karakteristik empedanstır.

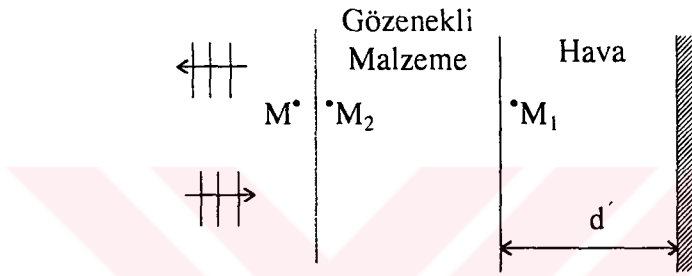


4.4.2 Yutma Katsayısı(α)

M noktasındaki yutma katsayısı $\alpha(M)$; yansımaya katsayısı kullanılarak elde edilir.

$$\alpha(M) = 1 - |R(M)|^2 \quad (4.29)$$

4.5 Gözenekli Malzemenin Empedansı



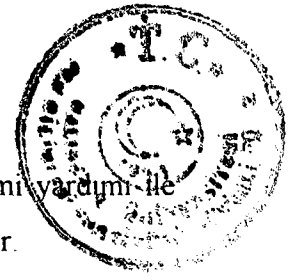
Şekil 4.4 Malzeme ve rijit duvar arasında hava boşluklu gözenekli malzeme tabakası [22]

$Z(M)$ 'in genel hesaplama metodu bölüm 4.3.3'te verilmiştir. Yüzey empedansı $Z(M)$; hava boşluğu empedansı $Z(M_1)$ iken, (4.24) denklemi kullanılarak elde edilir.

Gözenekli malzemenin empedansı $Z(M_2)$ (4.24) denklemi ile hesaplanırken; c_0 sesin havada yayılma hızı, ρ_0 havanın yoğunluğu ve (4.2), (4.15), (4.10) denklemleri göz önüne alınır.

4.6 Gözenekli Malzemeler Tarafından Sesin Yutulması

Yutma katsayısı; 3 Bölümde bahsedildiği gibi çoğunlukla akustik empedans vasıtasıyla ifade edilir. Homojen gözenekli bir malzemenin empedansı, malzemenin temel parametrelerine dayanarak aşağıdaki denklemler yardımı ile çözülür.



Malzemenin kalınlığı içinde enerji yutma işlemi, dalga denklemi yardımı ile analiz edilebilir ve malzeme içindeki havanın titreşimleri için uygulanabilir.

Dalga denklemini bulmak için; parçacık hızı v , ortamın yoğunluğu ρ ve ses basıncı p değişimlerini ifade eden süreklilik, durum ve hareket denklemlerini çözülmesi gerekir. Serbest hava için hareket denklemi şu şekildedir:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4.30)$$

Gözenekli bir malzemede havanın hacmi; serbest (atmosferik) havanınkinden

$\frac{V_{\text{malzeme}}}{V_{\text{gözenek}}}$ kez daha küçüktür ve bu yüzden (4.30)'daki sabitteki $\frac{\partial v}{\partial x}$ değerini muhafaza

etmek için, sağ tarafı $\frac{V_{\text{malzeme}}}{V_{\text{gözenek}}}$ ile bölmek zorundayız.

Bu durumda hareket denklemi şu şekli alır:

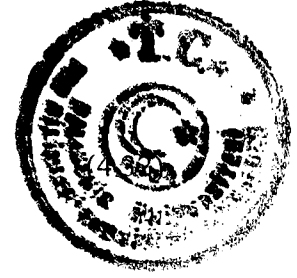
$$-\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\phi}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4.31)$$

$$\phi = \frac{V_{\text{gözenek}}}{V_{\text{malzeme}}} \quad (\text{Gözeneklilik})$$

V_{malzeme} = Malzemenin hacmi

$V_{\text{gözenek}}$ = Malzemenin gözeneklerindeki havanın hacmi

İskeletin malzemesi ile çok hızlı bir şekilde herhangi bir ısı transferi meydana gelen gözeneklerde hacim deformasyonunu göz önüne alacağız[23]. Bu şartlar altında serbest hava için durum denklemi şöyle yazılabilir:



$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$K = \rho_0 \frac{\partial p}{\partial p}$$

(4.33)

Daha genel olarak $\frac{\partial p}{\partial p}$ ile ifade edilen elastikiyet katsayısı kompleks bir değerdir ve şu şekilde ifade edilir:

$$K = K_1 e^{j\phi} = K_1 (\cos\phi - j\sin\phi) = K_1 \cos\phi (1 - j\tan\phi) \quad (4.34)$$

ϕ = Basınç ve yoğunluk arasındaki faz farkı.

Gözeneklerdeki hava için hareket denklemi; serbest hava için belirtilen denklemden farklı olduğu gibi ortamın yoğunluğu $\frac{k}{\phi}$ kez daha büyük bir değere sahiptir. Yoğunluktaki gözle görülür artış malzemenin yapısal sabiti k gerçeği ile bağıntılıdır. k; gözeneklerin düzenine, şekline ve boyutlarına bağlıdır. Bu gözle görülür yoğunluk artışları (gözeneklilik ile) hareket denklemi üzerinde göz önüne alınacaktır.

(3.4-a) denklemi ile verilen hareket denklemini elde ederken, gözeneklerin duvarlarında havanın sürtünme kuvveti hesabına yer verilmelidir.

Havanın sürtünme kuvveti = R. υ

R = Empedansın resistive bileşeni

υ = Hava parçacıklarının hızı'dır.

Böylece; gözeneklerdeki υ havanın hızı için denklem şu şekildedir:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{k}{\phi} \rho_0 \frac{\partial \upsilon}{\partial t} + R\upsilon \quad (4.35)$$



(3.20-a) denklemi ile verilen dalga denklemini elde etmek için denklemler (4.31) ve (4.33) 'u birlikte çözmek gerekir [24]. (4.31) denkleminin sağ tarafını

ile çarpalım ve (4.33) denkleminde türetilen $\frac{\partial p}{\partial x}$ değeri yerine konur.

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\phi}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{veya} \quad -\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\phi}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4.36)$$

$$\frac{k\rho_0}{\phi} + \frac{R}{j\omega} = \rho \quad (4.37)$$

(4.35) hareket denklemi tekrar düzenlenerek şu şekilde yazılır:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (4.38)$$

(4.36) ve (4.38) denklemlerinin ilk önce t'ye daha sonra x'e göre diferansiyeli alınır:

$$-\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} = \frac{\phi}{K} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4.39)$$

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial x} \quad (4.40)$$

(4.39) denklemindeki $\frac{\partial^2 v}{\partial t \partial x}$ değeri (4.40) denkleminde yerine yazılır.

Böylece; rijit iskeletli gözenekli malzemedeki ses yayını denklemini elde ederiz:

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\phi}{K} \rho \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4.41)$$

Bu denklemin çözümü:



$$p(x,t) = (A_1 e^{-bx} + A_2 e^{bx}) e^{j\omega t}$$

(4.42) denkleminin t'ye göre diferansiyeli alındığında aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -j\omega (A_1 e^{-bx} + A_2 e^{bx}) e^{j\omega t} = -j\omega p(x,t) \quad (4.43)$$

$\frac{\partial p}{\partial t}$ değeri, (4.36) denkleminde yerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{\partial v}{\partial x} = j\omega \frac{\phi}{K} (A_1 e^{-bx} + A_2 e^{bx}) e^{j\omega t}$$

Bu denklemden parçacık hızı v elde edilir:

$$v = j\omega \frac{\phi}{K} e^{j\omega t} \int_x (A_1 e^{-bx} + A_2 e^{bx}) dx = \frac{j\omega\phi}{Kb} e^{j\omega t} (A_1 e^{-bx} - A_2 e^{bx}) \quad (4.44)$$

Sonuç olarak; basınç (p) ve parçacık hızı (v) elde edilir:

$$p(x) = A_1 e^{-bx} + A_2 e^{bx}, \quad (4.45)$$

$$v(x) = 1/Z (A_1 e^{-bx} - A_2 e^{bx}) \quad (4.46)$$

Buradan Z (empedans) şu şekilde yazılır:

$$Z = \frac{Kb}{j\omega\phi}$$

b = yayınım sabiti

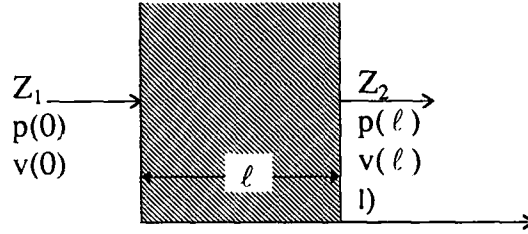
Z = Ortamın dalga empedansı



$$b^2 = \frac{\phi}{K} \rho \omega^2 \quad \text{veya} \quad b = \pm j\omega \sqrt{\frac{\phi}{K} \rho} \quad (4.47)$$

Empedans (Z) denkleminde (b) ifadesi yerine konulursa şu denklem elde edilir:

$$Z = \frac{bK}{j\omega\phi} = \frac{K}{j\omega\phi} j\omega \sqrt{\frac{\phi}{K} \rho} = \sqrt{\frac{K}{\phi} \rho} \quad (4.48)$$



Şekil 4.5 ℓ kalınlığındaki malzemenin empedansı [25]

Z_1 ve Z_2 noktalarındaki empedans değerleri:

$$Z_1 = \frac{p(0)}{v(0)} \quad \text{ve} \quad Z_2 = \frac{p(\ell)}{v(\ell)} \quad (4.49)$$

(4.45) ve (4.46) denklemlerinden basınç ve hız ifadelerini elde ederiz:

$x = 0$ noktasında;

$$p(0) = A_1 + A_2$$

$$v(0) = 1/Z (A_1 - A_2)$$

$$Z_1 = \frac{p(0)}{v(0)} = Z \frac{A_1 + A_2}{A_1 - A_2} \quad (4.50)$$

$x = \ell$ noktasında;

$$p(\ell) = A_1 e^{-b\ell} + A_2 e^{b\ell}$$

$$v(\ell) = 1/Z (A_1 e^{-b\ell} - A_2 e^{b\ell})$$



İntegral sabitleri A_1 ve A_2 şu şekilde yazılır:

$$A_1 = \frac{p(\ell) + v(\ell)Z}{2} e^{b\ell} \quad \text{ve} \quad A_2 = \frac{p(\ell) - Zv(\ell)}{2} e^{-b\ell} \quad (4.51)$$

A_1 ve A_2 değerleri denklem (4.50) denkleminde yerine konulursa "akustik empedans" elde edilir:

$$Z_1 = Z \frac{p(\ell)(e^{b\ell} + e^{-b\ell}) + Zv(\ell)(e^{b\ell} - e^{-b\ell})}{p(\ell)(e^{b\ell} - e^{-b\ell}) + Zv(\ell)(e^{b\ell} + e^{-b\ell})} \quad (4.52)$$

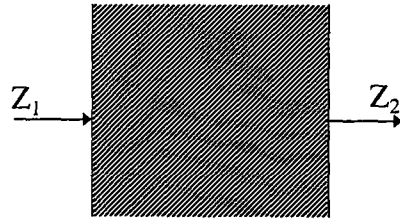
Sonuç olarak; akustik empedansın hiperbolik fonksiyon olarak ifadesi şu şekildedir:

$$Z_1 = Z \frac{Z_2 \cosh b\ell + Z \sinh b\ell}{Z_2 \sinh b\ell + Z \cosh b\ell} \quad (4.53)$$

4.7 Çeşitli Empedans Modelleri

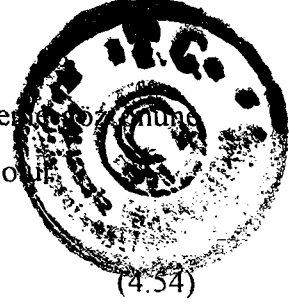
Genel akustik empedans ifadesini kullanarak; pratikte geniş bir şekilde kullanılan birkaç durum için akustik empedans değerleri elde edilebilir[26].

4.7.1 $Z_2 = Z$ Durumu



Şekil 4.6 Son derece kalın ses yutucu malzeme[3].

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi son derece kalın ses yutucu malzeme kullanıldığında; malzemeye giriş akustik empedans dalga empedansına eşit olur.



$$Z_1 = Z$$

(4.54)

(4.37) ve (4.48) denklemleri hesaba katılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$Z_1 = \sqrt{\frac{K}{\phi}} \rho = \sqrt{\frac{K}{\phi} \left(\frac{k}{\phi} \rho_0 + \frac{R}{j\omega} \right)}$$

(4.55)

(4.42) denkleminde; $b = \infty$ ise $A_1=0$ olur. (4.45) denkleminde:

$$p(x) = A_2 e^{bx} = A_2 e^{(\delta+j\gamma)x} \text{ ise;}$$

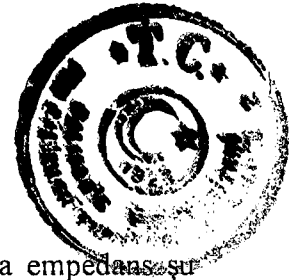
(4.56)

b =kompleks bir sayıdır. (Yayınım sabiti)

Eğer $x=0$ ise, $A_2=p(0)$ olduğundan (4.45) denklemi şu şekilde olacaktır:

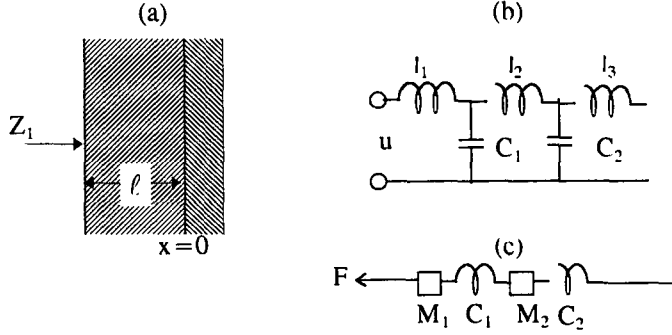
$$p(x) = p(0) e^{(\delta+j\gamma)x}$$

Yayınım sabiti b 'nin gerçel kısmı, ses basıncının faz değişimidir.



4.7.2 $Z_2 = \infty$ Durumu

Arkası rijit duvarlı ses yutucu malzeme göz önüne alındığında empedans şu şekildedir:



Şekil 4.7 (a) rijit duvarlı ses yutucu malzeme [3]
(b) Elektriksel analogi
(c) Mekaniksel analogi

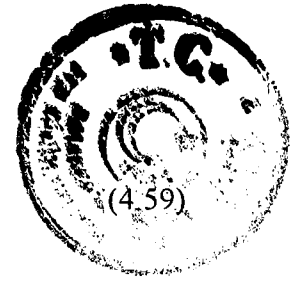
(4.53) denkleminde $Z_2 = \infty$ alındığında Z_1 empedansı şu şekilde olacaktır.

$$Z_1 = Z \coth b \ell \quad (4.57)$$

(4.47) ve (4.48) denklemleri ile verilen b ve Z ifadeleri yerine konulursa (4.57) denklemi şu şekilde olacaktır.

$$Z_1 = \sqrt{\frac{K}{\phi}} \rho \coth j\omega \ell \sqrt{\frac{K}{\phi}} \rho \quad (4.58)$$

(4.37) denklemi ile verilen ρ değeri yerine konur ve sadeleştirilirse Z_1 empedans değeri elde edilir.



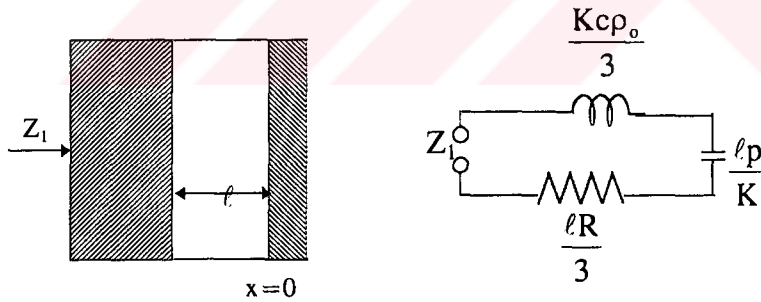
$$Z_1 = \frac{K}{\phi} \sqrt{\left(\rho_0 + \frac{R\phi}{j\omega K}\right)} \coth j\omega \ell \sqrt{\left(\rho_0 + \frac{R\phi}{j\omega K}\right)} \quad (4.59)$$

4.7.3 $Z_2=0$ Durumu

Rijit duvardan $\ell = \frac{\lambda}{4}$ uzaklıkta yerleştirilen malzeme gözönüne alındığında empedans şu şekilde bulunur:

(4.57) denkleminde gösterilen hava tabakasının kalınlığı (4.60) denklemi ile bulunmuştur. Eğer, (4.56) denkleminde belirtilen havadaki sesin azalması ($\delta=0$) ise; $b=jy$ elde edilir.

$$Z_{air} = Z \coth b\ell = Z \coth jy\ell = Z \coth j \frac{\omega}{c_0} \frac{\lambda}{4} = 0 \quad (4.60)$$



Şekil 4.8 Elektriksel Analoji

Akustik empedansın $z_2 = z$, $z_2 = \infty$ ve $z_2 = 0$ durumları incelenmiştir. Akustik empedans ile ifade edilen yutma katsayısı, her zaman akustik empedansın azalması ile artar. Bu nedenle, gözenekli bir malzemenin yutma kapasitesinin hangi parametrelere bağlı olduğu elde edilen (4.55),(4.59) ve (4.60) denklemleri ile



belirlenir. Yutma katsayısını etkileyen malzeme parametrelerinin etkileri şu şekilde verilebilir:

1. ϕ gözeneklilikteki artış, R resistance ve k yapısal sabitteki düşüş ile yutma katsayısı artar.
2. l malzeme kalınlığındaki azalma ile yutma katsayısı azalır.
3. ω ses frekansının artışı ile yutma katsayısı artar.
4. Rijit duvar ve malzeme arasındaki hava boşluğunun varlığı, yutma katsayısının artışına neden olur.





4.8 Süngerimsi Malzemelerin Empedans Modeli

Süngerimsi malzemeler izotropik malzemelerdir. Yani; farklı yönlerde, yapısal özellikleri değişkenlik göstermez [29]. Süngerimsi malzemelerin modellenmesinde kullanılan parametreler, sabit ve deneysel ölçümü yapılan değerler olmak üzere iki grupta toplanır. Parametrelerin deneysel ölçümleri Bölüm 6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Süngerimsi malzemelerin modellenmesinde kullanılan sabit parametreler

Parametreler	Semboller	Birimi
Havanın yoğunluğu	ρ_0	kg/m ³
Ses hızı (havada)	c_0	m/s
($\gamma=c_p/c_v$)	γ	—
Ses basıncı	p_0	Pa
Havanın viskozitesi	η	poise
Prandtl sayısı	B^2	—
Poisson oranı	ν	—

Çizelge 4.2 Süngerimsi malzemelerin deneysel parametreleri

Parametreler	Semboller	Birimi
Akış direnci	σ	Ns/m ⁴
Kesme modülü	N	N/m ²
Yapı şekil faktörü	α_x	—
Gözeneklilik	ϕ	—
İskelet yoğunluğu	ρ_1	kg/m ³

4.9 Süngerimsi Malzemenin Yüzey Empedansının Belirlenmesi

Akustik alanda; süngerimsi (gözenekli) malzeme Şekil 4.9' da gösterilmiştir. Rijit duvar ile malzeme arasındaki yüzeyde basit sınır şartlarını elde etmek için, süngerimsi (gözenekli) malzeme rijit duvara birleştirilir. Akustik alanda; kesme dalga (shear wave) harekete geçmez, yalnızca malzemede sıkıştırılmış dalgalar yayılır. Normal akustik alanda süngerimsi (gözenekli) malzemenin davranışını tahmin etmek için "Biot teorisi" kullanılır[7]. Malzemenin davranışını belirtmek için kullanılan parametre yüzey empedansıdır. Akustik alanın tanımı ve ölçümleri; ses dalgasının



malzemeye eğik (açık) gelme durumunda karışıktır. Bu nedenle; modelleme ses dalgasının malzemeye dik (normal) yönde gelişi göz önüne alınarak yapılır.

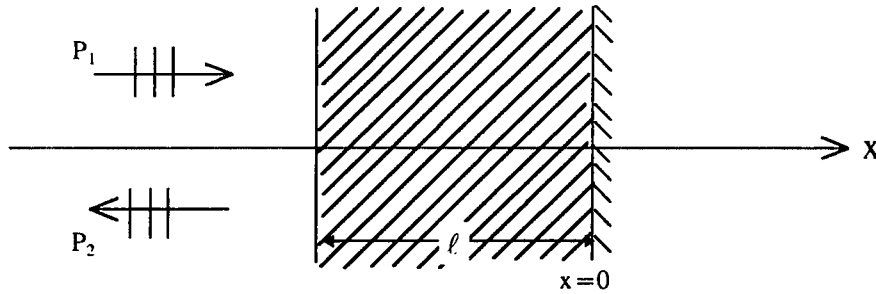
4.10 Ses Dalgasının Malzemeye Dik Yönde Gelme Durumunda Yüzey Empedansının Tahmini[28]

Malzemeye dik (normal) doğrultuda gelen ve yansıyan iki basınç dalgasının X doğrultusunda paralel olarak yayıldığı varsayalım. Malzeme içindeki hava ve yapısal iskeletin parçacık hızları sırasıyla şu şekildedir:

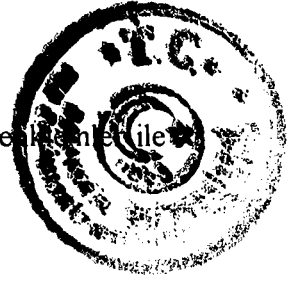
$$v^s(x) = V_i^1 \exp(-j\delta_1 x) + V_r^1 \exp(j\delta_1 x) + V_i^2 \exp(-j\delta_2 x) + V_r^2 \exp(j\delta_2 x) \quad (4.61)$$

$$v^f(x) = \mu_1 [V_i^1 \exp(-j\delta_1 x) + V_r^1 \exp(j\delta_1 x)] + \mu_2 [V_i^2 \exp(-j\delta_2 x) + V_r^2 \exp(j\delta_2 x)] \quad (4.62)$$

Bu denklemlerde; zaman bağımlılığı $\exp(j\omega t)$, yok edilmiştir. δ_1 ve δ_2 (4.89) (4.90) denklemleri ile; μ_1 ve μ_2 (4.93) denklemi ile verilmiştir. V_i^1 , V_r^1 , V_i^2 ve V_r^2 $x=0$ 'da malzeme iskeletinin hızlarıdır[28].



Şekil.4.9 Akustik Alanda; etki altında kalmayan (su vs. geçirmez.) rijit duvara dayalı birleşik süngerimsi (gözenekli) malzeme



Malzemedeki hava ve yapısal iskelete ait gerilmeler aşağıdaki denklemlerle verilmiştir:

$$\sigma_{xx}^s(x) = -Z_1^s [V_1^1 \exp(-j\delta_1 x) - V_1^1 \exp(j\delta_1 x)] - Z_2^s [V_1^2 \exp(-j\delta_2 x) - V_1^2 \exp(j\delta_2 x)] \quad (4.63)$$

$$\sigma_{xx}^f(x) = -\phi Z_1^f \mu_1 [V_1^1 \exp(-j\delta_1 x) - V_1^1 \exp(j\delta_1 x)] - \phi Z_2^f \mu_2 [V_1^2 \exp(-j\delta_2 x) - V_1^2 \exp(j\delta_2 x)] \quad (4.64)$$

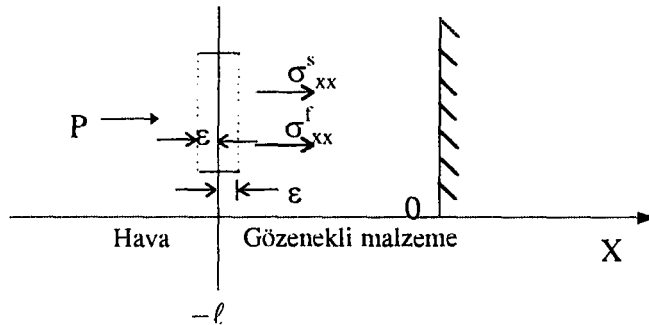
$x=0$ noktasında rijit duvar ve süngerimsi malzeme temas halinde iken, hızlar sıfıra eşittir.

$$v^s(0) = v^f(0) = 0 \quad (4.65)$$

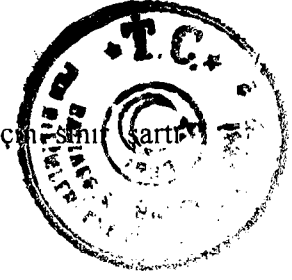
$x = -l$ 'de gözenekli malzeme serbest hava ile temas halindedir. Sınırları dahil olan gözenekli bir malzeme ve havanın ince bir tabakası şekil 4.10'da verilmiştir. Sağ tarafta iskelet ve hava üzerine etki eden gerilmeler, $\sigma_{xx}^s(-l + \epsilon)$ ve $\sigma_{xx}^f(-l + \epsilon)$ iken ince tabakanın sol tarafındaki hava basıncı $p(-l - \epsilon)$ ile gösterilir[28].

Gözenekli malzeme üzerine etki eden toplam kuvvet (ΔF), (4.66) denklemi ile verilir:

$$\Delta F = p(-l - \epsilon) + \sigma_{xx}^s(-l + \epsilon) + \sigma_{xx}^f(-l + \epsilon) \quad (4.66)$$



Şekil.4.10 Sınırları dahil olmak üzere süngerimsi (gözenekli) malzeme ve havanın ince bir tabakası



(4.66) denklemi ile verilen bu kuvvette; ε sıfır ve gerilme için sınır şartı $x = -\ell$ olduğunda denklem:

$$p(-\ell) + \sigma_{xx}^s(-\ell) + \sigma_{xx}^f(-\ell) = 0 \quad (4.67)$$

Diğer sınır şartı; basınç sürekliliğinden türetilir ve şu şekilde ifade edilir:

$$\sigma_{xx}^f(-\ell) = -\phi p(-\ell) \quad (4.68)$$

ϕ : malzemenin gözenekliliğidir.

(4.67) ve (4.68) denklemlerinin kullanımı sonucunda (4.68) denklemi şu hale gelir:

$$\sigma_{xx}^s(-\ell) = -(1-\phi)p(-\ell) \quad (4.69)$$

$x = \ell$ düzleminin başından sonuna kadar iskelet ve hava hacminin korunmasıyla hız ifadeleri şu şekilde yazılabilir:

$$\phi v^f(-\ell) + (1-\phi)v^s(-\ell) = v^a(-\ell) \quad (4.70)$$

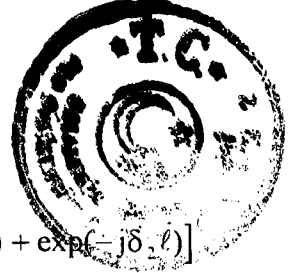
$v^a(-\ell)$: sınırdaki serbest havanın hızıdır.

