

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAĞLAYICI PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMİŞ GÖZENEKLİ ALÇI
YAPILARIN SES YUTMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ramazan ASLAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAĞLAYICI PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMİŞ GÖZENEKLİ ALÇI
YAPILARIN SES YUTMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ramazan ASLAN
(181212872001)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Osman TURAN

TEMMUZ 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 181212872001 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ramazan ASLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BAĞLAYICI PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMİŞ GÖZENEKLİ ALÇI YAPILARIN SES YUTMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Osman TURAN**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Deniz UZUNSOY**
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hüray CAN
Balıkesir Üniversitesi

Savunma Tarihi : 09 Temmuz 2019

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi/...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Ramazan ASLAN

İmzası :





Sevgili Eşime ve Değerli Aileme,

ÖNSÖZ

Öncelikle çalışmamın her bir aşamasında bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanlarını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan, akademik hayatıma en az benim kadar önem veren, destekleyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Osman TURAN'a teşekkürü bir borç bilirim. İş ve aynı zamanda oda arkadaşlarım Arş. Gör. Osman Bedrettin KARATAŞ, Arş. Gör. Necati ERCAN ve Arş. Gör. Ahmed DÜZCAN'a verdikleri destek için teşekkür ederim. Çalışmamın farklı aşamalarında bilgi ve tecrübeleriyle beni aydınlatan, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Doruk Erdem YUNUS'a, Dr. Ersen ARSLAN'a, ve Makine Yüksek Mühendisi Mustafa YOSUN'a teşekkür ederim. Test ve ölçüm için gerekli olan imkanı sağlayarak tez çalışmama en büyük desteklerden birini veren, Sayın Doç. Dr. Abdullah SEÇGİN'e ve ölçümler esnasında yardımını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Murat KARA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak aldığım tüm kararlarda beni destekleyen, maddi manevi tüm varlığıyla yanımda olan aileme ve eşim Özgül DİLEK ASLAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz 2019

Ramazan ASLAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	vii
SEMBOLLER	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1 GİRİŞ	1
1.2 Eklemeli Üretim	4
1.3 Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting) Tekniği.....	11
1.4 Ses ile İlgili Temel Kavramlar	14
1.4.1 Sesin Yansıması, Kırınması ve Kırılması	18
1.4.2 Ses Yutumu ve Ses Yutma Katsayısı	19
1.5 Gözenekli Yapılarda Ses Yutumunu Etkileyen Temel Parametreler	21
1.5.1 Akış Direnci	21
1.5.2 Porozite (Gözeneklilik Oranı).....	22
1.5.3 Vizkoz ve Termal Karakteristik Uzunluklar	22
1.5.4 Kırırmlılık (Malzemenin İç Yapı Çarpıklığı).....	23
1.5.5 Malzeme Kalınlığı.....	23
1.5.6 Malzeme Yoğunluğu.....	23
1.6 Literatür Özeti	24
1.7 Tezin Amacı	27
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
2.1 Deney Numunelerinin Üretimi	29
2.2 Ses Yutma Katsayısı Ölçümü.....	33
2.3 Deneysel Ölçümler İçin Tutarlılık Analizi.....	35
2.4 Sayısal Çalışmalar	37
2.4.1 Ses Yutma Katsayısı ile İlgili Sayısal Çalışmalar.....	37
2.4.2 Akış Analizi ile İlgili Sayısal Çalışmalar.....	39
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	42
3.1 Hücre Yapısının Ses Yutma Davranışına Etkisi	42
3.2 Porozitenin Ses Yutma Davranışına Etkisi	48
3.3 Numune Kalınlığının Ses Yutma Davranışına Etkisi.....	54
4. SONUÇLAR	58
5. ÖNERİLER	60
6. KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ.....	68

KISALTMALAR

ABS	: Akrlonitril Butadien Stiren
BCC	: Hacim Merkezli Kübik (Body Centered Cubic)
BJ	: Bağlayıcı Püskürtme Tekniği (Binder Jetting)
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
DMLS	: Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering)
E	: Eklemeli retim
EBM	: Elektron Işınlı Ergitme (Electron Beam Melting)
FDM	: Eriyik Yığma Modelleme (Fused Deposition Modelling)
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
MJF	: Multi Jet Füzyon
MKS	: Metre-Kilogram-Saniye
PLA	: Poliaktik Asit
SLA	: Stereolitografi (Stereolithography)
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering)
SLM	: Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting)
TPU	: Termoplastik Poliüretan
WHO	: Dünya Sağlık rgt (World Health Organization)
3DP	: 3-Boyutlu Yazıcı (3 Dimensional Printing)

SEMBOLLER

A	: Alan
c	: Ses hızı
c_{hava}	: Havadaki ses hızı
C_p	: Sabit basınçta özgül ısı
d	: Malzeme kalınlığı
D	: Daire çapı
dB	: Desibel
E_i	: Gelen toplam ses enerjisi
E_r, E_a, E_t	: Yansıyan, yutulan, iletilen ses enerjisi
f	: Frekans
g	: Yer çekimi ivmesi
H_{12}	: İki mikrofon arası transfer fonksiyonu
H_I, H_R	: Gelen ve yansıyan dalgaların transfer fonksiyonları
Hz	: Hertz
I	: Ses şiddeti
J	: Joule
k	: dalga numarası
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
$L_{h,laminer}$: Akış analizinde akışkan giriş uzunluğu
L_p	: Sesin basınç seviyesi
L_w	: Sesin güç seviyesi
m	: metre
n	: Ölçüm sayısı
N	: Newton
Pa	: Pascal
P	: Basınç değeri
P_{ref}	: Referans basınç değeri
P_1, P_2	: Gelen ve yansıyan toplam ses basınç değerleri
P_{1I}, P_{1R}	: 1 nolu mikrofon için gelen ve yansıyan ses basınç değerleri
P_{2I}, P_{2R}	: 2 nolu mikrofon için gelen ve yansıyan ses basınç değerleri
R	: Ses yansıma katsayısı
Re	: Reynolds sayısı
R_f	: Spesifik akış direnci
s	: Karakteristik uzunluk hesaplamalarında kullanılan sabit sayı
s	: saniye
S	: Ses dalgası
S_p	: Gözeneklerin yüzey alanı
t	: Zaman
u, v, w	: Sırası ile x, y ve z yönündeki hız bileşenleri
U	: Doğrusal ve kararlı akış hızı
X	: Numuneler üzerinde değişim yapılan ölçü değeri
x_1, x_2	: 1. ve 2. mikrofonun numune ile olan mesafeleri

W	: Watt
V_g	: Gözenekli yapıda, gözenekli kısmın hacmi
V_i	: Güvenirlik analizinde ölçüm çiftleri arasındaki kovaryans
V_t	: Gözenekli yapıda toplam hacim
V_t	: Ortalama varyans
Z_s	: Yüzey empedansı
ΔP	: Basınç farkı
°C	: Santigrat derece
θ	: Sıcaklığın °C cinsinden ifadesi
σ	: Akış direnci
ρ	: Yoğunluk
φ	: Porozite
Λ, Λ'	: Karakteristik uzunluklar
α	: Ses yutum katsayısı
α_∞	: Kıvrımlılık
α_{maks}	: Maksimum ses yutum katsayısı değeri
α_{ort}	: Ortalama ses yutum katsayısı değeri
α_{Cronbach}	: Cronbach alfa sayısı
λ	: Lambda
η	: Viskozite
ψ	: Ses dalgası ve gözenek arasındaki açı
μ	: Dinamik viskozite

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Eklemeli üretim yöntemlerini ve geleneksel üretim yöntemleri arasındaki temel farklar.....	6
Çizelge 1.2: EÜ Yöntemlerinin Sınıflandırılması ve kullanım şekilleri	9
Çizelge 1.3: Bağlayıcı Püskürtme Tekniğinin avantaj ve dezavantajları.	14
Çizelge 1.4: Ses yutma özelliği üzerinde etkili olan parametreler.....	21
Çizelge 2.1: Deneysel ölçümlerin güvenilirlik analizi verileri.	36
Çizelge 2.2: Sayısal analiz için kullanılan havanın fiziksel özellikleri.	37
Çizelge 2.3: Ağ bağımlılık çalışmasında kullanılan ağ yapıları.	38

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre Barselona şehrinde çeşitli sebeplerden ortaya çıkan hastalıklar ve hasta sayısı	1
Şekil 1.2: Gürültü kontrol yöntemleri etkinliklerinin frekans aralığına göre karşılaştırılması	2
Şekil 1.3: Gözenekli yapıların sınıflandırılması	3
Şekil 1.4: Metamateryellerin Eklemeli Üretim ile üretilmesi örneği	3
Şekil 1.5: Eklemeli üretim uygulama alanları	4
Şekil 1.6: Talaşlı İmalat ve Eklemeli Üretim karşılaştırılması.....	5
Şekil 1.7: Eklemeli Üretim aşamaları	7
Şekil 1.8: ASTM standartlarına göre Eklemeli Üretim yöntemleri	8
Şekil 1.9: Bağlayıcı Püskürtme Tekniği Şematik Görünümü.....	12
Şekil 1.10: Bağlayıcı Püskürtme Tekniği ile üretilen farklı uygulama örnekler	13
Şekil 1.11: Farklı Ses Kaynaklarının Frekans Aralıkları	15
Şekil 1.12: Harmonik Ses Dalgası	15
Şekil 1.13: Speech Banana - İnsan konuşma frekans aralığı	17
Şekil 1.14: Sesin (a) düzgün ve (b) dağınık yansıması.....	18
Şekil 1.15: Ses dalgalarının (a) kırınması olayı, (b) ortam değiştirirken kırılması olayı.....	19
Şekil 1.16: Ses Dalgalarının hareketi.....	20
Şekil 2.1: Numunelerin üretiminde kullanılan Projet 460 Plus Cihazı.....	30
Şekil 2.2: Bağlayıcı Püskürtme Tekniği ile üretilmiş, ses yutma katsayısı ölçümlerinde kullanılacak deney numuneleri	31
Şekil 2.3: Deney numunelerinin Bağlayıcı Püskürtme Tekniği (Binder-Jetting) ile üretim aşamaları	32
Şekil 2.4: Bağlayıcı Püskürtme Tekniğinde kullanılan kartuşlar a) Renklendirici kartuş, b) Bağlayıcı kartuş	32
Şekil 2.5: ISO 10534-2 ve ASTM E1050 standartlarına uygun (a) empedans tüpü deney düzeneği düzeneği ve (b) ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi.....	33
Şekil 2.6: Yapılan sayısal çalışmalarda kullanılan sınır şartları	38
Şekil 2.7: O-10-30 numunesi için ağ bağımlılık çalışması.....	39
Şekil 2.8: Akış alanı, ağ yapısı ve sınır koşullarının gösterimi	41
Şekil 3.1: 10 mm kalınlığa ve %30 porozite için farklı hücre yapılarının ses yutma katsayısı-frekans değişimi: (a) deneysel, (b) sayısal sonuçlar	43
Şekil 3.2: 10 mm kalınlığa ve %30 porozite için farklı hücre yapılarının maksimum ve ortalama ses yutma katsayısı değerleri.....	44
Şekil 3.3: 10 mm kalınlık ve %30 porozitede, farklı açık hücre yapılarının basınç gradyanlarına ait sayısal tahminler	46
Şekil 3.4: 10 mm kalınlığa ve %30 poroziteye sahip BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapılarına ait akım çizgileri.....	47
Şekil 3.5: BCC hücre formunda, farklı porozitelere sahip numunelerin ses yutma katsayısı ölçümleri (a) deneysel ölçümler, (b) sayısal ölçümler	49
Şekil 3.6: Gyroid hücre formunda, farklı porozitelere sahip numunelerin ses yutma katsayısı ölçümleri (a) deneysel ölçümler, (b) sayısal ölçümler	50

Şekil 3.7: Octet hücre formunda, farklı porozitelere sahip numunelerin ses yutma katsayısı ölçümleri (a) deneysel ölçümler, (b) sayısal ölçümler	51
Şekil 3.8: Her bir birim hücrede değişen porozitenin akış direnci üzerindeki etkisi.	52
Şekil 3.9: 10 mm kalınlığa ve %30 – 40 – 50 poroziteye sahip BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapılarına ait akım çizgileri	53
Şekil 3.10: BCC birim hücre için, numune kalınlığının ses yutumuna etkisi (a) %30 porozite, (b) %40 porozite, (c) %50 porozite.....	55
Şekil 3.11: Gyroid birim hücre için, numune kalınlığının ses yutumuna etkisi (a) %30 porozite, (b) %40 porozite, (c) %50 porozite	56
Şekil 3.12: Octet birim hücre için, numune kalınlığının ses yutumuna etkisi (a) %30 porozite, (b) %40 porozite, (c) %50 porozite.....	57



BAĞLAYICI PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMİŞ GÖZENEKLİ ALÇI YAPILARIN SES YUTMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Alışveriş merkezleri, konutlar, hastaneler ve fabrikalar gibi insan yoğunluğunun fazla olduğu iç mekân çözümlerinde karşılaşılan en önemli sorunların başında gürültü kontrolü gelmektedir. Bu gibi kalabalık alanların tasarımları esnasında, ortamda titreşerek akustik kaliteyi düşüren arka plan gürültüsünün ses yutucu malzemeler kullanılarak sönümlenmesi sıklıkla başvurulan gürültü kontrol yöntemlerinden bir tanesidir.

Bu çalışmada, gözenekli alçı yapıların ses yutma potansiyelini araştırarak, özellikle kalabalık iç mekân uygulamaları için alternatif bir ses yutucu yapı önerilmiştir. Eklemeli Üretim yöntemlerinden Bağlayıcı Püskürtme Tekniği (Binder Jet) ile üretilmiş kapalı ve açık (BCC, Gyroid ve Octet) birim hücre yapısına sahip gözenekli alçı metamateriyellerin ses yutma davranışları deneysel olarak araştırılarak hücre yapısının, porozitenin ve kalınlığın ses yutma katsayısı üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Ayrıca, üretilen gözenekli alçı yapıların ses yutma davranışlarını öngörmek ve deneysel çalışmalara yol göstermek amacıyla sayısal analizler yapılmıştır. Bununla birlikte, gözenekli yapıların ses yutma davranışlarını etkileyen akış direnci ve kıvrımlılık gibi temel parametreler ile ilgili fikir sahibi olabilmek amacıyla, açık hücre yapıları için sayısal akış analizleri yapılmıştır.

Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar neticesinde, gözenekli yapıda üretilen alçı numunelerinin, gözeneksiz referans numune ile kıyaslandığında, belirgin bir ses yutumu sağladığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, açık hücre formundaki alçı numunelerin, kapalı hücre formuna göre çok daha etkin ses yutma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Açık hücre yapıları içerisinde, Octet birim hücre yapısına sahip alçı numunelerin daha yüksek ses yutma performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapılarına sahip numunelerin her biri için porozite artışı ile ses yutma davranışının kötüleştiği belirlenmiştir. Sayısal akış analizleri sonucunda, bu durumun temel sebebinin, artan porozite ile hücre yapılarının akış direnci ve kıvrımlılık düzeylerinin azalması olduğu tespit edilmiştir. Son olarak, BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapıları için, kalınlık artışının ses yutma katsayısı-frekans eğrisinde düşük frekanslara doğru bir etkinlik sağladığı ve maksimum ses yutma katsayısı değerinin daha düşük frekanslarda ortaya çıktığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Eklemeli Üretim, Ses Yutum Katsayısı, Gözenekli Alçı Yapılar, Bağlayıcı Püskürtme Tekniği, Empedans Tüpü, Akış Direnci

INVESTIGATION OF SOUND ABSORPTION BEHAVIOR OF POROUS GYPSUM STRUCTURES PRODUCED BY BINDER JETTING TECHNIQUE

SUMMARY

Noise control is one of the most important problems faced in the interior space analyses for the places like malls, houses, hospitals and factories in which there are dense human crowds. In designing these kinds of crowded spaces, using sound-absorbing materials in order to decrease the background noises which reduce the acoustic quality is one of the most frequently used methods.

In this study it will be focused on an alternative sound-absorbing structure for crowded interior space activities by investigating sound absorption potential of gypsum materials which have various cell structures. Sound-absorbing behaviours of closed-cell and open-cell-structured gypsum materials (BCC, Gyroid and Octet) produced through binder jetting technique which is one of the additive manufacturing methods have been experimentally examined and the effects of cell structure, porosity and thickness on sound absorption coefficient have been presented. With the aim of predicting the sound-absorbing behaviours of porous gypsum structures and of leading the experimental studies to be conducted, numerical analyses have been made. Besides, in order to have an opinion about basic parameters such as flow resistance and tortuosity, numerical flow analyses for open-cell structures have been made.

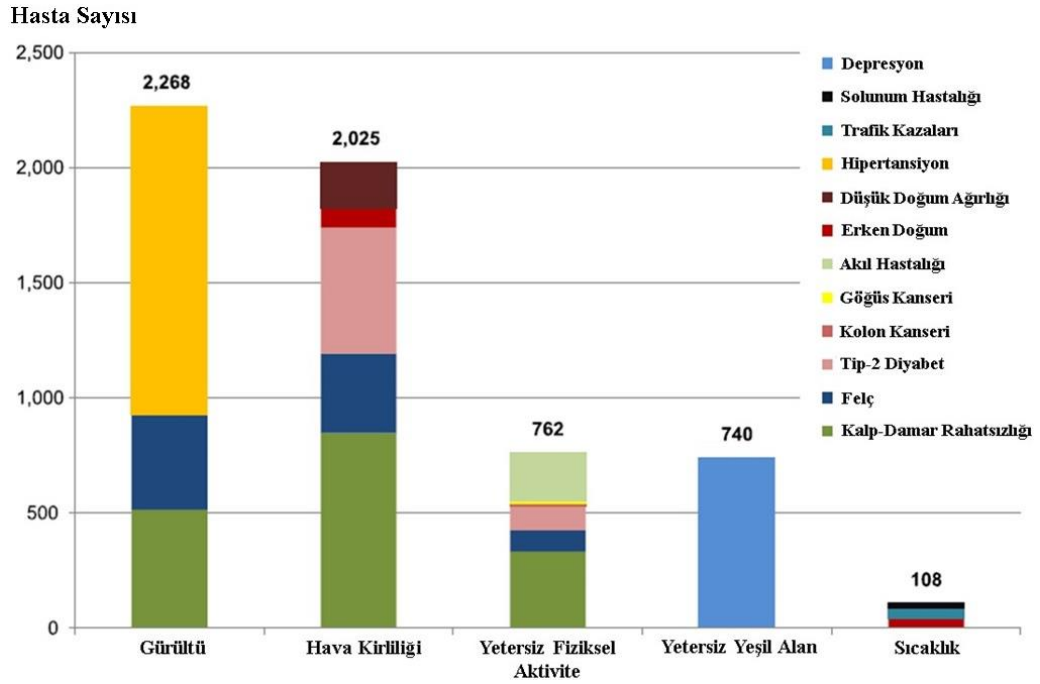
As a result of the experiments carried out and the numerical analyses made, it has been seen that the gypsum samples produced in porous structures, in comparison to non-porous reference sample, provided a substantial sound absorption. Also, it has been observed that open-cell gypsum samples are much more efficient in terms of sound absorption and among the open-cell structures, Octet unit cell structured gypsum samples have the highest sound-absorbing capacity. It has been detected that in each of the samples who have BCC, Gyroid and Octet unit cell structures, sound absorption behavior was deteriorated with the increase in porosity. As a result of the numerical flow analyses, it has been observed that the main reason for that was the decrease in the flow resistance of cell structures and in tortuosity due to the increase in porosity. Lastly, it has been observed that in BCC, Gyroid and Octet unit cell structures, increase in thickness causes sound absorption coefficient - frequency curve to shift to low frequencies and the maximum sound absorption coefficient value occurs at lower frequencies.