Malzemenin yüzey empedansı (Z):

$$Z = p(-\ell) / v^a(-\ell) \quad (4.71)$$

Bu yüzey empedansı; aşağıdaki yol ile hesaplanır. İlk önce; (4.61) (4.62) ve (4.65) denklemleri ile kolaylıkla şu şekilde gösterilir:

$$V_i^1 = -V_r^1 \quad V_i^2 = -V_r^2 \quad (4.72)$$



Denklemler (4.68) - (4.72) şu şekilde toparlanır:

$$-(1-\phi)v^a(-\ell)Z = -Z_1^s V_1^1 [\exp(j\delta_1 \ell) + \exp(-j\delta_1 \ell)] - Z_2^s V_1^2 [\exp(j\delta_2 \ell) + \exp(-j\delta_2 \ell)] \quad (4.73)$$

$$-\phi v^a(-\ell)Z = -Z_1^f \phi \mu_1 V_1^1 [\exp(j\delta_1 \ell) + \exp(-j\delta_1 \ell)] - Z_2^f \phi \mu_2 V_1^2 [\exp(j\delta_2 \ell) + \exp(-j\delta_2 \ell)] \quad (4.74)$$

$$[\phi \mu_1 + (1-\phi)]V_1^1 [\exp(j\delta_1 \ell) - \exp(-j\delta_1 \ell)] + [\phi \mu_2 + (1-\phi)]V_1^2 [\exp(j\delta_2 \ell) - \exp(-j\delta_2 \ell)] = v^a(-\ell) \quad (4.75)$$

(4.73) - (4.75) denklemleri ile belirtilen üç denklemlilik bu sistemin çözümü:

$$\begin{vmatrix} -(1-\phi)Z & -2Z_1^s \cos \delta_1 \ell & -2Z_2^s \cos \delta_2 \ell \\ -Z & -2Z_1^f \mu_1 \cos \delta_1 \ell & -2Z_2^f \mu_2 \cos \delta_2 \ell \\ 1 & 2j \sin \delta_1 \ell (\phi \mu_1 + 1 - \phi) & 2j \sin \delta_2 \ell (\phi \mu_2 + 1 - \phi) \end{vmatrix} = 0 \quad (4.76)$$

Malzemenin yüzey empedansı Z aşağıdaki son şeklini alır:

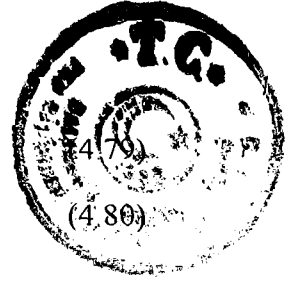
$$Z = -j \frac{(Z_1^s Z_2^f \mu_2 - Z_2^s Z_1^f \mu_1)}{D} \quad (4.77)$$

Burada (D):

$$D = (1-\phi + \phi \mu_2) [Z_1^s - (1-\phi)Z_1^f \mu_1] \operatorname{tg} \delta_2 \ell + (1-\phi + \phi \mu_1) [Z_2^f \mu_2 (1-\phi) - Z_2^s] \operatorname{tg} \delta_1 \ell \quad (4.78)$$

4.11 Basınç Dalgaları[9]

Elastik bir katıda; genişleyen ve dönen dalgaların dalga denklemleri skaler ve vektörel deplasman potansiyelleri kullanarak elde edilebilir. Hava ve iskelet için, iki skaler potansiyel (φ^f), (φ^s) basınç dalgaları için bulunabilir.



$$\mathbf{u}^s = \nabla\varphi^s$$

$$\mathbf{u}^f = \nabla\varphi^f$$

Bu ilişki kullanılarak (4.81) denklemi elde edilir:

$$\nabla\nabla^2\varphi = \nabla^2\nabla\varphi \quad (4.81)$$

$$-\omega^2(\rho_{11}\varphi^s + \rho_{12}\varphi^f) = P\nabla^2\varphi^s + Q\nabla^2\varphi^f \quad (4.82)$$

$$-\omega^2(\rho_{11}\varphi^s + \rho_{12}\varphi^f) = R\nabla^2\varphi^s + Q\nabla^2\varphi^f \quad (4.83)$$

φ vektörü şu şekilde gösterilir:

$$\varphi = [\varphi^s, \varphi^f]^T \quad (4.84)$$

(4.82) ve (4.83) denklemleri tekrar yazılırsa:

$$-\omega^2\rho\varphi = [M]\nabla^2\varphi \quad (4.85)$$

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} \\ \rho_{21} & \rho_{22} \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} P & Q \\ Q & R \end{bmatrix} \quad (4.86)$$

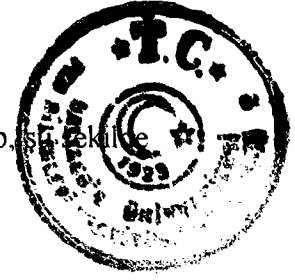
Denklem (4.85) şu şekilde yazılabilir:

$$-\omega^2[M]^{-1}\rho\varphi = \nabla^2\varphi \quad (4.87)$$

δ_1^2 , δ_2^2 özdeğerleri ve φ_1 , φ_2 özvektörleri şu şekilde yazılabilir:

$$-\delta_1^2\varphi_1 = \nabla^2\varphi_1 \quad (4.88)$$

$$-\delta_2^2\varphi_2 = \nabla^2\varphi_2$$



δ_1^2 ve δ_2^2 özdeğerleri basınç dalgalarının kompleks dalga sayıları olup, şu şekilde verilir:

$$\delta_1^2 = \frac{\omega^2}{2(PR - Q^2)} \left[P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} - \sqrt{\Delta} \right] \quad (4.89)$$

$$\delta_2^2 = \frac{\omega^2}{2(PR - Q^2)} \left[P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} + \sqrt{\Delta} \right] \quad (4.90)$$

Δ şu şekildedir:

$$\Delta = (P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12})^2 - 4(PR - Q^2)(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2) \quad (4.91)$$

İki özvektör tekrar yazılırsa:

$$\varphi_1 = \begin{bmatrix} \varphi_1^s \\ \varphi_1^f \end{bmatrix}, \quad \varphi_2 = \begin{bmatrix} \varphi_2^s \\ \varphi_2^f \end{bmatrix} \quad (4.92)$$

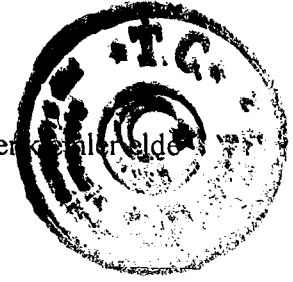
Denklem (4.82)'i kullanarak aşağıdaki denklemi elde ederiz:

$$\frac{\varphi_i^f}{\varphi_i^s} = \mu_i = \frac{P\delta_i^2 - \omega^2\rho_{11}}{\omega^2\rho_{12} - Q\delta_i^2} \quad i = 1, 2 \quad (4.93)$$

Bu denklem hava ve iskeletin hız oranını; iki basınç dalgası için gösterir. Gözenekli malzemede dalgalar hem hava hem de iskelet içinde yayıldığı için dört karakteristik empedans bulunur[26].

Gözenekli malzemenin iskeletinde yayılan dalgalar için karakteristik empedans:

$$Z^f = P / (j \omega u_3^f) \quad (4.94)$$



Basınç dalgaları için (4.95) denklemi tekrar yazılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$Z_1^i = (R + Q/\mu_1) \frac{\delta_1}{\phi \omega} \quad (4.95)$$

$$Z_2^i = (R + Q/\mu_2) \frac{\delta_2}{\phi \omega} \quad (4.96)$$

Gözenekli malzeme içinde, havada yayılan dalgalar için karakteristik empedans:

$$Z^s = -\sigma_{33}^s / (j \omega u_3^s) \quad (4.97)$$

(4.97) denklemi basınç dalgaları için şu şekilde tekrar yazılabilir:

$$Z_1^s = (P + Q/\mu_1) \frac{\delta_1}{\omega} \quad (4.98)$$

$$Z_2^s = (P + Q/\mu_2) \frac{\delta_2}{\omega} \quad (4.99)$$

ρ_{11} , ρ_{12} ve ρ_{22} parametreleri; gözenekli ortamın geometrisine ve akışkanın yoğunluğuna bağlıdır. Bu parametreler şu şekilde verilir[10]:

$$\rho_{11} = \rho_1 + \rho_a - j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \quad (4.100)$$

$$\rho_{12} = -\rho_a + j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \quad (4.101)$$

$$\rho_{22} = \phi\rho_o + \rho_a - j\sigma\phi^2 \frac{G(\omega)}{\omega} \quad (4.102)$$



Atalet bağlama terimi:

$$\rho_a = \rho_o \phi (\alpha_{\sigma} - 1)$$

(4.103)

Elastik Biot katsayıları:

$$R = \phi K_r$$

(4.104)

$$Q = K_r (1 - \phi)$$

(4.105)

$$P = \frac{4}{3} N + K_b + \frac{(1 - \phi)^2}{\phi} K_r$$

(4.106)

Kompleks hacim modülleri:

$$K_r = K = \frac{\gamma P_o}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{8\eta}{j\Lambda^2 B^2 \omega \rho_o} \left(1 + j\rho_o \frac{\omega B^2 \Lambda^2}{16\eta} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1}}$$

(4.107)

$$K_b = \frac{2N(\nu + 1)}{3(1 - 2\nu)}$$

(4.108)

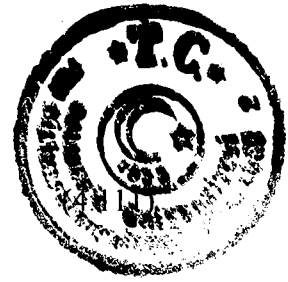
$$G(\omega) = \left(1 + \frac{4j\alpha_{\sigma}^2 \eta \rho_o \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(4.109)

Boyut faktörleri:

$$\Lambda = \frac{1}{c} \left(\frac{8\alpha_{\sigma} \eta}{\phi \sigma} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(4.110)



$$\Lambda = \frac{1}{c} \left(\frac{8\alpha_r \eta}{\phi \sigma} \right)^{1/2}$$

(4.95)-(4.111) denklemleri; (4.77) denklemi ile verilen ve ayrıca süngerimsi malzemelerin modellenmesinde, malzemenin davranışını belirtmek için kullanılan yüzey empedansı formülünde kullanılır.

4.12 Lifli Malzemelerin Empedans Modeli

Lifli malzemeler anizotropik malzemelerdir. Yani, özellikleri yöne bağlı olarak değişebilir.

Lifli malzemelerin modellenmesinde kullanılan parametreler sabit ve deneysel olarak iki grupta toplanmıştır.

Çizelge 4.3 Lifli malzemelerin modellenmesinde kullanılan sabit parametreler

Parametreler	Semboller	Birimi
Havanın yoğunluğu	ρ_0	kg/m^3
Ses hızı)	c_0	m/s
$\gamma = c_p/c_v$	γ	—
Ses basıncı	p_0	Pa
Havanın viskozitesi	η	poise
Prandtl sayısı	B^2	—

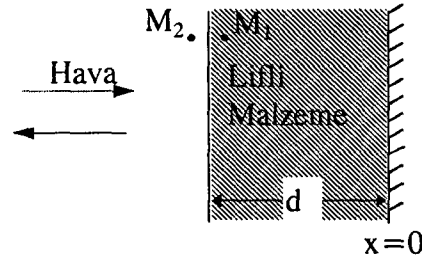
Çizelge 4.4 Lifli malzemelerin deneysel parametreleri

Parametreler	Semboller	Birimi
Gözeneklilik	ϕ	—
Yapı şekil faktörü	α_r	—
Akış direnci	σ	Ns/m^4



4.13 Lifli Malzemelerde YüzeY Empedansının Belirlenmesi

Şekil 4.11' de gösterilen lifli bir malzeme; rijit bir zemine yerleştirilir ve diğer yüzünün akustik alan olarak tanımlanan hava ile temas halinde olması sağlanır. Malzemenin yüzeyinde M_1 ve M_2 olan iki nokta seçilir. Serbest havadaki M_2 , gözenekli malzemedeki ise M_1 'dir[27].



Şekil 4.11 Rijit duvara dayalı bir lifli malzeme tabakası

$v(M_1)$: YüzeY yakın bir gözenekteki havanın ortalama hızı

$v(M_2)$: Serbest havadaki hız

$p(M_1)$: Bir gözenekteki havanın basıncı

$p(M_2)$: Serbest havadaki basınç

Gözenekli malzemenin yüzeyindeki basınç ve hava akışının sürekliliği aşağıdaki iki denklemlle ifade edilir:

$$p(M_2) = p(M_1) \quad (4.112)$$

$$v(M_2) = v(M_1)\phi \quad (4.113)$$

Serbest havadaki empedans $Z(M_2)$ ve gözenekteki empedans $Z(M_1)$ malzemenin yüzeyinde şu şekilde bulunabilir:

$$Z(M_2) = \frac{p(M_2)}{v(M_2)} \quad , \quad Z(M_1) = \frac{p(M_1)}{v(M_1)} \quad (4.114)$$



$$\phi Z(M_2) = Z(M_1)$$

Bir gözenekteki dalga denklemi[19]:

$$K \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (4.116)$$

Bir gözenekteki kompleks dalga sayısı k ve karakteristik empedans Z_c şu şekilde hesaplanır[25]:

$$Z_c = (K\rho)^{1/2}, \quad k = \omega(\rho/K)^{1/2} \quad (4.117)$$

$Z(M_1)$ empedansı denklem (4.25)'den hesaplanabilir:

$$Z(M_1) = -j Z_c \cotg kd \quad (4.118)$$

$Z(M_2)$ empedansı:

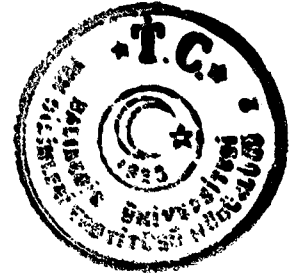
$$Z(M_2) = -j \frac{Z_c}{\phi} \cotg kd \quad (4.119)$$

Hacim modülü K , boyut faktörleri Λ , Λ' ve G ; (4.107), (4.110), (4.111), (4.109) denklemlerinden hesaplanabilir.

Yoğunluk (ρ):

$$\rho = \alpha_\alpha \rho_o \left(1 + \frac{\sigma \phi G}{j \omega \rho_o \alpha_\alpha} \right) \quad (4.120)$$

Lifli malzemelerin modellenmesinde malzemenin davranışını belirtmek için kullanılan parametre olan $Z(M_2)$ yüzey empedansı; (4.119) denklemi ile hesaplanır. Daha sonra hesaplanacak yutma katsayısı da (4.29) denklemi ile hesaplanır.



5. YUTMA KATSAYISININ OPTİMİZASYONU

5.1 Giriş

Süngerimsi ve lifli malzemelerin optimizasyonu yapılırken amaçlanan frekansa bağlı en iyi yutma katsayısını elde etmektir. Akustik yalıtım malzemelerindeki yutma katsayısı empedansa ve çeşitli parametrelere bağlı olarak programda hesaplanır. Çeşitli parametrelerden en kritik olanları kısıt olarak belirli değerler arasında alınarak yutma katsayısı(α)'nın optimal sonucu bulunur[27].

Optimizasyonda optimal sonucunu bulmak istediğimiz amaç fonksiyon olarak kullanılan akustik malzemelerinin yutma katsayısı denklem (5.1) ile verilmiştir.

$$\alpha(i) = 1 - |R(M)|^2 \text{ dir.} \quad (5.1)$$

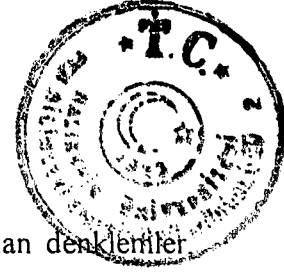
5.2 Akustik Yalıtım Malzemelerinin Optimizasyonu

Süngerimsi ve lifli malzemelerin optimizasyonunda kullanılan programların algoritmaları aşağıda geniş bir şekilde açıklanmıştır.

Optimizasyonda doğrusal olmayan denklemlerin çözümünde, “Kısıtlı Minimizasyon Çözümü”(Constr) fonksiyonu kullanılır. Kısıtlı Minimizasyon Çözümü”(Constr) fonksiyonunun amacı sınırlanmış çok değişkenli minimizasyonu bulmaktır. Kısıtlı Minimizasyon Çözümü”(Constr) fonksiyonunun belli başlı kullanım biçimleri ve daha ayrıntılı bilgi EK G.'de verilmiştir.

5.2.1 Süngerimsi Malzemelerin Optimizasyonu

Süngerimsi malzemelerin optimizasyonunda kullanılan ana program EK A.'da görüldüğü gibi $optr.m = funr.m + alfa4.m + fun5.m$ 'dir.



fun5.m programında:

Aşağıdaki kısıtlara bağlı, fun5.m isimli M-dosyasında tanımlanan denklemler belirli bir frekansta ($f_r = 1500 \text{ Hz}$ ' de), x_0 tahmini değerlerden başlayarak çözülür. Başka bir deyişle; “fun” fonksiyonunun minimizasyonu yapılır[28].

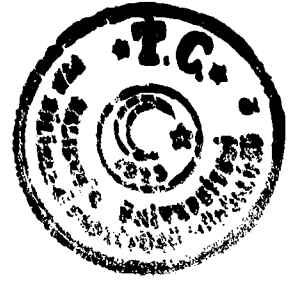
Minimizasyonu yapılan fonksiyonun akustik yutma katsayısı şu şekildedir:

$$f = \alpha = 1 - |R(M)|^2 \quad (5.2)$$

$$f(\phi, \alpha_\infty, \sigma, \ell, c, N, \rho, f_r) = \alpha = 1 - |R|^2$$

Süngerimsi akustik yalıtım malzemelerinin yutma katsayısında etkili olan bazı parametreler kısıt olarak alınmıştır. Bunlar şöyledir:

- Gözeneklilik $\phi_{\min} \leq \phi \leq \phi_{\max}$
- Yapı şekil faktörü $\alpha_{\infty \min} \leq \alpha_{\infty} \leq \alpha_{\infty \max}$
- Akış direnci $\sigma_{\min} \leq \sigma \leq \sigma_{\max}$
- Malzemenin kalınlığı $\ell_{\min} \leq \ell \leq \ell_{\max}$
- Şekil faktörü $c_{\min} \leq c \leq c_{\max}$
- Kesme modülü $N_{\min} \leq N \leq N_{\max}$



• Kesme modülü $N_{\min} \leq N \leq N_{\max}$

• İskelet yoğunluğu $\rho_{1\min} \leq \rho_1 \leq \rho_{1\max}$

funr.m programında:

x=constr('fun 5' ,x0) bildirimini; fun5.m dosyasındaki denklemleri x0 tahmini başlangıç değerlerinden başlayarak çözer ve sonucu x değişkenine aktarır. Burada x0'ın sayısı x değişkenlerinin sayısı kadardır.

Başlangıç değerleri (x0):

$x_0 = [0.96 \ 3 \ 50000 \ 0.018 \ 2.6 \ 1 \ 0.1 \ 21]$

Gözeneklilik = $\phi = 0.96$

Yapı şekil faktörü = $\alpha_r = 3$

Akış direnci = $\sigma = 50000$

Malzemenin kalınlığı = $\ell = 0.018$

Şekil faktörü = $c = 2.6$

Kesme modülü = $N = 1$

Kesme modülü = $N = j * 0.1$

İskelet yoğunluğu = $\rho_1 = 21$

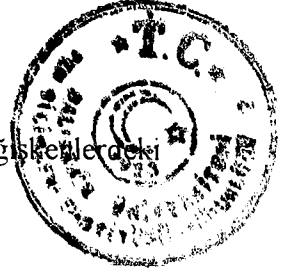
[f,g] = fun(x) bildirimini; "fun" fonksiyonunu iki argumana geri gönderir.

f = Minimize edilmiş akustik yalıtım malzemelerinin yutma katsayısı

g = Sınırlanmış matris

Programda (EK A:)' da g(1), ...,g(16) şeklinde verilmiştir.

options(16) =1e-10 bildirimini; Sonlu fark gradyan hesabında değişkenlerdeki minimum değişimi yapar.



options(17) = 0.5 bildirimi; Sonlu fark gradyan hesabında değişkenlerdeki maksimum değişimi yapar.

alfa4.m programında:

Bu programda yutma katsayısı frekansa bağlı olarak çizdirilir. Ayrıca fun5.m dosyasında bulunan sonucun aktarıldığı x değerleri şöyledir:

Gözeneklilik= $\phi=x(1)$

Yapı şekil faktörü= $\alpha_x=x(2)$

Akış direnci= $\sigma=x(3)$

Malzemenin kalınlığı= $l=x(4)$

Şekil faktörü= $c=x(5)$

Kesme modülü= $N=x(6)*10^5+j*x(7)*10^5$

İskelet yoğunluğu= $\rho_1=x(8)$

f1=100:100:1500 bildirimi; 100'er Hz artarak 100Hz'den 1500Hz'e kadar frekansın yutma katsayısı diyagramı için belirler.

alfa(15)=0 bildirimi; yutma katsayısının son bulacağı noktayı belirler.

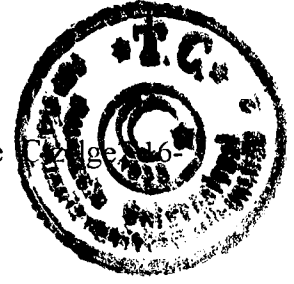
for i=1:15 bildirimi; i değişkeninin 15 sayı için olduğunu bildirir.

plot(f1,alfa) bildirimi; frekansa bağlı yutma katsayısının diyagramını çizer.

title('fun5r.m sonuçları') bildirimi; diyagramdaki başlığı yazar.

xlabel('f(Hz)') bildirimi; diyagramdaki x eksenine değişken yazar.

ylabel('Yutma katsayısı') bildirimi; diyagramdaki y eksenine değişken yazar.



Optimizasyondaki sabit ve deneysel parametreler Bölüm 7'de 7.19 ile verilmiştir.

Süngerimsi malzemelerin optimizasyonunda kullanılan denklemler (EK A:) aşağıda verilmiştir.

Akustik yutma katsayısı:

$\alpha(i)=A(M)=$ denklem (4.29) ile,

Yansıma katsayısı:

$E=R=$ denklem (4.28) ile,

Spesifik akustik empedans:

$zic=z'_c=$ denklem (3.37) ile.

Malzemenin yüzey empedansı:

$Z=Z=$ denklem (4.77) ile,

$D=D=$ denklem (4.78) ile,

Malzeme iskeletinde yayılan dalgaların empedansı:

$zbs=Z_1^s=$ denklem (4.98) ile,

$zis=Z_2^s=$ denklem (4.99) ile,

Malzemedeki havada yayılan dalgaların empedansı:

$zbf=Z_1^f=$ denklem (4.95) ile,

$zif=Z_2^f=$ denklem (4.96) ile,

Hava ve iskeletin hız oranı:

$nub=nui=\mu_i=$ denklem (4.93) ile,

Kompleks dalga sayıları

$delb=\delta_1=$ denklem (4.89) ile,

$deli=\delta_2=$ denklem (4.90) ile,

$del=\Delta=$ denklem (4.91) ile,

Elastik katsayılar:

$R=R=$ denklem (4.104) ile,

$Q=Q=$ denklem (4.105) ile,

$P=P=$ denklem (4.106) ile,



Hacim modülü:

$$K=K=.....$$

denklem (4.107) ile,

$$k_b=K_b=.....$$

denklem (4.108) ile,

Boyut faktörleri:

$$\lambda_{mu}=\Lambda'=.....$$

denklem (4.111) ile,

Yoğunluklar:

$$\rho_{11}=\rho_{11}=.....$$

denklem (4.100) ile,

$$\rho_{12}=\rho_{12}=.....$$

denklem (4.101) ile,

$$\rho_{22}=\rho_{22}=.....$$

denklem (4.102) ile,

Atalet bağlama terimi:

$$\rho_A=\rho_a=.....$$

denklem (4.103) ile,

$$G=G(W)=.....$$

denklem (4.109) ile,

$$\lambda_m=\Lambda=.....$$

denklem (4.110) ile,

EK A.'da gösterildiği gibi süngerimsi malzemelerin optimizasyonunda kullanılan denklemler Bölüm 4'de verilmiştir.

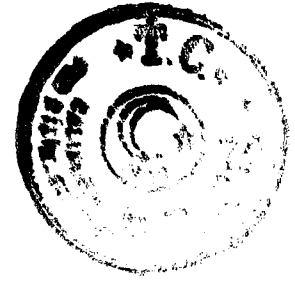
5.2.2 Lifli Malzemelerin Optimizasyonu

Lifli malzemelerin optimizasyonunda kullandığımız ana programlar EK B. ve EK C.'de verilmiştir.

EK B. ve EK C.de gösterilen lifli akustik yalıtım malzemelerinde kullanılan kısıt değerleri şu şekilde verilmiştir.

EK B'deki kısıt değerleri:

	<u>Kısıtlar(max)</u>	<u>Kısıtlar(min)</u>
Gözeneklilik(ϕ)	0.97	0.84
Yapı şekil faktörü(α_n)	3.2	1
Akış direnci(σ)	100000	5000



Lif yarıçapı(R)	$2.66 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$
İskelet yoğunluğu(ρ_1)	130	16
Malzeme kalınlığı(d)	0.1	0.02

EK C' deki kısıt değerleri:

	<u>Kısıtlar(max)</u>	<u>Kısıtlar(min)</u>
Gözeneklilik(ϕ)	0.97	0.84
Yapı şekil faktörü(α_v)	3.2	1
Akış direnci(σ)	100000	5000
Malzemenin kalınlığı(d)	0.1	0.002
Şekil faktörü(c)	1.14	0.78

EK B. ve EK C' de verilen lifli malzemelerin optimizasyonunda kullanılan başlangıç değerleri aşağıda verilmiştir.

EK C. 'deki başlangıç değerleri:

$$x_0 = [0.90 \ 2.1 \ 50000 \ 0.06 \ 0.96]$$

$$\text{Gözeneklilik} = \phi = 0.90 = x(1)$$

$$\text{Yapı şekil faktörü} = \alpha_v = 2.1 = x(2)$$

$$\text{Akış direnci} = \sigma = 50000 = x(3)$$

$$\text{Malzemenin kalınlığı} = d = 0.06 = x(4)$$

$$\text{Şekil faktörü} = c = 0.96 = x(5)$$

EK B 'deki başlangıç değerleri.

$$x_0 = [0.90 \ 2.1 \ 50000 \ 1.58 \cdot 10^{-5} \ 73 \ 0.06]$$

$$\text{Gözeneklilik} = \phi = 0.90 = x(1)$$

$$\text{Yapı şekil faktörü} = \alpha_v = 2.1 = x(2)$$

$$\text{Akış direnci} = \sigma = 50000 = x(3)$$

$$\text{Lif yarıçapı} = R = 1.58 \cdot 10^{-5} = x(4)$$



İskelet yoğunluğu= $\rho_1=73=x(5)$

Malzeme kalınlığı= $d=0.06=x(6)$

Lifli malzemelerin optimizasyonundaki sabit ve deneysel parametreler Bölüm 7'de çizelge 7.20-7.21 ile verilmiştir. Ayrıca lifli malzemelerin modellenmesinde kullanılan denklemler Bölüm 4'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

EK B. 'deki denklemler:

Akustik yutma katsayısı:

$\alpha(i)=\dots\dots\dots$ denklem (4.29) ile,

Yansıma katsayısı:

$E=R=\dots\dots\dots$ denklem (4.28) ile,

Spesifik akustik empedans:

$z_c=z'_c=\dots\dots\dots$ denklem (3.37) ile,

Yüzey empedansı:

$Z=Z(M_2)=\dots\dots\dots$ denklem (4.119) ile,

Yayınım sabiti:

$yays=k=\dots\dots\dots$ denklem (4.117) ile,

Karakteristik empedans:

$z_c=Z_c=\dots\dots\dots$ denklem (4.117) ile,

Yoğunluk:

$\rho=\rho=\dots\dots\dots$ denklem (4.120) ile,

Hacim modülü:

$G=G=\dots\dots\dots$ denklem (4.109) ile,

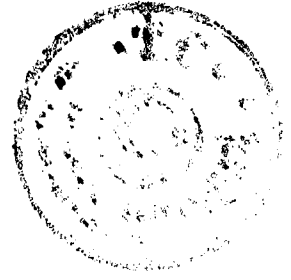
Şekil faktörleri:

$c_i=c'=1/2*c$
 $c=\dots\dots\dots$ denklem (4.111) ile,

Boyut faktörleri:

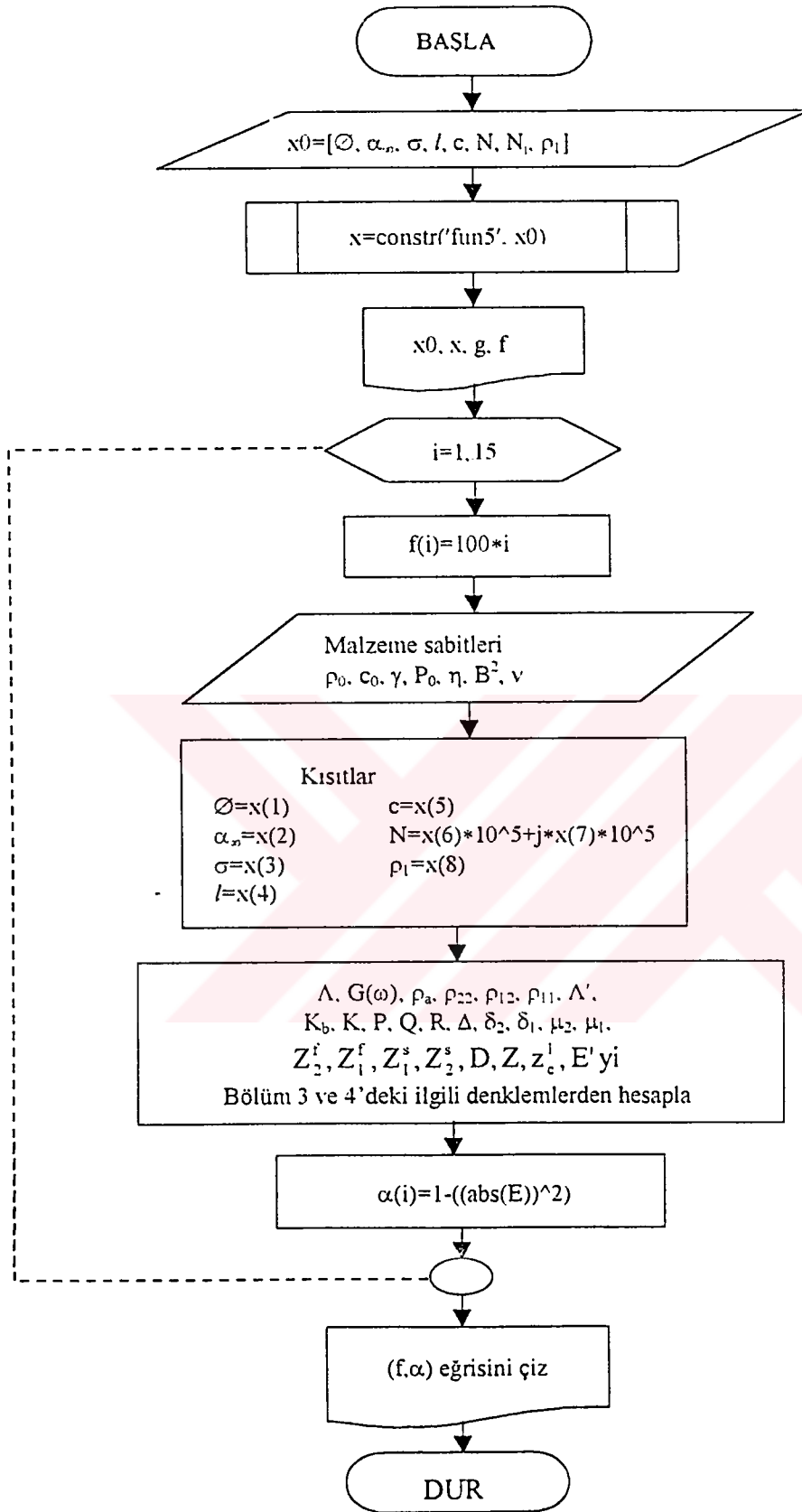
$\lambda_{mu}=\lambda'=2*\lambda$
 $\lambda=\lambda=\dots\dots\dots$ denklem (4.110) ile,

$$M = \frac{\rho_1}{\phi R^2 \rho_m}$$

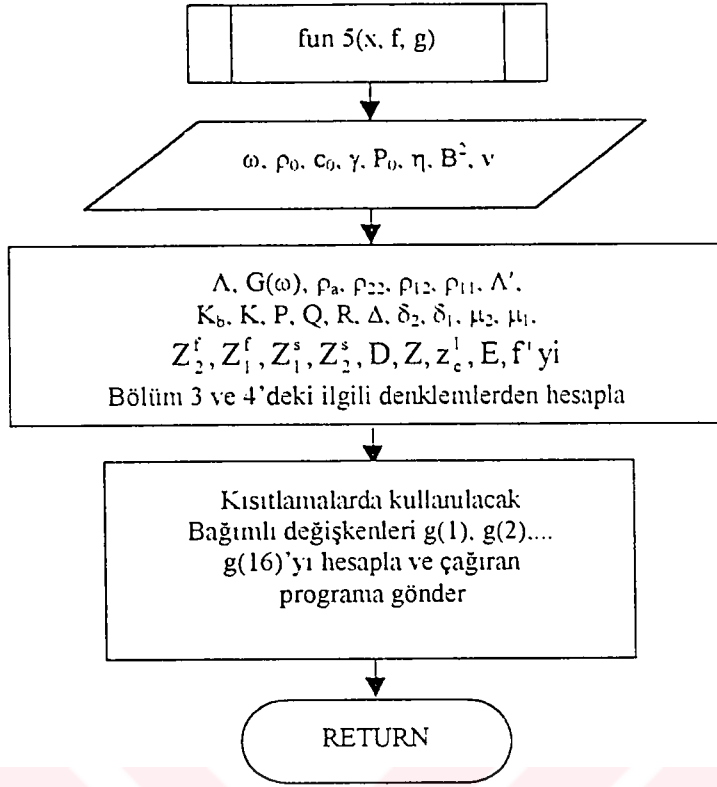
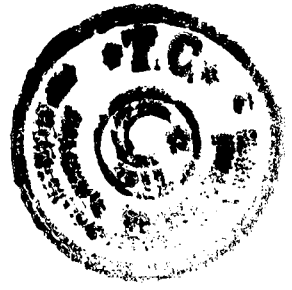


Deneyel ve sabit parametreler içeren süngerimsi ve lifli malzemelerin optimizasyonu için yapılan akış diyagramları aşağıda şekil 5.1-5.6 ile ana ve alt programlar şeklinde verilmiştir.

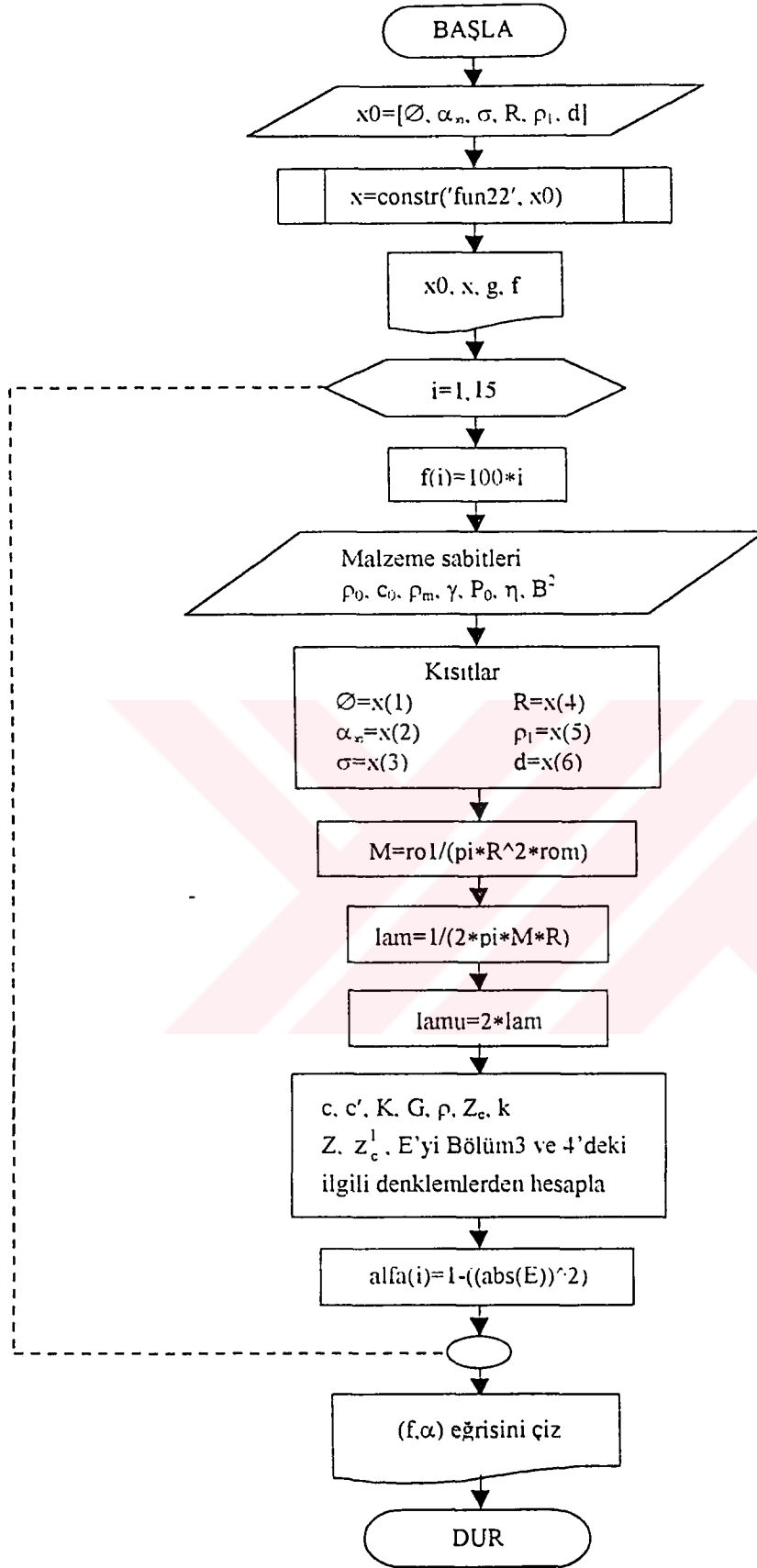




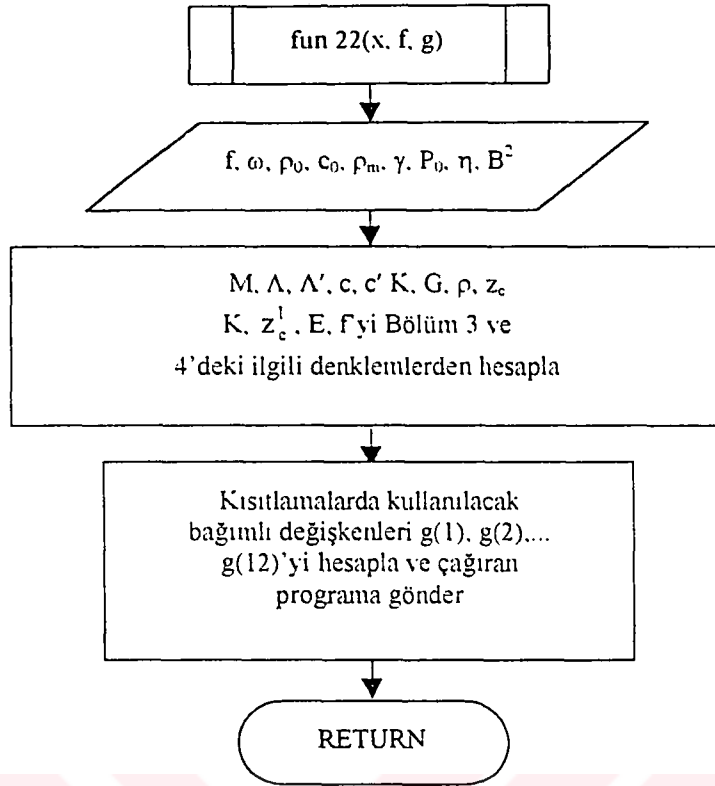
Şekil 5.1 Süngerimsi malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu için kullanılan ana programın akış diyagramı



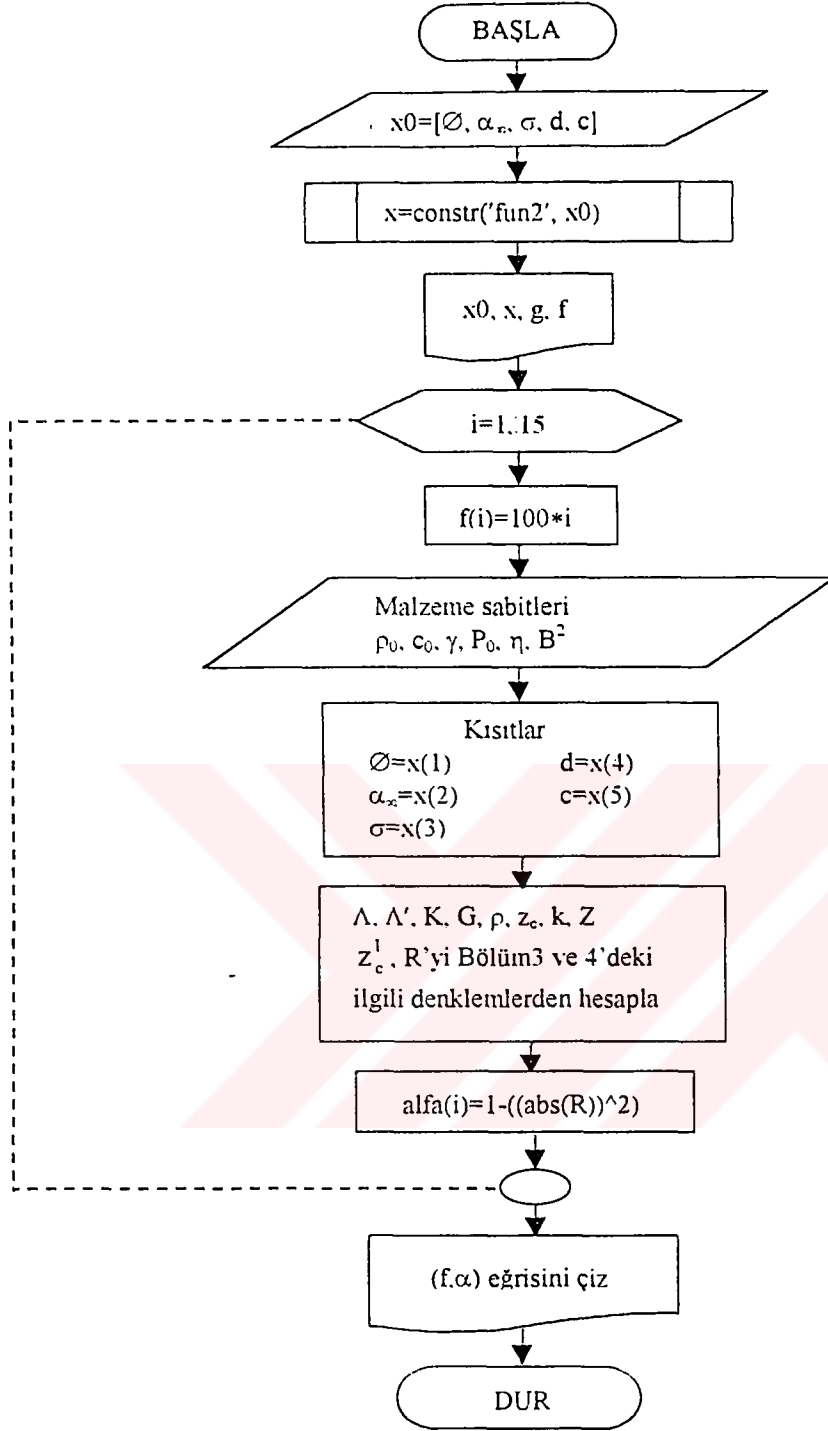
Şekil 5.2 Süngerimsi malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu sırasında kullanılan alt programın akış diyagramı.



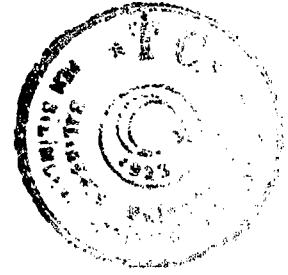
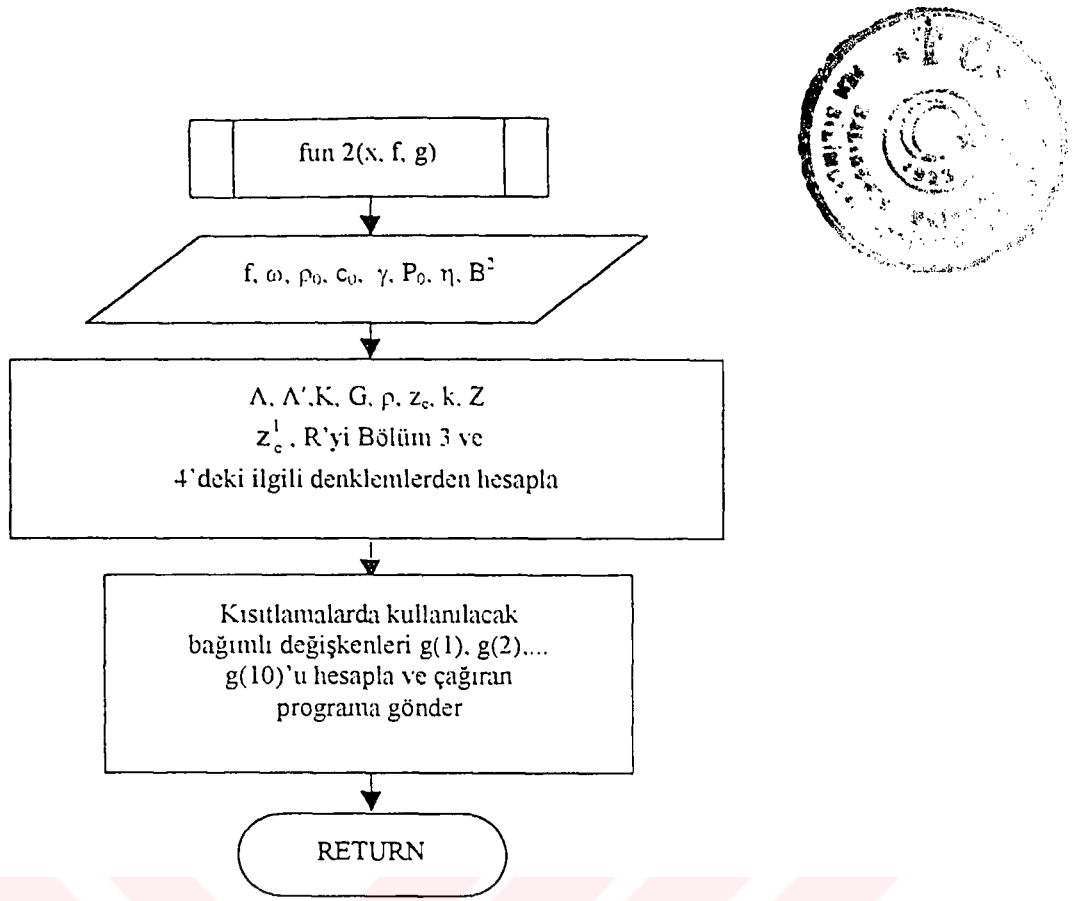
Şekil 5.3 Lifli malzemelerinin yutma katsayısının optimizasyonu için kullanılan ana programın akış diyagramı (fun 22r.m)



Şekil 5.4 Lifli malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu sırasında kullanılan alt programın akış diyagramı (fun22.m)



Şekil 5.5 Lifli malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu için kullanılan ana programın akış diyagramı (fun 2r.m)



Şekil 5.6 Lifli malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonu için kullanılan alt programın akış diyagramı (fun2.m)

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM
DOKÜMANTASYON



6. DENEYSEL YÖNTEMLER

6.1 Giriş

Bu bölümde akustik yutucu malzemelerin yutma katsayısını belirlemek için çeşitli parametrelerden yararlanılmıştır. Bu parametrelerin bazıları deneysel ölçümler sonucunda belirlenmiştir.

Çizelge 6.1 Deneysel olarak belirlenen parametreler

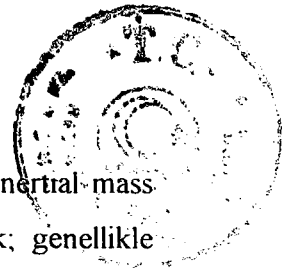
Akustik Yutucu Malzemelerdeki Parametreler	Sembol	Birimi
Akış Direnci (Flow Resistivity)	σ	Nsm^{-4}
Kesme Modülü (Shear Modulus)	N	N/m^2
Yapı Şekil Faktörü (Tortuosity)	$\alpha_s = k_s$	--
Gözeneklilik (Porosity)	\emptyset	--
İskelet Yoğunluğu (Frame Density)	ρ_1	kg/m^3

Deney düzenekleri hazırlanarak bulunan değerler sayısal değerler ile karşılaştırılır.

6.2 Akustik Akış Direncinin (Flow Resistance) Ölçümü

Lifli ve açık hücreli gözenekli malzemede; sesin etkilenmesi büyük ölçüde malzemenin akış direnci (flow resistance) ile belirlenir. Akış direncinin en çok yaygın olarak kullanılan metodunda, bir sabit akışkan akışı, malzemenin bir ucundan diğer ucuna sürdürülür ve malzeme tabakasının diğer tarafında basınç kaybına göre akış direnci bulunur. Malzemenin akış direnci basınç kaybı ile hız arasındaki orandır.

Akustik durumunda; harmonik zaman bağımlı ses alanında basınç kaybı ile akış hızının kompleks amplitüdlerini veren bu büyüklüklerin oranı; akustik akış direncinin reel kısmı ile kompleks akış empedansıdır. Gözenek yapısına bağlı akışkan hareketi için hız verilir. Ayrıca; malzemenin kalınlığı; dalga boyundan daha küçüktür. Böylece; hız amplitüdü, malzemede baştan başa sabit olması farzedilebilir.



Akış empedansının reaktif kısmı; malzemede akışkanın effective inertial mass density (etkin atalet kütlesi yoğunluğu) ile uygundur [4]. Bu yoğunluk; genellikle structure factor (yapısal faktör) ile verilen çevreleyen akışkan yoğunlundan daha büyüktür.

6.3 Ölçüm Metodu

Şekil 6.1'de görüldüğü gibi, gözenekli malzeme rijit duvarlı ve rijit sınırlı (Alüminyum) bir tüpe yerleştirilir. Tüpün sonuna yerleştirilen bir ses kaynağı (Hoparlör) ile tüpte ses alanı üretilir. Gözenekli malzemenin ve rijit sınırın (Alüminyum) önüne yerleştirilen mikrofonlar ile ses basıncı ölçülür. Sırasıyla ölçümler 1 ve 3 noktalarında yapılır. Tüp boyutları dalga boyundan (λ) daha küçüktür. Böylece tüp içinde düzlem dalga modu yayılabilir. Tüp çapı (D) için: $1.7D$ 'den daha küçük dalga boyu (λ) gerekli bulunur. deney düzeneğimizde kullanılan tüp çapı (D) = 7.5 cm dir.

u_1 = Gözenekli malzemede kompleks hız amplitüdü

P_1 = Mikrofon 1 ile gözenekli malzeme önünde ölçülen kompleks ses basıncı amplitüdü

P_2 = Gözenekli malzemede diğer tarafta (Şekil 5-1) ölçülen kompleks ses basıncı amplitüdü

P_3 = Rijit sınır (Alüminyum) önünde ölçülen kompleks ses basıncı amplitüdü

c = Ses hızı (340 m/s)

L = Gözenekli malzeme ve rijit sınır arasındaki uzaklık. Bu uzaklık (L); 100 Hz'de dalga boyunun dörtte biri olacak şekilde seçilmiştir.

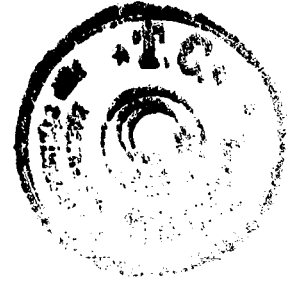
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{100} = 3.4 \text{ m}$$

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{3.4}{4} = 0.85 \text{ m} = 850 \text{ mm}$$

Gözenekli malzemede ve rijit sınırda (Alüminyum) kompleks hız amplitüdü:

$$u_1 = -i (P_3 / \rho c) \sin (kL) \quad (6.1)$$

Burada;



Dalga sayısı :

$$k = \frac{\omega}{c}$$

f = Frekans (Hz)

ω = Açısal hız (rad/s)

$$\omega = 2\pi f$$

c = Sesin havada yayılma hızı (m/s)

Kompleks ses basıncı amplitüdü:

$$p(t) = \text{Re}\{p \exp(-i\omega t)\} \quad (6.2)$$

Burada;

p = Kompleks ses basıncı genliğidir.

Benzer olarak; iki numaralı (şekil 6.1) bölgede gözenekli malzemenin diğer tarafındaki kompleks ses basıncı amplitüdü (P_2) şu şekilde hesaplanır:

$$P_2 = P_3 \cos(kL) \quad (6.3)$$

Akış empedansı:

$$z = \frac{(P_1 - P_2)}{u_1} = i(\rho c) \frac{\left(\frac{P_1}{P_3}\right)}{\sin(kL)} + i(\rho c) \cot(kL) \quad (6.4)$$

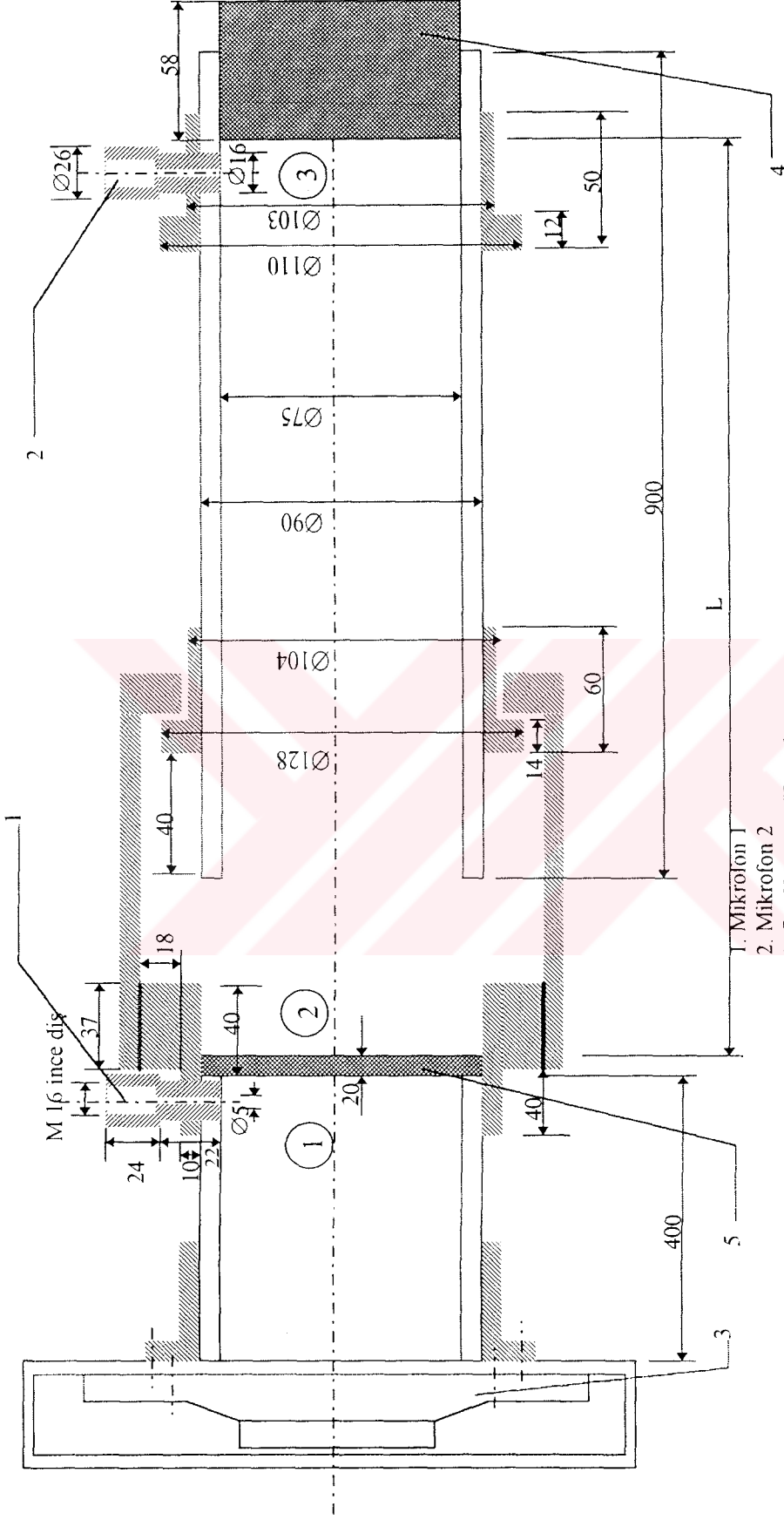
Normalize edilmiş akış empedansı:

$$\frac{z}{\rho c} = \theta + i_x = i(-1)^{n-1} \left(\frac{P_1}{P_3}\right) \quad (6.5)$$

$$L = \frac{(2n-1)\lambda}{2} \quad n=1,2,3,\dots \quad (6.6)$$

Böylece; normalize edilmiş akış direnci (flow resistance) (P_1 / P_3) basınç oranının imajiner kısmının mutlak değeri olacaktır.

$$\theta = \left| \text{Im}\{P_1 / P_3\} \right| \quad (6.7)$$

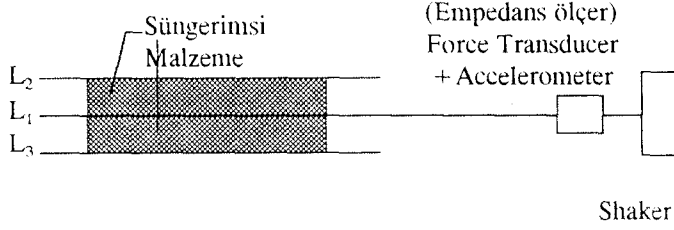


Şekil 6.1 Gözenekli Malzemenin Akış Empedansının Ölçümü İçin Deneysel Düzenek [4]



6.4 Kesme Modülü (Shear Modülü)'nün Bulunması

Süngerimsi malzemelerdeki kesme modülünü ölçmek için şekil (6.2)'deki deney düzeneği hazırlanmıştır.



Şekil 6.2 Kesme Modülünün (Shear Modülün) ölçülmesi için kullanılan aparat [5]

L_1 levhası aynı kalınlık ve alana sahip iki süngerimsi malzemeye yapıştırılmış aynı zamanda bu iki malzeme L_2 , L_3 levhalarına da yapıştırılmıştır. Bu durumda L_2 ve L_3 levhaları sabit diğer L_1 levhası hareketlidir. L_1 levhası yatay olarak shaker tarafından hareket ettirilir ve süngerimsi malzemelerde kesme dalgaları yayılır. Malzeme iskeletinin kesme modülü L_1 levhasındaki mekanik empedanstan analizör ve (Kuvvet ölçer + ivme ölçer) yardımı ile hesaplanır.

6.4.1 Kesme Modülü (Shear Modülünün) Hesaplanması

$$\text{(Transfer Fonksiyonu)} H_1 = \frac{G_{AB}}{G_{AA}} = \frac{\text{crossspectrum}}{\text{Auto spectrum}}$$

$$H_1 = \frac{G_{12}}{G_{11}} = \frac{F}{\iint \ddot{x} dt} = \frac{F}{x} \quad (6.8)$$

$$F = \text{kuvvet [N]} \quad \frac{\ddot{x}}{\omega^2} = x$$

$$\ddot{x} = \text{ivme [m/s}^2\text{]}$$

$$|x| = A$$

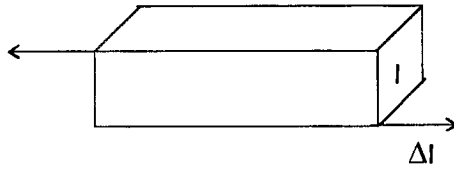


$$|\dot{x}| = A\omega$$

$$|\ddot{x}| = A\omega^2$$

$$x = A \cos \omega t$$

$$\frac{dx}{dt} = -A\omega \sin \omega t$$



$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

σ gerilme (sinüzoidal stress) kompleks notasyon kullanılarak şöyle yazılabilir:

$$\sigma = \bar{\sigma} x e^{j\omega t} \quad (6.9)$$

Birim uzama (strain):

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} x e^{j(\omega t - \theta)} \quad (6.10)$$

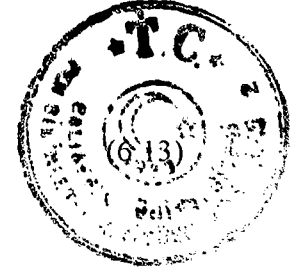
Kompleks elastik modülü (E^*):

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} x e^{j\theta} \quad (6.11)$$

Elastisite Modülü (E'):

$$E' = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} \right) x \cos \theta \quad [\text{Aynı fazda}] \quad (6.12)$$

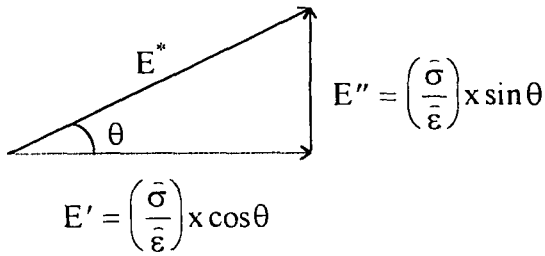
Elastisite Modülü (E''):



$$E'' = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} \right) \times \sin \theta \quad [\text{Farklı fazda}]$$

Kayıp faktörü (η):

$$\eta = \frac{E''}{E'} = \tan \theta \quad (6.14)$$



E^* = Kompleks Modül

E' = Elastik (Young's) Modülü

E'' = Kayıp Modülü

$\tan \theta = \eta = \text{Kayıp Faktörü}$

Şekil 6.3 Çeşitli modüllerin vektörel gösterilmesi [6]

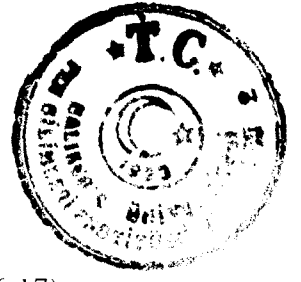
$$E' = \frac{|F|}{|d|} \times \frac{\ell}{A} \cos \theta = \text{Re} \left(\frac{F}{d} \right) \times \frac{\ell}{A} \quad (6.15)$$

$$E'' = \frac{|F|}{|d|} \times \frac{\ell}{A} \sin \theta = \text{Im} \left(\frac{F}{d} \right) \times \frac{\ell}{A} \quad (6.16)$$

6.5 Tortuosity - Structure Form Factor (Yapısal Şekil Faktörü)'nün Ölçümü

Bir tüp içerisine konulan gözenekli malzeme CU (Bakır) elektrotlar vasıtasıyla direnci ölçülür. Bu direnç ölçümü yapılırken elektrolit olarak deterjanlı su kullanılır.

İlk önce iletken akışkan (deterjanlı su) ile doyurulmuş malzemenin direnci daha sonra iletken akışkanın (deterjanlı su) ile doyurulmuş malzemenin direnci ölçülerek yapı şekil faktörünün belirlenmesi sağlanır.