Keywords: Additive Manufacturing, Sound Absorption Coefficient, Gypsum Porous Structures, Binder Jetting, Impedance Tube, Flow Resistivity

1. GENEL BİLGİLER

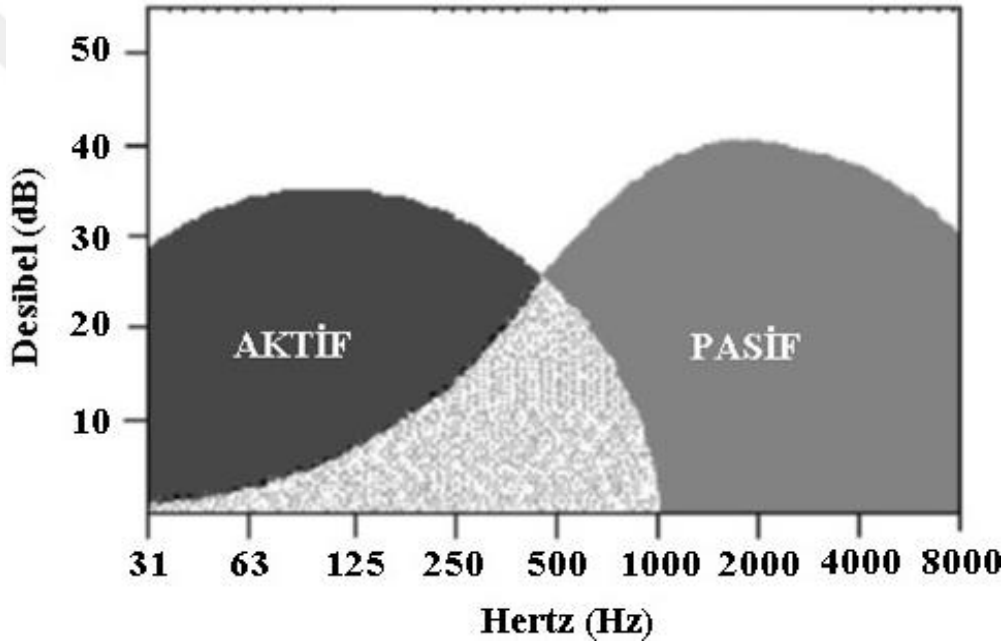
1.1 GİRİŞ

Sanayileşme ile birlikte ortaya çıkan kentleşmenin doğurduğu en önemli çevresel risklerin başında, aşırı gürültü olarak tanımlayabileceğimiz “gürültü kirliliği” gelmektedir. Öyle ki, Şekil 1.1’de görüldüğü gibi Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre, her yıl milyonlarca insan, aşırı gürültünün (doğrudan ya da dolaylı olarak) neden olduğu hipertansiyon, felç ve kalp-damar hastalıkları gibi çeşitli sağlık sorunları ile karşı karşıya kalmaktadır [1]. Bu durum, gürültünün insan sağlığı açısından istenen düzeylere indirgenerek, kontrol edilmesini elzem kılmaktadır. Bu nedenle, uzun yıllardır, bilim insanları gürültünün nasıl kontrol edileceği üzerine araştırmalar yapmışlar ve bu araştırmalar neticesinde çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Bu yöntemleri, genellikle düşük frekanslarda kullanmak üzere geliştirilen aktif gürültü kontrol yöntemleri ve yüksek frekanslarda daha verimli olan pasif gürültü kontrolü olmak üzere iki ayırmak mümkündür.



Şekil 1.1: Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre Barcelona şehrinde çeşitli sebeplerden ortaya çıkan hastalıklar ve hasta sayısı [2]

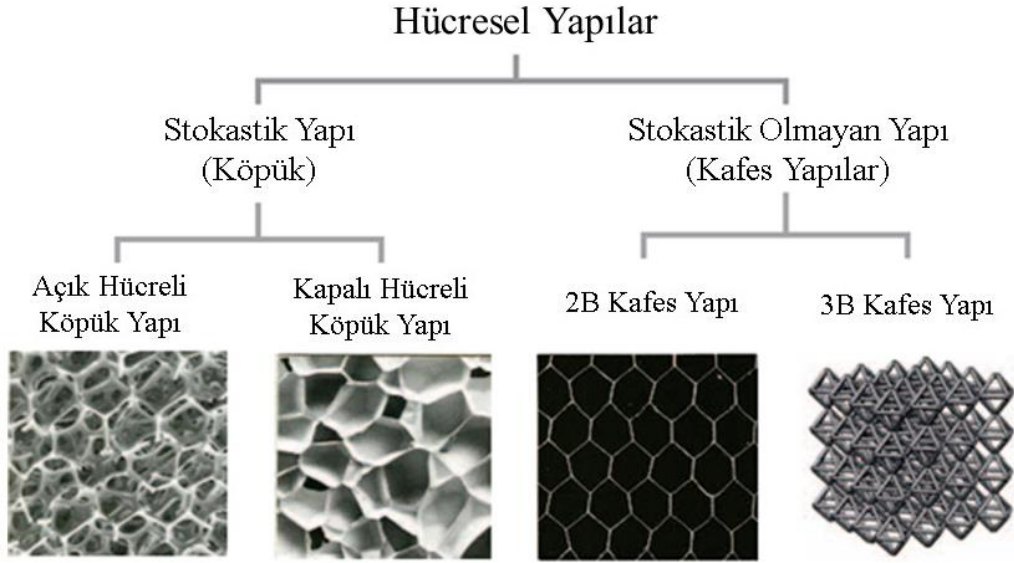
Aktif gürültü kontrolünde bir enerji kaynağı kullanılarak, gelen ses dalgasının tersi yönde bir ses dalgası üretilir ve ses dalgasının enerjisi sönmülenererek gürültüyü kontrol edilmeye çalışılır. Bu yöntem genellikle düşük frekans aralığındaki gürültülerin kontrol edilmesi amacıyla uygulanır. Pasif gürültü kontrol yönteminde ise dışardan herhangi bir enerji kaynağı kullanılmaz. Genellikle gözenekli veya lifli yapıya sahip ses yutucu malzemeler kullanılarak gürültü kontrolü amaçlanır. Ses dalgası, ses yutucu malzeme içerisinde ilerlerken enerjisinin bir kısmını termal ve viskoz etkilerden dolayı kaybeder ve ısı enerjisine dönüşür. Bu sayede gelen ses dalgasının sahip olduğu enerji, başka bir enerji formuna dönüştürülerek absorbe edilir ve gürültü kontrolü sağlanır. Pasif gürültü kontrol yöntemleri yüksek frekanslarda çok daha etkili bir yöntemdir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2: Gürültü kontrol yöntemleri etkinliklerinin frekans aralığına göre karşılaştırılması [3]

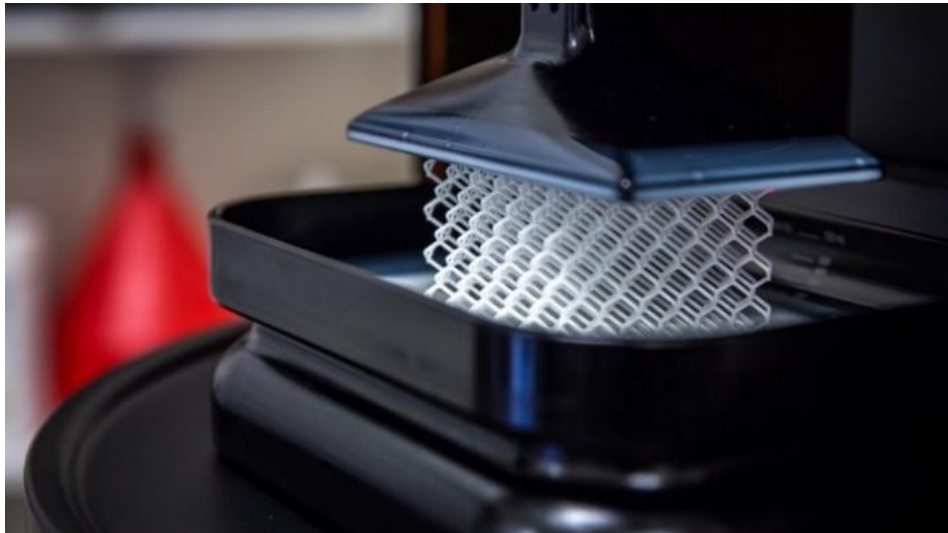
Gözenekli yapılar, malzeme boşluklarını dolduran akışkan ve hücre yapısı sayesinde bu akışkanı çevreleyen fazdan oluşur [4]. Genel olarak, gözenekli yapıları hücre formu açısından, hücreler arasında etkileşimin olmadığı kapalı hücreli (closed-cell) ve hücrelerin bir biri ile etkileşim halinde olduğu açık hücreli (open-cell) olmak üzere iki sınıfa ayırmamız mümkündür. Açık hücreli gözenekli yapıların kapalı hücreli yapılara göre ses yutma kapasitelerinin çok daha yüksek olduğu literatürde yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur [5-10]. Bunun yanında, gözenekli yapıları köpük, keçe gibi doğal gözenekli yapılar ve farklı üretim yöntemleri ile üretilmiş kafes (lattice)

yapısındaki metamateryaller ya da yapay gözenekli yapılar olarak sınıflandırmak mümkündür (Şekil 1.3).



Şekil 1.3: Gözenekli yapıların sınıflandırılması [58]

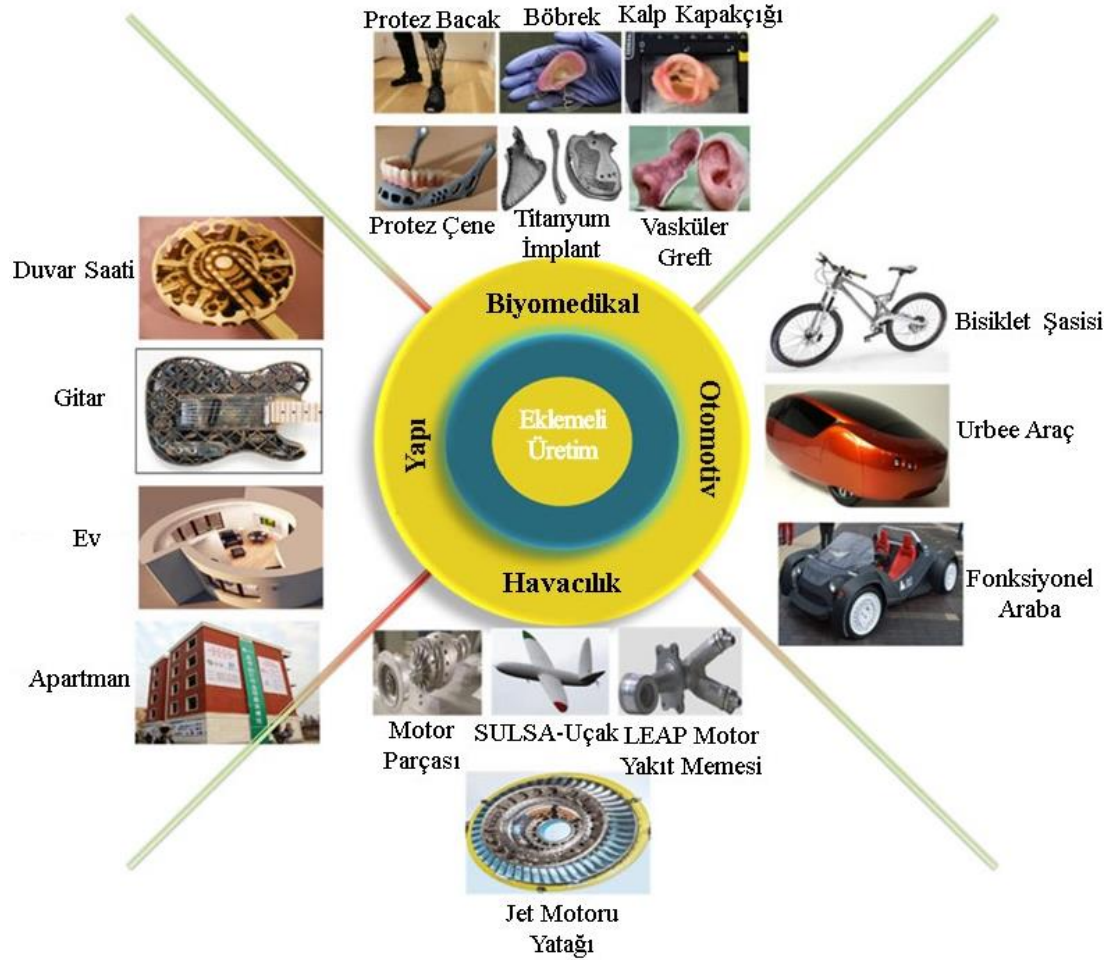
Uygulamada, gerek titreşim kontrolü gerekse akustik amaçlı olarak, genellikle doğal gözenekli yapıların kullanıldığı göze çarpmaktadır. Ancak, doğal gözenekli yapıların rutubete ve ateşe karşı dayanımlarının düşük oluşu nedeniyle, son yıllarda, özellikle Eklemeli Üretim yöntemleri gibi yeni imalat teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte, metamateryallerin titreşim kontrolü ve akustik uygulamalarda kullanılmaya başlandığı görülmektedir(Şekil 1.4). Zira özellikle de açık hücre formuna sahip kafes yapısındaki gözenekli metamateryellerin, geleneksel üretim yöntemleri ile imal edilmeleri son derece zordur.



Şekil 1.4: Metamateryellerin Eklemeli Üretim ile üretilmesi örneği [11]

1.2 Eklemeli Üretim

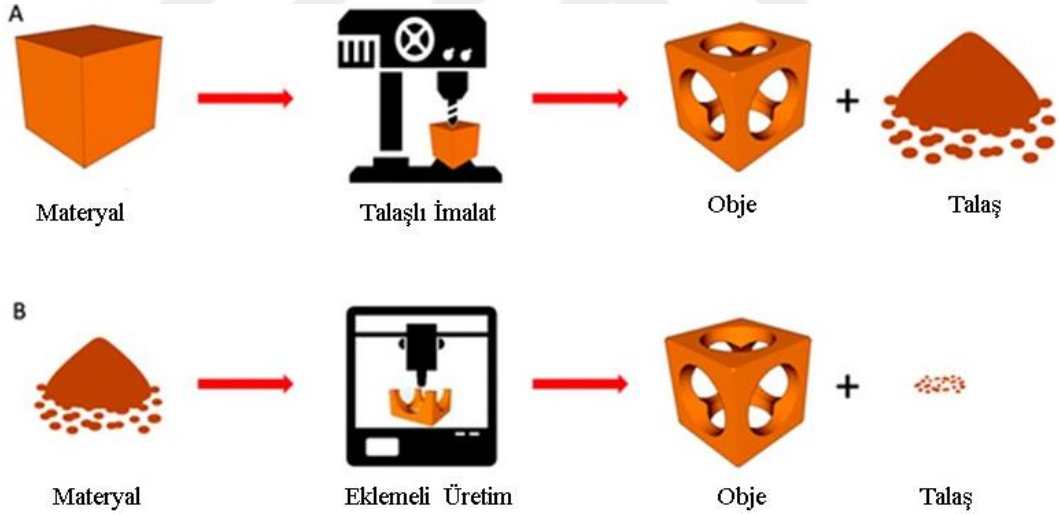
Endüstride kullanılan üretim yöntemleri günden güne gelişim göstermektedir. Son yıllarda, yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemlerine ek olarak dikkatleri üzerine çeken yeni bir üretim şekli de Eklemeli Üretim'dir. Eklemeli Üretim, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) kullanarak 3-Boyutlu nesnelere oluşturmak için, yapı malzemesinin katman katman eklenerek imal edilmesi temeline dayanan bir üretim şeklidir. İlk ortaya çıktığında kullanılan adıyla Hızlı Prototipleme Teknolojisi (Rapid Prototyping Technology) 1980'li yıllarda, üretimi yapılacak parçalar için model oluşturmak ve bunların prototiplerini üretmek amacıyla kullanılmıştır. Daha sonra yıllarda hızlı bir gelişim göstererek günümüzde sağlık endüstrisinden otomotiv endüstrisine kadar çok farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 1.5). Eklemeli Üretim yöntemlerinin "Endüstriyel Devrim" olarak adlandırılmasındaki temel sebep; kesme, oyma şekil verme gibi üretim tekniklerinin yetersiz kaldığı durumlarda teknolojinin devreye girip yeni imkânlar sağlamasıdır.



Şekil 1.5: Eklemeli üretim uygulama alanları [12]

Eklemeli Üretim yönteminin en büyük avantajı karmaşık geometrilerin, geleneksel imalat yöntemlerine göre, kolaylıkla üretilmelerine olanak sağlamalarıdır. Ayrıca, Eklemeli Üretim yönteminde üretilen parçalar, katmanların eklenmesi temeline dayandığından, Talaşlı İmalat yöntemlerindeki gibi malzemeden herhangi bir talaş kaldırılma işlemine tabi tutulmaz ve fire verilmez. Eklemeli üretimde talaş olarak adlandırabileceğimiz kısımlar destek malzemeleridir ve üretim sonrası temizlenir (Şekil 1.6). Bir başka önemli nokta ise, Eklemeli Üretim sayesinde bir parçayı üretmek için geleneksel üretim yöntemlerindeki gibi kalıp ihtiyacının olmamasıdır. Parçanın 3 Boyutlu katı modeli yazıcıya aktarılarak, herhangi ek yöntem kullanmaksızın, birebir üretimi gerçekleştirilebilir.

Avantajlarının yanında bu teknolojiyi kullanmanın dezavantajları da bulunmaktadır. İlk olarak geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla, seri üretim söz konusu olmadığı için parça başı birim maliyet daha yüksek çıkabilir. Bunun yanında teknoloji, talaş kaldırmak yerine katman ekleme temeline dayandığı için parçaların dayanımı istenilen seviyede olmayabilir.



Şekil 1.6: Talaşlı İmalat ve Eklemeli Üretim karşılaştırılması [13]

Eklemeli Üretim en büyük dezavantajlarından bir tanesi de zamandır. Her geçen gün teknoloji, gelişim gösterip ilgiyi üzerine çekse de üretim hızının düşük olması teknolojinin önündeki en büyük engeldir. Zaman olarak uzun bir üretim sürecine tabi olan bu teknolojide büyük ölçekli parçaların üretimi günler alabilir. Bu da seri üretimi ve haliyle sistemin kullanılabilirliğini temelde etkilemektedir. Temel parametrelerden süreci arttırmak için müdahaleler yapıldığında, yüzey hassasiyetinde bozulmalar, katmanların birbirine yapışmaması gibi hatalar ortaya çıkabilmektedir.

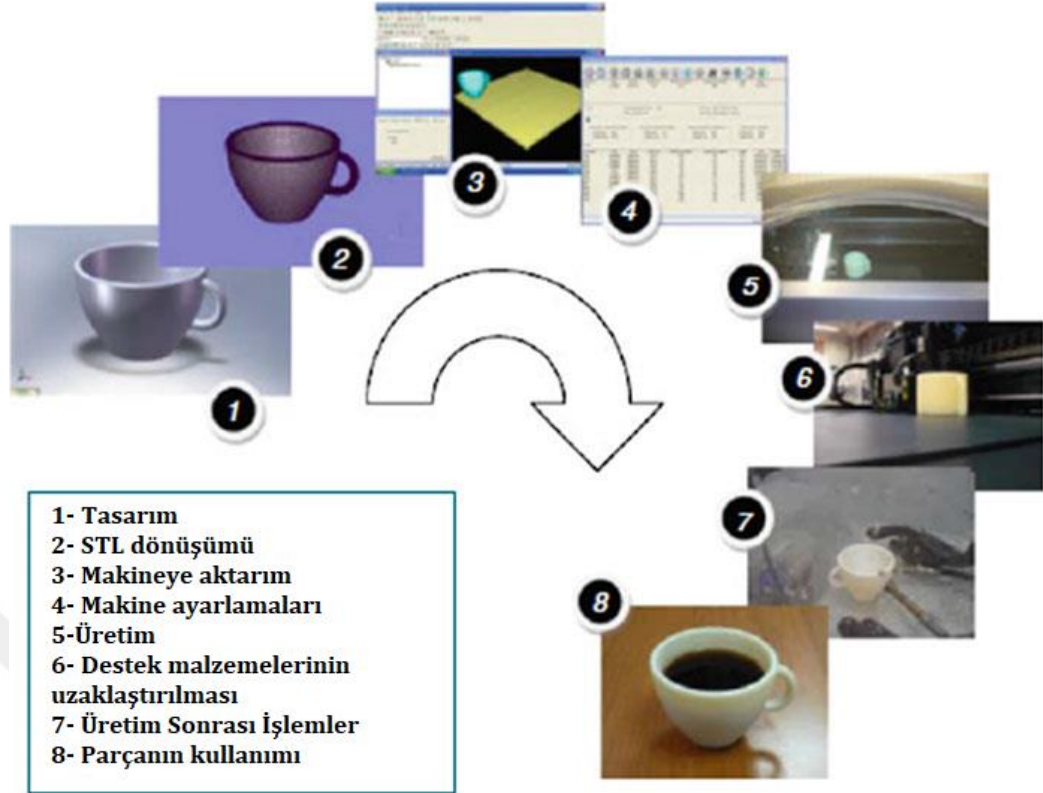
Tüm bu bilgiler ışığında Eklemeli Üretim'in geleneksel üretim yöntemleri arasında bulunan farklar Çizelge 1.1'de özetlenmiştir.