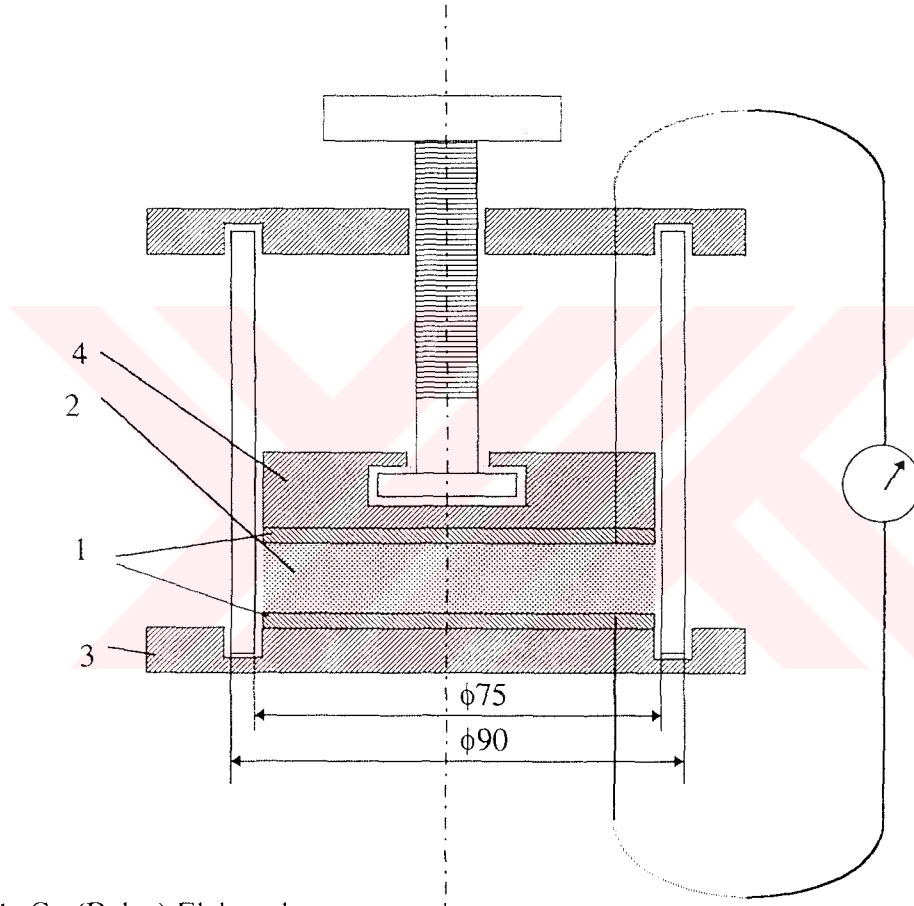
Yapı şekil faktörü (Tortuosity) :

$$\alpha_{cc} = k_s = \phi \frac{r_c}{r_f} \quad (6.17)$$

r_c = Doyurulmuş malzemenin direnci [ohm]

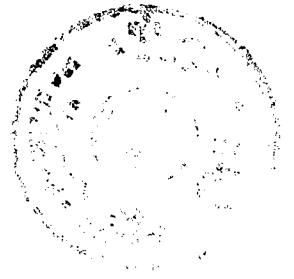
r_f = Elektrolitin (İletken akışkan) direnci [ohm]

ϕ = Porosity (Gözeneklilik)



1. Cu (Bakır) Elektrotlar
2. Elektrolit (Deterjanlı su)
3. Plexiglass
4. Kestamit

Şekil 6.4 Tortuosity-structure form factor (yapı şekil faktörü)'nün ölçümü $\alpha_{cc} = k_s$ [7]



6.6 Gözeneklilik (Porosity)

Gözeneklilik (Porosity); hava hacmi ile gözenekli malzemenin toplam hacminin oranıdır.

$$\phi = \frac{V_a}{V_T} \quad (6.18)$$

V_a = Hava Hacmi

V_T = Gözenekli malzemenin toplam hacmi

6.7 Yoğunluk (ρ_1)

Malzemenin iskelet yoğunluğu aşağıdaki denklem ile bulunabilir=

$$\rho_1 = \frac{m}{V} \quad (6.19)$$

ρ_1 = Malzemenin iskelet yoğunluğu [kg/m^3]

m = Malzemenin ağırlığı [kg]

V = Malzemenin toplam hacmi [m^3]

6.8 Empedans Tüpü

6.8.1 İki Mikrofonlu Metod

İki mikrofonlu empedans ölçüm tüpü; akustik yutma katsayısı, akustik yansıtma katsayısı ve normal empedans ölçümlerinde kullanılır.

Akustik yutma katsayısının iki mikrofonlu ölçüm metodu; gelen (P_i) ve yansıyan (P_r) bileşenlerindeki geniş-bant sabit rastgele sinyalin analizi içerir. Sinyal, ses kaynağı ile meydana gelir. Gelen ve yansıyan bileşenler, tüpün duvarındaki iki



bölgede mikrofonlar ile ölçülmüş akustik basınç arasındaki ilişkiden bulunur. İki mikrofon pozisyonundaki ses basıncının gelen ve yansıyan bileşenlerinden üç frekans cevap fonksiyonu hesaplanır:

H_1 = Frekans cevap fonksiyonu

H_i = Gelen bileşen ile ilişkili olan frekans cevap fonksiyonu

H_r = Yansıyan bileşen ile ilişkili olan frekans cevap fonksiyonu

Bu değerler kullanılarak; kompleks yansıtma katsayısı R aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$R = \left(\frac{H_1 - H_i}{H_r - H_1} \right) e^{j2k(l+s)} \quad (6.20)$$

k = Dalga sayısı

l = Test numunesinin önünden ilk mikrofon arasındaki uzaklık [mm]

s = Mikrofonların arasındaki uzaklık [mm]

Yansıtma katsayısı için bu değeri kullanarak, normal empedans oranı $\left(\frac{z}{\rho c} \right)$ ve ses yutma katsayısı aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir:

$$\frac{z}{\rho c} = \frac{1+R}{1-R} \quad (6.21)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (6.22)$$

İki mikrofonlu teoride; düzlem-dalga yayılımı farzedilir, ki bu teoride çok iyi akış ve tüp duvarlarındaki yutmadan dolayı kayıplar yoktur.

6.8.2 Kalibrasyon Metodu

Frekans cevap fonksiyonu, iki mikrofonlu sinyalin cross-spektrumundan hesaplanır. Bu nedenle, mikrofon kanalları arasındaki herhangi bir faz ya da amplitüd



hatası frekans cevap fonksiyonunu bozacaktır. Kalibrasyon işlemi sırasında, frekans cevap fonksiyonu iki mikrofonun karşılıklı değiştirilmesi ve daha sonra ilk pozisyonlarında hesaplanır. Bu iki sonucun geometrik ortalaması kompleks bir değerdir. Daha sonraki frekans cevap fonksiyonuna eklenebilen bu değer, mikrofon kanallarındaki herhangi bir bozuk ayardan dolayı etkili olarak hatalar yok edilerek aynı düzende kullanılarak hesaplanır.

Kalibrasyon işlemi sırasında; standart pozisyonlardaki mikrofonlar (H_{c1}) ve karşılıklı değiştirilmiş pozisyonlardaki (H_{c2}) için kalibrasyon frekans cevap fonksiyonları şu şekilde hesaplanır:

$$H_{c1} = |H_{c1}| e^{j\phi_1} \quad (6.23)$$

ve

$$H_{c2} = |H_{c2}| e^{j\phi_2} \quad (6.24)$$

Burada;

ϕ_1 = Kalibrasyon frekans cevap fonksiyonu (H_{c1})'nin fazı

ϕ_2 = Kalibrasyon frekans cevap fonksiyonu (H_{c2})'nin fazı

$$j = \sqrt{-1}$$

Bu değerlerden; kalibrasyon faktörü (H_c) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$H_c = |H_c| e^{j\phi_c} \quad (6.25)$$

Burada;

$$|H_c| = \sqrt{|H_{c1}| |H_{c2}|} \quad (6.26)$$

$$\phi_c = \frac{1}{2} (\phi_1 + \phi_2)$$



Herhangi bir frekans cevap fonksiyonu ile eklenebilen kalibrasyon faktörü empedans tüpü kullanılarak ölçülür ve verilen bu değer mikrofon kanalları arasındaki amplitüd veya faz bozukluğundan etkilenmez.

Örneğin; aşağıdaki frekans cevap fonksiyonu standart pozisyonlardaki mikrofonlar ile ölçülür:

$$H = |H|e^{j\phi} \quad (6.27)$$

Düzeltilme faktörü eklenir ve verilen düzeltilmiş frekans cevap fonksiyonu (H_1)

:

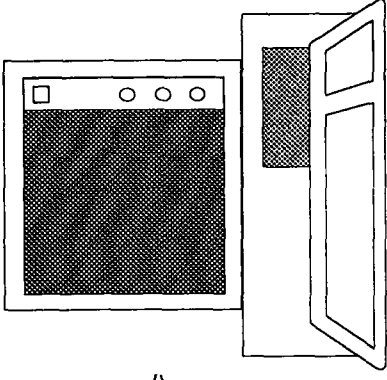
$$H_1 = \frac{H}{H_c} = |H_1|e^{j\phi_h} \quad (6.28)$$

Burada;

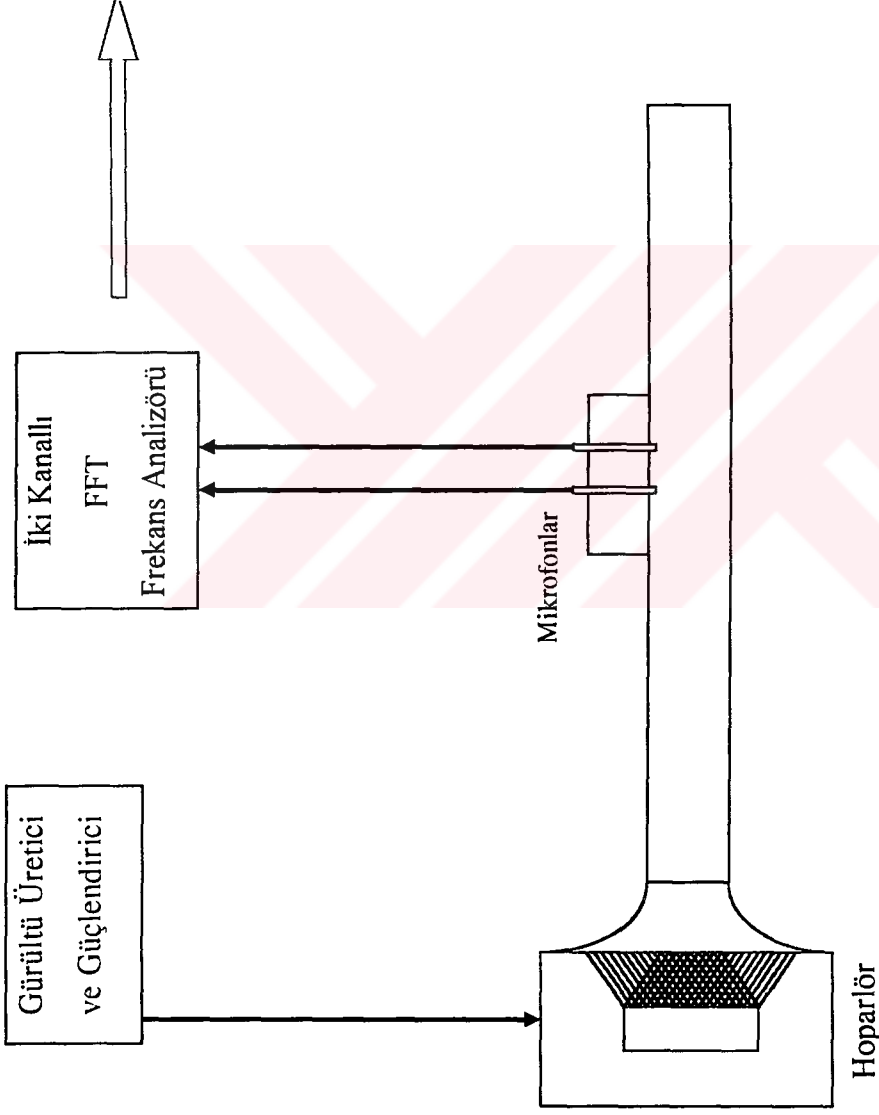
$$|H_1| = \frac{|H|}{|H_c|} \quad (6.29)$$

$$\phi_h = \phi - \phi_c \quad (6.30)$$

Bu frekans cevap fonksiyonu (H_1); test numunesinin akustik özelliklerini hesaplamak için kullanılan bir değerdir.

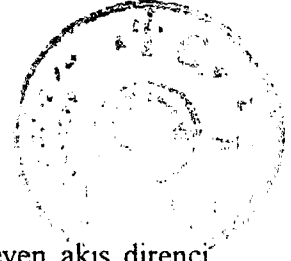


**EMPEDANS TÜPÜ
ile ÖLÇÜMLER**
Akustik Yutma Katsayısı
Akustik Yansıtma Katsayısı
Normal Empedans



Şekil 6.5 Empedans Tüpü [8]





7. UYGULAMALAR

Süngerimsi ve lifli malzemelerin yutma katsayısını (α); etkileyen akış direnci (σ), kesme modülü (N), yapı şekil faktörü (α_r), gözeneklilik (ϕ) ve iskelet yoğunluğu (ρ_1); Bölüm 6'da bahsedilen deney düzeneklerinde ölçümleri ve hesaplamaları yapılmıştır. Bölüm 7.1'de ölçülmüş ve hesaplanmış veriler tablolar halinde sunulmuş daha sonra sabit parametreler ile birlikte bu deneysel parametrelerde kullanılarak hem lifli hem de süngerimsi malzemeler için yutma katsayıları bulunmuştur. Akustik yalıtım malzemeleri için sayısal olarak bulunan yutma katsayıları, iki mikrofonlu empedans ölçüm tüpü ile elde edilen deneysel yutma katsayıları ile karşılaştırılmış sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bölüm 7.3'de ise belirli bir frekansta lifli ve süngerimsi malzemelerin yutma katsayılarının daha iyi bir değere ulaşması için malzemelerin bazı parametreleri kısıt olarak alınıp optimizasyonu yapılmıştır.

Böylelikle; akustik yalıtım malzemeleri deneysel ve sayısal yönden analizi yapılmıştır. Aşağıda lifli ve süngerimsi malzemelerin modellenmesinin sonucunda elde edilen yutma katsayıları diyagramlar şeklinde verilmiştir. Ayrıca hesaplanan, ölçülmüş ve optimizasyon sonucunda elde edilen parametreler tablolar halinde sunulmuştur.

7.1 Deneysel Yöntemin Uygulanması

7.1.1 Akış Direnci (σ)

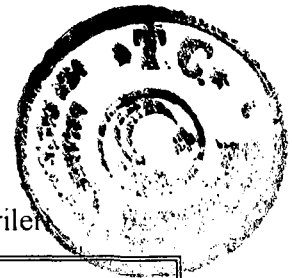
Süngerimsi ve lifli malzemelerin “flow resistivity” (akış direnci) parametresi için deneysel çalışmalarda elde edilen veriler: [Bu değerler; “iki kanallı FFT frekans analizörü” tarafından analiz edilerek bulunmuştur].

Şekil 6.1'deki deney düzeneği kullanılarak süngerimsi ve lifli malzemelerin normalize edilmiş akış direnci verileri elde edilmiştir. Bu veriler aşağıda tablolarda belirtilmiştir.



Çizelge 7.1 Süngerimsi malzemelerin normalize edilmiş akış direnci verileri.

SÜNGERİMSİ MALZEMELER		
	Frekans [Hz]	$ Im[P_1 / P_3] $
Malzeme 1 (S1)	100	2
	300	2.6
	500	2.7
	700	2.9
	900	2.6
Malzeme 2 (S2)	100	1.2
	300	3.4
	500	4.6
	700	4.7
	900	3.7
Malzeme 3 (S3)	100	1.4
	300	1.6
	500	1.6
	700	1.7
	900	1.7



Çizelge 7.2 Lifli malzemelerin normalize edilmiş akış direnci verileri

LİFLİ MALZEMELER		
	Frekans [Hz]	$ \text{Im}[P_1 / P_3] $
Malzeme 1 (L1)	100	3.4
	300	2.3
	500	1.2
	700	1.7
	900	2.4
Malzeme 2 (L2)	100	4.9
	300	4.5
	500	1.6
	700	2.2
	900	4.4
Malzeme 3 (L3)	100	6.8
	300	5.8
	500	2.4
	700	5.0
	900	4.9

Çizelge 7.3 Deney düzeneğinde malzeme olmadığında elde edilen sonuçlar

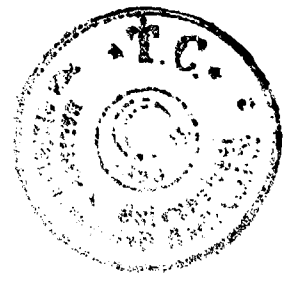
Frekans [Hz]	$ \text{Im}[P_1 / P_3] $
100	0.021
300	0.035
500	0.021
700	0.0096
900	0.073

Akış dirençleri (6.4) denklemi ile çeşitli frekanslarda hesaplanarak tablo halinde sunulmuştur.



Çizelge 7.4 Süngerimsi malzemelerin akış direnci verileri.

SÜNGERİMSİ MALZEMELER		
	Frekans [Hz]	Akış Direnci (σ), [Ns/m ⁴]
Malzeme 1 (S1)	100	68000
	300	88400
	500	91800
	700	98600
	900	88400
Malzeme 2 (S2)	100	65280
	300	184960
	500	250240
	700	255680
	900	201280
Malzeme 3 (S3)	100	59500
	300	68000
	500	68000
	700	72250
	900	72250

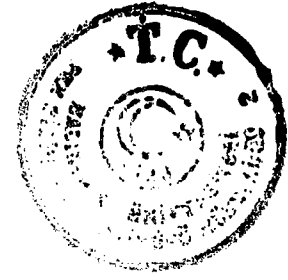


Çizelge 7.5 Lifli malzemelerin akış direnci verileri

LİFLİ MALZEMELER		
	Frekans [Hz]	Akış Direnci (σ), [Ns/m ⁴]
Malzeme 1 (L1)	100	115600
	300	78200
	500	40800
	700	57800
	900	81600
Malzeme 2 (L2)	100	233240
	300	214200
	500	76160
	700	104720
	900	209440
Malzeme 3 (L3)	100	2312000
	300	1972000
	500	816000
	700	1700000
	900	1666000

Çizelge 7.6 Malzeme olmadığında akış direnci verileri.

Frekans [Hz]	Akış Direnci (σ), [Ns/m ⁴]
100	0.021
300	0.035
500	0.021
700	0.0096
900	0.073



7.1.2 Kesme Modülü (N)

Süngerimsi malzemelerdeki kesme modülü, şekil 6.2 ile gösterilen deney düzeneği ile ölçülmüş ve (6.15)-(6.16) denklemleri ile hesaplanmıştır. Kesme modülü verileri çizelge 7.7 ile verilmiştir.

Çizelge 7.7 Kesme modülü verileri.

Süngerimsi Malzemeler	N (Kesme Modülü), [N/m ²]
Malzeme 1 [230 Hz]	$(1.45 + i 1.925) 10^5$
Malzeme 2 [200 Hz]	$(4.25 + i 1.25) 10^5$
Malzeme 3 [205 Hz]	$(5 + i 3.25) 10^5$

7.1.3 Gözeneklilik (ϕ)

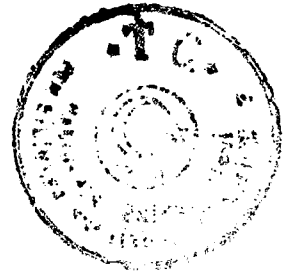
Akustik yalıtım malzemelerindeki gözeneklilik (6.18) denklemi ile hesaplanmıştır.

Çizelge 7.8 Süngerimsi malzemelerin gözeneklilik verileri.

Süngerimsi Malzemeler	Gözeneklilik (ϕ)
Malzeme 1(S1)	0.96
Malzeme 2(S2)	0.97
Malzeme 3(S3)	0.98

Çizelge 7.9 Lifli malzemelerin gözeneklilik verileri

Lifli Malzemeler	Gözeneklilik (ϕ)
Malzeme 1(L1)	0.95
Malzeme 2(L2)	0.97
Malzeme 3(L3)	0.98



7.1.4 İskelet Yoğunluğu (ρ_1)

Süngerimsi malzemelerde yoğunluk (ρ_1) (6.19) denklemi ile hesaplanmıştır.

Çizelge 7.10 Süngerimsi malzemelerin yoğunluk verileri.

Süngerimsi Malzemeler	İskelet yoğunluğu (ρ_1), [kg/m ³]
Malzeme 1(S1)	100
Malzeme 2(S2)	160
Malzeme 3(S3)	125

Çizelge 7.11 Lifli malzemelerin yoğunluk verileri

Lifli Malzemeler	İskelet yoğunluğu (ρ_1), [kg/m ³]
Malzeme 1(L1)	100
Malzeme 2(L2)	140
Malzeme 3(L3)	1000

7.1.5 Yapı Şekil Faktörü (α_o)

Şekil 6.4 ile belirtilen deney düzeneğinde elde edilen sonuçlar Çizelge 7.12 olarak sunulmuştur.

Çizelge 7.12 Doyurulmuş süngerimsi malzemelerin direnci.

Süngerimsi Malzemeler	Direnç(R),[k Ω]
Malzeme 1(S1)	25.7
Malzeme 2(S2)	20.3
Malzeme 3(S3)	33.9

Çizelge 7.13 Doyurulmuş lifli malzemelerin direnci

Lifli Malzemeler	Direnc(R),[kΩ]
Malzeme 1(L1)	6.4
Malzeme 2(L2)	9.6
Malzeme 3(L3)	10.88

Deney düzeneğinde kullanılan elektrolitin direnci (R)= 6.4 kΩ. Malzemelerde yapı şekil faktörü (6.17) denklemi ile hesaplanmıştır.

Çizelge 7.14 Süngerimsi malzemelerin yapı şekil faktörü verileri.

Süngerimsi Malzemeler	Yapı şekil faktörü (α_r)
Malzeme 1(S1)	4
Malzeme 2(S2)	3.17
Malzeme 3(S3)	5.29

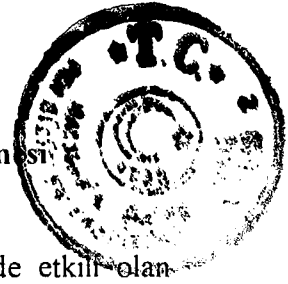
Çizelge 7.15 Lifli malzemelerin yapı şekil faktörü verileri

Lifli Malzemeler	Yapı şekil faktörü (α_r)
Malzeme 1(L1)	1
Malzeme 2(L2)	1.5
Malzeme 3(L3)	1.7

Akustik yalıtım malzemelerindeki deneysel parametrelerden akış direnci ve yapı şekil faktörünün deneysel zorluklar yüzünden tam istenilen sonucu elde edilememiştir. Bu konuda hazırlanan deneysel düzenekler tekrar gözden geçirilmelidir.

7.2 Yutma Katsayısının Hesabı

Süngerimsi ve lifli olarak gruplandığımız akustik yalıtım malzemelerinin yutma katsayıları hesaplandıktan sonra deneysel olarak empedans tüpünden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



7.2.1 Süngerimsi Malzemelerin Yutma Katsayısının Belirlenmesi

Süngerimsi malzemelerin yutma katsayısının (α) belirlenmesinde etkili olan sabit ve deneysel parametreler aşağıda çizelge 7.16-7.18 ile verilmiştir. Ayrıca akustik yutma katsayılarının hesaplama yöntemi de EK D.'de sunulmuştur.

Süngerimsi malzemelerin modellenmesi yapılırken; Bölüm 4.9'de belirtilen akustik alanda etki altında kalmayan(su vs. geçirmez) rijit duvara dayalı süngerimsi malzemelerin(Şekil 4.9) empedans modeli dikkate alınmıştır.

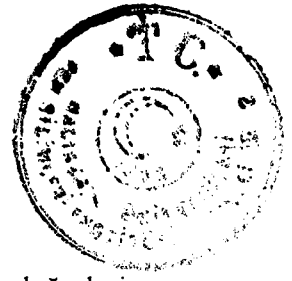
Modellemede süngerimsi malzemelerin yüzey empedansı bulunarak yutma katsayısı çeşitli parametreler göz önüne alınarak(çizelge 4.1-4.2) elde edilmiştir.

Çizelge 7.16 Süngerimsi malzemelerde sabit parametrelerin değerleri

Parametreler	Semboller	Birimi
Havanın yoğunluğu	$\rho_0 = 1.213$	kg/m ³
Ses hızı (havada)	$c_0 = 342.2$	m/s
($\gamma = c_p/c_v$)	$\gamma = 1.4$	—
Ses basıncı	$p_0 = 1.0132 \cdot 10^5$	Pa
Havanın viskozitesi	$\eta = 1.84 \cdot 10^{-5}$	poise
Prandtl sayısı	$B^2 = 0.71$	—
Poisson oranı	$\nu = 0.4$	—

Çizelge 7.17 Süngerimsi malzemelerde deneysel parametrelerin referans değerleri

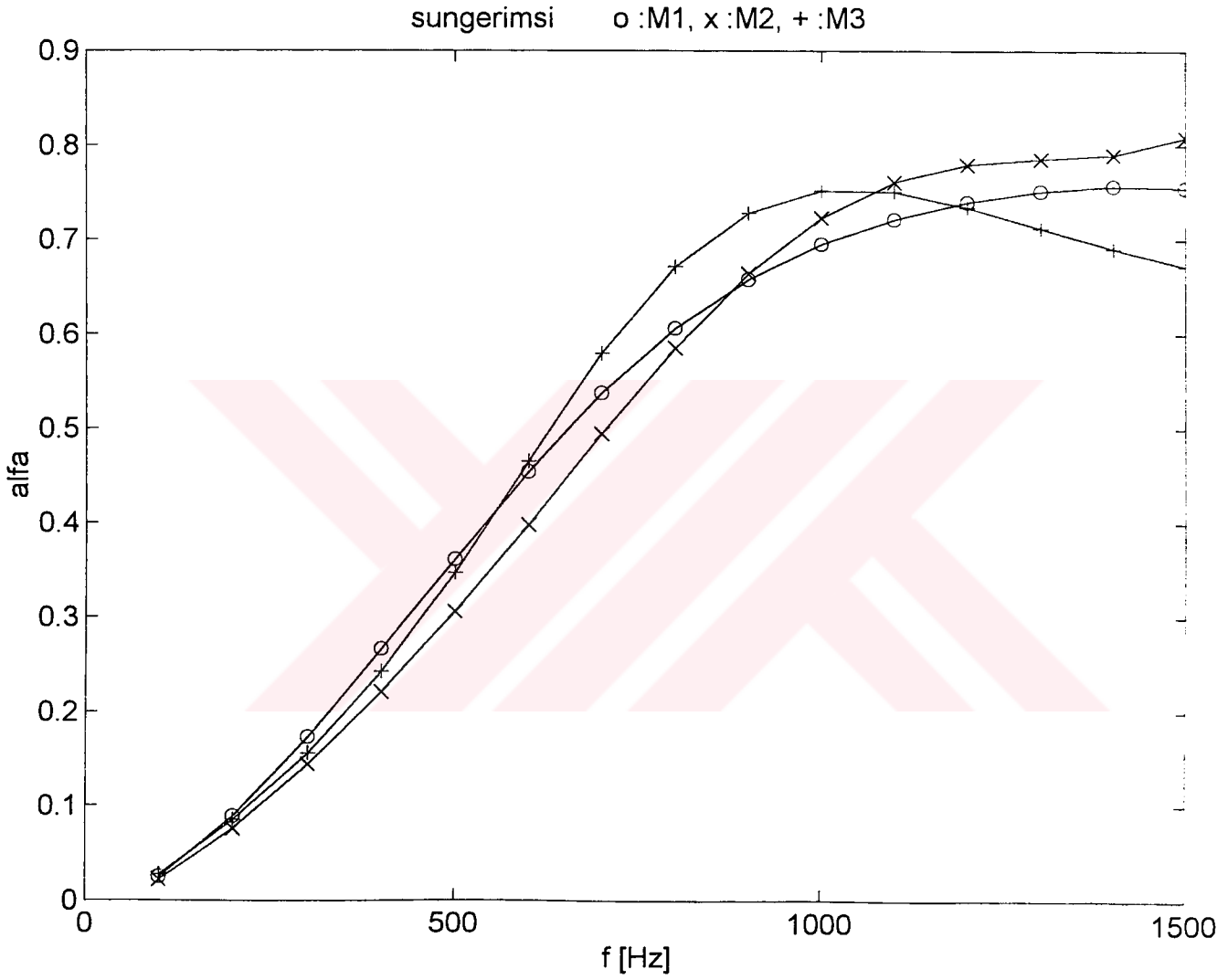
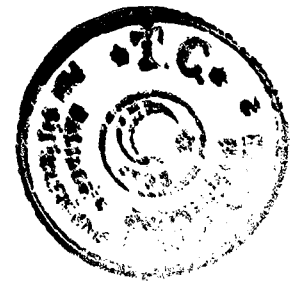
Parametreler	Ref1	Ref2	Ref3	Birimi
Akış direnci(σ)	55000	88000	10000	Ns/m ⁴
Kesme modülü(N)	$(4+j0.4)10^7$	$0.1510^6 + j0.7810^4$	$18(1+0.1j)10^4$	N/m ²
Yapı şekil faktörü(α_r)	3.2	4.5	3.5	-
Gözeneklilik(ϕ)	0.93	0.97	0.98	-
İskelet yoğunluğu(ρ_1)	30	21	12	kg/m ³



Çizelge7.18 Süngerimsi malzemelerde deneysel parametrelerin ölçüm değerleri

Malzemeler	Parametreler	Ölçüm	Birimi
Malzeme 1 (S1)	Akış direnci(σ)	98600	Ns/m ⁴
	Kesme modülü(N)	(1.45+j1.925)10 ⁵	N/m ²
	Yapı şekil faktörü(α_r)	4	-
	Gözeneklilik(ϕ)	0.96	-
	İskelet yoğunluğu(ρ_1)	100	kg/m ³
Malzeme 2 (S2)	Akış direnci(σ)	65800	Ns/m ⁴
	Kesme modülü(N)	(4.25+j1.25)10 ⁵	N/m ²
	Yapı şekil faktörü(α_r)	3.17	-
	Gözeneklilik(ϕ)	0.97	-
	İskelet yoğunluğu(ρ_1)	160	kg/m ³
Malzeme 3 (S3)	Akış direnci(σ)	72250	Ns/m ⁴
	Kesme modülü(N)	(5+j3.25)10 ⁵	N/m ²
	Yapı şekil faktörü(α_r)	5.29	-
	Gözeneklilik(ϕ)	0.98	-
	İskelet yoğunluğu(ρ_1)	125	kg/m ³

EK D.'de hesaplama yöntemi gösterilen süngerimsi malzemelerin yutma katsayıları aşağıda diyagramlar halinde verilmiştir.



Şekil 7.1 Süngerimsi akustik yalıtım malzemelerinde yutma katsayıları (alfa 981.m)



7.2.2 Lifli Malzemelerde Yutma Katsayısının Belirlenmesi

Lifli malzemelerin yutma katsayısının (α) belirlenmesinde etkili olan sabit ve deneysel parametreler aşağıda çizelge 7.18-7.21 ile verilmiştir. Ayrıca akustik yutma katsayılarının hesaplama yöntemi de EK E. ve EK F.'de sunulmuştur. EK E. ve EK F.'de görüldüğü gibi lifli malzemeler için iki modelleme yapılmıştır. Alfa 3-98.m adlı modelde ρ_1 (iskelet yoğunluğu) parametresi yoktur. Bu parametre ikinci model olan alfa 2298.m'de kullanılmıştır.

Lifli malzemelerin modellenmesi yapılırken; Bölüm 4.13'de belirtilen rijit duvara dayalı lifli malzemelerin(Şekil 4.11) empedans modeli dikkate alınmıştır.

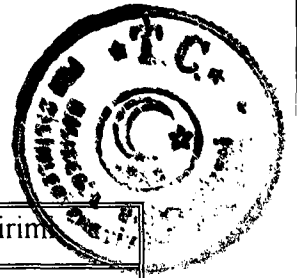
Modellemede lifli malzemelerin yüzey empedansı bulunarak yutma katsayısı, çeşitli parametreler göz önüne alınarak(çizelge 4.3-4.4) elde edilmiştir.

Çizelge 7.19 Lifli malzemelerde sabit parametrelerin değerleri

Parametreler	Semboller	Birimi
Havanın yoğunluğu	$\rho_0=1.213$	kg/m ³
Ses hızı	$c_0=342.2$	m/s
$\gamma=c_p/c_v$	$\gamma=1.4$	—
Ses basıncı	$p_0=1.0132*10^5$	Pa
Havanın viskozitesi	$\eta=1.84*10^{-5}$	poise
Prandtl sayısı	$B^2=0.71$	—

Çizelge 7.20 Lifli malzemelerde deneysel parametrelerin referans değerleri

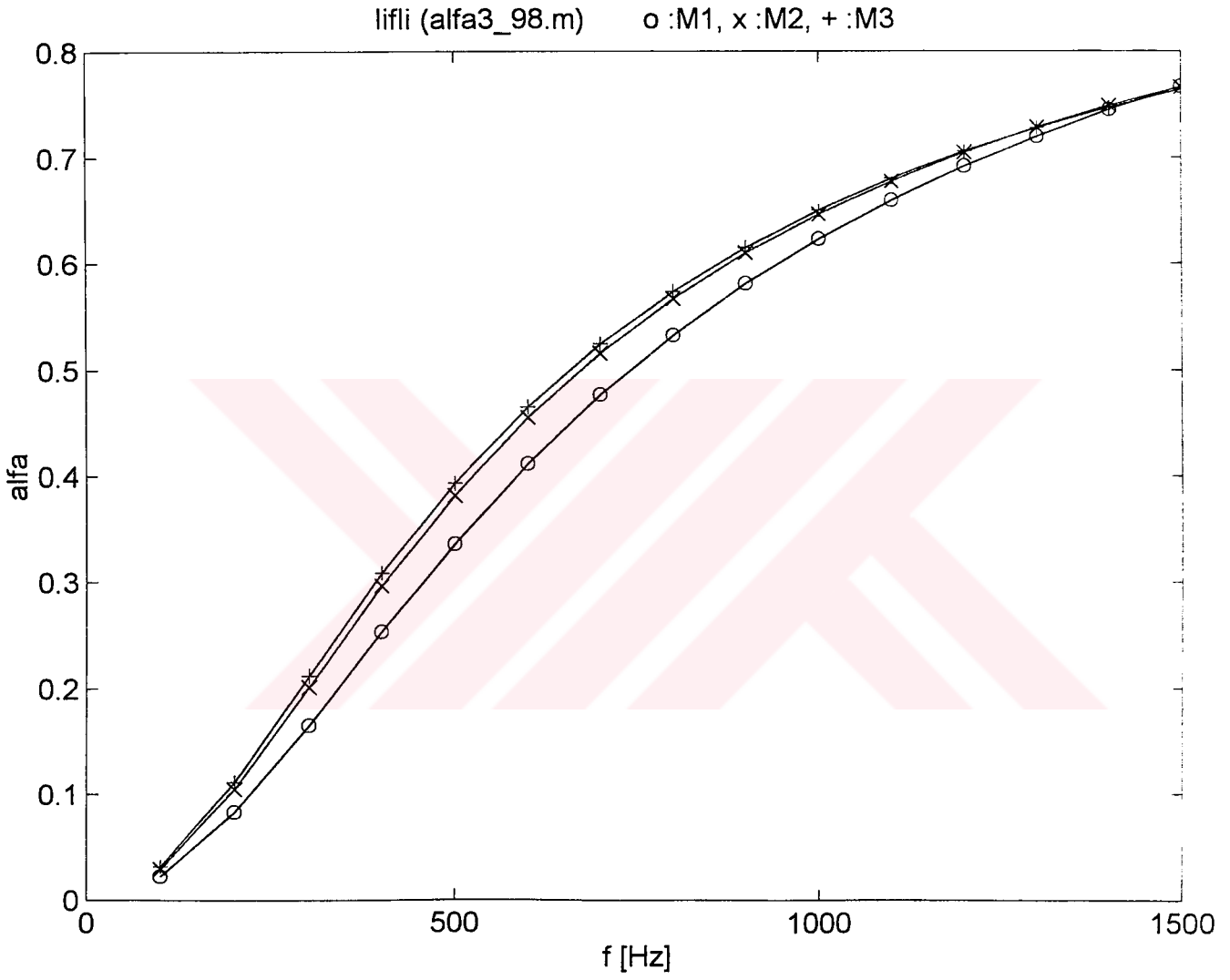
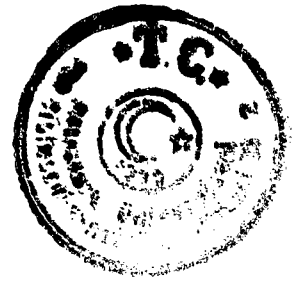
Parametreler	Ref1	Ref2	Birimi
Akış direnci(σ)	5000	40000	Ns/m ⁴
Yapı şekil faktörü(α_r)	1.5	1.06	-
Gözeneklilik(ϕ)	0.4	0.94	-
İskelet yoğunluğu(ρ_1)	100	130	kg/m ³



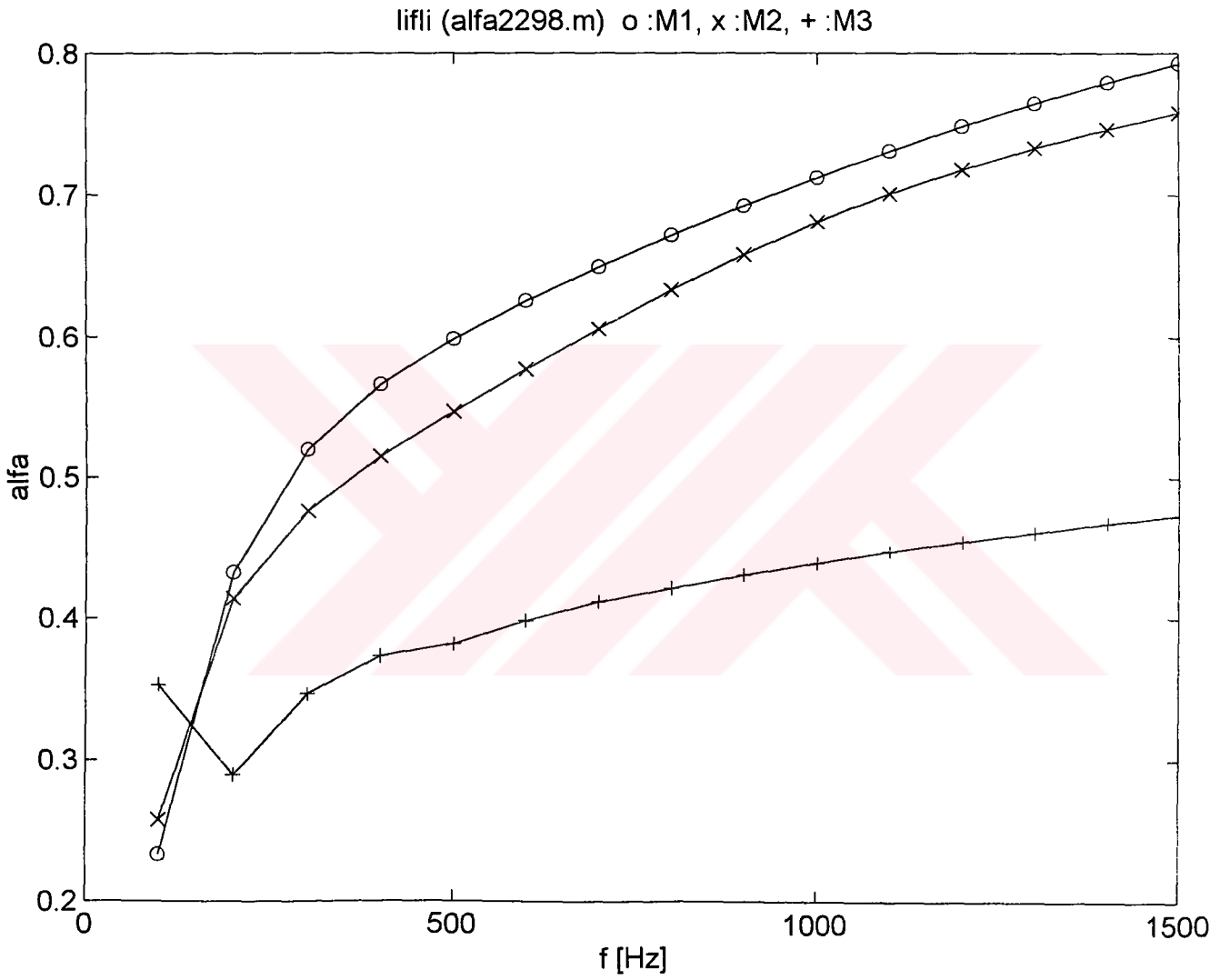
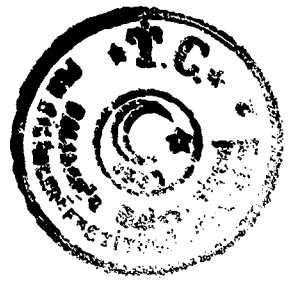
Çizelge 7.21 Lifli malzemelerde deneysel parametrelerin ölçüm değerleri

Malzemeler	Parametreler	Ölçüm	Birim
Malzeme 1 (L1)	Gözeneklilik(ϕ)	0.95	-
	Yapı şekil faktörü(α_v)	1	-
	Akış direnci(σ)	57800	Ns/m ⁴
	İskelet yoğunluğu(ρ_1)	100	kg/m ³
Malzeme 2 (L2)	Gözeneklilik(ϕ)	0.97	-
	Yapı şekil faktörü(α_v)	1.5	-
	Akış direnci(σ)	76160	Ns/m ⁴
	İskelet yoğunluğu(ρ_1)	140	kg/m ³
Malzeme 3 (L3)	Gözeneklilik(ϕ)	0.98	-
	Yapı şekil faktörü(α_v)	1.7	-
	Akış direnci(σ)	81000	Ns/m ⁴
	İskelet yoğunluğu(ρ_1)	1000	kg/m ³

EK E. ve EK F.' de hesaplama yöntemi gösterilen lifli malzemelerin yutma katsayıları aşağıda diyagramlar halinde verilmiştir.



Şekil 7.2 Lifli akustik yalıtım malzemelerinde yutma katsayıları (alfa 3-98.m)



Şekil 7.3 Lifli akustik yalıtım malzemelerinde yutma katsayıları (alfa 2298.m)

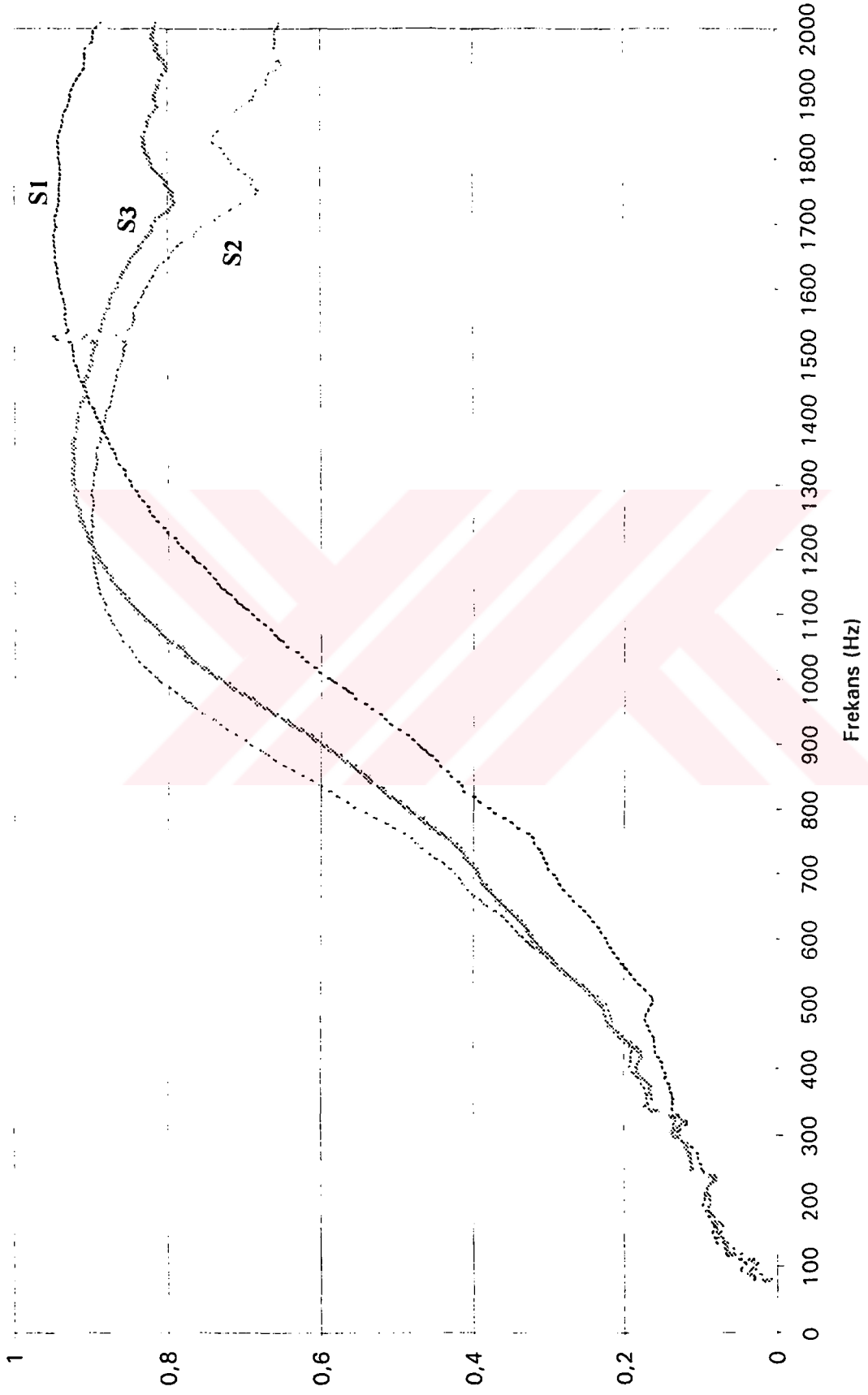
7.2.3 Deneyle Elde Edilen Yutma Katsayısının Belirlenmesi



Deneysel olarak akustik yutma katsayısı; şekil 6.5’de gösterilen, iki mikrofönlü empedans ölçüm tüpü ile belirlenmiştir. Süngerimsi ve lifli malzemeler için belirlenen yutma katsayıları aşağıda şekil 7.4-7.5 ile gösterilmiştir.



Yutma Katsayısı

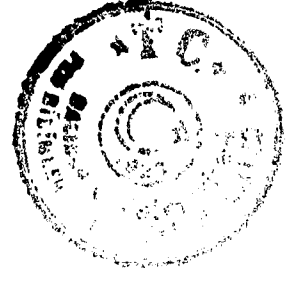
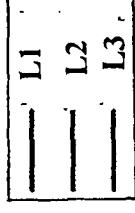
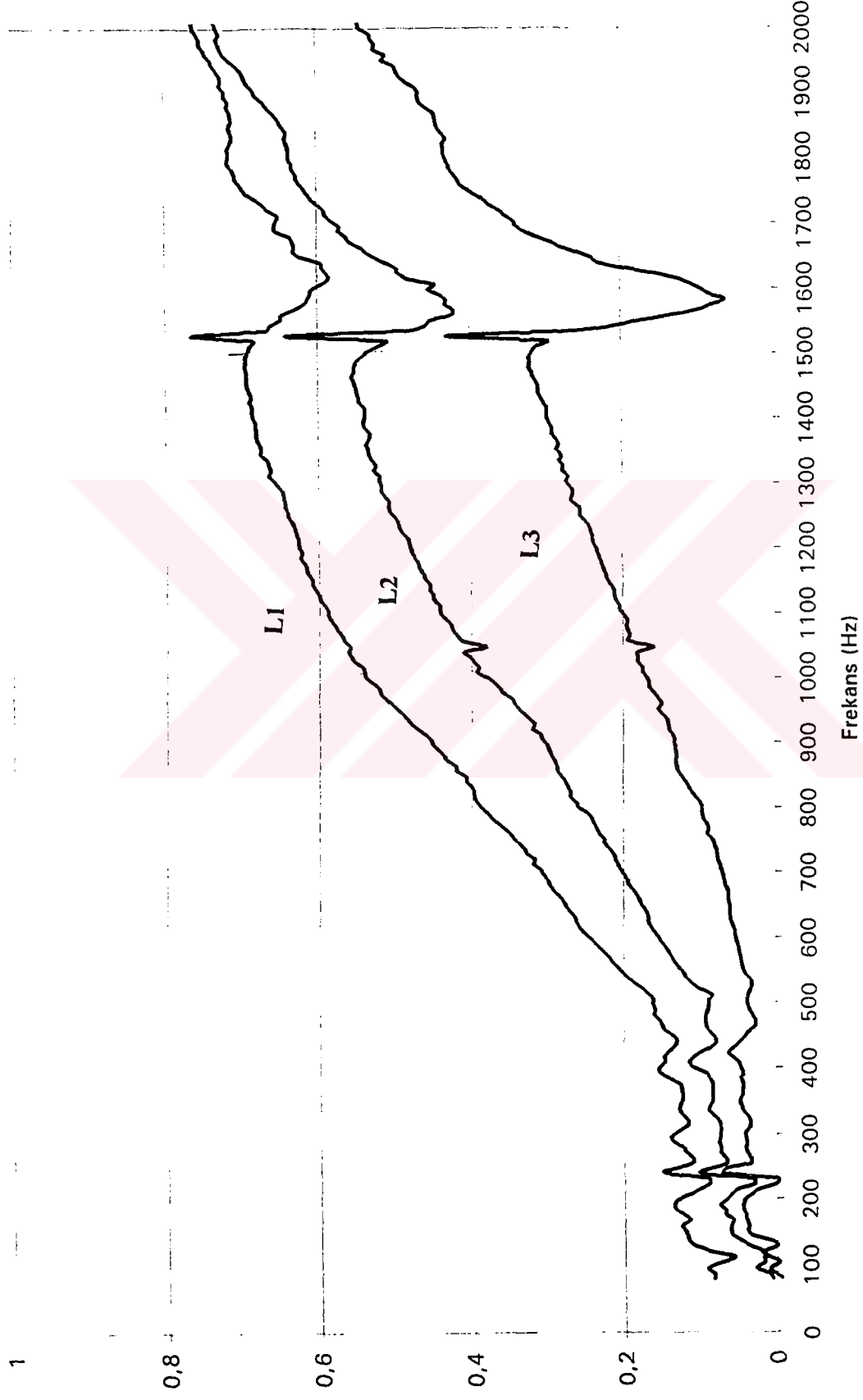


S1
S2
S3



Şekil 7.4 Süngerimsi malzemelerin deneysel yutma katsayıları

Yutma Katsayısı



Şekil 7.5 Lifli malzemelerin deneysel yutma katsayıları



7.2.4 Hesaplanan ve Deneyle Elde Edilen Yutma Katsayılarının Karşılaştırılması

Süngerimsi malzemelerin, çeşitli parametreleri dikkate alınarak hesaplanan frekansa bağlı yutma katsayıları şekil 7.1 ile; deneysel olarak bulunan yutma katsayıları ise şekil 7.4 ile verilmiştir. 500, 1000,1500 Hz'deki frekanslar göz önünde tutularak aşağıda yutma katsayısı verileri sunulmuştur.

Çizelge 7.22 Süngerimsi malzemelerin yutma katsayılarının karşılaştırılması

Malzeme	Frekans(Hz)	Yut. katsayısı(Hesaplanan)	Yut.katasayısı(Deneysel)
Malzeme 1 (S1)	500	0.36	0.17
	1000	0.7	0.6
	1500	0.75	0.91
Malzeme 2 (S2)	500	0.31	0.24
	1000	0.73	0.83
	1500	0.81	0.87
Malzeme 3 (S3)	500	0.35	0.24
	1000	0.75	0.75
	1500	0.68	0.9

Lifli malzemelerin, hesaplanan frekansa bağlı yutma katsayıları şekil 7.2-7.3 ile; deneysel olarak bulunan yutma katsayıları ise şekil 7.5 ile verilmiştir. Çizelge 7. 23 ve çizelge 7.24 ile lifli malzemelerin yutma katsayısı verileri sunulmuştur.



Çizelge 7.23 Lifli malzemelerin yutma katsayılarının karşılaştırılması (alfa 3-

98)

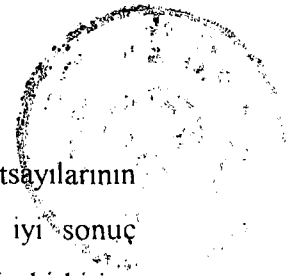
Malzeme	Frekans(Hz)	Yut. katsayısı(Hesaplanan)	Yut.katasayısı(Deneysel)
Malzeme 1 (L1)	500	0.35	0.15
	1000	0.63	0.54
	1500	0.77	0.7
Malzeme 2 (L2)	500	0.38	0.1
	1000	0.65	0.4
	1500	0.78	0.54
Malzeme 3 (L3)	500	0.4	0.05
	1000	0.66	0.17
	1500	0.77	0.32

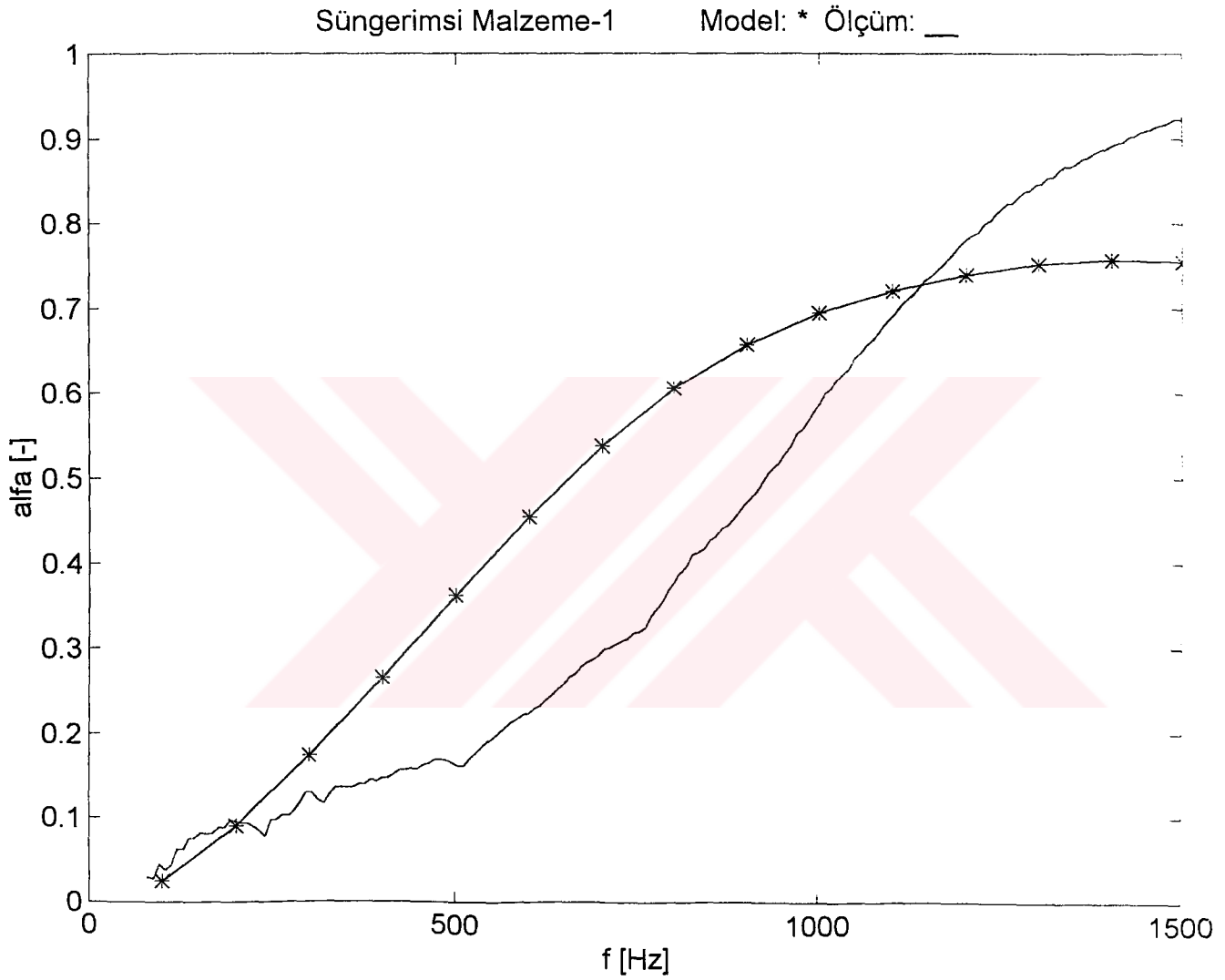
Çizelge 7.24 Lifli malzemelerin yutma katsayılarının karşılaştırılması(alfa 2298.m)

Malzeme	Frekans(Hz)	Yut. katsayısı(Hesaplanan)	Yut.katasayısı(Deneysel)
Malzeme 1 (L1)	500	0.61	0.15
	1000	0.71	0.54
	1500	0.78	0.7
Malzeme 2 (L2)	500	0.55	0.1
	1000	0.68	0.4
	1500	0.78	0.54
Malzeme 3 (L3)	500	0.31	0.05
	1000	0.44	0.17
	1500	0.47	0.32

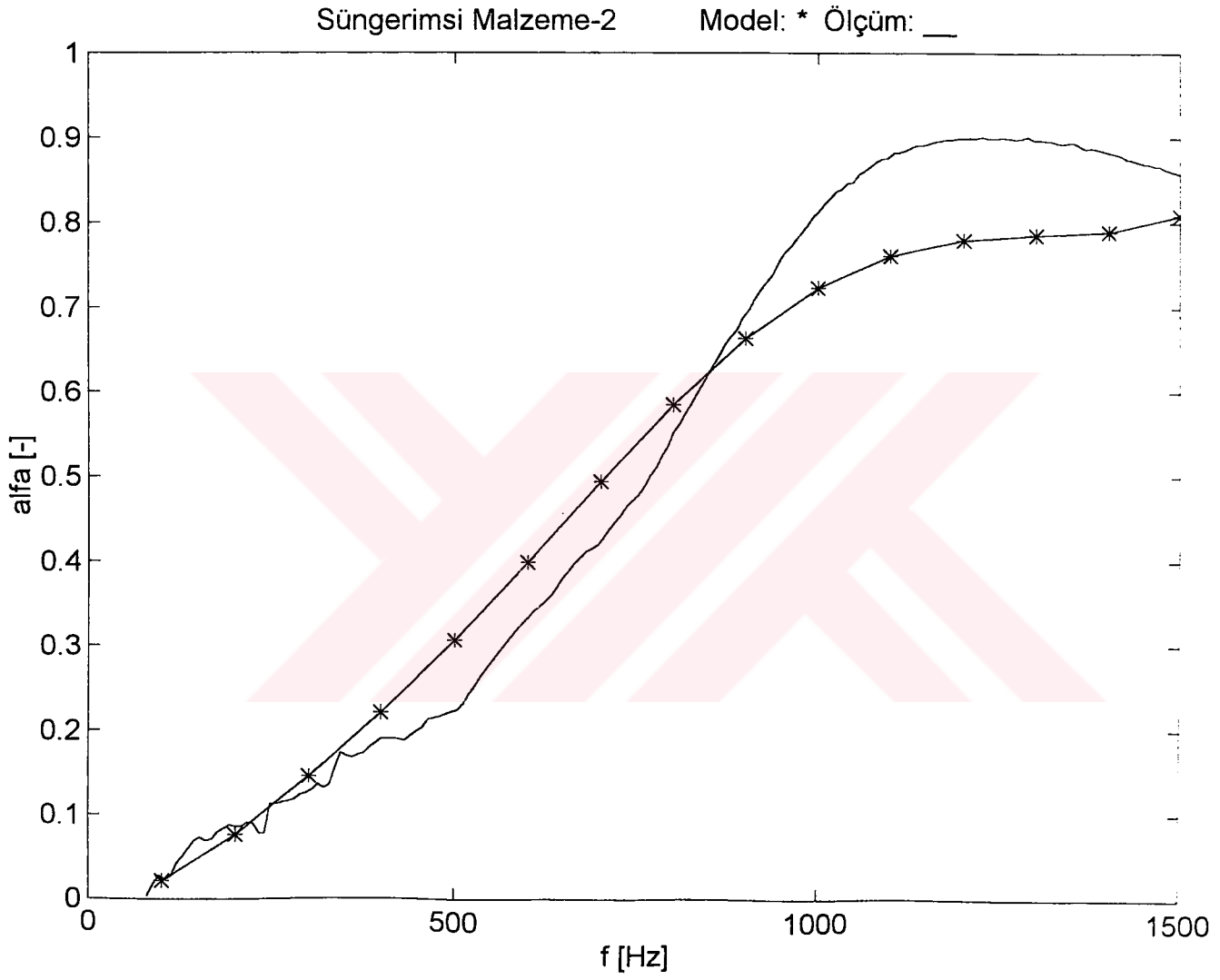
Şekil 7.6-7.8'de süngerimsi malzemelerin; şekil 7.9-7.14'de lifli malzemelerin sayısal ve deneysel yutma katsayıları karşılaştırılmak üzere diyagramlar elde edilmiştir.

Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayılarının karşılaştırılmasında süngerimsi malzemeler lifli malzemelere göre daha iyi sonuç vermiştir. Süngerimsi malzemelerde 1000 Hz civarında her üç malzeme için birbirine yakın değerler bulunmuştur.

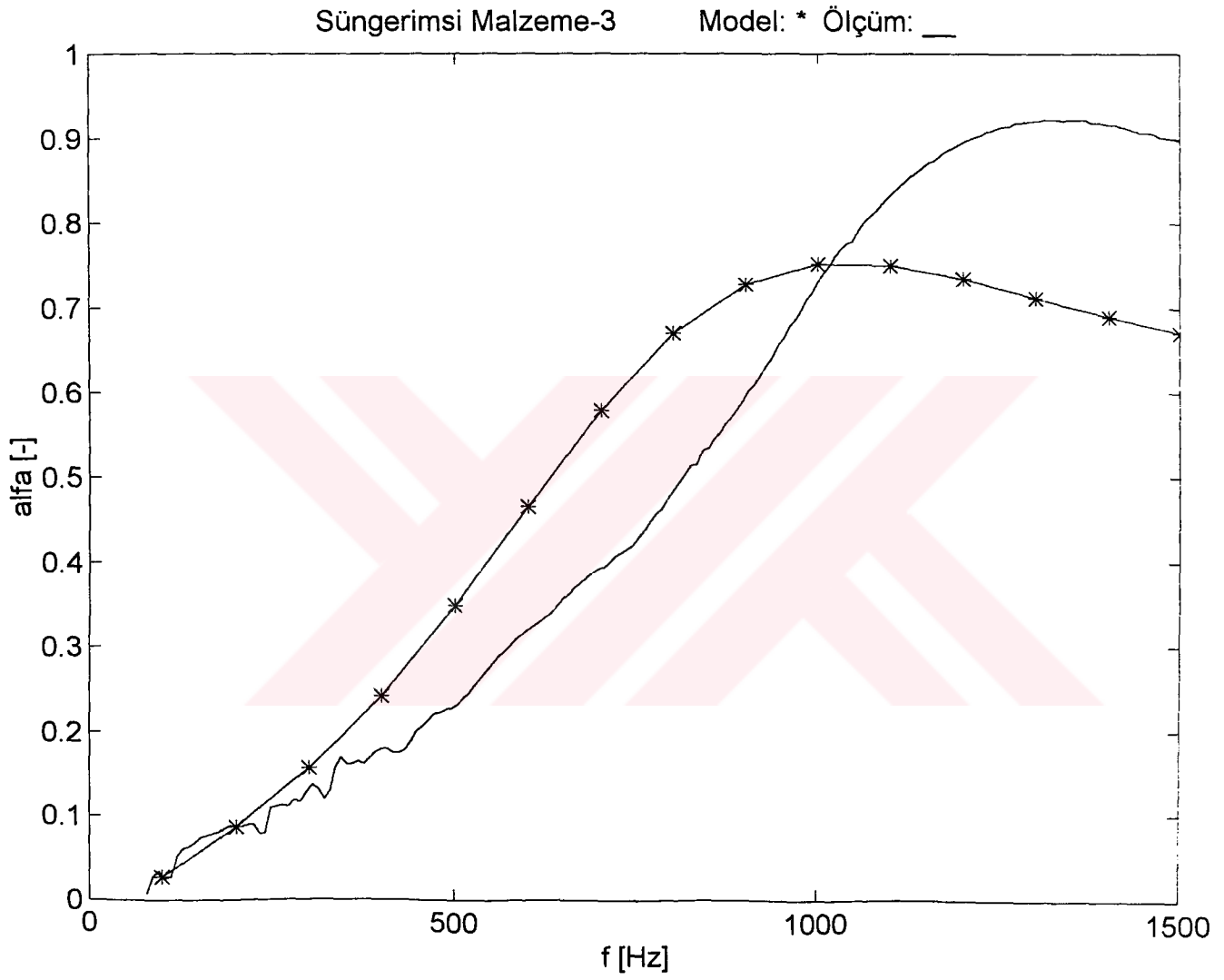
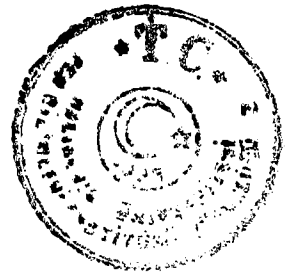




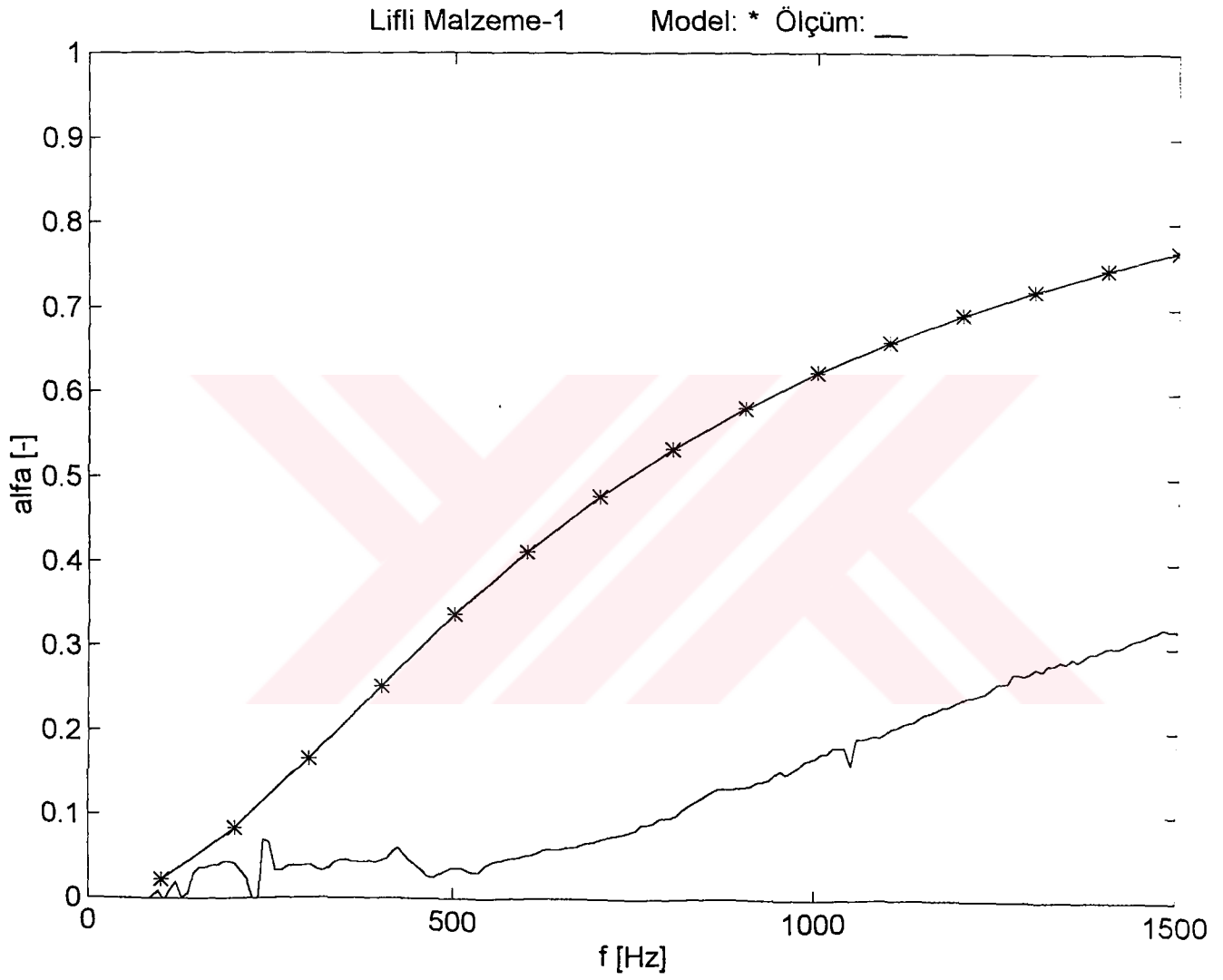
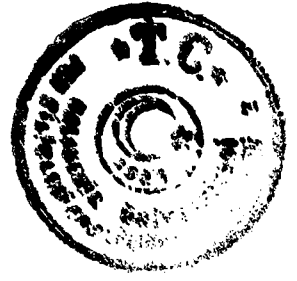
Şekil 7.6 Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayılarının karşılaştırılması (alfa 981.m)



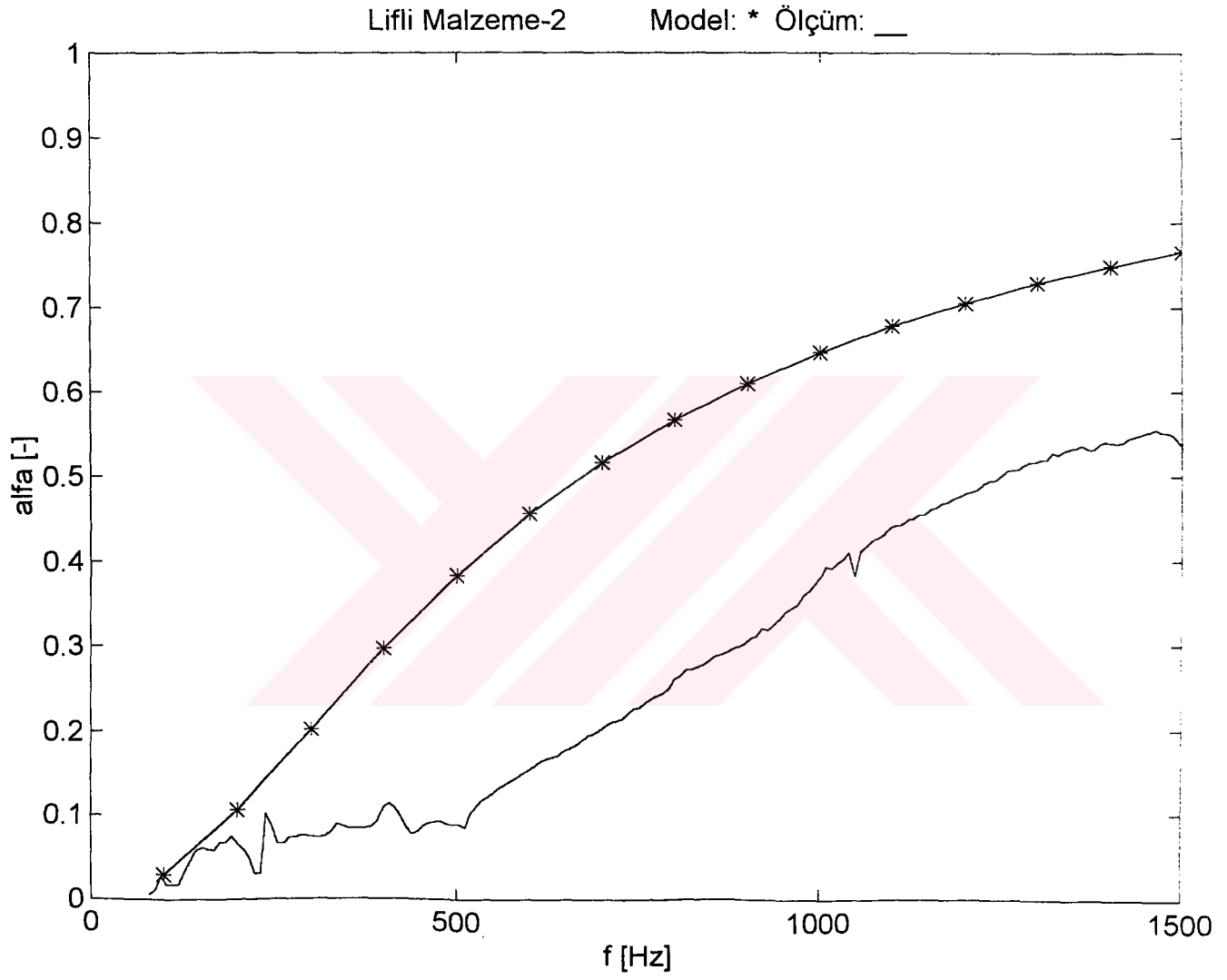
ekil 7.7 Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayılarının karşılaştırılması
(alfa 981.m)



Şekil 7.8 Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayılarının karşılaştırılması (alfa 981.m)

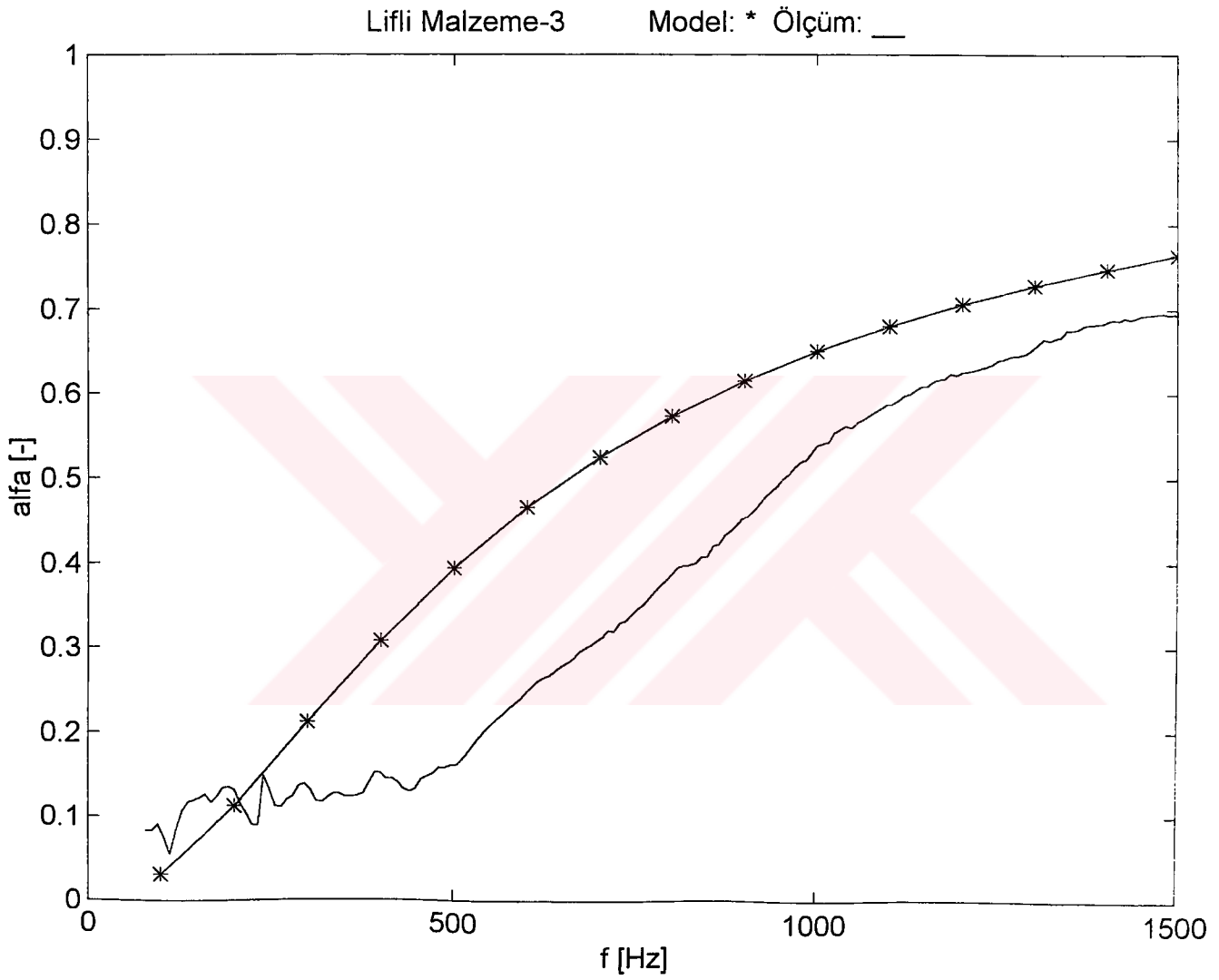


Şekil 7.9 Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayılarının karşılaştırılması (alfa 3-98.m)

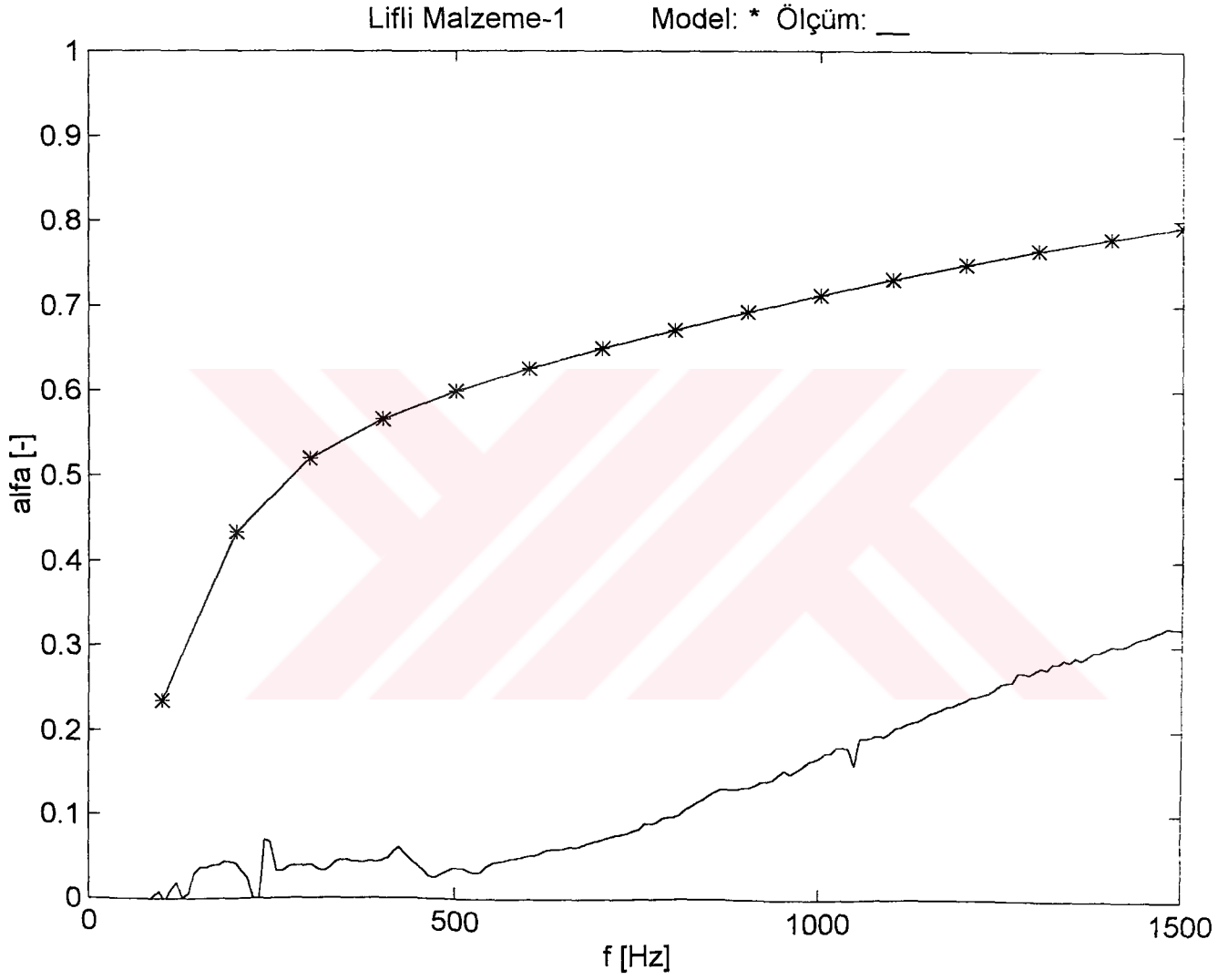


Şekil 7.10 Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayılarının karşılaştırılması (alfa 3-98.m)

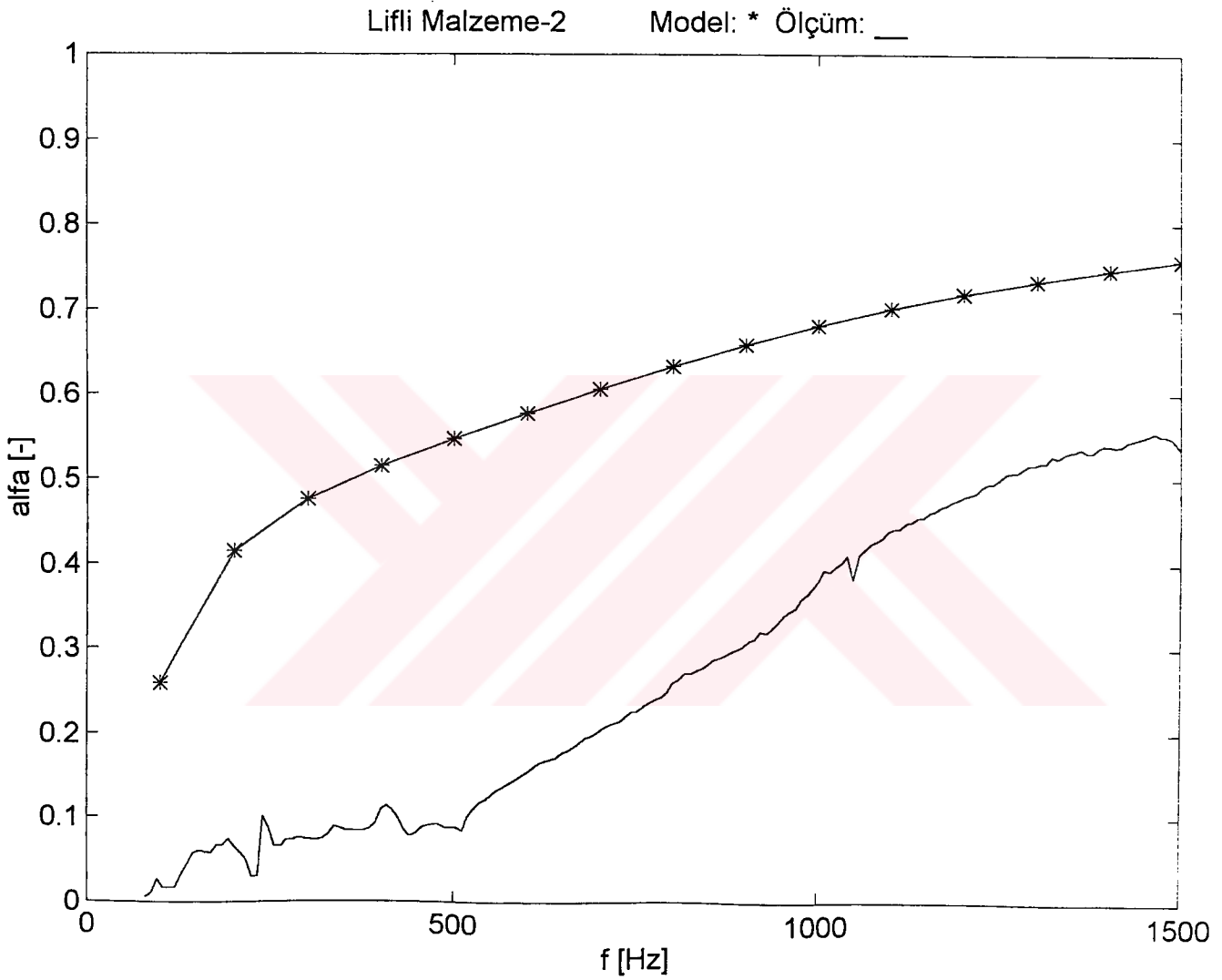
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM
DOKÜMANTASYON



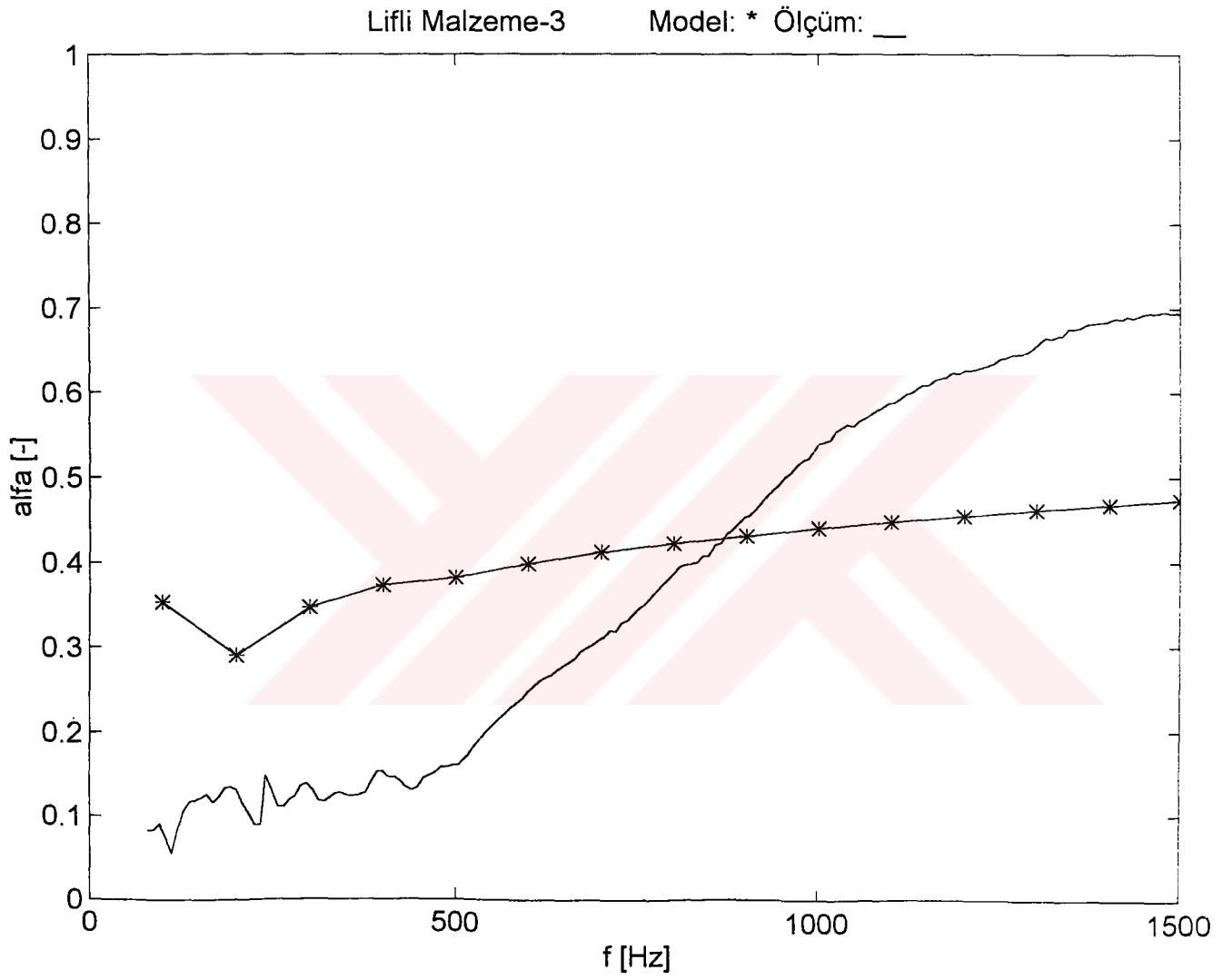
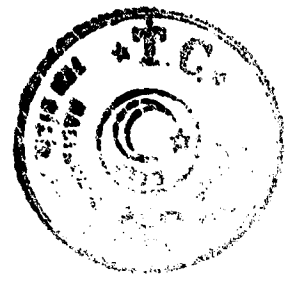
Şekil 7.11 Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayılarının karşılaştırılması
(alfa 3-98.m)



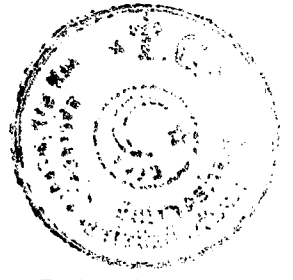
Şekil 7.12 Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayılarının karşılaştırılması
(alfa 2298.m)



Şekil 7.13 Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayılarının karşılaştırılması
(alfa 2298.m)



ekil 7.14 Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayılarının karşılaştırılması
(alfa 2298.m)



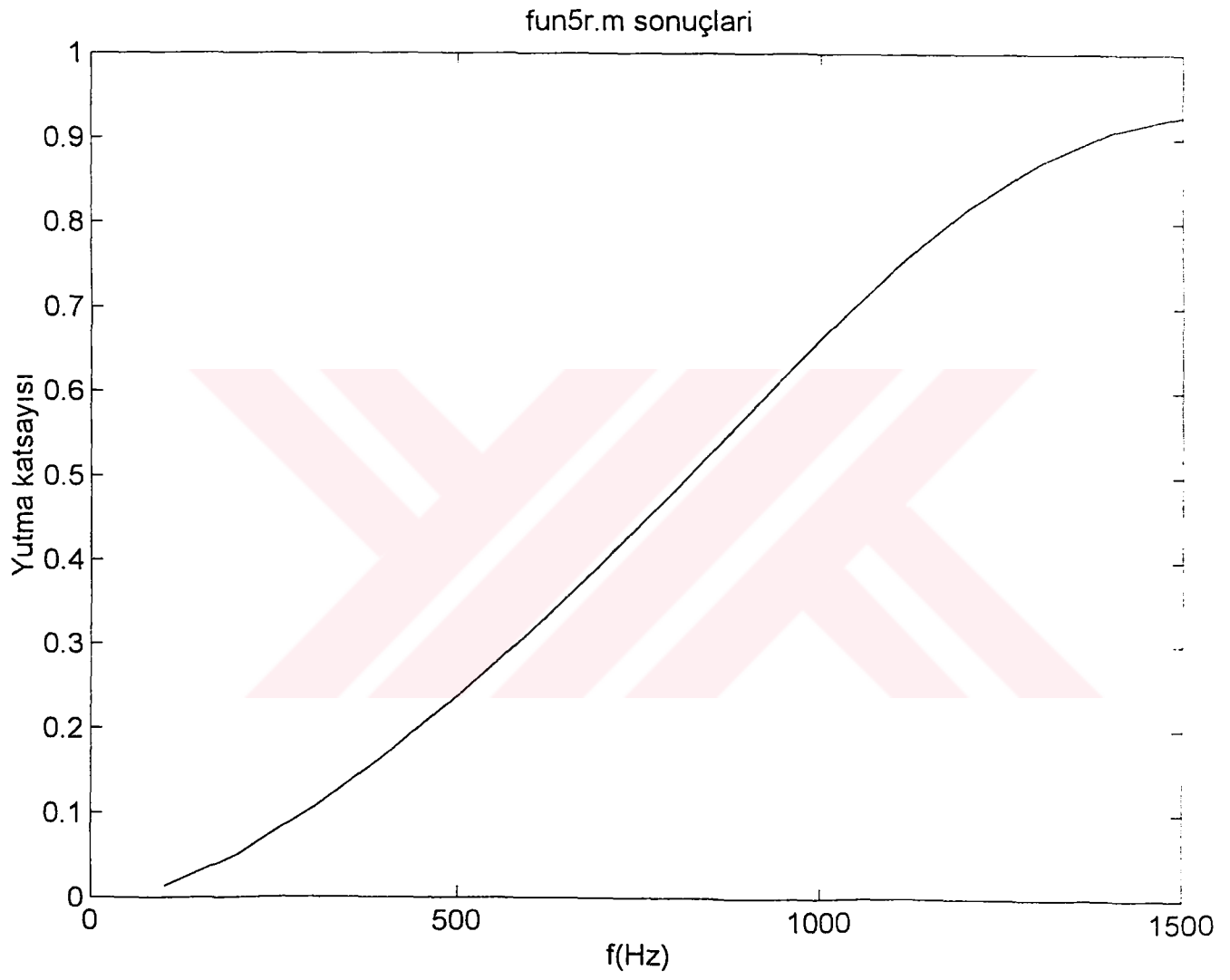
7.3 Optimizasyon

Süngerimsi ve lifli malzemelerin akustik yutma katsayılarının 5. Bölümde belirtilen algoritmada optimizasyonu yapılarak belirli frekansa bağlı en iyi yutma katsayıları elde edilmeye çalışılmıştır.