Eklemeli Üretim sürecinde bir ürünün kullanılabilir, işlevsel bir hale gelebilmesi birçok farklı aşamadan geçer (Şekil 1.7). Ürünler, farklı malzeme kullanılarak değişik şekillerde üretilebilir. Küçük, nispeten basit ürünler, çok fazla işlem den geçmeden üretilebiliyorken, daha büyük, daha karmaşık ürünler üretim süreci boyunca çok sayıda aşamadan geçebilir. Ayrıca üretilen parçaların kullanılmadan önce, dikkatli bir şekilde temizleme, zımparalama ve boyama gibi üretim sonrası işlemlerden geçmesi gerekebilir. Genel olarak uygulanan Eklemeli Üretim aşamaları Şekil 1.7'de özetlenmiştir.

İlk olarak CAD programlarından tasarımları yapılan modeller, STL formatına dönüştürülerek 3B yazıcı cihazına aktarılır. STL, Eklemeli Üretim'de en fazla tercih edilen uzantılardan bir tanesidir. Ardından cihaz üzerinde istenirse modelin boyut, yön ve diğer düzenlemeleri yapılır. Üretim işlemi tamamlandıktan sonra da cihazdan çıkarılan model üzerinde, gerektiği takdirde üretim sonrası işlemler yapılarak parçanın son hali ortaya çıkarılır. Bu aşamadan sonra ise parçamız kullanıma hazır durumdadır.

Çizelge 1.1 : Eklemeli Üretim yöntemlerini ve geleneksel üretim yöntemleri arasındaki temel farklar.

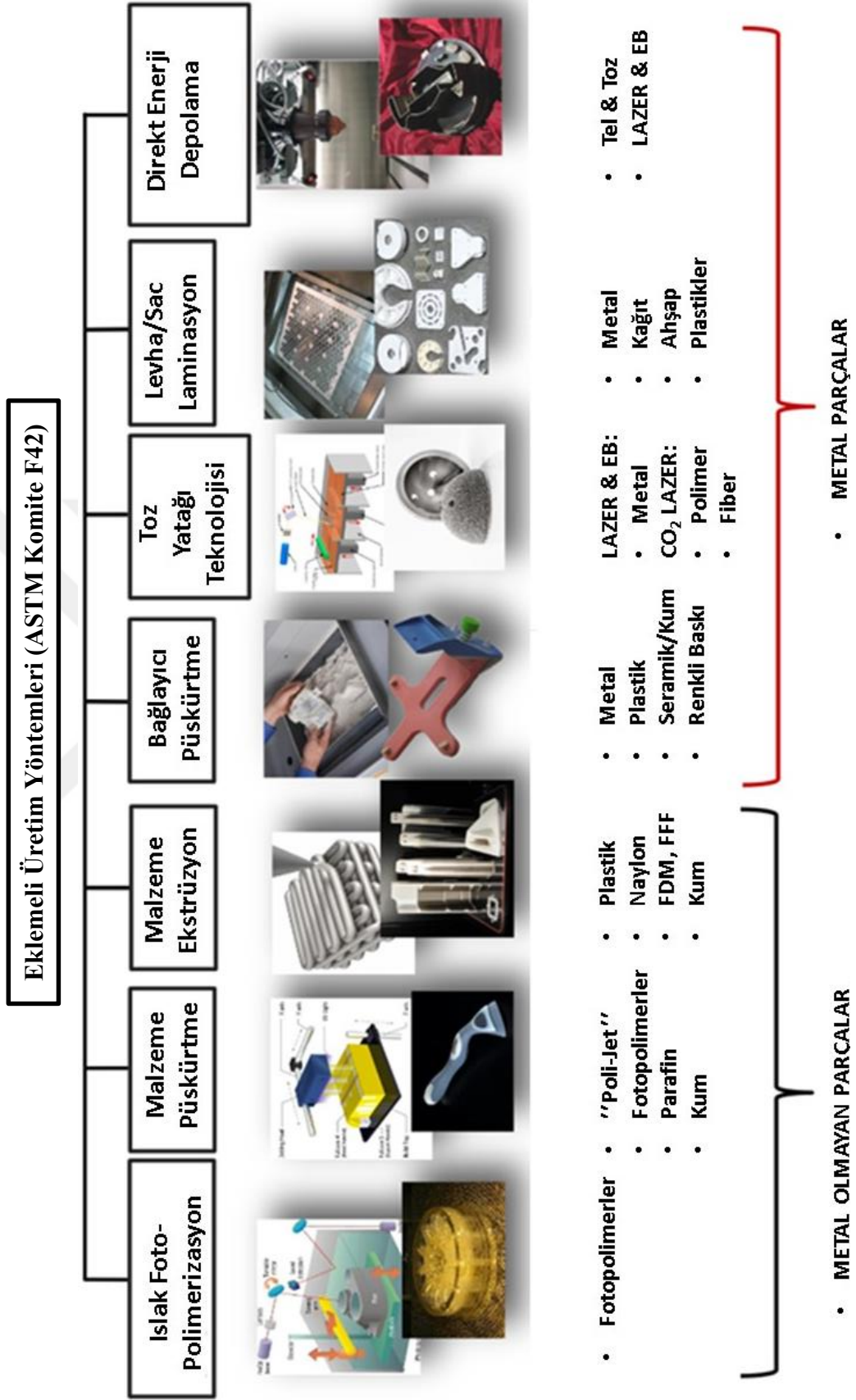
Geleneksel Üretim Yöntemleri		Eklemeli Üretim
Yüksek maliyetli üretim söz konusudur.	Maliyet	Prototip üretimi sayesinde %70'e kadar tasarruf sağlar.
Maliyet kısıtlamaları nedeniyle daha az yenilikçi üretim olur.	Tasarım	Tasarımı kolay ve ucuz yenilikler sağlar.
Seri üretim söz konusudur. Bu sayede daha hızlı üretim gerçekleşir.	Üretim	Seri üretim yerine parçalar bireysel olarak üretilir. Bu da çok zaman alır.
Daha fazla talaş oluşur; talaş kaldırma işleminde hassasiyetten ödün verir.	Kalite	Katman katman ekleme yöntemiyle yüksek hassasiyet sağlanır.
Üretilen parçalar yüksek dayanım içerebilir.	Dayanım	Geleneksel üretime oranla daha düşük mukavemet sağlanır.



Şekil 1.7: Eklemeli Üretim aşamaları [14]

Günümüzde yedi farklı Eklemeli Üretim yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler ve kullanılan malzeme türleri Şekil 1.8’de verilmiştir. Eklemeli Üretim teknolojisinin ticari olarak ilk başlangıcı Charles Hull tarafından 1986 yılında Stereolitografi (SLA) olarak bilinen proses ile gerçekleştirilmiştir. Ardından, Eriyik Yığma Modelleme (FDM), Toz Yatağı Teknolojileri (SLS, SLM, EBM vb.) ve Mürekkep-Bağlayıcı Püskürtmeli Sistemler (Binder Jetting, 3DP) gibi üretim yöntemleri ortaya çıkmıştır [15]. Eklemeli Üretim yöntemleri arasındaki temel farklar katmanları birbirine ekleme yöntemi ve kullanılan hammadde türüdür. Belirli bir tasarım için doğru Eklemeli Üretim yöntemini seçmek her zaman kolay değildir. Farklı Eklemeli Üretim teknikleri ve malzemelerinin mevcudiyeti, çoğu zaman birkaç tekniğin uygun olabileceğini işaret eder.

Eklemeli Üretim yöntemlerini sınıflandırmak istediğimizde 7 farklı sınıfa ayırmak mümkündür. Kullandığı malzeme, kullanım şekli, bu yöntemleri birbirinden ayıran özelliklerden bazılarıdır. Bağlayıcı Püskürtme Tekniği dışında günümüzde uygulanan Eklemeli Üretim teknolojilerinin temel çalışma prensipleri, avantaj ve dezavantajları Çizelge 1.2’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 1.8: ASTM standartlarına göre Eklemeli Üretim yöntemleri [16,17]

Çizelge 1.2: EÜ Yöntemlerinin Sınıflandırılması ve kullanım şekilleri [12].

Proses	Yöntem	Üretim şekli	Avantajları	Dezavantajları	Katman Kalınlığı	Materyal Tipi	Referans
Islak Polimerizasyon	Stereolitografi	Enerji kaynağı olarak UV ışınlar kullanılarak yüzeydeki reçine katmanlarının kurlenmesi.	1- Büyük nesnelerin imalatında iyi yüzey kalitesi ve 4000 DPI üzeri yüksek çözünürlük sağlar. 2- Harici desteğe ihtiyaç yoktur. 3- Yüksek seviyede hassas iç tasarım ve düzgün dış yapı elde edilebilir.	1- Düşük mekanik özellikler. 2- Kurlleme ihtiyacı. 3- Kullanılabilecek malzeme sınırlıdır. 4- Harici destek gereken durumlarda, parçayı temizleme zorluğu olur.	50-100 µm	Akrilikler ve epoksiler, PPF seramik hidrojel	[18-21]
	Dijital Işık İşleme Teknolojisi	Stereolitografi teknolojisinden farklı olarak reçine üzerine UV ışınlar yerine ışık projektörleri gönderir.	1- Geniş malzeme seçimi. 2- Birçok karmaşık şekil hızlı bir şekilde üretilebilir.	1- Harici destek gereken durumlar, parçayı temizleme zorluğu olur.	35-120 µm	Polimerler, kompozitler, zirkonya, elastomer	[22,23]
	Seçici Lazer Sinterleme	CO ₂ lazer ışını, atomik difüzyonla toz partiküllerinin sinterlenmesi için kullanılır	1- Geniş malzeme seçimi. 2- Birçok karmaşık şekil hızlı bir şekilde üretilebilir.	1- Geniş malzeme seçimi. 2- Birçok karmaşık şekil hızlı bir şekilde üretilebilir.	1- Gözenekli ve pürüzlü yüzey. 2- Karmaşık işleme sistemi. 3- Malzeme değiştirme zorluğu.	50-100 µm	Naylon, PEEK, PLGA, PCL, PLA, PVA, HA
Toz Yatağı Teknolojisi	3 Boyutlu Baskılama	Partiküllerin yapışma yoluyla bağlanması.	1- Hızlı doğrulama.	1- Yetersiz yapışma sebebiyle ortaya çıkan anizotropik mekanik özellikler.	100 µm	Niasta, selüloz, PLGA, PCL, PLA, Al ₂ O ₃ .	[31-32]
	Seçici Lazer Ergitme	Üretilen lazer ışını partikülleri tamamen eriyene ve birbirine kaynaşana kadar toz yatağı üzerindeki metalik tozları eritir.	1- Toplu üretim oranı çok yüksek. 2- İyi mekanik özelliklerin yanında yüksek yüzey kalitesi. 3- Biyomedikal uygulamalar için oldukça karmaşık hassas metal nesnelere %99'u aşan yüksek yoğunluk. 2- Seçici lazer ergitmeyle kıyaslandığında daha az termal gerilme. 3- Hızlı üretim, az destek malzeme. 4- Vakum ortamı, oksitler ve nitritler gibi yabancı maddeleri yok eder.	1- Demir dışı metallerde topaklanma sorunu. 2- Erimiş malzeme kararsızlığı. 3- Nispeten yavaş üretim. 1- Sınırlı metal grubu. 2- Vakum ihtiyacı sebebiyle maliyet artışı 3- Üretim sonrası fazla işlem bulunmaktadırlar. 4- Kötü yüzey kalitesine sahiptir. Sadece küçük ve orta ölçekli parçalar üretilebilir.	30-150 µm	Çelik, kobalt bazlı alaşımlar, Cp-Ti, Ti-6Al-4V, alüminyum, seramik	[33-35]
	Elektron Işınlı Ergitme	Metal tozları eritmek için yüksek vakum altında üretilen elektron ışını kullanılır.	1- Kısa zamanda yüksek hassasiyet elde edilir. 2- Keskin iç koşullar ve zor geometriler kolaylıkla üretilebilir.	1- Üretim sonrası fazla işlem bulunmaktadırlar. 4- Kötü yüzey kalitesine sahiptir. Sadece küçük ve orta ölçekli parçalar üretilebilir.	20.3-25.4 µm	Ti-6Al-4V, Co-Cr-Mo, Cp-Ti, β-Ti alaşımları, inconel 718	[36-38]
Direkt Metal Sinterleme	Seçici lazer sinterleme tekniğine benzer olup, plastik yerine metal alaşımları kullanılır.	1- Kısa zamanda yüksek hassasiyet elde edilir. 2- Keskin iç koşullar ve zor geometriler kolaylıkla üretilebilir.	1- Üretim sonrası fazla işlem bulunmaktadırlar. 4- Kötü yüzey kalitesine sahiptir. Sadece küçük ve orta ölçekli parçalar üretilebilir.	1- Üretim sonrası fazla işlem bulunmaktadırlar. 4- Kötü yüzey kalitesine sahiptir. Sadece küçük ve orta ölçekli parçalar üretilebilir.	89-97 µm	Ti-6Al-4V, Co-Cr	[39,40]

Çizelge 1.2 (Devam): EÜ Yöntemlerinin Sınıflandırılması ve kullanım şekilleri [12].

Proses	Yöntem	Üretim şekli	Avantajları	Dezavantajları	Katman Kalınlığı	Materyal Tipi	Referans
Malzeme Püskürtme	Sürekli Baskı	Damlacıklar sürekli bir akış halindeki sıvısının	1- Yüksek yüzey kalitesi ve yüksek hassasiyet 2- 100'den fazla dijital malzeme birleşimi sağlayabilir.	1- Kısıtlı malzeme. Sadece balmumuna benzer malzemeler ve polimerler kullanılmaktadır. 2- Parçalar kırılabilir.	40 µm	PCL, ABS, Poliamit, PLA ve bileşenleri	[41,42]
	İsteğe Bağlı Baskı	Damlacıklar ihtiyaç anında üretilir.					
Malzeme Ekstrüzyon	Doğrudan Mürekkep Yazdırma	Kolloidal veya polimer bazlı mürekkeplerin katman katman eklenmesi	1- Yumuşak / Normal işlem koşulları 2- İlaçların ve biyomoleküllerin kanştırılma imkânı 3- Biyomedikal uygulamalar için yüksek kalite gözenekli yapıların üretimi	1- Bazı malzemeler için işlem sonrası römşalar gerekir 2- Kısıtlı kararlılık 3- İşlemin yavaş olması 4- Yetersiz mekanik özellikler	20 µm	PCL, HA, zirkon, aerogeller, biyoaktif camlar	[43-48]
	Eriyik Yıgna Modelleme	Eritilmiş termoplastik filamentlerin nozul vasıtasıyla katman katman eklenmesi	1- Çeşitli türde malzemenin kullanılabilmesi 2- Her parça için destek malzeme ihtiyacı duyulmaması 3- Kurulumda tasarruf 4- Üretim sonrası kütleme ihtiyacı yoktur.	1- Gözenekli ve pürüzlü yüzey 2- Zayıf Z yönlü yüzey 3- Destek yapınınun temizlenme zorluğu 4- Büyük parçaların üretiminin zaman alması	100-150 µm	ABS, Poliamid, PLA ve bileşenleri	[49-51]
Levha Laminasyon	Üretim	3D obje kesme, sıralı bir şekilde katmanların ayırma ve yapıştırma yoluyla oluşturulur.	1- Masaüstü kurulumda ucuz kağıt kullanımı 2- Kapalı haznenin gerekmemesi 3- Çok farklı çalışma sıcaklığının kullanımı 4- Düşük maliyet ve materyalin kolay işlenmesi 5- Levhada etime görülmez.	1- Katmanlar arası bağ oluşturmak zordur. 2- İç boş parçaların üretimi zordur. 3- Çok emek ve zaman alır.	200-300 µm	Seramik, Alüminyum, Paslanmaz Çelik, Bakır, Titanyum, Plastik, Kumaş, Sentetik materyaller	[52]
	Doğrudan Enerji Biriktirme	Nesneler lazerle eritilip eklenir.	1- Parça üretimi yönü ve eksenle sınırlanmaz. 2- Tek noktada biriktirilebilir/tortulama azlığı 3- Mevcut parça üzerine de uygulanabilir.	1- Düşük kararlılık 2- Objeden talaş kaldırma işlemi uygulanır. 3- Metal objelere ısı işlem uygulanması gerekir.	10-120 µm	Metal, demir-nikel alaşımı, manyetik alaşım, Ti-Tungsten alaşım	[53-57]

1.3 Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting) Tekniği

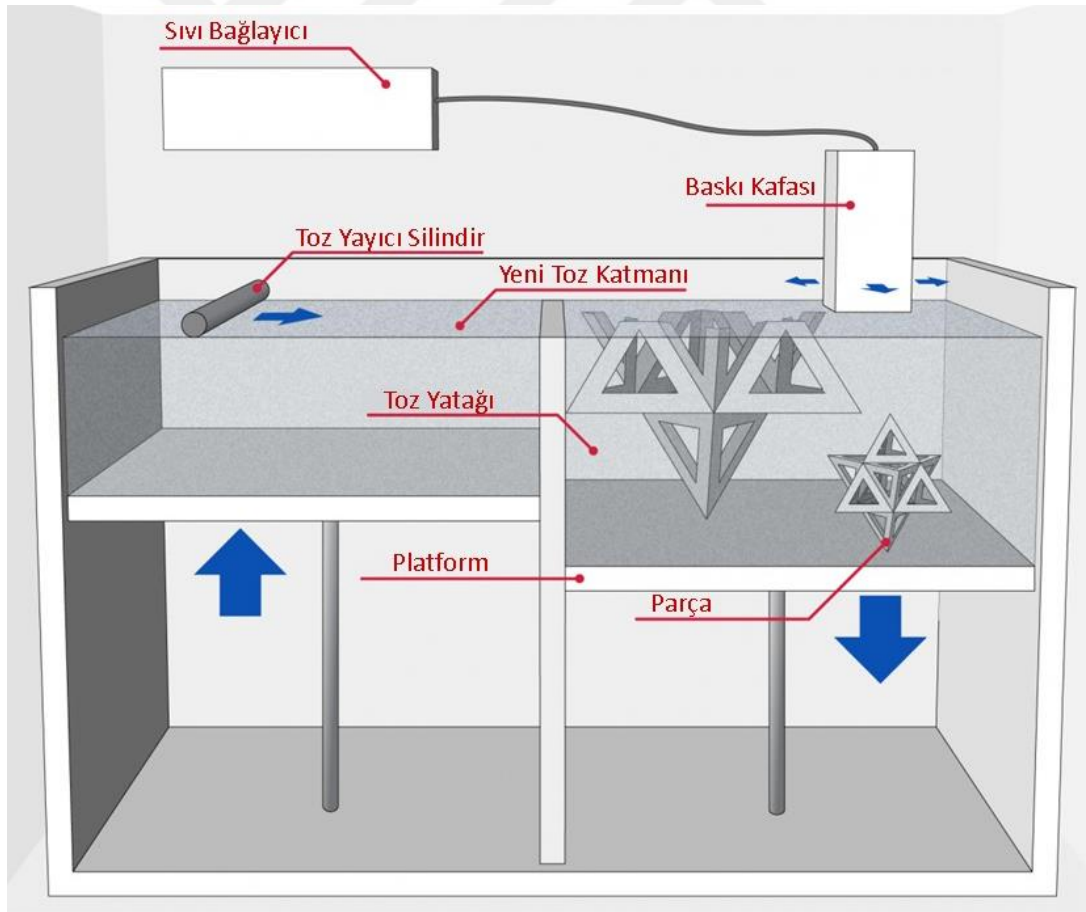
Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting-BJ) Tekniği ilk defa Massachusetts Institute of Technology (MIT) tarafından geliştirilmiş Eklemeli Üretim yöntemlerinden bir tanesidir [59]. Bağlayıcı Püskürtme yönteminin diğer teknolojilerden en büyük farkı renkli baskı sağlayabiliyor olmasıdır. Toz kullanılarak gerçekleştirilen bu teknikte bir parçanın imal edilmesi, toz yatağına püskürtülen yapıştırıcının, toz katmanlarını üst üste eklemesi temeline dayanmaktadır. Dolayısıyla, bu yöntemde parçanın temel malzemesinin sadece küçük bir kısmı baskı kafasından iletilir ve parçanın çoğu toz yatağındaki malzeme tozlarından oluşur. Ürün, toz ile sıvı bağlayıcının bir araya gelip bağlanmasıyla oluşmaktadır. Sıvı bağlayıcının içeriği, toz yatağındaki malzemeyi harekete geçirebilmesi için çoğunlukla sudur. Viskoziteyi, yüzey gerilimini ve kaynama noktasını, baskı kafası özelliklerine uyacak şekilde ayarlamak için bağlayıcı içerisinde katkı maddeleri bulunmaktadır. Bununla birlikte renklendirme gereken baskılar için de boyalar mevcuttur.

Bağlayıcı Püskürtme Tekniği'nin şematik gösterimi Şekil 1.9'da verilmiştir. Genel olarak Bağlayıcı Püskürtme Tekniği ile üretim yapan bir 3-Boyutlu yazıcı; platform, platforma serilen toz, toz yayıcı silindir, sıvı bağlayıcı ve sıvı bağlayıcıyı toza püskürten baskı kafasından oluşur. Bu yöntemde, önce platform üzerine bir katman toz serilir ve yapıştırıcı uygulanır ardından tozun bulunduğu platform, katmanın kalınlığı kadar aşağı indirilir ve üzerine merdaneler yardımıyla yeni bir toz tabakası serilir. Bu işlem, parça tamamlanıncaya kadar devam eder. Yazdırılan kısım, bağlayıcı maddenin tam olarak oturması ve parçanın ön mukavemet kazanması için, üretim tamamlandıktan sonra toz yatağında bırakılır ve bir süre bekletilir. Üretim sonrasında, ürün kullanıma tam olarak hazır değildir ve birkaç işlemde daha geçmesi gerekir. Öncelikle, parçanın toz yatağından çıkarılarak parçaya bağlı olmayan artık tozların basınçlı hava yoluyla uzaklaştırılması gerekir. Daha sonra, parçanın daha da mukavemetli hale gelerek mekanik özellikler kazanabilmesi amacıyla yapıştırıcı ile infiltrasyon işlemi uygulanır.

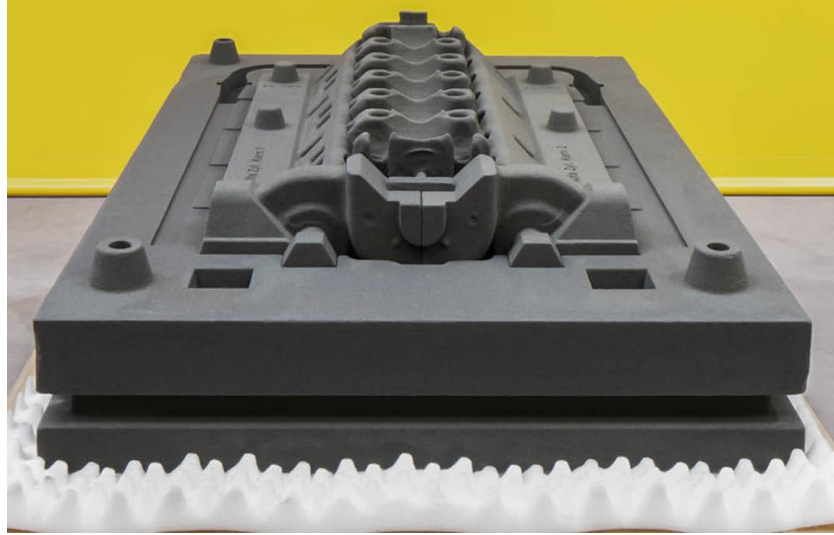
Bağlayıcı Püskürtme Tekniğinde kullanılan malzemelerin başında alçı tozu gelmektedir. Ayrıca metaller/alaşımlar (Al bazlı, Cu bazlı, Fe bazlı, Ni bazlı ve Ko bazlı alaşımlar dâhil) ve seramikler de (cam, kum, grafit vb. dâhil) Bağlayıcı

Püskürtme Tekniği ile işlenebilmektedir. Bununla birlikte, toz halinde olan herhangi bir malzemenin bu teknikle işlenmesinin mümkün olduğu da ileri sürülmektedir [60]. Ancak şunu da ifade etmek gerekir ki, yapıştırma ile bağlama söz konusu olduğu için, bu teknikle üretilen parçaların malzeme özellikleri, dayanıklılık gerektiren uygulamalar (havacılık, otomotiv vb. alanlarda) için uygun değildir [61].

Bağlayıcı Püskürtme Teknolojisi mimari, aksesuar, eğitim ve sergi, fuarlar için model üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin, bu yöntem yardımıyla tam renkli model organlar, anatomik yapılar ya da küçük ölçekli mimari yapılar kolayca üretilir. Ayrıca, 3B mikroskopi teknolojilerindeki veriler kolayca işlenebilir ve büyütülmüş (veya küçültülmüş), renkli fiziksel nesnelere basılabilir. Bağlayıcı Püskürtme Tekniği'nde yapım hacmi, diğer Eklemeli Üretim teknolojilerine kıyasla oldukça yüksektir. Örnek verilecek olursa, büyük hacimli kum döküm kalıplarının üretimleri için kullanılmaktadır [63]. Şekil 1.10'da teknoloji kullanılarak üretilen farklı uygulama örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 1.9: Bağlayıcı Püskürtme Tekniği Şematik Görünümü [62]



Şekil 1.10: Bağlayıcı Püskürtme Tekniği ile üretilen farklı uygulama örnekler [64]

Bağlayıcı Püskürtme Tekniğinin en önemli avantajlarından biriside üretim esnasında destek yapılara ihtiyaç duyulmamasıdır. Üretim esnasında üretilen parçanın etrafındaki tozlar, parçaya gerekli tüm desteği sağlar (SLS'ye benzer). Bu, genellikle destek yapılarının yaygın olarak kullanılmasını gerektiren diğer Eklemeli Üretim yöntemleri arasında önemli bir farktır. Parçaların yapı platformuna bağlanması gerekmediğinden, tüm yapı hacmi kullanılabilir. Bu nedenle, Bağlayıcı Püskürtme Tekniği düşük-orta ölçekli üretimlerde toplu üretim için uygundur [63]. Bağlayıcı Püskürtme Tekniği'nin diğer Eklemeli Üretim yöntemlerine göre bir diğer önemli avantajı da, bağlama işleminin oda sıcaklığında gerçekleşmesidir. Bu durum, termal etkilere bağlı (FDM'de çarpılma, SLS, DMSL / SLM'de bükülme veya SLA / DLP'de kıvrılma gibi) boyutsal çarpıklıkların oluşmasını engellemektedir [63]. Bağlayıcı Püskürtme Tekniği'nin avantaj ve dezavantajları Çizelge 1.3'de özetlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 1.3: Bağlayıcı Püskürtme Tekniği'nin avantaj ve dezavantajları.

Avantajlar	Dezavantajlar
Renkli parçaların üretimi yapılmaktadır. Tozu elde edilebildiği sürece her malzemeye uygundur.	Üretim sonrasında mekanik özelliklerinin artmasına yönelik işlemlere tabi tutulur.
Diğer teknolojilere göre daha hızlı üretim sağlamaktadır.	Toz partiküllerinin birbirine bağlanması söz konusu olduğundan, üretilen ürünler kırılabilir.
Üretim esnasında destek yapıları gerekmez, çevresindeki toz gerekli tüm desteği sağlar.	Dayanıklılık gerektiren parçaların üretimi için uygun değildir.
Üretim bittiğinde kullanılan tozlar bir sonraki üretim için tekrar kullanılabilir.	Kısıtlı üretim söz konusudur. Üretim Tablasını dolduracak kadar parça üretimi yapılır.
Aynı anda birden fazla parçanın paralel üretimine izin verir.	
Bağlanma işlemi oda sıcaklığında gerçekleştiği için çarpılma, büzülme söz konusu değildir.	

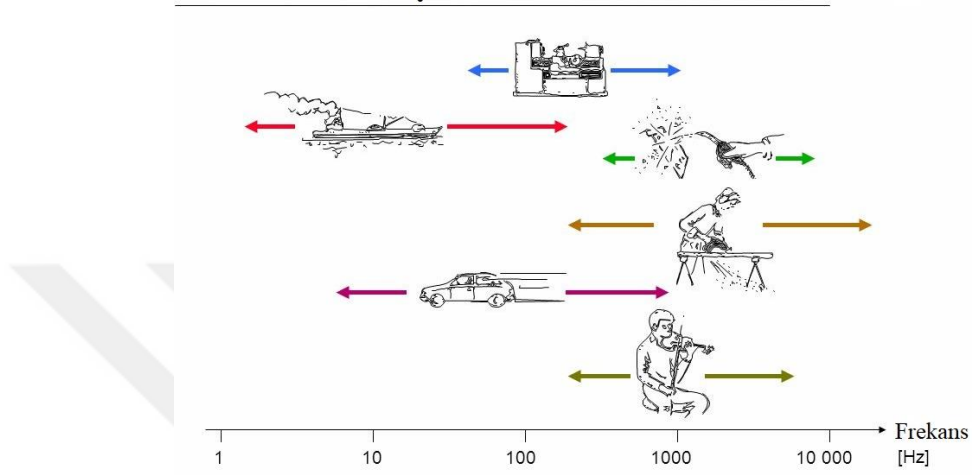
1.4 Ses ile İlgili Temel Kavramlar

Ses; insanların algılayabildiği seviyede katı, sıvı veya gaz gibi maddesel ortamlarda yayılan mekanik bir dalga hareketidir. Ses, yayılabilmek için bir ortama ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple boşlukta ses oluşumu söz konusu değildir. Ses, kaynağından çıktıktan sonra havadaki taneciklerin titreşmesine sebep olur. Bu tanecikler birbirine çarparak dalga meydana getirir ve bu şekilde ses ortam içerisinde ilerler. Tanecikler ne kadar sıkı ise ses o kadar hızlı yayılır. Bu nedenle katı cisim üzerinde ses çok daha hızlı yayılmaktadır.

Gürültü; sesin bir alt kümesi olarak değerlendirilebilir ve hoş olmayan, istenmeyen bir ses olarak adlandırılır. Yüksek seviyede gürültüye maruz kalmak geçici veya kalıcı işitme kaybına neden olabilir.

Frekans; ses ortamda yayılırken titreşimler meydana getirmektedir. Sesin birim zamandaki titreşim sayısına frekans denir ve "f" ile gösterilir. Frekans birimi olarak Hertz (Hz) kullanılmaktadır. Çevremizde ortaya çıkan her sesin bir frekans değeri vardır. Bu seslerden bazıları Şekil 1.11'de gösterilmektedir. Sesler kulağımıza

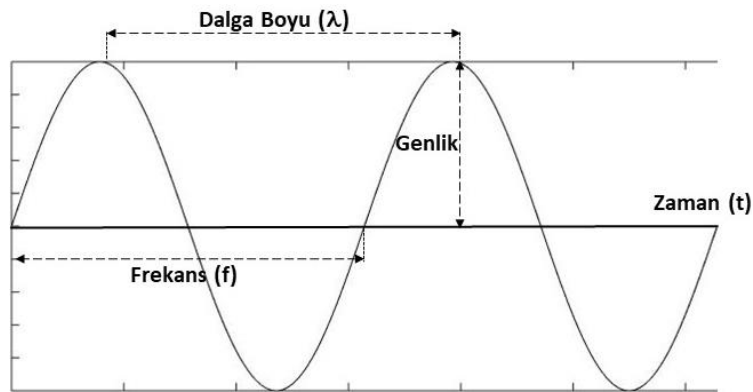
ulaşırken belirli bir yolu kat etmesi gerekmektedir. Sesleri ince veya kalın işitmemize neden olan ses özelliğine de ses yüksekliği denir. Ses yüksekliği fazla olan sese ince (tiz), ses yüksekliği az olan sese de kalın (pes) ses adı verilir. Çevrede bulunan ses kaynaklarının çıkardıkları seslerin yüksekliği sesin frekansına bakılarak belirlenir. Yüksek frekanslarda çıkan sesler ince, düşük frekanslardaki sesler ise kalın ses olarak nitelendirilir.



Şekil 1.11: Farklı Ses Kaynaklarının Frekans Aralıkları [64]

Dalga boyu; ses dalgalarının uzayıp kısalmasıyla oluşan salınımında, iki tepe arasındaki mesafe olarak adlandırılır ve lambda " λ " ile gösterilir. Dalga boyu bir uzunluk olduğu için metre (m) birim cinsinden ifade edilir.

Genlik; bir yol boyunca ilerleyen ses dalgalarının maksimum olduğu basınç değeri genlik olarak adlandırılır. Birimi Pascal (Pa)'dır. Genliğin miktarı insan kulağına gelen ses şiddetinin miktarı olarak değerlendirilir. Bu bilgiler ışığında harmonik bir ses dalgası üzerinde genlik-frekans-dalga boyu gösterimleri Şekil 1.12'de belirtilmiştir.



Şekil 1.12: Harmonik Ses Dalgası

Ses Hızı; titreşme özelliğine sahip ve esnek bir yapıdan oluşan her cisim, ses oluşturma özelliğine sahiptir. Bu da her ses çıkarma özelliğine sahip cisimlerin aslında birer ses kaynağı olduğunu gösterir. Bu kaynaktan çıkıp yayılmakta olan ses dalgaları ortamın özelliğine göre belirli bir hızda ortamda yayılmaktadır. Bu yayılma ses hızıdır. Bu hızı, frekans ve dalga boyu cinsinden değerlendirildiğinde (Denklem 1.1);

$$c = f \cdot \lambda \quad (1.1)$$

ile ifade edilir. Bu formül de hız, frekanstan bağımsızdır ve frekans değerinin artmasıyla veya azalmasıyla değişim göstermemektedir. Dalga boyu frekans ile ters orantılı şekilde artıp azalır, bu sayede ses hızı, ilerlediği doğrultu boyunca frekans değerinden etkilenmez. Ses herhangi bir ortamda, ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir. Hava da ses iletiminin sağlandığı ortamlardan bir tanesidir. Havadaki ses hızı, sıcaklık ile doğru orantılı olarak değişim gösterir (Denklem 1.2).

$$c_{\text{hava}} = (331.5 + (0.6 \times \theta)) \text{ m/s} \quad (1.2)$$

Formülde yer alan “ θ ” sıcaklığın derece santigrat ($^{\circ}\text{C}$) cinsinden ifadesidir. 1 atmosfer basınç ve oda sıcaklığı için hava hızı 340 m/s alınabilir.

Ses basıncı; ses dalgalarının oluşturduğu birim yüzeydeki kuvvet olarak ifade edilir ve birim olarak Pascal (Pa) kullanılır. Her ses dalgası bir ses basınç değerine karşılık gelmektedir. İnsan kulağının algılayabildiği ses dalgası değerlerine karşılık gelen basınç değerleri en düşük 20 μPa (mikropaskal) , en yüksek 20 Pa’dır. Bu aralığın çok geniş olması sebebiyle ses, desibel (dB) olarak adlandırılan logaritmik bir oran birimi ile ifade edilir.

Ses gücü; ses dalgalarının birim zamanda yaydığı enerji miktarıdır. Watt (W) biriminde ifade edilir.

Desibel (dB); ses seviyesini ölçmek ve fiziksel iki değer oranını ifade etmek için kullanılan logaritmik bir birimdir. Ses basınç ve güç seviyeleri dB biriminde ifade edilir. Ses dalgalarına ait değişkenler, sesin fiziksel özelliklerine göre değişir. Her ortam, her bir değer ile değişen bu parametreler için bir referans değer belirtmek gerekir. Ses basınç seviyesini ölçerken de bu referans parametresinden yararlanır. Bir insanın duyabileceği en düşük ses basıncı olarak 20×10^{-6} Pa, en düşük ses gücü

değeri de 10^{-12} W referans değerler kabul edilerek sırasıyla ses basınç ve güç seviyeleri sırasıyla aşağıda yer alan Denklem 1.3 ve Denklem 1.4'te verilmiştir.

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_{ref}^2} \text{ (dB)} \quad (1.3)$$

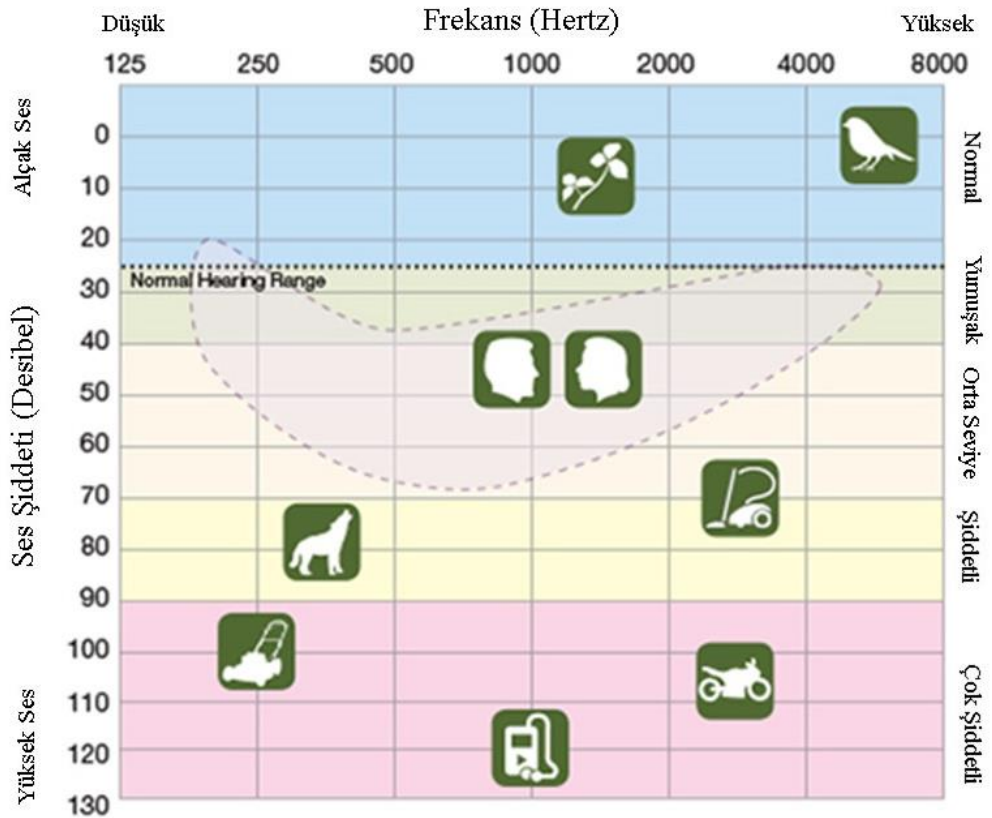
$$L_w = 10 \cdot \log \frac{W}{W_{ref}} \text{ (dB)} \quad (1.4)$$

Ses şiddeti; birim alandan akan ses enerjisi miktarını ifade eder. Ses şiddeti (I) kaynaktan yayılan ses gücünün yayılma alanına oranıdır (Denklem 1.5)

$$I = \frac{W}{A} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1.5)$$

Burada W ses gücünü temsil ederken, A ise sesin geçtiği birim alanı gösterir. İnsan kulağının algılayabilmesi için, ses dalgasının sahip olduğu en düşük ses şiddeti değeri 10^{-12} W/m², en yüksek değeri ise 1 W/m² olmalıdır.

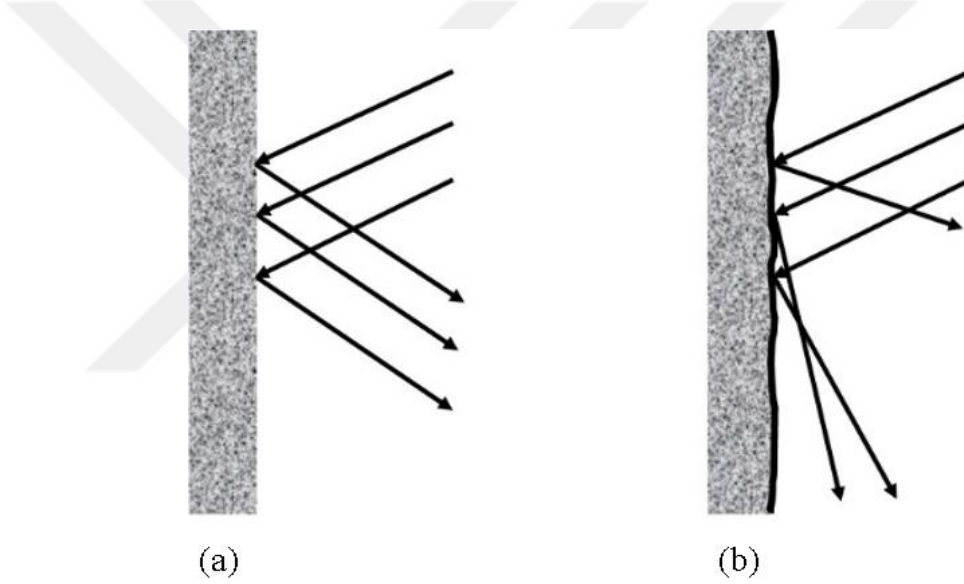
Son olarak insan konuşma Frekans aralığı 100-10000 Hz aralığında olup Speech Banana olarak adlandırılan insan konuşma frekans aralıkları Şekil 1.13'de verilmiştir.