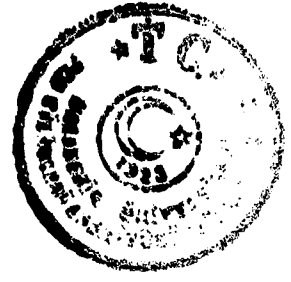
Optimizasyon sonucunda elde edilen veriler aşağıda diyagramlar halinde sunulmuştur.

7.3.1 Süngerimsi Malzemelerin Optimizasyonu

Süngerimsi malzemelerin optimizasyonu sonucunda elde edilen yutma katsayısı şekil 7.15 ile verilmiştir. Ayrıca süngerimsi malzemelerin optimizasyonu EK A.'da sunulmuştur.



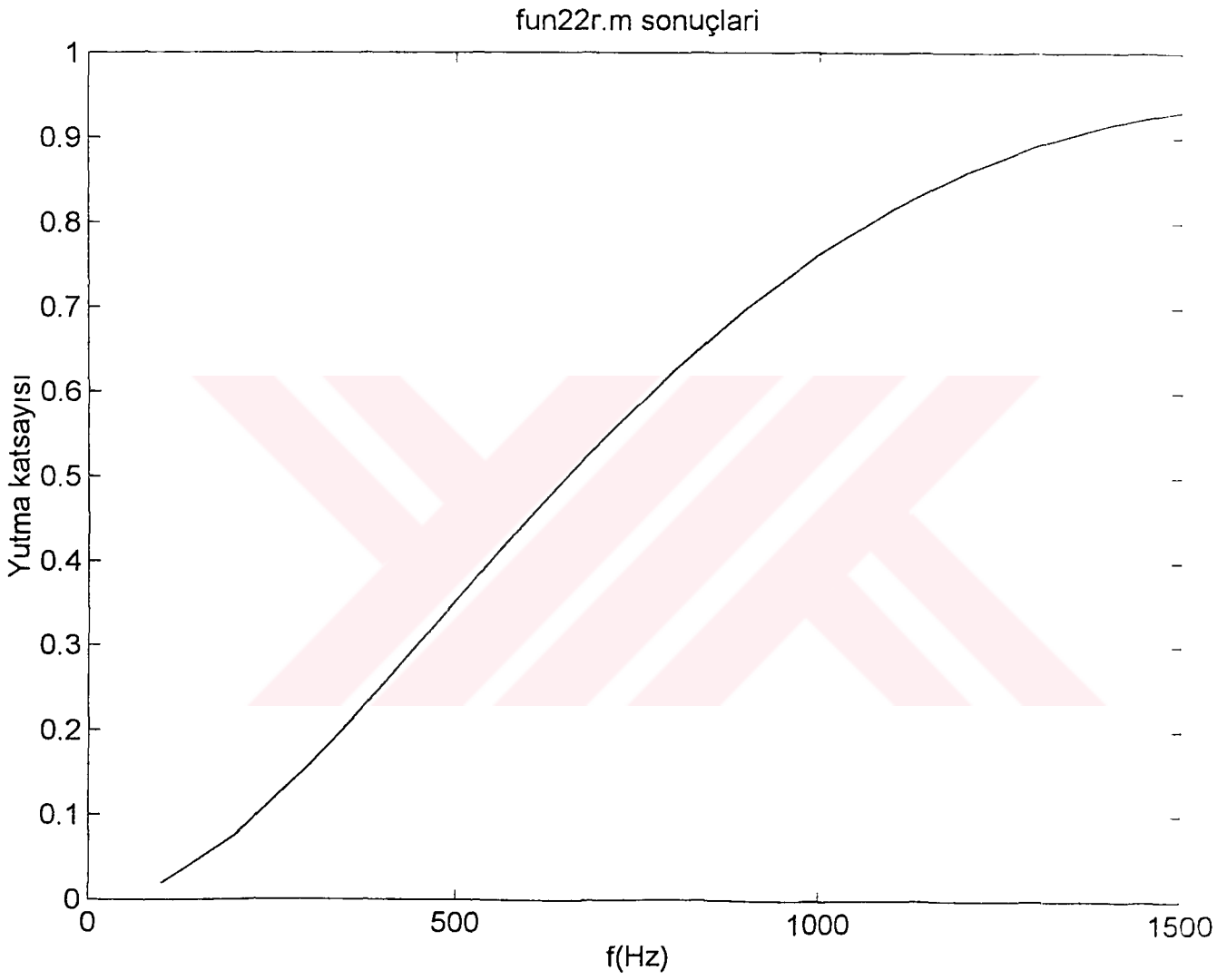
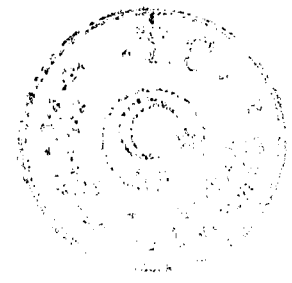
Şekil 7.15 Süngerimsi malzemelerin optimizasyonu sonucunda elde edilen yutma katsayısı



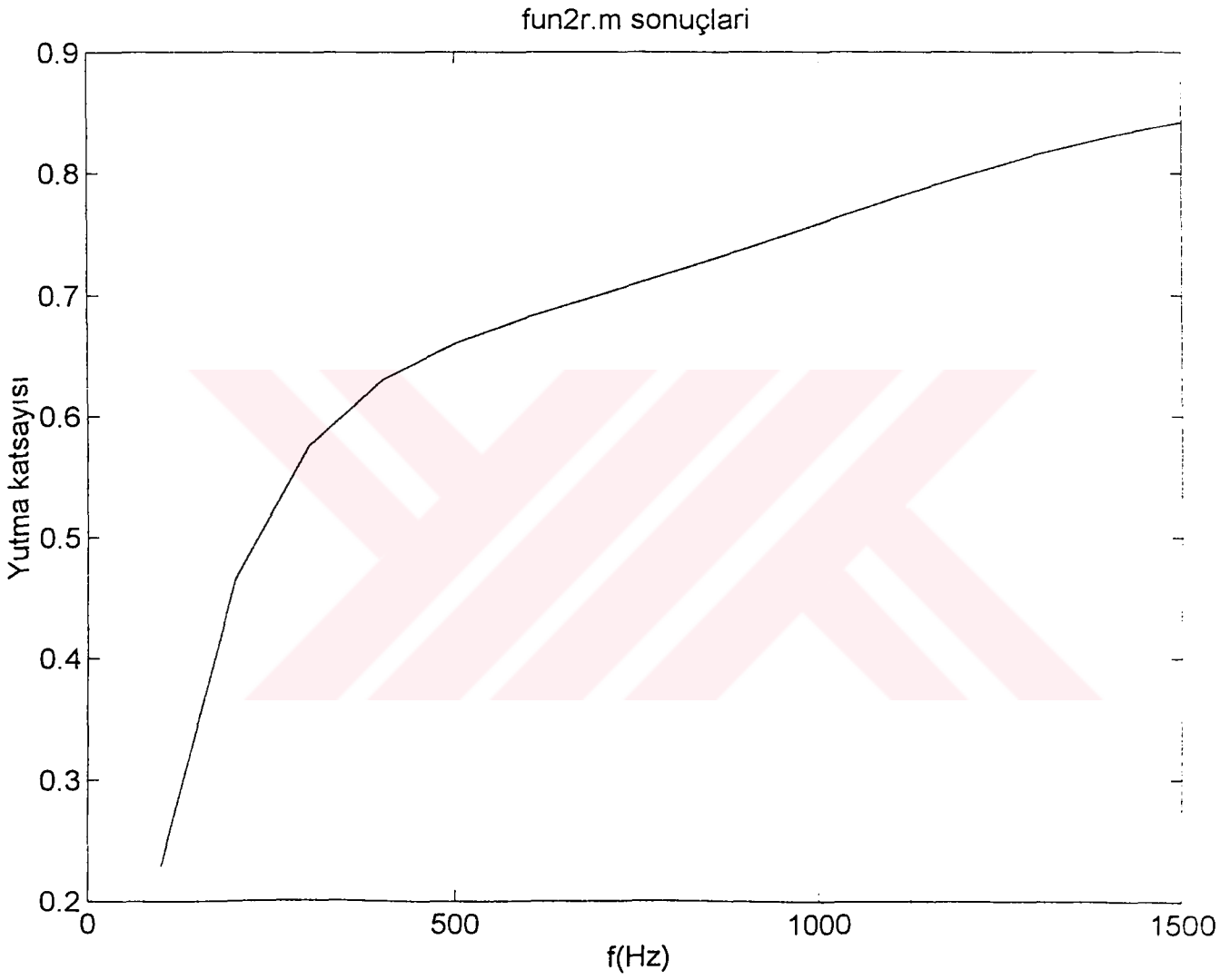
7.3.2 Lifli Malzemelerin Optimizasyonu

Lifli malzemelerin optimizasyonu sonucunda elde edilen yutma katsayısı şekil 7.16-7.17 ile verilmiştir. Ayrıca lifli malzemelerin optimizasyonu EK B. ve EK C.'de verilmiştir.

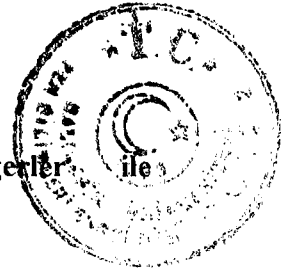




Şekil 7.16 Lifli malzemelerin optimizasyonu sonucunda elde edilen yutma katsayısı



Şekil 7.17 Lifli malzemelerin optimizasyonu sonucunda elde edilen yutma katsayısı



7.3.3 Optimizasyon Sonucunun Hesaplanmış Değerler ile Karşılaştırılması

Lifli ve süngerimsi malzemelerin modeli, 4. Bölümde verilmiştir. Akustik yalıtım malzemelerinin empedans modeli yapılırken yüzey empedansı şekil 4.9 ve şekil 4.11' den yararlanılarak bulunmuştur. Daha sonra lifli ve süngerimsi malzemelerin yutma katsayıları bulunmuş ve daha iyi yutma katsayısı elde edilebilmesi için optimizasyonu belirli bir frekansta yapılmıştır

Aşağıda lifli ve süngerimsi malzemelerin optimizasyon öncesi ve sonrası malzeme özelliğine etki eden bazı parametrelerin kısıt olarak alınmış değerleri ve yutma katsayıları verilmiştir.

Süngerimsi malzemelerin modelleri EK A., EK D. ile; lifli malzemelerin modelleri ise EK B., EK C., EK E. ve EK F. ile sunulmuştur.

Süngerimsi Malzemeler

$f_r = 1500 \text{ Hz}$ ' de

Optimizasyon Öncesi(alfa 981.m)

Yutma Katsayısı(α)=0.8

X(eski değerler)

Gözeneklilik (ϕ) =X(1) =0.98

Yapı şekil faktörü (α_r) =X(2) =5.29

Akış direnci (σ) =X(3) =72250

Malzemenin kalınlığı (l) =X(4) =0.02

Şekil faktörü (c) = X(5) =3.37

Kesme modülü (N) = X(6)* 10^5 =5* 10^5

Kesme modülü (N) =j*X(7)* 10^5 =j*3.25* 10^5

İskelet yoğunluğu (ρ_1) =X(8) =125

Optimizasyon Sonrası

Yutma Katsayısı(α)=0.92

X(yeni değerler)

X(1) =0.98

X(2) =4.5

X(3) =49999

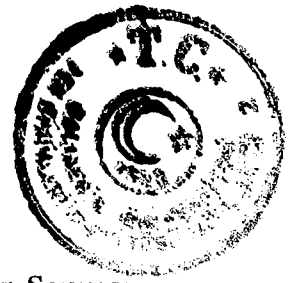
X(4) =0.018

X(5) =2

X(6)* 10^5 =7* 10^5

j*X(7)* 10^5 =j*0.1* 10^5

X(8) =20.816



Lifli Malzemeler

fr = 1500 Hz' de

Optimizasyon Öncesi(alfa 2298.m)

Yutma Katsayısı(α)=0.75

X(eski değerler)

Gözeneklilik (ϕ) =X(1) =0.98

Yapı şekil faktörü (α_s) =X(2) =1.7

Akış direnci (σ) =X(3) =81000

Lif yarıçapı (R)=X(4) =2.47.10⁻⁶

İskelet yoğunluğu (ρ_1) =X(5)=1000

Malzemenin kalınlığı (d) =X(6) =0.07

Optimizasyon Sonrası

Yutma Katsayısı(α)=0.93

X(yeni değerler)

X(1) =0.97

X(2) =3.2

X(3) =50000

X(4) =0.000005

X(5) =73.026

X(6) =0.025

Lifli Malzemeler

fr = 1500 Hz' de

Optimizasyon Öncesi(alfa 3-98.m)

Yutma Katsayısı(α)=0.78

X(eski değerler)

Gözeneklilik (ϕ) =X(1) =0.98

Yapı şekil faktörü (α_s) =X(2) =1.7

Akış direnci (σ) =X(3) =81000

Malzemenin kalınlığı(d)=X(4)=0.025

Şekil faktörü(c)=X(5)=0.59

Optimizasyon Sonrası

Yutma Katsayısı(α)=0.85

X(yeni değerler)

X(1) =0.97

X(2) =3.2

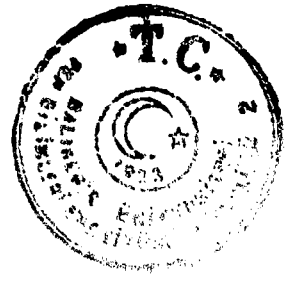
X(3) =49999.99

X(4)=0.065

X(5)=0.78

Belirli bir frekansta (fr=1500 Hz'de) yapılan optimizasyon sonucunda; süngerimsi malzemelerin yutma katsayısı(α), 0.8'den 0.92'ye, lifli malzemelerin yutma katsayısı ise ilk modelde 0.75'ten 0.93'e, ikinci modelde 0.78'den 0.85'e iyileşme göstermiştir.

Yutma katsayısını etkileyen kısıt değeri olarak alınmış malzemenin çeşitli parametrelerinin optimal sonuçları da bulunmuştur.



8. SONUÇ ve ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

Bu çalışmada; akustik yalıtım malzemesi olarak lifli ve süngerimsi malzemeler kullanılmış olup, homojen olarak alınan malzemelerin akustik empedans modelleri kurularak sayısal yutma katsayıları bulunmuştur.

Sayısal çalışmaları, deneysel çalışmalar desteklemiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçları iki bölüm altında toplayabiliriz:

Bunlardan birincisi; akustik yalıtım malzemelerinin yutma katsayısında etken olan akış direnci, kesme modülü, yapısal şekil faktörü, gözeneklilik, iskelet yoğunluğu gibi parametrelerin ölçümü yapılmıştır. Parametrelerin ölçümünde, deneysel zorluklar ile karşılaşılması nedeniyle özellikle lifli malzemelerin yapı şekil faktörü, süngerimsi-lifli malzemelerin akış direnci için istenilen sonuçlar elde edilememiş ve bu nedenle yaklaşık değerler yutma katsayısında kullanılmaya çalışılmıştır.

İkincisi; şekil 6.5'te gösterilen, empedans tüp ile elde edilen yutma katsayıları hesaplanmış yutma katsayıları ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda bazı frekanslarda sayısal ve deneysel sonuçlar birbirine tutmamıştır. Deneysel çalışmalarda; numunelerin hazırlanmasında ve deneysel empedans tüpündeki rezonans olayı bu sonuçları olumsuz yönde etkilemiş olabilir.

Süngerimsi malzemelerde yaklaşık olarak 500 Hz'de 0.34, 1000 Hz'de 0.72, 1500 Hz'de 0.74 yutma katsayıları elde edilmişken, lifli malzemelerde 500 Hz'de 0.61, 1000 Hz'de 0.71, 1500 Hz'de 0.67 yutma katsayıları yaklaşık olarak elde edilmiştir.

Bunun sonucunda; lifli malzemelerde alçak frekanslarda yutma katsayıları daha iyi, süngerimsi malzemelerde ise yüksek frekanslarda yutma katsayıları daha iyi olduğu anlaşılmıştır.



Süngerimsi malzemelerde; hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayıları birbirine yakın değerdedir. Lifli malzemelerde ise; ilk modellemedeki (alfa 3-98.m) yutma katsayıları, ikinci modellemeden (alfa 2298.m) daha iyi sonuçlar vermiştir. Hesaplanarak ve deneysel olarak elde edilen yutma katsayıları arasındaki fark, yapı şekil faktörü, gözeneklilik, akış direnci gibi yutma katsayısını etkileyen parametrelerin deney sonuçlarının tam doğrulukla ölçülememesi olarak yorumlanabilir.

Optimizasyon sonucunda; süngerimsi malzemelerde $f=1500$ Hz'de yutma katsayısı 0.8'den 0.92'ye, lifli malzemelerde 0.75'ten 0.93'e yükselmiştir.

Ayrıca optimizasyonda optimal sonuçları bulunan malzemelerin çeşitli parametreleri yeni malzeme geliştirilmesi için bir örnek oluşturmuştur.

8.1 Çalışmanın Devamına İlişkin Öneriler

Akustik yalıtım malzemelerindeki , malzemenin özelliğine ve geometresine bağlı çeşitli parametrelerin etkileri tek tek araştırılabilir ve yutma katsayısına etkisi görülebilir.

Örneğin; malzemenin ne kadar kalınlıkta olacağı, lif yarı çapının az ya da çok olması, gözeneklilik olarak adlandırdığımız hava dolu yapıların artırılması ya da azaltılması bir öneri olarak sunulabilir.

EK A. Süngerimsi Malzemelerin Optimizasyonu



```
%-----  
%      fun5r.m  
%      Bu program sungerimsi malzeme için  
%      yutma katsayýsýný optimize eder ve  
%      alfa=f(frekans)  
%      egrisini çizer.  
%      (optr.m = funr.m+alfa4.m)  
%-----  
%-----  
% fun programinin calistirilarak x'lerin bulunmasi (funr.m)  
%-----  
x0=[0.96 3 50000 0.018 2.6 1 0.1 21];  
options(16) = 1e-10;  
options(17) = 0.5;  
%x=constr('fun41',x0,options);  
  
x=constr('fun5',x0,options);  
[f,g] = fun(x);  
fprintf ('x0 = \n')  
fprintf ('%8.3g \n ',x0)  
fprintf ('\n')  
  
fprintf ('x = \n')  
fprintf ('%8.3f \n',x)  
fprintf ('\n')  
  
fprintf ('g = \n')  
fprintf (' %8.3f \n',g)  
  
fprintf ('alfa = %8.3f \n',f)  
fprintf ('\n')  
  
%-----  
% Yukarida bulunan x degerlerinin kullanilarak  
% egrinin cizdirilmesi. (alfa4.m)  
%-----  
f1 = 100:100:1500;  
alfa(15) = 0;  
for i = 1:15,  
    f = 100*i;  
    om = 2*pi*f;  
    ro0 = 1.213;  
    c0 = 342.2;  
    phi = x(1);  
    alfas = x(2);  
    sigma = x(3);  
    l = x(4);  
    c = x(5);  
    gam = 1.4;  
    p0 = 1.0132*10^5;  
    eta = 1.84*10^(-5);
```




```

bek = 0.71;
shem = x(6)*10^(5)+j*x(7)*10^5;
ro1 = x(8);
pois = 0.4;
lam = (1/c)*((8*alfas*eta)/(phi*sgma))^(0.5);
G = (1+(4*j*alfas^2*eta*ro0*om)/(sgma^2*lam^2*phi^2))^(0.5);
roA = ro0*phi*(alfas-1);
ro22 = phi*ro0+roA-j*sgma*phi^2*(G/om);
ro12 = -roA+j*sgma*phi^2*(G/om);
ro11 = ro1+roA-j*sgma*phi^2*(G/om);
lamu = c*((8*alfas*eta)/(phi*sgma))^(0.5);
kb = (2*shem*(pois+1))/(3*(1-2*pois));
H = (1+(j*ro0*om*bek^2*lamu^2)/(16*eta));
L = (8*eta)/(j*lamu^2*bek^2*om*ro0);
K = (gam*p0)/(gam-(gam-1)*(1+L*H^0.5)^(-1));
P = (4/3)*shem+kb+((1-phi^2)/phi)*K;
Q = K*(1-phi);
R = phi*K;
del = (P*ro22+R*ro11-2*Q*ro12)^2-4*(P*R-Q^2)*(ro11*ro22-ro12^
2);
deli = (((om^2)/(2*(P*R-Q^2)))*(P*ro22+R*ro11-2*Q*ro12+sqrt(d
el)))^(0.5);
delb = (((om^2)/(2*(P*R-Q^2)))*(P*ro22+R*ro11-2*Q*ro12-sqrt(d
el)))^(0.5);
nui = ((P*deli^2-om^2*ro11)/(om^2*ro12-Q*deli^2));
nub = ((P*delb^2-om^2*ro11)/(om^2*ro12-Q*delb^2));
zif = ((R+(Q/nui))*(deli/(phi*om)));
zbf = ((R+(Q/nub))*(delb/(phi*om)));
zis = ((P+Q*nui)*(deli/om));
zbs = ((P+Q*nub)*(delb/om));
D = (1-phi+phi*nui)*(zbs-(1-phi)*zbf*nub)*tan(deli*1)+(1-phi+
phi*nub)*(zif*nui*(1-phi)-zis)*tan(delb*1);
Z = -j*((zbs*zif*nui-zis*zbf*nub)/D);
zic = ro0*c0;
E = (Z-zic)/(Z+zic);
alfa(i) = (1-((abs(E))^2));
end;
plot(f1,alfa,'w');
axis([0 1500 0 1])
title('fun5r.m sonuçlari')
xlabel('f(Hz)')
ylabel('Yutma katsayısı')
end

```



 fun5.m

Bu program süngerimsi malzemelerin yutma katsayısının optimizasyonunu yapar.

function [f,g] = fun(x)

```

fr = 1500;
om = 2*pi*fr;
ro0 = 1.213;
c0 = 342.2;
gam = 1.4;
p0 = 1.0132*10^5;
eta = 1.84*10^(-5);
bek = 0.71;
pois = 0.4;
lam = (1/x(5))*((8*x(2)*eta)/(x(1)*x(3)))^(0.5);
G = (1+(4*j*x(2)^2*eta*ro0*om)/(x(3)^2*lam^2*x(1)^2))^(0.5);
roA = ro0*x(1)*(x(2)-1);
ro22 = x(1)*ro0+roA-j*x(3)*x(1)^2*(G/om);
ro12 = -roA+j*x(3)*x(1)^2*(G/om);
ro11 = x(8)+roA-j*x(3)*x(1)^2*(G/om);
lamu = x(5)*((8*x(2)*eta)/(x(1)*x(3)))^(0.5);
kb = (2*x(6)*10^5+j*x(7)*10^5*(pois+1))/(3*(1-2*pois));
H = (1+(j*ro0*om*bek^2*lamu^2)/(16*eta));
L = (8*eta)/(j*lamu^2*bek^2*om*ro0);
K = (gam*p0)/(gam-(gam-1)*(1+L*H^0.5)^(-1));
P = (4/3)*x(6)*10^5+j*x(7)*10^5+kb+((1-x(1)^2)/x(1))*K;
Q = K*(1-x(1));
R = x(1)*K;
del = (P*ro22+R*ro11-2*Q*ro12)^2-4*(P*R-Q^2)*(ro11*ro22-ro12^2);
;
deli = (((om^2)/(2*(P*R-Q^2)))*(P*ro22+R*ro11-2*Q*ro12+sqrt(del)))^(0.5);
delb = (((om^2)/(2*(P*R-Q^2)))*(P*ro22+R*ro11-2*Q*ro12-sqrt(del)))^(0.5);
nui = ((P*deli^2-om^2*ro11)/(om^2*ro12-Q*deli^2));
nub = ((P*delb^2-om^2*ro11)/(om^2*ro12-Q*delb^2));
zif = ((R+(Q/nui))*(deli/(x(1)*om)));
zbf = ((R+(Q/nub))*(delb/(x(1)*om)));
zis = ((P+Q*nui)*(deli/om));
zbs = ((P+Q*nub)*(delb/om));
D = (1-x(1)+x(1)*nui)*(zbs-(1-x(1))*zbf*nub)*tan(deli*x(4))+(1-x(1)+x(1)*nub)*(zif*nui*(1-x(1))-zis)*tan(delb*x(4));
Z = -j*((zbs*zif*nui-zis*zbf*nub)/D);
zic = ro0*c0;
E = (Z-zic)/(Z+zic);
f = -(1-((abs(E))^2));

g(1) = x(1) - 0.98;
g(2) = - x(1) + 0.93;
g(3) = x(2) - 4.5;
g(4) = - x(2) + 1.38;
g(5) = x(3) - 100000;

```

EK A.'nin Devamı

$$\begin{aligned}g(6) &= -x(3) + 5000; \\g(7) &= x(4) - 0.03; \\g(8) &= -x(4) + 0.005; \\g(9) &= x(5) - 3.37; \\g(10) &= -x(5) + 2; \\g(11) &= x(6) - 7; \\g(12) &= -x(6) + 1; \\g(13) &= x(7) - .7; \\g(14) &= -x(7) + 0.1; \\g(15) &= x(8) - 30; \\g(16) &= -x(8) + 12;\end{aligned}$$



EK B. Lifli Malzemelerin Optimizasyonu



```
%-----  
% fun22r.m  
% Bu program lifli malzeme için  
% yutma katsayısını optimize eder ve  
%   alfa=f(frekans)  
%   egrisini çizer.  
%-----  
%-----  
% fun programinin calistirilarak x'lerin bulunmasi  
%-----  
  
x0=[0.90 2.1 50000 1.58e-5 73 0.06];  
x=constr('fun22',x0);  
[f,g] = fun(x);  
fprintf ('x0 = \n')  
fprintf ('%8.3g \n ',x0)  
fprintf ('\n')  
  
fprintf ('x = \n')  
fprintf ('%8.3f \n ',x)  
fprintf ('\n')  
  
fprintf ('g = \n')  
fprintf (' %8.3f \n ',g)  
  
fprintf ('alfa = %8.3f \n ',f)  
fprintf ('\n')  
  
%-----  
% Yukarida bulunan x degerlerinin kullanilarak  
% egrinin cizdirilmesi.  
%-----  
  
f1 = 100:100:1500;  
alfa(15) = 0;  
for i = 1:15,  
    f = 100*i;  
    om = 2*pi*f;  
    ro0 = 1.213;  
    c0 = 342.2;  
    phi = x(1);  
    alfas = x(2);  
    sigma = x(3);  
    R = x(4);  
    rol = x(5);  
    rom = 2.5e3;  
    d = x(6);  
    gam = 1.4;  
    p0 = 1.0132*10^5;  
    eta = 1.84*10^(-5);  
    bek = 0.71;  
    M = rol / (pi*R^2*rom);  
    lam = 1 / (2*pi*M*R);
```