Şekil 1.13: Speech Banana - İnsan konuşma frekans aralığı [65]

1.4.1 Sesin Yansımaları, Kırınması ve Kırılması

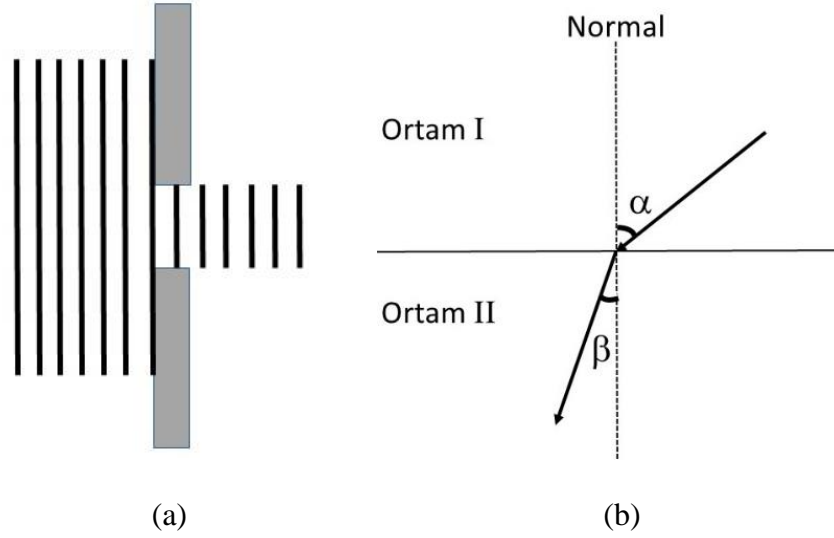
Ses dalgaları yayıldıkları ortamdan farklı bir ortama geçerken veya bir nesne ile karşılaştıklarında bir takım davranışlar sergilerler. Ses, bir nesneye çaptığında dalgaların bir kısmı nesnenin yüzeyinden yansırken bir kısmı da nesnenin etrafında belirli bir açı yaparak yayılmaya devam eder. Katı bir cisme çarpan ses dalgalarının, belirli bir açıyla geri gelmesi olayına yansıma denilmektedir. Ses yansıması düzgün veya dağınık olabilir. Yansıtıcı yüzeyin girinti ve çıkıntıları yansıyan sesin dalga boyundan küçük ise yansıma düzgün olur. Düzgün yansımada ses ışını yüzeye geldiği açıyla yansır. Yansıtıcı yüzeyin girinti ve çıkıntılarının boyutu yansıyan sesin dalga boyundan büyükse yansıma dağınık olur. Dağınık yansımada gelen ses ışını, açısını değiştirerek geldiği açıdan farklı bir açıda yansır.(Şekil 1.14)



Şekil 1.14: Sesin (a) düzgün ve (b) dağınık yansıması

Ses dalgaları bir delikten veya bir yüzeyin kenarlarından geçerken yön değiştirir. Bu olaya kırınma adı verilir. Kırınmanın nedeni ses dalgalarının süründükleri yüzeyde yavaşlamalarıdır. Kırınma olayının gerçekleşmesi için ses dalgasının denk geldiği aralık, kenar, köşe gibi engellerin sesin dalga boyundan küçük olması gerekmektedir. Düşük frekanslı ses dalgalarında kırınma olayı yüksek frekanslara oranla daha fazla gerçekleşir. Ses dalgalarının kırınma olayı Şekil 1.15a'da gösterilmektedir.

Ses dalgalarının bir diğer davranışı ise Şekil 1.15b'da görüldüğü gibi kırılmadır. Hızlı yayıldığı bir ortamdan daha yavaş yayıldığı bir ortama geçen ses dalgaları normale yaklaşarak kırılır.



Şekil 1.15: Ses dalgalarının (a) kırınması olayı, (b) ortam değiştirirken kırılması olayı

Dalga, ortam değiştirirken dik açıyla geliyorsa eğer kırılma olmaz. Havada sesin yayılma hızını etkileyen faktör sıcaklık olduğundan sıcak bir ortamdan soğuk bir ortama veya soğuk bir ortamdan sıcak bir ortama geçen ses dalgaları kırılır ve yön değiştirirler.

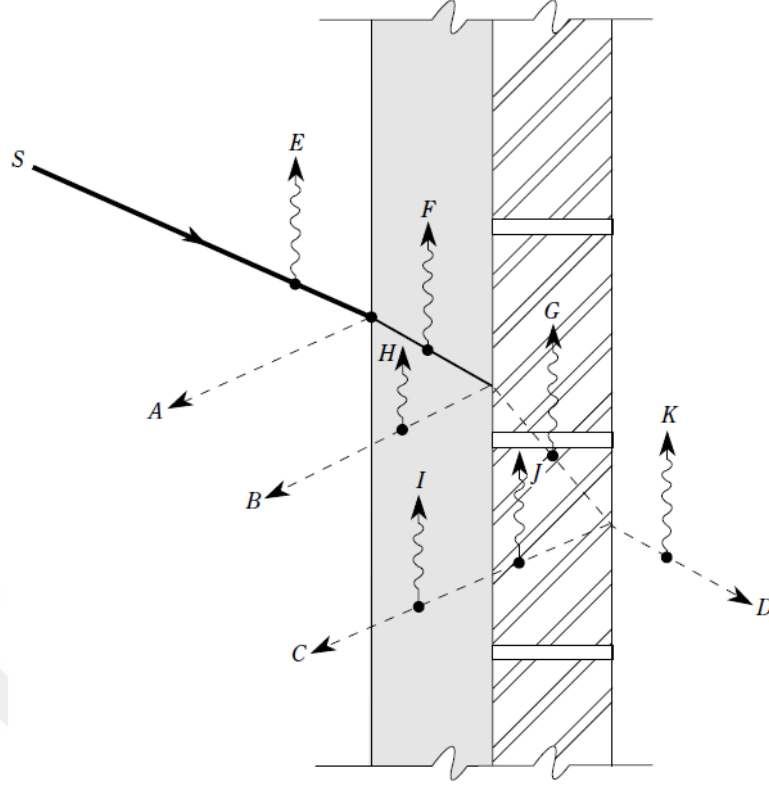
1.4.2 Ses Yutumu ve Ses Yutma Katsayısı

Ses dalgaları bir malzemeye çarptıktan sonra bir kısmı yansır, bir kısmı yutulur ve geri kalan kısım da karşı ortama iletilir. Enerjinin korunumu yasası, enerjinin ne yaratılabileceğini ne de yok edilebileceğini, ancak bir formdan diğerine değiştirilebileceğini belirtir [66]. Malzemeye giren ses enerjisi ile çıkan ses enerjisi de birbirine eşit olmalıdır. Buradan yola çıkarak gelen ses enerjisi, yansıyan, yutulan ve iletilen ses enerjilerinin toplamıdır ve Denklem 1.6'da ifade edilmiştir [67].

$$E_i = E_r + E_a + E_t \quad (1.6)$$

Bu denklemde E_i gelen toplam ses enerjisi, E_r yansıyan, E_a yutulan, E_t ise iletilen ses enerji olarak ifade edilir.

Şekil 1.16'da görüldüğü gibi her bir ortam değişikliğinde ses dalgasında yansımalar ve yutulmalar olur. Ses dalgasının (S) 2 farklı yapıya sahip duvara çarptıktan sonra A, B, C noktalarında geri yansıması, F, G, H, I, J noktalarında yutumu ve son olarak D noktasında da iletimi gösterilmektedir. E ve K noktaları ise çok yüksek frekanslarda herhangi bir ortam değişikliği olmasa da gerçekleşebilecek olası ses yutumunu temsil eder.



Şekil 1.16: Ses Dalgalarının hareketi [66]

Ses, ortam değişirken yoğunluk farklıyla oluşan kırılmalar sebebiyle duvara çarptığı düzlemde yoluna devam etmez. Daha yoğun ortama giriyorsa eğer normalden uzaklaşır [66].

Ses yutumu, yutucu malzeme tarafından absorbe edilen ve ses yutma katsayısı (α) olarak ifade edilen enerjiyi ifade eder. Ses yutma katsayısı absorbe edilen enerjinin numune üzerine gönderilen toplam ses enerjisine oranıdır. Bu katsayı, 0 ile 1 arasında değişmektedir; buradaki 0 ses yutumunun olmadığını, 1 ise gelen tüm enerjinin yutulduğunu ifade etmektedir [68]. Bir malzemenin ses yutma katsayısı tayini için iki yöntem kullanılmaktadır. İlk yöntem “yankısız odalarda” yapılır ve bu yöntem büyük malzemeler için kullanılır. İkinci yöntem ise küçük malzeme örneklerinin ses yutma katsayılarını belirlemekte kullanılır ve yutulan enerjinin toplam enerjiye oranı şeklinde bulunmaktadır (Denklem 1.7) [69].

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (1.7)$$

1.5 Gözenekli Yapılarda Ses Yutumunu Etkileyen Temel Parametreler

Ses yutucu malzemelerin, ses dalgalarını absorbe etmesi ve mümkün olduğu kadar az yansıtarak daha fazla ses dalgasını iletmeleri istenir. Yansıttığından daha fazla ses dalgasını yutabilen ve iletebilen bir malzemenin iyi bir ses yutucu malzeme olduğu düşünülmektedir [70]. Genel olarak, bir malzemenin ses yutuma özelliği üzerinde etkili olan parametreler Çizelge 1.4’de özetlenmiştir. Çizelge 1.4’de belirtilen parametrelerin etkileri genel olarak birbirinden bağımsızdır. Malzemelerin ses yutma özelliği, birden fazla parametrenin değiştirilmesiyle farklılık gösterebilir. Örneğin malzemenin porozitesinin artışı, akış direncinde bir azalma meydana getiriyor ise malzemenin ses yutma özelliğinde iyileşme beklenirken kötüleştiği görülebilir.

Çizelge 1.4: Ses yutma özelliği üzerinde etkili olan parametreler.

Parametre	Sembol	Açıklama
Akış Direnci	σ	Havanın gözenekli malzeme içerisine girebilme yeteneğini ve bu esnada karşılaştığı direnci ifade eder.
Porozite	ϕ	Porozite, toplam gözenek hacminin, ses yutucu malzemenin toplam hacmine oranıdır.
Karakteristik uzunluk	Λ, Λ'	Gözeneklerin şekline, büyüklüğüne bağlı olarak sürtünme ve termal etkiler yaratan faktörlerdir.
Kıvrımlılık	α_∞	Kıvrımlılık, içyapı dağınıklığı olarak adlandırılabilir.
Yoğunluk	ρ	Malzeme yoğunluğu.
Kalınlık	d	Malzeme kalınlığı.

1.5.1 Akış Direnci

Spesifik hava akış direnci, havanın gözenekli bir yapı içerisine ne kadar kolay girebildiğini ve bu sırada maruz kaldığı direnci gösteren önemli bir özelliktir. Malzeme içerisinde yer alan ses enerjisinin diğer enerji türlerine dönüşümünde akış direnci etkin rol alır. Poroziteyle beraber akış direnci, gözenekli yapılarda ses yutumunu etkileyen en önemli faktördür. Akış direncinin yüksek olduğu malzemelerde ses yapı içerisinde ilerlerken zorlanır ve yutulur. Ancak, direnç seviyesi çok yüksek olur ise ses dalgaları içeri giremez ve yansıtılır. Spesifik akış direnci R_f , malzeme giriş ve çıkışları arasındaki basınç farkının, doğrusal ve kararlı akış hızına oranıdır ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Denklem 1.8).

$$R_f = \frac{\Delta P}{U} \text{ N.s.m}^{-3} \text{ veya Pa.s.m}^{-1} \text{ (MKS Rayl)} \quad (1.8)$$

Birim kalınlıktaki malzeme için akış direnci şu şekilde hesaplanır (Denklem 1.9);

$$\sigma = \frac{\Delta P}{dU} \text{ N.s.m}^{-4} \text{ veya Pa.s.m}^{-2} \text{ (MKS Rayl/m)} \quad (1.9)$$

Metre-kilogram-saniye (MKS) birim sisteminde hesaplanan akış direnci, Rayl olarak adlandırılır.

1.5.2 Porozite (Gözeneklilik Oranı)

Gözenekli yapıların ses yutma özelliğini etkileyen en önemli parametreler akış direnci ve porozitedir. Porozite ϕ , yapı içerisindeki gözenekli kısmın hacmi V_g 'nin toplam hacim V_t 'ye oranı olarak tanımlanır (Denklem 1.10).

$$\phi = \frac{V_g}{V_t} \quad (1.10)$$

Bu oranın yüksek olması, ses dalgalarının yapı içerisine nüfuz etmesini kolaylaştırır. Genel olarak, gözenekli yapıları hücre formu açısından, hücreler arasında etkileşimin olmadığı kapalı hücreli (closed-cell) ve hücrelerin bir biri ile etkileşim halinde olduğu açık hücreli (open-cell) olmak üzere iki sınıfa ayırmak mümkündür. Açık hücreli gözenekli yapıların kapalı hücreli yapılara göre ses yutma kapasitelerinin çok daha yüksektir.

1.5.3 Viskoz ve Termal Karakteristik Uzunluklar

Gözeneklerin şekli, yapı içerisindeki ses yayılımını etkiler ve dolayısıyla yutum gözenek şekline göre değişir. Farklı gözenek biçimleri, farklı yüzey alanları anlamına gelir ve bu da farklı termal, viskoz etkiler oluşturur. Viskoz etkiler sürtünme ile termal etkiler ise ısı iletimi ile meydana gelmektedir. Denklem 1.11'de ifade edilen Viskoz Karakteristik Uzunluk gözenek hacminin yüzey alanına oranıdır ve basit, dar kesite sahip gözenekli yapılar için kullanılır [4].

$$\Lambda = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{8\eta\alpha_w}{\phi}} \quad (1.11)$$

Burada s sabit bir sayıdır ve birçok gözenekli yutum malzemesi için 0,3-3 arasında alınabilir. η havanın vizkozitesini α_∞ kıvrımlılığı ve son olarak ϕ ise poroziteyi temsil etmektedir. Daha karmaşık şekillere, daha geniş kesitli alanlara sahip olup silindirik olmayan malzemeler için de termal karakteristik uzunluk kullanılır (Denklem 1.12).

$$\Lambda' = \frac{2V_g}{S_p} \quad (1.12)$$

Burda V_g gözeneklerin hacmini, S_p ise yüzey alanını ifade eder.

1.5.4 Kıvrımlılık (Malzemenin İç Yapı Çarpıklığı)

Gelen ses dalgalarının ilerlediği yolun karmaşıklığının ses yutumuna etkisi vardır. Yutucu içinde yayılma yolu ne kadar karmaşıkça, ses yutumu o kadar yüksek olur. Kıvrımlılık olarak ifade edilen bu içyapı düzeni α_∞ ile gösterilir (Denklem 1.13). Basit silindirik ve düz gözenekler için, içyapı çarpıklığı ses dalgası ve gözenek arasındaki açıya (ψ) bağlıdır.

$$\alpha_\infty = \frac{1}{\cos^2(\psi)} \quad (1.13)$$

1.5.5 Malzeme Kalınlığı

Yapıların kalınlığı, ses yutumunu etkileyen önemli parametrelerden biridir. Yapının kalınlığı arttıkça, ses yutumunda da artış görülür. Bu koşul altında yapı içinde etkili bir ses yutumuna sahip olmak için, yapının kalınlığı, meydana gelen ses dalgasının dalga boyunun en az onda biri olmalıdır. Düşük frekanslı seslerin uzun dalga boyuna sahip olmaları nedeniyle, bu frekanstaki seslerin yutumu için daha kalın yapılar gereklidir [72]. Bu sebeple, yapılan çalışmalar da ses yutumunda kalınlığın etkisi düşük frekans değerlerinde görülmekte olup yüksek frekans değerlerinde bu etkinin daha az olduğunu göstermektedir [73].

1.5.6 Malzeme Yoğunluğu

Yoğunluk, malzemenin ses yutumunu etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Aynı özelliklere sahip malzemelerde artan yoğunluk ses yutumunda da iyileşme sağlamaktadır. Yoğunluğunu arttırmak, sürtünme etkilerini arttıracığı için ses yutumunu da arttıracaktır [73].

1.6 Literatür Özeti

Alışveriş merkezleri, konutlar, hastaneler ve fabrikalar gibi insan yoğunluğunun fazla olduğu iç mekân çözümlerinde karşılaşılan en önemli sorunların başında gürültü kontrolü gelmektedir. Bu gibi kalabalık alanların tasarımları esnasında, ortamda titreşerek akustik kaliteyi düşüren arka plan gürültüsünün ses yutucu malzemeler kullanılarak sönümlenmesi sıklıkla başvurulmuş gürültü kontrol yöntemlerinden bir tanesidir. Bununla birlikte, ses dalgaları, gözenekli yapılar içerisinde yayılırken, enerjisinin bir kısmının viskoz yutulma etkisi ile ısı enerjisine dönüştüğü bilinmektedir. Bu nedenle, son yıllarda, farklı gözenekli malzemelerin ses yutma özelliklerinin incelenmesi yönelik çalışmalar yoğunluk kazanmıştır [5-10]. Genel olarak, gözenekli yapıları hücre formu açısından, hücreler arasında etkileşimin olmadığı kapalı hücreli (closed-cell) ve hücrelerin bir biri ile etkileşim halinde olduğu açık hücreli (open-cell) olmak üzere iki sınıfa ayırmak mümkündür. Bunun yanında, gözenekli yapıları sünger, keçe gibi doğal gözenekli yapılar ve farklı üretim yöntemleri ile üretilmiş kafes (lattice) yapısındaki metamateryaller olarak sınıflandırmak mümkündür. Burada sunulacak literatür özetinde, öncelikle doğal gözenekli geleneksel ses yutucu malzemeler ile ilgili çalışmalara değinilecek, daha sonra farklı Eklemeli Üretim yöntemleri ile üretilmiş metamateryal alternatif ses yutucu yapılar üzerinde durulacak ve son olarak gözenekli alçı yapıların ses yutma davranışları ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilecektir.

Literatürde gözenekli yapıların akustik uygulamaları ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, genellikle doğal gözenekli malzemeler üzerine yoğunlaşıldığı görülmektedir [7,8]. Bununla birlikte, özellikle son yıllarda, doğal yünler ve lifli yapıların akustik davranışlarının incelenmesine yönelik artan bir ilgide göze çarpmaktadır [73-75]. Örneğin, Berardi ve Iannace [73] yaptıkları çalışmada kenaf, kenevir, hindistan cevizi, mantar ve koyun yünü gibi doğal lifli ve yünlü yapıların ses yutma davranışlarını incelemişlerdir. Doğal liflerinde, bilinen gözenekli yapılar gibi iyi bir ses yutma performansı sergilediklerini görmüşlerdir. Ayrıca kalınlık artışının ses yutma performansını, düşük frekans değerlerinde iyileştirirken yüksek frekans değerlerinde kötüleştirildiğini tespit etmişlerdir. Konu ile ilgili bir diğer çalışmada ise Qui ve Enhui [75] tarafından gerçekleştirilmiş olup bu çalışmada kaba yünler ve lifler karıştırılarak oluşturulan levhaların ses yutma davranışları araştırılmıştır. Levha

kalınlığı için benzer davranış gözlemlenirken, yoğunluk ve porozite artışının ses yutma davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğu not edilmiştir.

Bu deneysel çalışmaların yanı sıra son yıllarda, gözenekli malzemelerin ses yutma davranışları sayısal olarakta yoğun bir şekilde incelenmektedir [76-78]. Arslan ve Çalışkan [76] ANSYS-Mechanical ticari paket programında empedans tüpünün sonlu elemanlar modelini oluşturarak melamin bazlı köpük malzemenin ses yutma davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, literatürde gözenekli yapıların ses yutma davranışlarını kestirmek için önerilmiş olan Delany-Bazley, Miki ve Dunn modelleri kullanılmış ve elde edilen sayısal sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Miki modelinin köpük bazlı gözenekli yapıların ses yutma davranışlarını modellemede daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Can [77] yaptığı çalışmada kapalı mekânlarda ve taşıt kabinlerinde gürültü düzeyini azaltacak yalıtım malzemeleri için ses yutma katsayılarının parametrik modellerini geliştirmiştir. Süngerimsi malzemeler için daha önce yapılmış katsayı hesaplarını tekrar incelemiş ve uygun bulduklarını gözeneklilik, akış direnci gibi değişkenlere bağlı olarak tekrar yorumlamıştır. Yine bu çalışma kapsamında geliştirilen çift mikrafonlu empedans tüpü ölçüm cihazıyla süngerimsi malzemelerin deneysel olarak ölçümleri yapmıştır. Sonuç olarak bazı frekans değerlerinde sayısal ve deneysel sonuçlar birbirini tutmamıştır. Bunun sebebini de Deney tüpündeki rezonans olayının sonuçları etkilemesi olarak yorumlamıştır. Ve son olarakta sayısal ve deneysel olarak elde ettiği yutma katsayılarını karşılaştırdığında gözenekli malzemelerin lifli malzemelere göre daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna varmıştır. Ahmedinejad ve Monazzam [78] ses yutum katsayısı ölçümleri için kullanılan empedans tüpünü Sonlu Elemanlar Yöntemiyle oluşturup, poliüretan yün için analitik ölçümleri yapmışlar ve bu ölçüm sonuçları ile deneysel olarak yapılan ölçüm sonuçlarını kıyaslamışlardır. Analitik ölçümleri yaparken farklı boyutlarda mesh uygulayarak, sonuca etkisini araştırmışlardır. Bir araya getirilen verilen sonucunda ses yutumu için uygun mesh boyutunu çıkaran formülasyonu tanımlamışlar, deneysel ve sayısal ölçüm sonuçlarında çok büyük farklılık olmadığını gözlemlemişlerdir. Yosun [4] yapmış olduğu tez çalışmasında gözenekli ve lifli malzemelerin akustik özelliklerinin karakterize edilmesini incelemiştir. Çalışma sonlu elemanlar akustik analiz yöntemi ile sanal bir empedans tüpü ölçüm sistemi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait tam Biot modelleri oluşturulmuş ve sonuç üzerinden enerji kayıpları dikkate alınarak malzemelerin

akustik parametreleri tahmin edilmiştir. Son olarak bu tahminlerin doğruluğunu teyit etmek için sanal empedans tüpü ölçümlerinde kullanılan akustik parametreler referans alınarak karşılaştırılmıştır.

Son yıllarda literatürde, geleneksel ses yutucu doğal gözenekli malzemelerden farklı olarak, özellikle 3-Boyutlu yazıcı teknolojisi gibi yeni üretim yöntemlerinin gelişmesi ile birlikte metamateriyal alternatif ses yutucu yapıların geliştirilmesi yönelik yeni bir eğilimin olduğu görülmektedir. Literatürde, bu doğrultudaki ilk çalışmalardan biri Godbold ve ark. [79]'nın çalışmasıdır. Godbold ve ark. [79] yapmış oldukları çalışmada, Seçici Lazer Sinterleme yöntemini kullanarak Helmholtz Rezonatörü yapısında alternatif bir ses yutucu yapı geliştirmişler ve farklı yapılar ile karşılaştırarak geliştirdikleri Helmholtz Rezonatörü yapısının daha iyi ses yutma davranışı sergilediğini gözlemişlerdir. Jiang ve ark. [80], Multi Jet Füzyon (MJF) yöntemini kullanarak üretmiş oldukları kapalı hücre formuna sahip gözenekli termoplastik yapıların ses yutma performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, porozite (gözeneklilik oranı), delik çapı, numune kalınlığı ve en-boy oranına gibi farklı parametrelerin ses yutma katsayısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, porozite arttıkça ses yutma katsayısının maksimum değerinin düşük frekanslara doğru kaydığını ve aynı poroziteye sahip numunelerin ses yutma özelliğinin önemli ölçüde delik çapı-numune boyu oranına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Konu ile ilgili başka bir çalışmada ise, Liu ve ark. [81] Stereolitografi yöntemiyle üretilen kapalı hücre formuna sahip gözenekli polikarbonat yapıların akustik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, özellikle düşük ve orta frekans değerlerinde artan delik açısı ile ses yutma katsayısının azaldığını gözlenmiştir. Liu ve ark. [82] yapmış oldukları diğer bir çalışmada ise, yine Stereolitografi yöntemiyle ürettikleri gözenekli yapı ile ses yutucu malzemeden oluşturdukları katmanlı yapıların ses yutma özelliklerini incelemişlerdir. Katmanlı yapılarda artan delik sayısı (yani porozite) ile ses yutma özelliğinin iyileştiği ve akustik rezonans frekansının yapı arkasındaki hava boşluğuna bağlı olduğu görülmüştür. Matthew ve ark. [83] yapmış oldukları çalışmada, Eriyik Yığılma Modelleme yöntemiyle üretmiş oldukları üç farklı doluluk oranındaki TPU bazlı metamateriyallerden katmanlı bir alternatif ses yutucu yapı tasarlamışlardır. Katmanlar %20 doluluk oranı 0,2cm kalınlık, %40 doluluk 2 cm kalınlık ve son katmanda %100 doluluk 0,2 cm kalınlığında sonik kristalik yapılarda oluşmaktadır. Her bir katmanın

tekli olarak ve birleştirilmiş olarak akustik empedans tüpünde ölümleri yapılmış ve tüm ölümler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda %100 doluluk oranındaki numune sesi tamamen yansıtırken %20 ve %40 doluluklardaki numuneler ile birleştirildiği zaman yansıtığı sesin %95'inde yutma gerçekleştiğini göstermiştir. Çalışma sonucunda geleneksel ses yutucuların dışında oldukça etkili ve kompakt bir ses yutucu geliştirdiklerini ifade etmişlerdir. Yine Eriyik Yığma Modelleme yöntemi kullanılarak yapılan başka bir çalışmada ise Gao ve Hou [84], PLA (Poliaktik Asit) malzemesinden ürettikleri, çok sayıda mikro sarmal yapıdan oluşan metamateriyal yapıların ses yutma davranışlarını incelemişlerdir. Yapılarda mikro sarmalların geometrik ölülerinin ve yapı arkasında bırakılan farklı  l lerdeki hava boşluklarının etkisini inceleyen Gao ve Hou [84],  alışma sonucunda sarmalların giriş çapı ve boşluk uzunlukları gibi geometrik özelliklerin ses yutma davranışı üzerinde oldukça etkili olduğunu g rmuşlerdir. Ayrıca sarmal yapılar arasındaki boşluk artışının ses yutma katsayısı değerlerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Setaki ve ark. ise [85], Eklemeli  retim yöntemlerinden Seçici Lazer Sinterleme teknolojisini kullanarak ürettikleri farklı geometrilerde, kapalı hücre formuna sahip gözenekli alçı yapıların akustik özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma sonucunda geometrik dizaynın akustik performans üzerinde önemli etkileri olduğunu ve hücre formunun karmaşık olmasının ses yutma özelliğini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Son olarak Arjunan [86] yapmış olduğu çalışmada Eklemeli  retim yöntemlerinden Seçici Lazer Sinterleme yöntemini kullanarak gözenekli alçı yapıda numuneler üreterek; uzunluk, çap gibi geometri değişimlerinin ses yutma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Delik çaplarının k  t lmesinin ve gözenek boyutlarının artırılmasının ses yutumu üzerine olumlu etkileri olduğunu gözleyen Arjunan [86] gürültüyü daha etkin bir Şekilde azaltmak adına ses iletim kayıplarının da incelenmesi gerektiğini önermiştir.

1.7 Tezin Amacı

Daha öncede vurgulandığı üzere, insan yoğunluğunun yüksek olduğu kalabalık iç ortam uygulamalarında karşılaşılan en önemli sorunların başında, ortamda titreşerek akustik kaliteyi düşüren arka plan gürültüsünün kontrol edilmesi gelmektedir. Bu tür uygulamalarda arka plan gürültüsünü kontrol etmek amacıyla farklı ses yutucu malzemeler kullanılırlar. Bu amaca yönelik genellikle geleneksel gözenekli yapılar

kullanılmakta olup, son yıllarda, özellikle Eklemeli Üretim teknolojisi gibi yeni üretim tekniklerinin gelişmesi ile birlikte farklı malzemelerden gözenekli metamateryal yapılar tasarlanmaktadır. Mevcut literatürde, Setaki ve ark. [85] ve Arjunan [86]'nın yapmış oldukları çalışmalar dışında, Eklemeli Üretim teknolojisini kullanarak, gözenekli formda üretilen alçı yapıların ses yutma davranışının araştırılmasına yönelik herhangi bir çalışma göze çarpmamaktadır. Ayrıca, her iki çalışmada kapalı formdaki gözenekli alçı yapılar için gerçekleştirilmiş olup, ses yutma davranışı açısından daha etkili olan açık gözenekli formdaki alçı yapılar ile ilgili literatürde henüz bir çalışma bulunmamaktadır. Oysaki alçı; yanmaz, dayanıklı ve hafif oluşu nedeniyle günümüz mimarisinin en önemli yapı bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle, konu ile ilgili yapılacak yeni çalışmalar oldukça önemlidir. Bu çalışmanın temel amacı, farklı açık hücre formuna sahip gözenekli alçı yapıların ses yutma potansiyelini araştırarak, özellikle kalabalık iç mekân uygulamaları için alternatif bir ses yutucu yapı önermektir.

Bu amaçla ele alınan yüksek lisans tezinin giriş bölümünü takip edecek olan diğer alt bölümler aşağıdaki gibi organize edilmiştir:

Bölüm 2: Materyal ve Yöntem; tez çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalar ile ilgili detaylı bilgiler verilecektir.

Bölüm 3: Bulgular ve Tartışma; hücre yapısı, porozite ve hücre kalınlığının ses yutma davranışı üzerindeki etkileri incelenerek elde edilen bulgular tartışılacaktır.

Bölüm 4: Sonuçlar; tez çalışması neticesinde elde edilen bulgular özetlenecektir.

Bölüm 5: Öneriler; konu ile ilgili daha sonra düzenlenebilecek olası çalışmalar için öneriler sunulacaktır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, Bağlayıcı Püskürtme Tekniği kullanılarak üretilen, farklı hücresel yapılarda, farklı porozitelerde ve farklı kalınlıklarda ki gözenekli alçı yapıların ses yutma davranışları araştırılmıştır. Üretilen numunelerin ses yutum katsayılarının ölçümleri akustik empedans tüpü kullanılarak yapılmıştır.

Deneysel çalışmalara ek olarak ANSYS - Harmonic Acoustics paket programı kullanılarak empedans tüpü ölçüm düzeneği modellenmiş ve parçaların ses yutma katsayıları sayısal olarakta hesaplanmıştır.

Ayrıca, üretilen gözenekli yapıların akış direnci ve kıvrımlılıkları ile ilgili fikir sahibi olmak amacıyla ANSYS-Fluent paket programında sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

2.1 Deney Numunelerinin Üretimi

Üretilmesi planlanan numunelerin tasarımı Solidworks paket programından yapılmıştır. Referans (gözeneksiz), kapalı hücre ve açık hücre yapısındaki numuneler tasarlanmış olup her bir numunenin çapı 29 mm'dir. Bu değer akustik ölçümlerde kullanılacak empedans tüpü iç çap değeridir. Referans hücre %100 tam doluluğa sahip olup 10 mm kalınlığında üretilmiştir.

Kapalı hücre yapısına sahip numuneler, üzerinde 61 adet 2 mm çapa sahip birbiriyle bağlantısı olmayan deliklerden oluşmakta olup, %30 gözenek oranına sahip olacak şekilde 10 mm kalınlığında katı yüzey oluşturulmuştur.

Açık hücreli yapılar için BCC (Hacim Merkezli Kübik), Octet-Truss, Yüzey Gyroid olmak üzere üç farklı kafes (lattice) yapısı dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında, üç farklı birim hücre, üç farklı porozite ve üç farklı kalınlık parametrelerinde toplam 27 adet numune tasarlanmıştır. Numuneleri hazırlamak için her bir kafes yapısının birim hücreleri oluşturulmuş, ardından aynalama yapılarak çoğaltılarak 29 mm çapında kesilmiştir. Birim hücrelerin Şekil 2.2'de X ile gösterilen geometrik uzunluklarında değişiklikler yapılarak $\phi = \%30-40$ ve 50 porozite değerleri elde edilmiştir. Son olarak

farklı uzunluklarda aynı yapıya sahip hücreleri karşılaştırmak amacıyla parçaların kalınlıkları üzerinde 1,25 ve 1,5 oranında bir ölçeklendirme yapılmış ve boyları 12,5 mm, 15 mm'ye çıkartılmıştır.

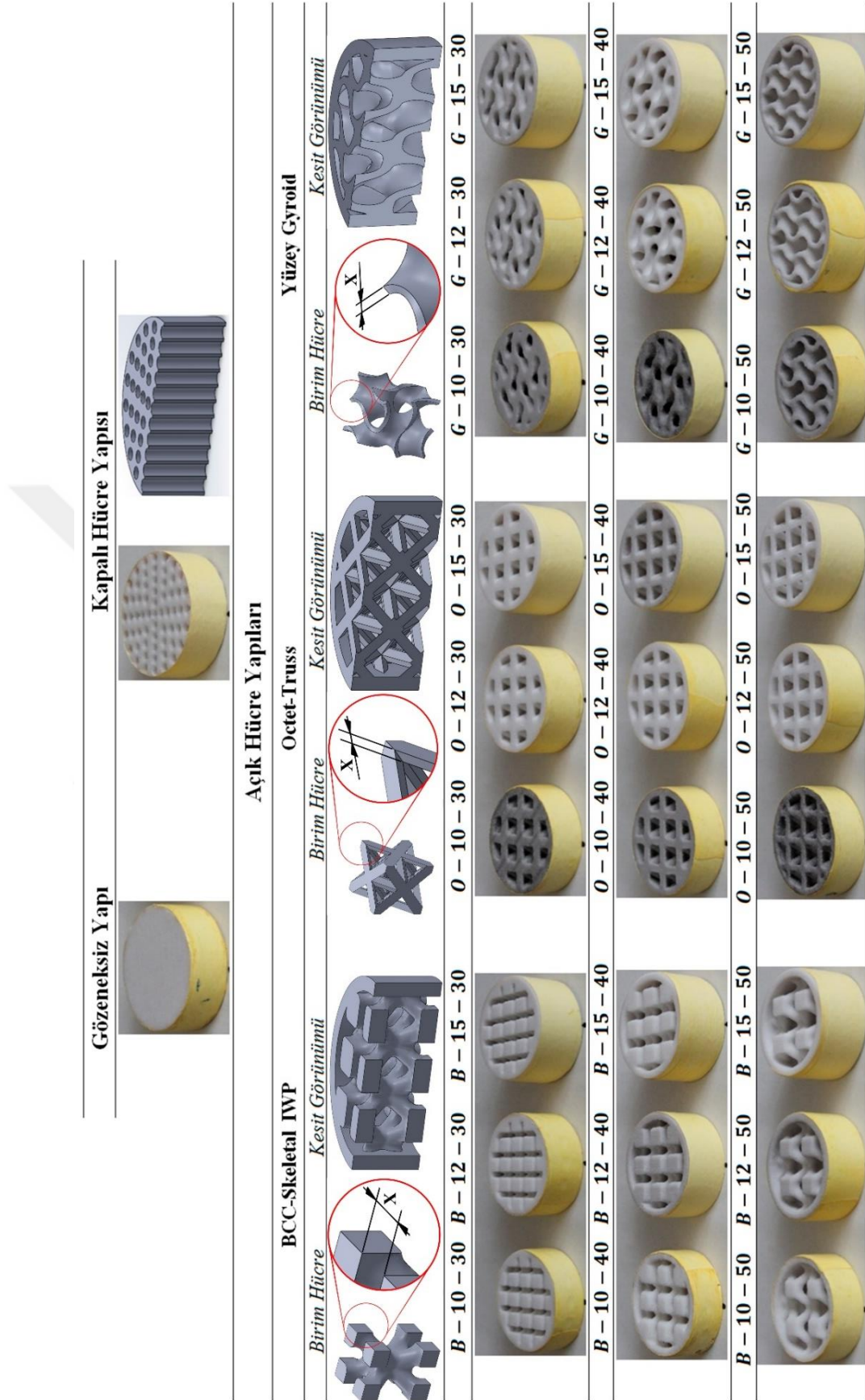
Deneysel olarak incelenmesi planlanan numuneler, Eklemeli Üretim yöntemlerinden biri olan Bağlayıcı Püskürtme Tekniği (Binder Jet) kullanılarak üretilmiş olup Projet 460 Plus cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.1).



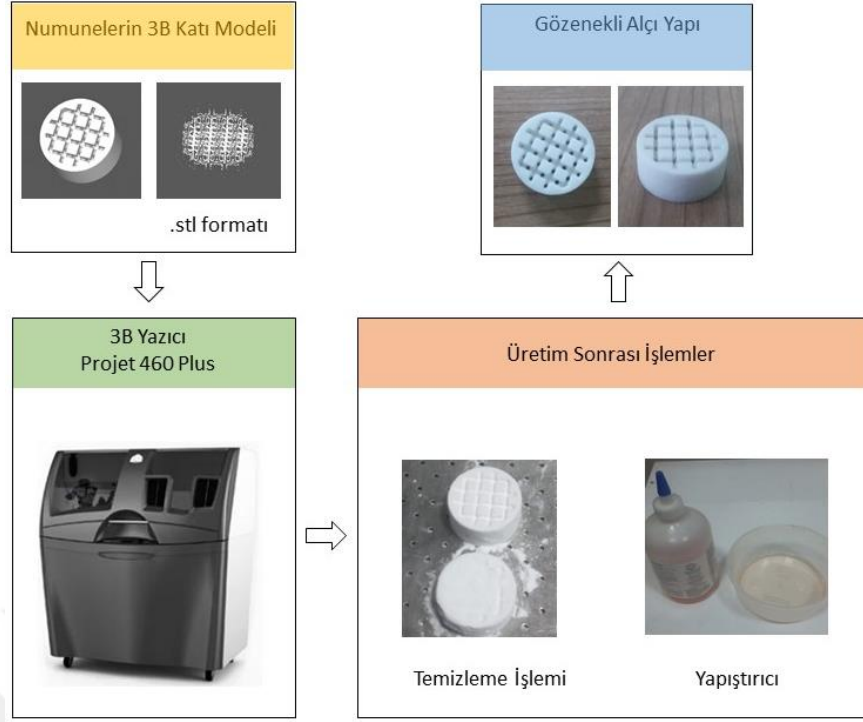
Şekil 2.1: Numunelerin üretiminde kullanılan Projet 460 Plus Cihazı

Aşağıda yer alan Şekil 2.2'de, üretilen ve empedans tüpü ölçüm düzeneğinde testleri yapılacak tüm numuneler gösterilmiştir. Numuneleri isimlendirmek için kullanılan kısaltmalarda ilk sıraya birim hücrenin adının ilk harfi, ikinci sıraya kalınlık ölçüsü ve üçüncü sıraya ise porozite oranı yazılmıştır (Örn. G-10-30: 10 mm kalınlığa ve %30 poroziteye sahip Gyroid birim hücreli numune).

Deney numuneleri, alçı temelli özel tozlar (VisiJet PXL) yapı malzemesi kullanılarak, 0,1 mm kalınlığında katmanlar halinde üretilmiştir. Öncelikle, Solidworks programında katı modelleri hazırlanan numuneler, STL formatında kayıt edilerek 3-Boyutlu yazıcıya aktarılmış, daha sonra üretilen numuneler temizleme işlemine tabi tutularak kalıntı tozlar uzaklaştırmıştır. Son olarak, temizlenen numuneler 3-Boyutlu yazıcılar için özel bir yapıştırıcı olan ColorBond'a daldırılarak mukavemet kazanması sağlanmıştır (Şekil 2.3). ColorBond, 3B yazıcı modellerini güçlendirmek için tasarlanmış son derece hızlı sertleşen, genel amaçlı bir reçinedir. Mukavemet arttırmasının yanında renkli parçalarda kullanıldığında, parçanın yüzey canlılığını da arttırmaktadır.



Şekil 2.2: Bağlayıcı Püskürtme Tekniği ile üretilmiş, ses yutma katsayısı ölçümlerinde kullanılacak deney numuneleri



Şekil 2.3: Deney numunelerinin Bağlayıcı Püskürtme Tekniği (Binder-Jetting) ile üretim aşamaları

Üretim esnasında kullanılan kartuşlar Şekil 2.4’te gösterilmiştir. Numunelerin üretim aşamalarında 3-B yazıcının renklendirici kartuşlarının tükenmesi üzerine yeni kartuş takılmış ve yeni kartuştan çıkan ilk ürünlerde renk değişimi gözlemlenmiştir. Kartuşun bir süre kullanılmasıyla beraber üretilen ürünler tekrardan eski renginde çıkmaya devam etmiştir. Şekil 2.2 de yer alan numunelerdeki renk farklılıkları bu sebepten oluşmuştur.