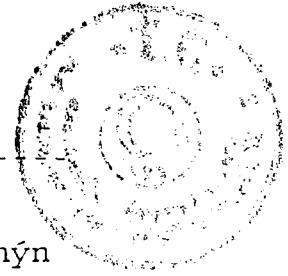


```

lamu = 2*lam;
c = ((8*alfas*eta)/(phi*sgma))^0.5/lam;
ci = 0.5*c;
H = (1+(j*ro0*om*bek^2*lamu^2)/(16*eta));
L = (8*eta)/(j*lamu^2*bek^2*om*ro0);
K = (gam*p0)/(gam-(gam-1)*(1+L*H^0.5)^(-1));
G = (1+(4*j*alfas^2*eta*ro0*om)/(sgma^2*lam^2*phi^2))^0.5;
ro = alfas*ro0*(1+(sgma*phi*G)/(j*om*ro0*alfas));
zc = (K*ro)^0.5;
yays = om*(ro/K)^0.5;
Z = (-j)*(zc/phi)*(1/(tan(yays*d)));
zic = ro0*c0;
E = (Z-zic)/(Z+zic);
alfa(i) = 1-((abs(E))^2);
end;
plot(f1,alfa,'w');
title('fun22r.m sonuçlari')
xlabel('f(Hz)')
ylabel('Yutma katsayısı')

```





 fun22.m

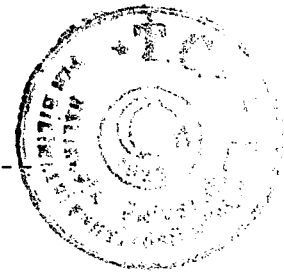
Bu program lifli malzemelerin yutma katsayısın optimizasyonunu yapar.

```
function [f,g] = fun(x)

fr=1500;
om = 2*pi*fr;
ro0 = 1.213;
c0 = 342.2;
rom = 2.5e3;
gam = 1.4;
p0 = 1.0132*10^5;
eta = 1.84*10^(-5);
bek = 0.71;
M = x(5) / (pi*x(4)^2*rom);
lam = 1 / (2*pi*M*x(4));
lamu = 2*lam;
c = ((8*x(2)*eta)/(x(1)*x(3)))^0.5/lam;
ci = 0.5*c;
H = (1+(j*ro0*om*bek^2*lamu^2)/(16*eta));
L = (8*eta)/(j*lamu^2*bek^2*om*ro0);
K = (gam*p0)/(gam-(gam-1)*(1+L*H^0.5)^(-1));
G = (1+(4*j*x(2)^2*eta*ro0*om)/(x(3)^2*lam^2*x(1)^2))^0.5;
ro = x(2)*ro0*(1+(x(3)*x(1)*G)/(j*om*ro0*x(2)));
zc = (K*ro)^0.5;
yays = om*(ro/K)^0.5;
Z = (-j)*(zc/x(1))*(1/(tan(yays*x(6))));
zic = ro0*c0;
E = (Z-zic)/(Z+zic);
f = -(1-((abs(E))^2));

g(1) = x(1) - 0.97;
g(2) = - x(1) + 0.84;
g(3) = x(2) - 3.2;
g(4) = - x(2) + 1;
g(5) = x(3) - 100000;
g(6) = - x(3) + 5000;
g(7) = x(4) - 2.66e-5;
g(8) = - x(4) + 5e-6;
g(9) = x(5) - 130;
g(10) = - x(5) + 16;
g(11) = x(6) - 0.1;
g(12) = - x(6) + 0.02;
```

EK C. Lifli Malzemelerin Optimizasyonu



```
%-----
%      fun2r.m
%      Bu program lifli malzeme için
%      yutma katsayısının optimize eder ve
%      alfa=f(frekans)
%      egrisini çizer.
%      (optr.m = funr.m+alfa2-1.m)
%-----

%-----
% fun programinin calistirilarak x'lerin bulunmasi (funr.m)
%-----

x0=[0.90 2.1 50000 0.06 0.96];
x=constr('fun2',x0);
[f,g] = fun(x);
fprintf ('x0 = \n')
fprintf ('%8.3g \n ',x0)
fprintf ('\n')

fprintf ('x = \n')
fprintf ('%8.3f \n',x)
fprintf ('\n')

fprintf ('g = \n')
fprintf (' %8.3f \n',g)

fprintf ('alfa = %8.3f \n',f)
fprintf ('\n')

%-----
% Yukarida bulunan x degerlerinin kullanilarak
% egrinin cizdirilmesi. (alfa2-1.m)
%-----

f1 = 100:100:1500;
alfa(15) = 0;
for i = 1:15,
    f = 100*i;
    om = 2*pi*f;
    ro0 = 1.213;
    c0 = 342.2;
    phi = x(1);
    alfas = x(2);
    sigma = x(3);
    d = x(4);
    c = x(5);
    gam = 1.4;
    p0 = 1.0132*10^5;
    eta = 1.84*10^(-5);
    bek = 0.71;
    lam = (1/c)*(((8*alfas*eta)/(phi*sigma))^0.5);
    lamu = c*(((8*alfas*eta)/(phi*sigma))^0.5);
    H = (1+(j*ro0*om*bek^2*lamu^2)/(16*eta));
```

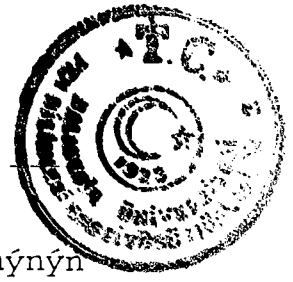
EK C.'nin Devamı



```
L = (8*eta)/(j*lamu^2*bek^2*om*ro0);
K = (gam*p0)/(gam-(gam-1)*(1+L*H^0.5)^(-1));
G = (1+(4*j*alfas^2*eta*ro0*om)/(sgma^2*lam^2*phi^2))^(0.5);
ro = alfas*ro0*(1+(sgma*phi*G)/(j*om*ro0*alfas));
zc = (K*ro)^(0.5);
yays = om*(ro/K)^(0.5);
Z = (-j)*(zc/phi)*(1/(tan(yays*d)));
zic = ro0*c0;
R = (Z-zic)/(Z+zic);
alfa(i) = 1-((abs(R))^2);
end;
plot(f1,alfa,'w');
%%axis([0 3000 0 1])
title('fun2r.m sonuçlari')
xlabel('f(Hz)')
ylabel('Yutma katsayısı')

end
```





```

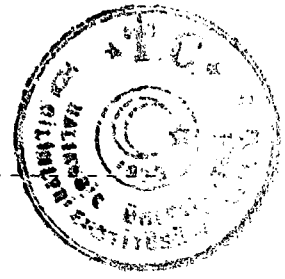
%-----
%      fun2.m
%
%      Bu program lifli malzemelerin yutma katsayısınyn
%      optimizasyonunu yapar.
%-----
function [f,g] = fun(x)

fr=1500;
om = 2*pi*fr;
ro0 = 1.213;
c0 = 342.2;
gam = 1.4;
p0 = 1.0132*10^5;
eta = 1.84*10^(-5);
bek = 0.71;
lam = 1/x(5)*(((8*x(2)*eta)/(x(1)*x(3)))^0.5);
lamu = x(5)*(((8*x(2)*eta)/(x(1)*x(3)))^0.5);
H = (1+(j*ro0*om*bek^2*lamu^2)/(16*eta));
L = (8*eta)/(j*lamu^2*bek^2*om*ro0);
K = (gam*p0)/(gam-(gam-1)*(1+L*H^0.5)^(-1));
G = (1+(4*j*x(2)^2*eta*ro0*om)/(x(3)^2*lam^2*x(1)^2))^0.5;
ro = x(2)*ro0*(1+(x(3)*x(1)*G)/(j*om*ro0*x(2)));
zc = (K*ro)^0.5;
yays = om*(ro/K)^0.5;
Z = (-j)*(zc/x(1))*(1/(tan(yays*x(4))));
zic = ro0*c0;
R = (Z-zic)/(Z+zic);
f = -(1-((abs(R))^2))

g(1) = x(1) - 0.97;
g(2) = - x(1) + 0.84;
g(3) = x(2) - 3.2;
g(4) = - x(2) + 1;
g(5) = x(3) - 100000;
g(6) = - x(3) + 5000;
g(7) = x(4) - 0.1;
g(8) = - x(4) + 0.002;
g(9) = x(5) - 1.14;
g(10) = - x(5) + 0.78;

```

EK D. Süngerimsi Malzemelerin Yutma Katsayısının Hesaplanması

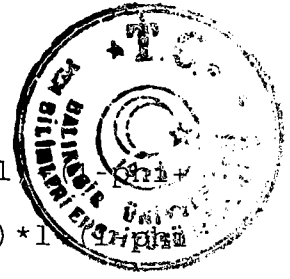


alfa981.m

(10.12.98)

Bu program plastik köpük için yutma katsayısının hesaplar ve frekansa bağlı olarak egrisini çizer.

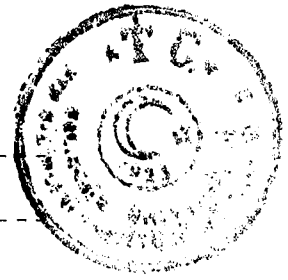
```
f1 = 100:100:1500;
alfa(15) = 0;
for i = 1:15,
    f = 100*i;
    om = 2*pi*f;
    ro0 = 1.213;
    c0 = 342.2;
    phi = 0.98;
    alfas = 5.29;
    sigma = 72250;
    l = 0.02;
    c = 3.37;
    ci = 0.29;
    gam = 1.4;
    p0 = 1.0132*10^5;
    eta = 1.84*10^(-5);
    bek = 0.71;
    shem = 10^5*(5+3.25*j);
    ro1 = 125;
    pois = 0.4;
    lam = (1/c)*((8*alfas*eta)/(phi*sigma))^(0.5);
    G = (1+(4*j*alfas^2*eta*ro0*om)/(sigma^2*lam^2*phi^2))^(0.5);
    roA = ro0*phi*(alfas-1);
    ro22 = phi*ro0+roA-j*sigma*phi^2*(G/om);
    ro12 = -roA+j*sigma*phi^2*(G/om);
    ro11 = ro1+roA-j*sigma*phi^2*(G/om);
    lamu = (1/ci)*((8*alfas*eta)/(phi*sigma))^(0.5);
    kb = (2*shem*(pois+1))/(3*(1-2*pois));
    H = (1+(j*ro0*om*bek^2*lamu^2)/(16*eta));
    L = (8*eta)/(j*lamu^2*bek^2*om*ro0);
    K = (gam*p0)/(gam-(gam-1)*(1+L*H^0.5)^(-1));
    P = (4/3)*shem+kb+((1-phi^2)/phi)*K;
    Q = K*(1-phi);
    R = phi*K;
    del = (P*ro22+R*ro11-2*Q*ro12)^2-4*(P*R-Q^2)*(ro11*ro22-ro12^2);
    deli = (((om^2)/(2*(P*R-Q^2)))*(P*ro22+R*ro11-2*Q*ro12+sqrt(del)))^(0.5);
    delb = (((om^2)/(2*(P*R-Q^2)))*(P*ro22+R*ro11-2*Q*ro12-sqrt(del)))^(0.5);
    nui = ((P*deli^2-om^2*ro11)/(om^2*ro12-Q*deli^2));
    nub = ((P*delb^2-om^2*ro11)/(om^2*ro12-Q*delb^2));
    zif = ((R+(Q/nui))*(deli/(phi*om)));
    zbf = ((R+(Q/nub))*(delb/(phi*om)));
    zis = ((P+Q*nui)*(deli/om));
    zbs = ((P+Q*nub)*(delb/om));
```



```
D = (1-phi+phi*nui)*(zbs-(1-phi)*zbf*nub)*tan(deli*1
phi*nub)*(zif*nui*(1-phi)-zis)*tan(delb*1);
% D = (1-phi+phi*nui)*(zbs-(1-phi)*zbf*nub)*tan(deli)*1
+phi*nub)*(zif*nui*(1-phi)-zis)*tan(delb)*1;
Z = -j*((zbs*zif*nui-zis*zbf*nub)/D);
zic = ro0*c0;
E = (Z-zic)/(Z+zic);
alfa(i) = 1-((abs(E))^2);
end;
plot(f1,alfa,'w');
xlabel('f [Hz]')
ylabel('alfa [-]')
```



EK E. Lifli Malzemelerin Yutma Katsayısının Hesaplanması



```

%-----
% alfa2298.m
%-----

f1 = 100:100:1500;
alfa(15) = 0;
for i = 1:15,
    f = 100*i;
    om = 2*pi*f;
    ro0 = 1.213;
    c0 = 342.2;
    phi = 0.98;
    alfas = 1.7;
    sigma = 81000;
    R = 2.47e-6;
    ro1 = 1000;
    rom = 2.5e3
    d = 0.07;
    gam = 1.4;
    p0 = 1.0132*10^5;
    eta = 1.84*10^(-5);
    bek = 0.71;
    M = ro1 / (pi*R^2*rom);
    lam = 1 / (2*pi*M*R);
    lamu = 2*lam
    c = ((8*alfas*eta)/(phi*sigma))^0.5/lam;
    ci = 0.5*c
    %lam = (1/c)*(((8*alfas*eta)/(phi*sigma))^0.5);
    %lamu = (1/ci)*(((8*alfas*eta)/(phi*sigma))^0.5);
    H = (1+(j*ro0*om*bek^2*lamu^2)/(16*eta));
    L = (8*eta)/(j*lamu^2*bek^2*om*ro0);
    K = (gam*p0)/(gam-(gam-1)*(1+L*H^0.5)^(-1));
    G = (1+(4*j*alfas^2*eta*ro0*om)/(sigma^2*lam^2*phi^2))^0.5);
    ro = alfas*ro0*(1+(sigma*phi*G)/(j*om*ro0*alfas));
    zc = (K*ro)^0.5);
    yays = om*(ro/K)^0.5);
    Z = (-j)*(zc/phi)*(1/(tan(yays*d)));
    zic = ro0*c0;
    E = (Z-zic)/(Z+zic)
    alfa(i) = 1-((abs(E))^2);
end;
plot(f1, alfa, 'w');
title('alfa2298')
xlabel('f(Hz)')
ylabel('alfa')

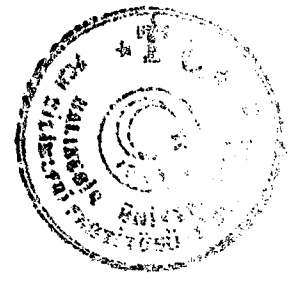
```

EK F. Lifli Malzemelerin Yutma Katsayısının Hesaplanması



%% -----
-
%% alfa3_98.m (10.12.1998)
%% -----
-

```
f1 = 100:100:1500;  
alfa(15) = 0;  
for i = 1:15;  
    f = 100*i;  
    om = 2*pi*f;  
    ro0 = 1.213;  
    c0 = 342.2;  
    phi = 0.98;  
    alfas = 1.7;  
    sigma = 81000;  
    d = 0.025;  
    c = 0.59;  
    ci = 0.29;  
    gam = 1.4;  
    p0 = 1.0132*10^5;  
    eta = 1.84*10^(-5);  
    bek = 0.71;  
    lam = (1/c)*(((8*alfas*eta)/(phi*sigma))^0.5);  
    lamu = (1/ci)*(((8*alfas*eta)/(phi*sigma))^0.5);  
    H = (1+(j*ro0*om*bek^2*lamu^2)/(16*eta));  
    L = (8*eta)/(j*lamu^2*bek^2*om*ro0);  
    K = (gam*p0)/(gam-(gam-1)*(1+L*H^0.5)^(-1));  
    G = (1+(4*j*alfas^2*eta*ro0*om)/(sigma^2*lam^2*phi^2))^0.5);  
    ro = alfas*ro0*(1+(sigma*phi*G)/(j*om*ro0*alfas));  
    zc = (K*ro)^(0.5);  
    yays = om*(ro/K)^(0.5);  
    Z = (-j)*(zc/phi)*(1/(tan(yays*d)));  
    zic = ro0*c0;  
    R = (Z-zic)/(Z+zic);  
    alfa(i) = 1-((abs(R))^2);  
end;  
plot(f1,alfa,'w');  
title('alfa3_98.m')  
xlabel('frekans [Hz]')  
ylabel('alfa [-]')
```



EK G. Kısıtlı Minimizasyon Çözümü

Doğrusal olmayan denklemlerin çözümünde, MATLAB, Optimization Toolbox içinde yer alan *constr* fonksiyonu kullanılır. Optimization Toolbox içinde, doğrusal olmayan denklemlerin, değişik şekilde çözümünde kullanılan diğer pek çok fonksiyon vardır. Bunların tanımları aşağıda olduğu gibidir. Genel kullanım biçimleri Matlab ortamında help komutu ile elde edilebilir.

Constr fonksiyonunun amacı; sınırlanmış (kısıtlanmış) çok değişkenli minimizasyonunu bulmaktır. *Constr* fonksiyonunun belli başlı kullanım biçimleri aşağıda olduğu gibidir.

`x = constr (' fun ' , x0)`

`x = constr (' fun ' , x0 , options)`

`x = constr (' fun ' , x0 , options , vlb , vub , ' grad ')`

`x = constr (' fun ' , x0 , options , vlb , vub , ' grad ' , p1 , p2 , ...)`

`[x , options] = constr (' fun ' , x0 , ...)`

"constr" fonksiyonu, birinci tahminden başlayarak birkaç değişkenli skaler bir fonksiyonun sınırlanmış (kısıtlanmış) minimizasyonunu bulur. Bu, genellikle "kısıtlanmış doğrusal olmayan optimizasyon" olarak adlandırılır ve matematiksel ifadesi şu şekildedir:

Amaç:

minimize $f(x)$
X

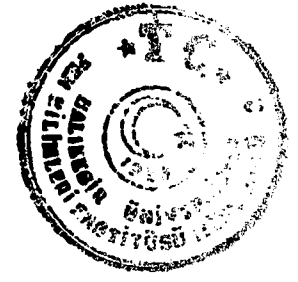
Kısıtlar:

$G(x) \leq 0$

X; $G(x)$ = Matris

$f(x)$ = skaler fonksiyon.

`x = constr (' fun ' , x0)` bildirim; fun.m isimli M-dosyasında tanımlanan denklemleri, x0 tahmini başlangıç değerlerinden başlayarak çözer ve sonucu x değişkenine atar. Başka bir deyişle; "fun" fonksiyonunun minimizasyonunu yapar.



EK G.'nin Devamı

Burada x_0 boyutu x değişken sayısı kadar olmalıdır. " fun " fonksiyonu; iki argümene geri gönderilir:

f = Minimize edilmiş fonksiyonun skaler değeri

g = Sınırlanan (kısıtlanan) matris.

$[f, g] = \text{fun}(x)$

Bu denklem; şu şekilde de yazılabilir:

$x = \text{constr} ('f = \text{fun} (x) ; g = \text{cstr} (x) ;', x_0)$

f =fonksiyon

g =kısıtlar

x =bağımsız değişkenler

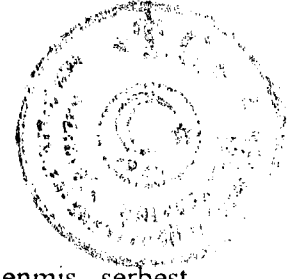
$x = \text{constr} (' \text{fun} ', x_0 , \text{options})$ bildirimi; isteğe bağlı parametrelerin vektörünü bulur.

- **options(1)**, ekranı kontrol eder. 1'in değerine bunu katarak ortalama sonuçları tablo halinde gösterir.
- **options(2)**, çözümde x 'in değerini kontrol eder.
- **options(3)**, çözümde f 'in değerini kontrol eder.
- **options(4)**, ihmalî uygun olan maksimum sabitleri ayarlar.

"Constr"; "Sequential Quadratic Programming" (SQP) metodunu kullanır. Bu metodta, "Quadratic Programming" (QP), alt problemi her iterasyonda çözer.

Kısıtlanmış (sınırlanmış) optimizasyonda genel amaç, tekrarlanan bir işlemin temeli gibi çözülebilen ve kullanılabilen daha kolay bir alt problem içinde problemin değiştirilmesidir. Önceki metodların büyük bir bölümünün özelliği, sınır şartlarının ötesinde veya yakınındaki şartlar için ceza fonksiyonu kullanarak temel serbest bir problem için sınırlanmış probleme dönüştürülebilmesidir. Bu yönde sınırlanmış

EK G.'nin Devamı



problem, sınırdaki kısıtlanmış probleme yakınsayan parametreleri belirlenmiş, serbest optimizasyonların sırasına uygun olarak çözülür. Bu metodlar, bugün göreceli olarak ele alınır ve Kuhn-Tucker denklemlerinin çözümüne odaklanan metodlar ile yer değiştirmiştir. Kt denklemleri, sınır şartları belirlenmiş bir optimizasyon problemi için gerekli şartlardır. Eğer problem konveks bir fonksiyon ise, o zaman kt denklemleri hem gerekli hem de global çözüm noktası için önemlidir.

Belirlenen Kuhn-Tucker denklemleri şu şekildedir:

$$\nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i^* \nabla g_i(x^*) = 0$$

$$\lambda_i^* g_i(x^*) = 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$\lambda_i^* \geq 0 \quad i = m_e + 1, \dots, m$$

İlk denklem, çözüm noktasında esas fonksiyon ile etkin kısıtlamalar arasındaki düşüşlerin farkını belirtir. Farkları iptal edebilmek için esas fonksiyon ve sınırlı düşüşlerin büyüklüğündeki sapmaları lagrangian çarpanları dengeler.

Kt denklemlerinin çözümü bir çok lineer olmayan algoritmalara taban oluşturur. Bu algoritmalar, lagrangian çarpanlarını direkt olarak hesaplamaya çalışır.

“Constr” sadece lokal çözümler için verilebilir. Fonksiyon minimize edilebilir ve kısıtlar (sınırlar) süreklidir.

Eğer problem uygun değilse; maksimum sınırlı değere minimize etmek için çalışır.



EK H. Biot Teorisi

1.1 Stress-Strain Denklemleri ve Gedanken Deneyleri

Stress-Strain denklemleri *Biot* tarafından şu şekilde verilmiştir:

$$\tau_{ij}^s = [(P - 2N)\nabla u + Q\nabla U]\delta_{ij} + N(u_{,i} + u_{,j}) \quad (1)$$

$$\tau_{ij}^f = -\phi p_f \delta_{ij} = (R\nabla U + Q\nabla u)\delta_{ij} \quad (2)$$

ϕ = Gözeneklilik

p_f = Akışkandaki basınç

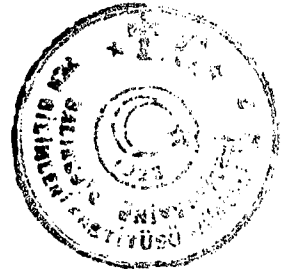
P, Q, R, N = Biot elastik katsayıları

P, Q ve R katsayıları iki *gedanken* deneyinden elde edilir. İlk deneyde; hidrostatik basınca (p_s) maruz kalan malzeme, esnek bir kauçuk silindir ile kaplanır ($\tau_{ij}^s = -p_s \delta_{ij}$). Silindirin içi atmosfer ile temas halindedir ve malzeme içersindeki basınç sabit kalır. (1) ve (2) denklemlerinden aşağıdaki bağıntıları yazabiliriz:

$$-p_s = \left(P - \frac{4}{3}N \right) \nabla u_1 + Q\nabla U_1 \quad (3)$$

$$0 = R\nabla U_1 + Q\nabla u_1 \quad (4)$$

İkinci deneyde; kauçuk silindir olmadan sıkıştırma işlemi yapılabilen bir testtir. Numune, akışkan basınca maruz kalır. ∇u_2 ve ∇U_2 ; bu deneyde hava ve iskeletin genişlemesi olarak verilmiştir. (1) ve (2) denklemlerinden aşağıdaki şu bağıntılar yazılır:



EK H.'nin Devamı

$$-(1-\phi)p_r = \left(P - \frac{4}{3}N\right)\nabla u_2 + Q\nabla U_2 \quad (5)$$

$$-\phi p_r = R\nabla U_2 + Q\nabla u_2 \quad (6)$$

Statik gedanken deneylerinde; ∇u_1 , ∇u_2 ve ∇U_2 hesaplanır.

1.2 Homojen Elastik İskeletli Malzeme

İskeletin hacim modülü silindirik gedanken deneyinden şu şekilde bulunur:

$$\nabla u_1 = -\frac{P_s}{k_b} \quad (7)$$

İskelet homojen ise, silindir olmadan yapılan testteki iskeletin deformasyonu yalnızca skalanın bir değişimidir ve gözeneklilikte değişim yoktur.

K_f = Havanın hacim modülü

K_s = İskeletin hacim modülü

∇u_2 ve ∇U_2 birbirine eşittir ve şu şekilde yazılabilir:

$$\nabla u_2 = -\frac{P_f}{K_s} \quad (8)$$

$$\nabla U_2 = -\frac{P_f}{K_f} \quad (9)$$

P, Q ve R katsayıları:

EK H.'nin Devamı



$$P = \frac{(1-\phi)(1-\phi - K_b / K_s)K_s + \phi(K_s / K_f)K_b}{1-\phi(K_b / K_s) + \phi(K_s / K_f)} + \frac{4}{3}N \quad (10)$$

$$Q = \frac{(1-\phi - K_b / K_s)\phi K_s}{1-\phi - (K_b / K_s) + \phi(K_s / K_f)} \quad (11)$$

$$R = \frac{\phi^2 K_s}{1-\phi - (K_b / K_s) + \phi(K_s / K_f)} \quad (12)$$

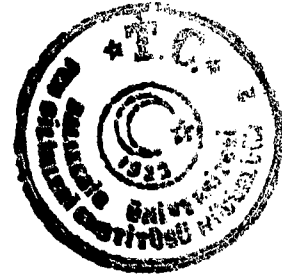
Bu denklemler; homojen iskelete sahip izotropik gözenekli malzemelerin tümünü tanımlamak için kullanılır. Cam yünü ve süngerimsi malzemeler gibi ses yutucu malzemelerde $\phi = 1$ ve $\frac{K_b}{K_s} \ll 1 - \phi$ dür. (10)-(12) denklemlerini tekrar yazarsak şu bağıntıları elde ederiz:

$$P = K_b + \frac{4}{3}N + \left[(1-\phi)^2 / \phi \right] K_f \quad (13)$$

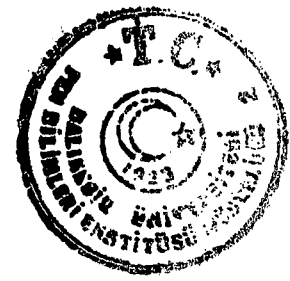
$$Q = (1-\phi)K_f \quad (14)$$

$$R = \phi K_f \quad (15)$$

KAYNAKÇA



- [1] Kinsler, E.L., Frey, A.R., Fundamentals of Acoustics, John Wiley&Sons inc., New York,(1950).
- [2] Beranek, L.L., Acoustics, American Institute of Physics Inc., New York, (1986).
- [3] Mankovsky, V.S., Acoustics of studios and Auditoria, Focal Press, London, (1980).
- [4] Ingard, K.U., Dear, T.A., "Measurement of Acoustic Flow Resistance", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.103, No.4, (1985)567-572.
- [5] Allard, J.F., Aknine, A., Depollier C., "Acoustical properties of partially reticulated foams with high and medium flow resistance", *Journal Acoustical Society of America*, Vol.79, No.6, (June 1986)1734.
- [6] Gade,S.,Zaveri,K.,"Complex Modulus and Damping Measurement Using Resonant and Non-resonant Methods",No.2,(1994)30.
- [7] Allard, J.F., Propagation of Sound in Porous Media, London, (1993).
- [8] ASTM Standards, "Two-microphone Impedance Measurement Tube", Product Data.
- [9] Delany, M.E., Bazley, E.N., "Acoustical Properties of fibrous materials", *Applied Acoustics*, Vol.3, (1970)105-16.
- [10] Gray, D.E., American Institue of Physics Handbook, Mc-Graw Hill, New York, (1957)



- [11] Pierce, A.D., Acoustics, Mc-Graw Hill, New York, (1981).
- [12] Bruneau, M., Introduction aux Theories de l' Acoustique, Universite du Maine, France, (1983).
- [13] Zwikker, C., Kosten, C.W., Sound Absorbing Materials, New York,(1949).
- [14] Kergomard, J., Causse, R., "Measurement of Acoustic Impedance using a capillary, *J.Acoust. Soc. Amer.*, Vol.79,(1986)1129-40.
- [15] Bruneau, M., Polack, J.D., "General Formulation of the Dispersion Equation in Bounded Visco-Thermal Fluid and Application to Some Simple geometries", *Wave Motion*, Vol.11, (1989)441-51.
- [16] Craggs, A., Hildebrandt, J.G., "The Normal Incidence Absorption Coefficient of a Matrix of Narrow Tubes with Constant Cross-Section", *J. Sound Vib.*, Vol.105, (1986)101-7.
- [17] Stinson, M.R., "The Propagation of Plane Sound Waves in Narrow and Wide Circular Tubes and Generalization to Uniform Tubes of Arbitrary Cross-Sectional Shape", *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol.89,(1991)550-8.
- [18] Attenborough, K., "The Prediction of Oblique-Incidence Behaviour of Fibrous Absorbents", *J.Sound Vib.*, Vol.14,(1971)183-91.
- [19] Burke, S., "The Absorption of Sound by Anizotropic Porous Layers", ASA, San Diego,(1983).
- [20] Nicolas, J., Berry, J.L., "Propagation du son et Effect de Sol", *Revue d'Acoustique*, Vol.71, (1984)191-200.
- [21] Allard, J.F., "Anisotropy Effect in Glass Wool on Normal Impedance at



Oblique Incidence”, *J. Sound Vib.*, Vol.114, (1987)233-8.

- [22] Bies, D.A., Hansen, C.H., “Flow Resistance Information for Acoustical Design”, *Applied Acoustics*, Vol.13,(1980)357-91.
- [23] Mechel, F.P., “Ausweitung der Absorberformel von Delany and Bazley zu Tiefen Frequenzen”, *Acustica*, Vol35, (1976)210-13.
- [24] Dunn, I.P., Davern, W.A., “Calculation of Acoustic Impedance of Multilayer Absorbers”, *Applied Acoustics*, Vol.19, (1986)321-34.
- [25] Miki, Y., “Acoustical Properties of Porous Materials”, *J.Acoust. Soc., Japan*, Vol.11,(1990)19-24.
- [26] Papoulis, A., *Signal Analysis*, Mc-Graw Hill, Singapore,(1984).
- [27] Yüksel, İ., *Matlab ile Mühendislik Sistemlerinin Analizi ve Çözümü*, Bursa,(1996).
- [28] Grace, A., Laub, A.J., Little, J.N., Thompson, C.M., *Control System Toolbox for Use with Matlab*, The Mathworks Inc.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM
DOKÜMANASYON