(a)

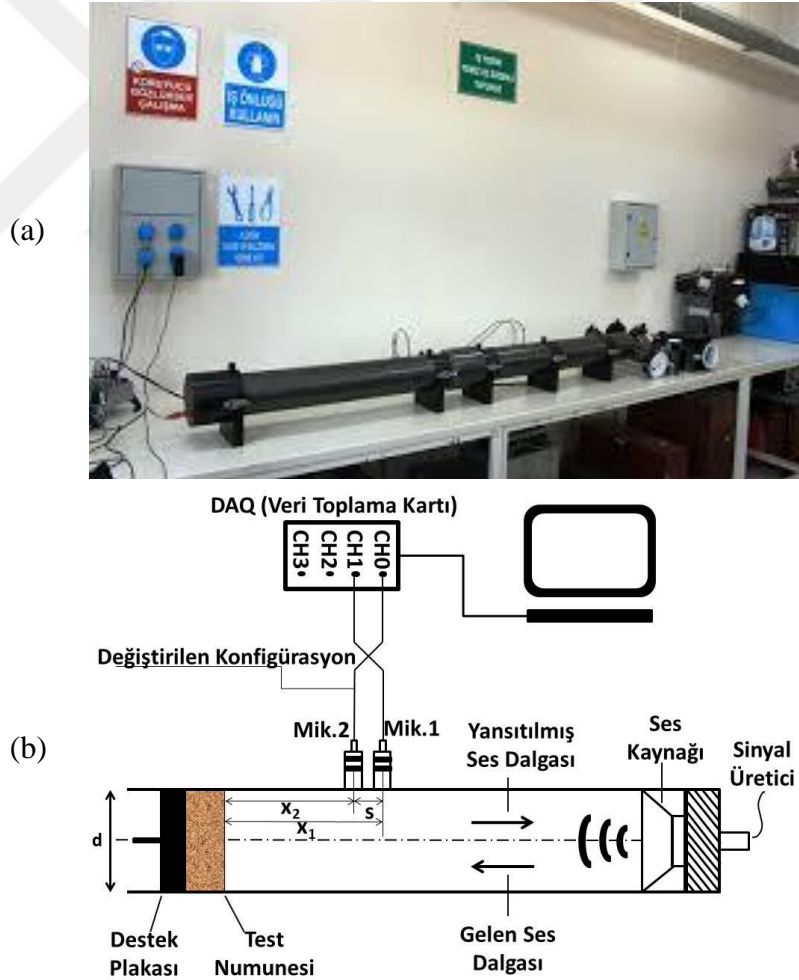


(b)

Şekil 2.4: Bağlayıcı Püskürtme Tekniğinde kullanılan kartuşlar a) Renklendirici kartuş, b) Bağlayıcı kartuş

2.2 Ses Yutma Katsayısı Ölçümü

Eklemeli üretim yöntemiyle imal edilen numunelerin ses yutma katsayısı ölçümleri Şekil 2.5a'da gösterilen, iki mikrofona empedans tüpü deney düzeneği yardımıyla ASTM-E 1050-98 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney düzeneği; empedans tüpü, 2 adet mikrofona, sinyal üretici, sinyal güçlendirici, veri toplama kartı ve bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 2.5b). Ses yutma katsayısı ölçümleri 1000 - 6400 Hz frekans aralığında, yüksek frekans değerleri için gerçekleştirilmiştir. Ancak özellikle 5000 Hz'den sonra elde edilen deneysel verilerde, çok fazla gürültü içerdiği için 1000-5000 Hz arasındaki veriler dikkate alınmıştır. Hazırlanmış numuneler empedans tüpünün uç kısmına, hava boşluğu oluşmayacak şekilde, kenarlarına teflon bant sarılarak yerleştirilmiş ve sinyal jeneratörü güç sinyali verecek şekilde ayarlanmıştır. Mikrofonlar vasıtasıyla frekansa bağlı ölçümler yapılmış ve ses yutma katsayısı-frekans grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 2.5: ISO 10534-2 ve ASTM E1050 standartlarına uygun (a) empedans tüpü deney düzeneği ve (b) ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi

Ses basınç dalgası, bir sinyal üreticisi tarafından üretilerek hoparlör vasıtasıyla, tüp içerisine gönderilir. Bu dalga tüpün diğer ucundaki sabitlenmiş olan numuneye çarparak enerjisinin bir bölümünü kaybeder ve daha düşük bir genliğe sahip olarak geri döner. Böylece tüp üzerindeki iki mikrofonun ürettiği ses basınçları ölçülerek transfer fonksiyonu çıkarılır ve ses yutum katsayısı (α) hesaplanır.

Transfer Fonksiyon Metodu empedans tüplerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin avantajı, yüzey empedansı ve ses yutum katsayısı değerlerinin bütün frekanslar için tek bir ölçümde elde edilmesidir. Gelen dalga (H_I) ve yansıyan dalga (H_R) için transfer fonksiyonu:

$$H_I = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-jk(x_1-x_2)} = e^{-jks} \quad (2.1)$$

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk(x_1-x_2)} = e^{jks} \quad (2.2)$$

olarak tanımlanır. Yukarıdaki denklemlerde iki mikrofon arası mesafe “s”, mikrofonların numune ile olan mesafesi, “ x_1 ” ve “ x_2 ” olarak belirtilmiştir. p_{1I} ve p_{1R} 1 nolu mikrofon için, p_{2I} ve p_{2R} ise 2 nolu mikrofon için gelen ve yansıyan ses basınç değeri, k ise dalga numarası olarak tanımlanmıştır. Transfer fonksiyonu, gelen ve yansıyan basınçların oranı olduğu için iki mikrofon arasındaki transfer fonksiyonu denklemi;

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{e^{jkx_2} + R(e^{-jkx_2})}{e^{jkx_1} + R(e^{-jkx_1})} \quad (2.3)$$

ile ifade edilir. R , ses yansıma katsayısı olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$R = \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \quad (2.4)$$

Burada Z_s yüzey empedansı, $\rho_0 c_0$ havanın empedansıdır. Eğer numunenin yüzey empedans değeri biliniyorsa ses yutumu şu şekilde hesaplanabilmektedir;

$$\alpha = 1 - |R|^2 = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c} \right|^2 \quad (2.5)$$

2.3 Deneysel Ölçümler İçin Tutarlılık Analizi

Ses yutma katsayısının belirlenmesine yönelik yapılan deneysel ölçümlerin iç tutarlılığını test etmek amacıyla her bir ölçüm üçer kez tekrarlanmış ve elde edilen verilerin tutarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerin tutarlılıklarını yansıtmak için en yaygın kullanılan göstergelerinden biri Cronbach alfa katsayısıdır [87]. Esas itibari ile Cronbach alfa katsayısı, aynı durum için gerçekleştirilen farklı testlerin ya da ölçümlerin ne kadar yakından ilişkili olduğunu göstermek amacıyla kullanılan bir iç tutarlılık ölçüsüdür. Cronbach alfa katsayısı, ölçüm verilerinin sayısının ve ölçümler arasındaki ortalama korelasyonun bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\alpha_{\text{Cronbach}} = \frac{n}{n-1} \left(1 - \frac{\sum V_i}{V_t} \right) \quad (2.6)$$

Burada, n ölçüm sayısını, V_i ölçüm çiftleri arasındaki ortalama kovaryansı ve V_t ortalama varyansı temsil etmektedir. İdeal bir ölçüm sonucunun Cronbach alfa katsayısı 0,7'nin üzerinde olması beklenir [87].

Deneysel ölçümlerin iç tutarlılığını belirlemek amacıyla her bir birim hücre yapısı için farklı kalınlık ve porozite oranlarında toplam dokuz deney numunesi için yapılan ölçümler için tutarlılık analizleri yapılmıştır. Çizelge 2.1'de seçilen deney numuneleri için yapılan ölçümlerin tutarlılık analizlerine ilişkin, ölçümler arası ilişki korelasyonu ve her bir numuneye ait ölçümün Cronbach alfa katsayısı değerleri sunulmuştur. Ölçümler arası ilişki korelasyonu her bir numune için yapılan ölçümlerin kendi içerisindeki ilişkisini, Cronbach alfa katsayısı ise her bir numune için yapılan ölçümün genel tutarlılığı yansıtmaktadır. Buna göre, Çizelge 2.1 incelendiğinde, ölçümler arası ilişki korelasyonu ve Cronbach alfa katsayısı değerlerinin 0,9'dan büyük olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum deneysel ölçümler arası tutarlılığın son derece yüksek olduğunu kanıtlayıcı niteliktedir.

Çizelge 2.1: Deneysel ölçümlerin güvenilirlik analizi verileri.

İlişki Korelasyonu Matrisi				Cronbach Alfa Katsayısı
B-10-30	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,962	0,959	0,987
Ölçüm - 2	0,962	1,000	0,963	
Ölçüm - 3	0,959	0,963	1,000	
B-12-40	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,982	0,979	0,994
Ölçüm - 2	0,982	1,000	0,981	
Ölçüm - 3	0,979	0,981	1,000	
B-15-50	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,945	0,942	0,980
Ölçüm - 2	0,945	1,000	0,938	
Ölçüm - 3	0,942	0,938	1,000	
G-10-30	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,993	0,993	0,998
Ölçüm - 2	0,993	1,000	0,994	
Ölçüm - 3	0,993	0,994	1,000	
G-12-40	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,983	0,981	0,994
Ölçüm - 2	0,983	1,000	0,980	
Ölçüm - 3	0,981	0,980	1,000	
G-15-50	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,980	0,981	0,993
Ölçüm - 2	0,980	1,000	0,980	
Ölçüm - 3	0,981	0,980	1,000	
O-10-30	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,995	0,996	0,999
Ölçüm - 2	0,995	1,000	0,996	
Ölçüm - 3	0,996	0,996	1,000	
O-12-40	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,984	0,982	0,994
Ölçüm - 2	0,984	1,000	0,985	
Ölçüm - 3	0,982	0,985	1,000	
O-15-50	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,953	0,957	0,985
Ölçüm - 2	0,953	1,000	0,955	
Ölçüm - 3	0,957	0,955	1,000	

2.4 Sayısal Çalışmalar

2.4.1 Ses Yutma Katsayısı ile İlgili Sayısal Çalışmalar

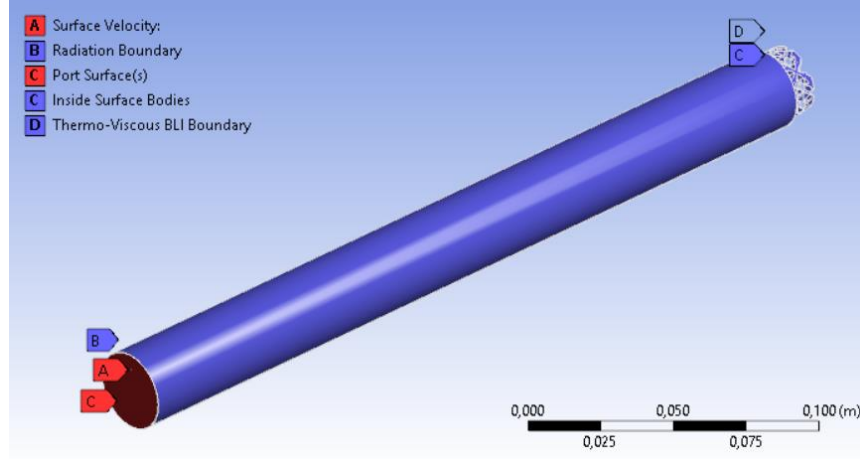
Bu çalışmada deneysel çalışmaları desteklemek amacıyla, tasarımı yapılan numunelerin ses yutma performanslarının tahminine yönelik sayısal analizleri de gerçekleştirilmiştir. ANSYS-Harmonic Acoustics paket programı kullanılarak yapılan analizlerde, düzlemsel dalga koşulunu sağlamak için, deneysel çalışmalara benzer şekilde silindirik kanalın iç çapı 29 mm olarak tanımlanmıştır. Yapılan analizlerde sadece tüp içerisinde yer alan ve numunenin iç tarafından çıkartılan hava, yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Sayısal analizlerde, referans sıcaklık olarak oda sıcaklığı (25 °C) dikkate alınmış ve modellenen havanın termofiziksel özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

İlk olarak Solidworks paket programında oluşturulan 300 mm uzunluğunda empedans tüpünün uç kısmına, sayısal analizi gerçekleştirilecek parçaların montajı yapılmıştır. Daha sonra, parçanın yapı kısımları çıkartılarak sadece yapı içindeki havanın empedans tüpüne montajı yapılmış şekilde tasarımı sağlanmıştır. Solidworks ortamında STEP olarak kaydedilen dosya ANSYS-Harmonic Acoustics programında açılmış ve malzeme olarak hava tanımlanmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan yüzey hızı, port, radyasyon, termal ve viskoz sınır şartlarının değer ve konumları Şekil 2.6’da belirtilmiştir. Deneysel çalışmada göz önüne alınan bütün gözenekli yapıların, 1000 - 6000 Hz frekans aralığında ses yutma katsayısı değerleri sayısal olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 2.2: Sayısal analiz için kullanılan havanın termofiziksel özellikleri.

Özellikler	Değer	Birim
Yoğunluk	1,225	kg/m ³
İzentropik Isıl İletkenlik	0,0242	W/m. K
Sabit Basınçta Özgül Isı - C_p	1006,4	J/kg. K
Sesin Yayılma Hızı	346,25	m/s
Viskozite	1,7894E-05	kg/m.s

Ses yutma katsayısı ile ilgili yapılan sayısal çalışmada öncelikle ağ yoğunluğunun sonuçlar üzerindeki etkisini görmek amacıyla ağ bağımlılık çalışması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6: Yapılan sayısal çalışmalarda kullanılan sınır şartları

Örnek bir numune (O-10-30) için detayları Çizelge 2.3’de verilen M1-M2-M3-M4 olarak adlandırılan dört farklı yoğunluktaki ağ yapısı için sayısal analizler düzenlenmiştir. Şekil 2.7’de, örnek numune için farklı yoğunluktaki ağ yapılarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 2.7’de, ağ yoğunluğu arttıkça ağ yapısının sonuçlar üzerindeki etkisinin ortadan kalktığı göze çarpmaktadır. Buna göre, hesap süresini de dikkate alarak, ses yutma katsayısı ile ilgili sayısal analizler için M3 ağ yapısı kullanılmıştır.

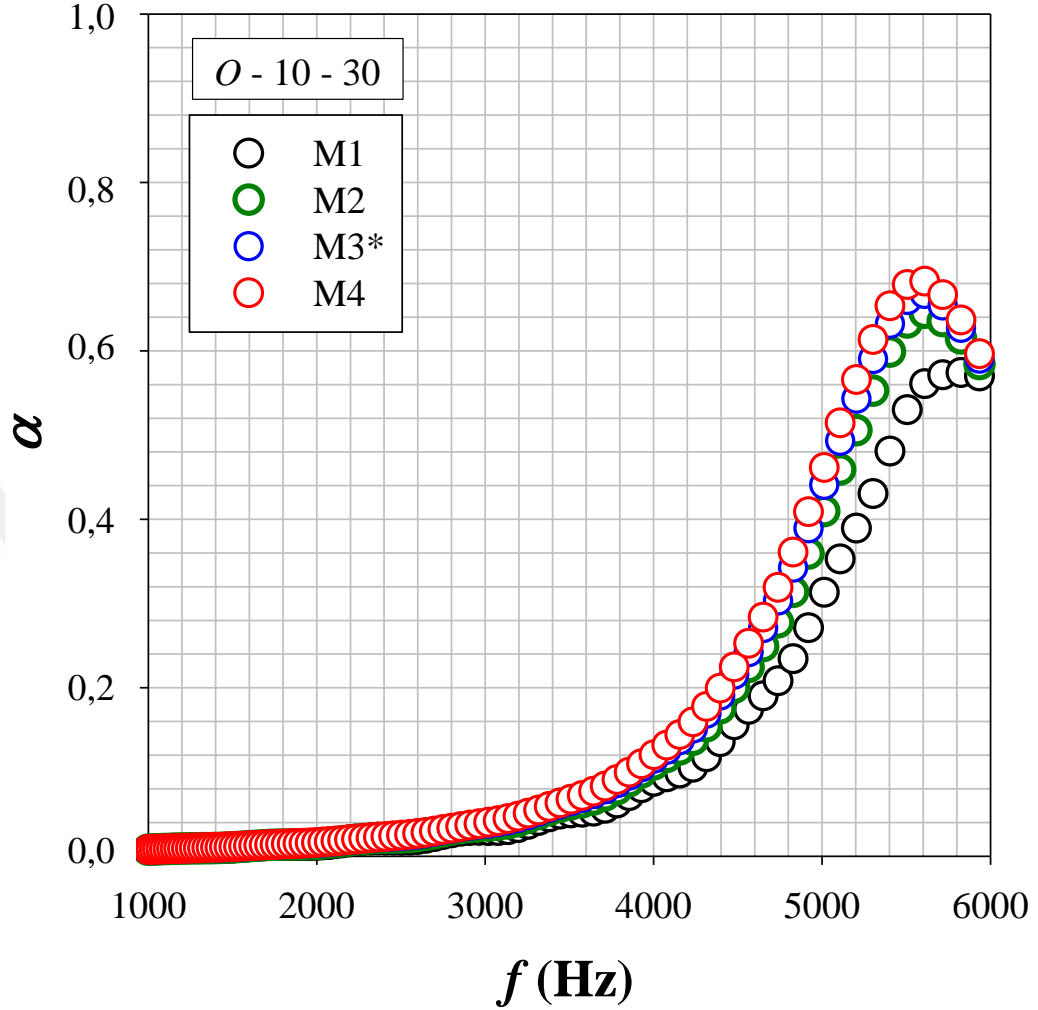
Çizelge 2.3: Ağ bağımlılık çalışmasında kullanılan ağ yapıları.

Ağ Numarası	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası
M1	19347	32269
M2	39864	81179
M3 ¹	85848	172553
M4	157244	315145

Gözenekli yapıların, ses yutma katsayılarının sayısal olarak hesaplanmasında birçok farklı ampirik kestirim modeli kullanılmaktadır. Genel olarak, bu modeller yapı malzemesinin türü, geometrisi, gözeneklilik oranı, yüzey empedansı, akış direnci, kısırlılıığı gibi birçok farklı parametreye bağlıdır. Johnson-Champoux-Allard, Miki, Delany-Bazley uygulamada en çok kullanılan modellerden bazılarıdır [88-91]. Ancak bu modeller doğal gözenekli yapılar için geliştirilmiş olup metamateryal olarak

¹ Sayısal analizlerde kullanılan ağ yapısı

adlandırılan, yapay gözenekli yapılar için önerilmiş herhangi bir model bulunmamaktadır



Şekil 2.7: O-10-30 numunesi için ağ bağımlılık çalışması

Bu yüzden ANSYS-Harmonic Acoustics programında yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar yalnızca geometrik etkilerden kaynaklanan ses yutma davranışını yansıtmaktadır. Bu nedenle elde edilen sayısal sonuçlarının, deneysel sonuçlar ile niceliksel olarak birebir örtüşmesi beklenmemektedir. Sayısal analizlerin temel amacı, katı model tasarımları gerçekleştirilen farklı hücre yapısına sahip gözenekli yapıların, üretim aşamasına geçmeden önce, ses yutma davranışları hakkında bir ön tahminde bulunmak ve deneysel çalışmaya yol göstermektir.

2.4.2 Akış Analizi ile İlgili Sayısal Çalışmalar

Daha öncede vurgulandığı üzere, gözenekli yapıların ses yutma davranışını etkileyen temel parametrelerden başında, gözenekli yapı içerisindeki sürtünme etkilerinin

büyükliğünün en önemli göstergesi olan akış direnci ve kıvrımlılık gelmektedir. Gözenekli bir yapının yüksek ses yutma davranışı gösterebilmesi için yapı içerisine giren ses dalgalarının mümkün olduğunca fazla sürtünmeye maruz kalması istenir. Bu yüzden ses yutma özelliği gösteren yapıların akış direncinin ve kıvrımlılıklarının yüksek olması istenir. Bu amaçla, katı model tasarımları gerçekleştirilen farklı hücre yapısına sahip gözenekli yapıların, akış dirençlerini ve kıvrımlılıklarını karşılaştırmak amacıyla sayısal akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal analizlerde 3-Boyutlu, daimi, sıkıştırılamaz ve hidrodinamik tam gelişmiş laminer akış koşulları dikkate alınmıştır. 3-Boyutlu, sürekli ve sıkıştırılamaz akış koşulları için kartezyen koordinatlarda kütle ve momentum korunum denklemleri (Denklem 2.7-Denklem 2.8) aşağıdaki şekilde dikkate alınmıştır:

Kütle Korunum (Süreklilik) Denklemi

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

Momentum Korunum (Navier-Stokes) Denklemi

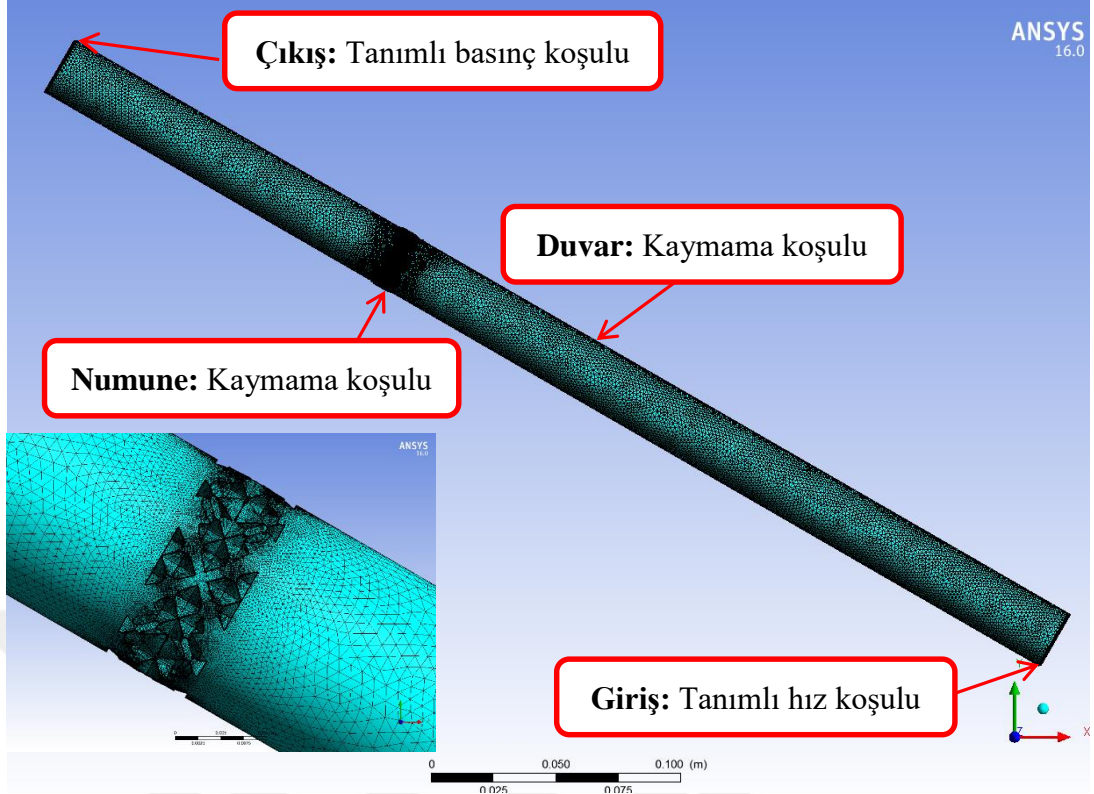
$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.8a)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.8b)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.8c)$$

Sayısal analiz bölgesinin şematik gösterimi ve sınır koşulları Şekil 2.8’de sunulmuştur. Akış analizlerinde havaya ait termofiziksel özellikler dikkate alınmış olup, girişte düzgün hız profili, çıkışta ise atmosfer basıncı tanımlanmıştır. Ayrıca, duvarlarda ve numune yüzeylerinde kaymama sınır koşulu göz önüne alınmıştır. Tam gelişmiş akış koşulu elde edebilmek için giriş uzunluğu olarak $L_{h,laminer}=0,05ReD$ eşitliği [92] dikkate alınmıştır.

Sayısal akış analizleri için ANSYS-FLUENT ticari paket programı kullanılmıştır. Sayısal analizlerde, yayılım (difüzyon) terimleri için ikinci-derece merkezi yöntemi, taşınım terimleri için ise ikinci-derece up-wind yöntemi kullanılmıştır



Şekil 2.8: Akış alanı, ağ yapısı ve sınır koşullarının gösterimi

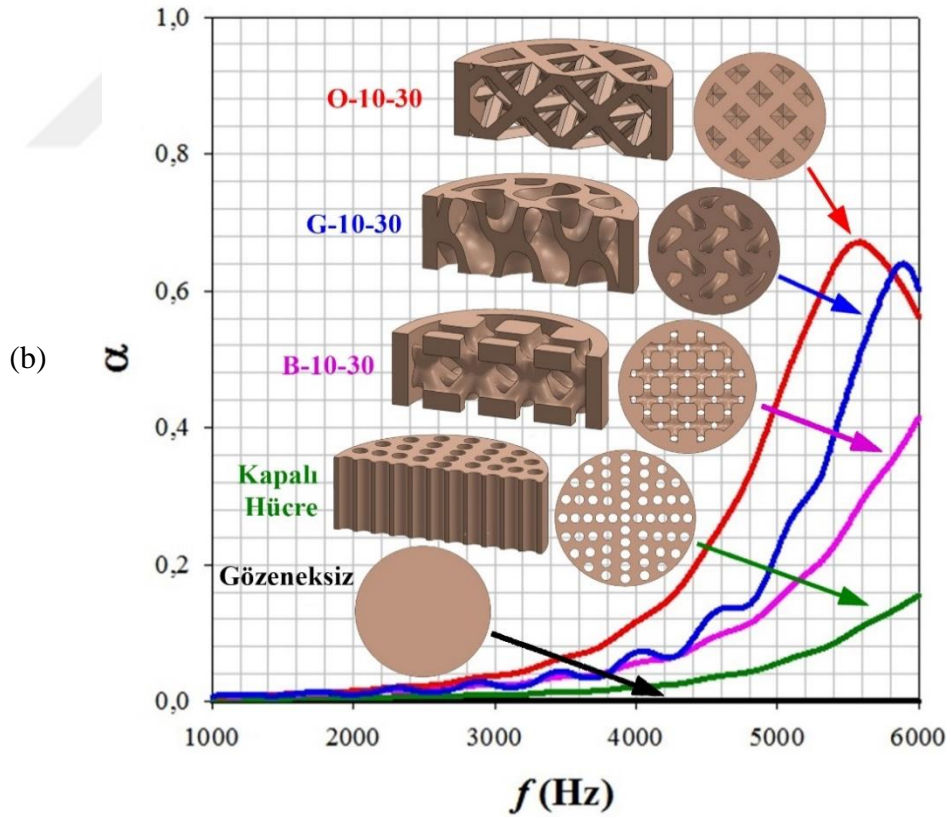
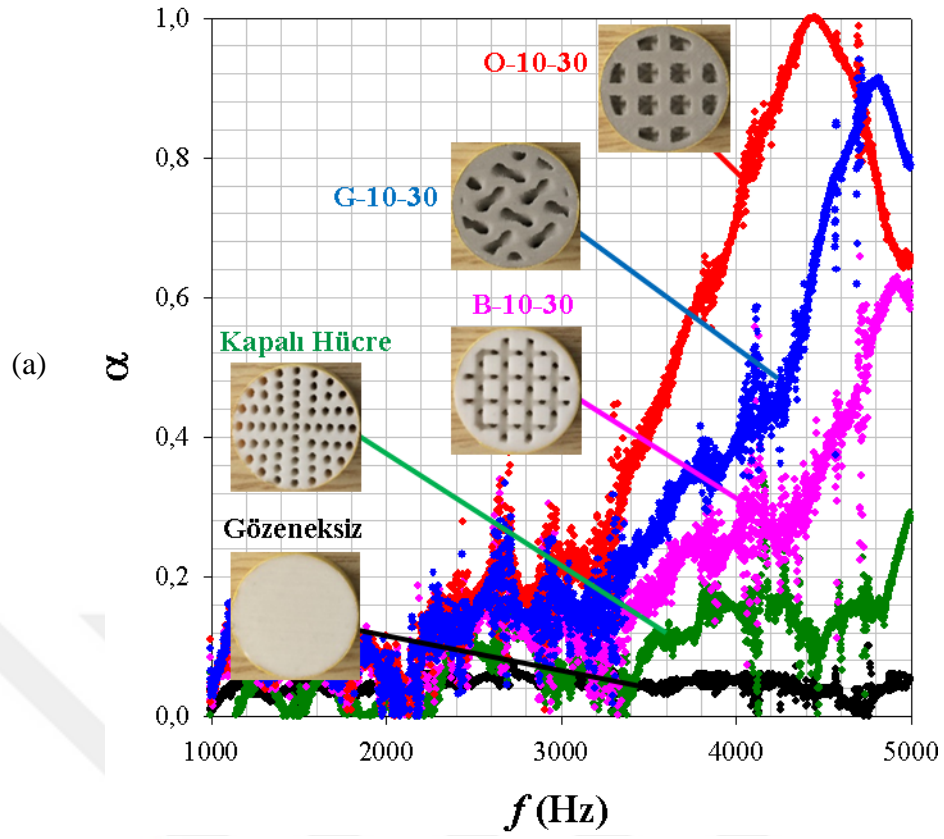
Hız ve basınç çiftleri SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritması [93] kullanılarak elde edilmiştir. Yakınsama kriteri 10^{-6} olarak alınmış ve bütün sayısal analizlerde korunum denklemleri için bu kriter sağlanıncaya kadar iteratif çözümlere devam edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, hücre yapısı, porozite ve hücre kalınlığının gözenekli alçı yapıların ses yutma davranışına etkisi ile ilgili yapılan deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmuştur. Öncelikle, tekrar altını çizmek gerekir ki, metamateryal olarak adlandırılan bu tür yapıların ses yutma davranışlarını sayısal olarak tahmin etmeye yönelik literatürde geliştirilmiş herhangi bir model bulunmaması nedeniyle, sayısal ve deneysel sonuçların niceliksel olarak örtüşmesi değil, davranışsal olarak uyumlu olması beklenmelidir. Esasen, daha öncede vurgulandığı üzere, sayısal çalışmaların temel amacı, üretim aşamasına geçmeden önce, numunelerin ses yutma davranışlarını öngörmek ve deneysel çalışmaya yol göstermektir.

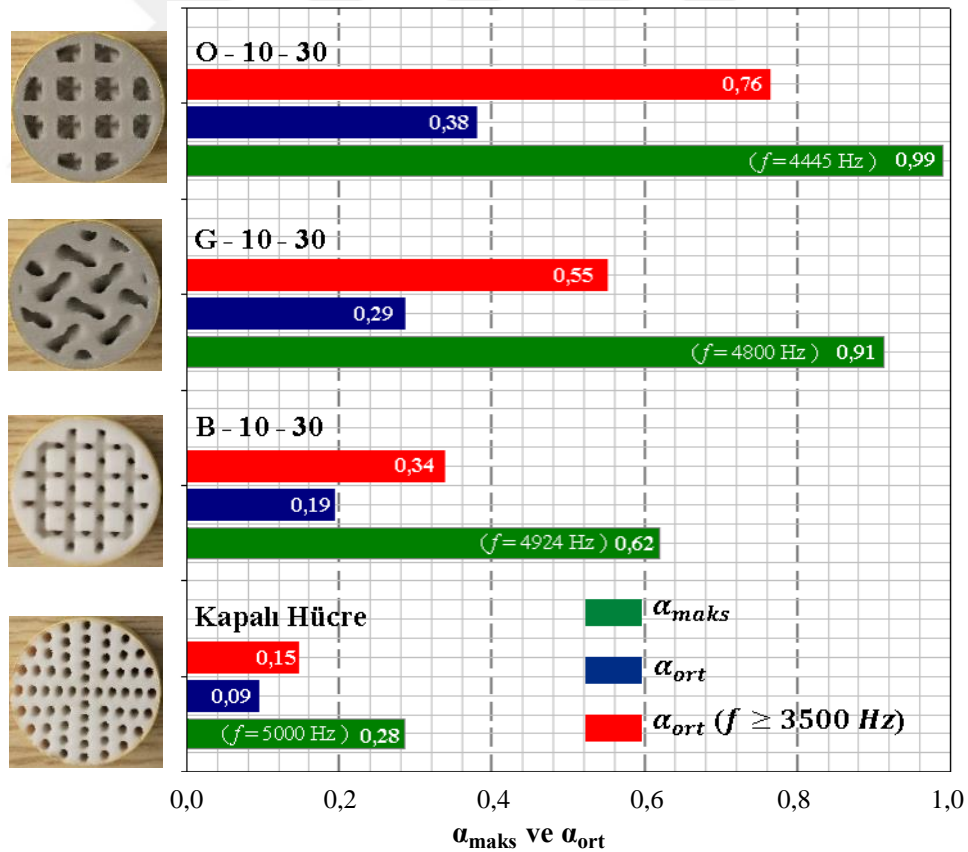
3.1 Hücre Yapısının Ses Yutma Davranışına Etkisi

Şekil 3.1a ve 3.1b’de, 10 mm kalınlık için; gözeneksiz yapı, %30 porozitede kapalı hücre yapısı (close-cell) ve %30 porozitede BCC, Gyroid, Octet açık hücre (open-cell) yapılarına ait numunelerin ses yutum katsayısı - frekans değişimlerine ait sırası ile deneysel ve sayısal sonuçlar sunulmuştur. Öncelikle, Şekil 3.1’den, deneysel ve sayısal sonuçların benzer davranış sergilediğini görmek mümkündür. Deneysel ve sayısal sonuçlar; referans numune olarak tayin edilen gözeneksiz yapının herhangi bir ses yutma sağlamadığı işaret etmektedir. Referans hücreye gelen ses dalgalarının tamamen yansıtılması sebebiyle alçı yapıların ses yutma davranışı sergilemediklerini ifade etmek mümkündür. Bunun birlikte, Şekil 3.1’de sunulan deneysel ve sayısal sonuçlar, açık hücre yapısına sahip numunelerin, kapalı hücre yapısına kıyasla, çok daha iyi ses yutma davranışı sergilediğini göstermektedir. Özellikle, $f > 3000$ Hz için kapalı ve açık hücre yapıları arasında, ses yutma davranışları açısından, çok belirgin bir farklılık göze çarpmaktadır. Ayrıca, açık hücre yapısındaki numuneler karşılaştırıldığında, Octet kafes yapısının en iyi ses yutma davranışı sergilediği, hem deneysel hem de sayısal olarak, tespit edilmiştir (Şekil 3.1). Ses yutma davranışı açısından, Octet kafes yapısını sırası ile Gyroid ve BCC kafes yapıları takip etmektedir.



Şekil 3.1: 10 mm kalınlığa ve %30 porozite için farklı hücre yapılarının ses yutma katsayısı-frekans değişimi: (a) deneysel, (b) sayısal sonuçlar

Hücre yapılarının ses yutma davranışlarını Şekil 3.2'den daha net bir şekilde karşılaştırmak mümkündür. Şekil 3.2'de 10 mm kalınlığa ve %30 poroziteye sahip farklı hücre yapılarına ait maksimum, $1000 \leq f \leq 5000$ Hz ve $3500 \leq f \leq 5000$ Hz frekans aralıkları için ortalama ses yutma katsayısı değerleri verilmiştir. Buna göre, ölçülen maksimum ses yutma katsayısı α_{maks} değerleri karşılaştırıldığında; Octet birim hücre yapısına sahip O-10-30 numunesi için $f=4445$ Hz'de $\alpha_{maks}=0,99$, Gyroid birim hücre yapısına sahip G-10-30 numunesi için $f=4800$ Hz'de $\alpha_{maks}=0,91$, BCC birim hücre yapısına sahip B-10-30 numunesi için $f=4924$ Hz'de $\alpha_{maks}=0,62$ ve kapalı hücre yapısı için $f=5000$ Hz'de $\alpha_{maks}=0,28$ olarak ölçülmüştür. Görüldüğü üzere maksimum ses yutma katsayısı α_{maks} değerleri genel olarak $f > 4500$ yüksek frekans değerlerinde kaydedilmiştir. $1000 \leq f \leq 5000$ Hz aralığında ölçülen ses yutma katsayısı değerlerinin ortalamaları dikkate alındığında; O-10-30 numunesi için $\alpha_{ort}=0,38$, G-10-30 numunesi için $\alpha_{ort}=0,29$, B-10-30 numunesi için $\alpha_{ort}=0,19$ ve kapalı hücre yapısı için $\alpha_{ort}=0,09$ olarak belirlenmiştir.

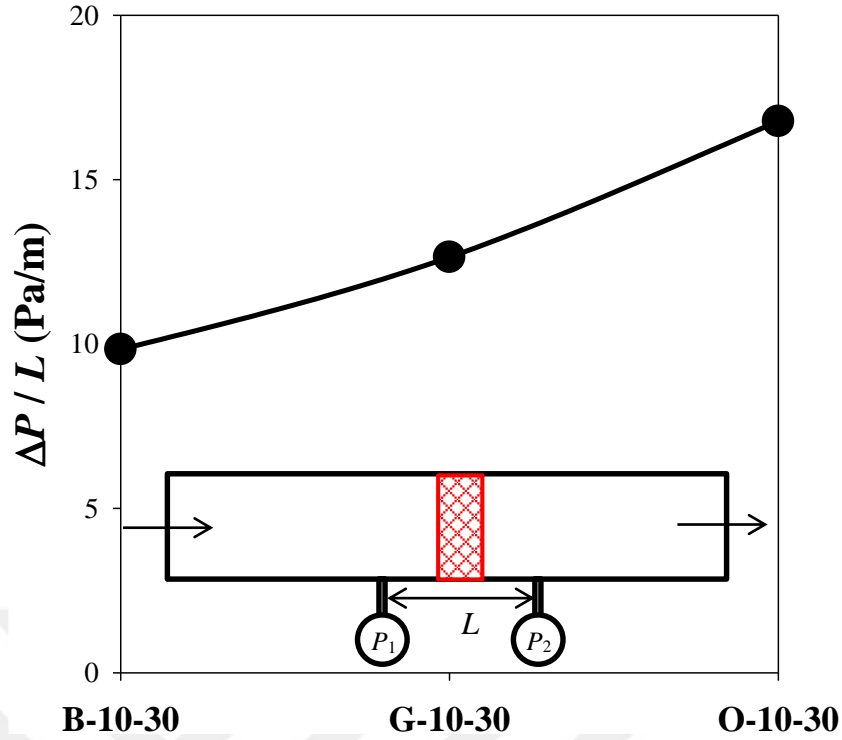


Şekil 3.2: 10 mm kalınlığa ve %30 porozite için farklı hücre yapılarının maksimum ve ortalama ses yutma katsayısı değerleri

Şekil 3.1.'de verilen hücre yapılarına ait ses yutma katsayısı-frekans değişimleri incelendiğinde, $f > 3500$ Hz için ses yutma davranışlarının farklılık gösterdiği gözle çarpılmaktadır. Bu yüzden, $3500 \leq f \leq 5000$ Hz aralığında ölçülen ses yutma katsayısı değerlerinin ortalamaları karşılaştırmak çok daha anlamlı olacaktır. Buna göre, $3500 \leq f \leq 5000$ Hz aralığında, Octet birim hücre yapısına sahip O-10-30 numunesi için $\alpha_{ort}=0,76$, Gyroid birim hücre yapısına sahip G-10-30 numunesi için $\alpha_{ort}=0,55$, BCC birim hücre yapısına sahip B-10-30 numunesi için $\alpha_{ort}=0,34$ ve kapalı hücre yapısı için $\alpha_{ort}=0,15$ olarak belirlenmiştir. Octet birim hücre yapısının Gyroid ve BCC açık hücre yapılarına ve kapalı hücre yapısına kıyasla ortalama olarak sırası ile yaklaşık %30, %55 ve %100 oranında daha yüksek ses yutma davranışı sergilediği gözlenmektedir.

Şekil 3.1 ve 3.2, hücreler arasında etkileşimin olduğu açık hücre yapısının, kapalı hücre yapısına kıyasla çok daha iyi ses yutma davranışı sergilediğini açıkça göstermektedir. Bununla birlikte, açık hücre yapıları karşılaştırıldığında, Octet birim hücre yapısının Gyroid ve BCC birim hücre yapılarına göre, gerek maksimum gerekse ortalama ses yutma katsayısı açısından daha yüksek değerler verdiği gözlenmektedir. Bu durumun temel sebebi, Octet birim hücre yapısının, diğer hücre yapılarına kıyasla, çok daha girintili-çıkıntılı karmaşık bir yapıya sahip olması yani akış direncinin çok yüksek olması olarak gösterilebilir. Böylece ses dalgaları, yapı içerisinde geçerken yüzeylere çarptıkça ilerlemesi zorlaşmakta ve sönümlenerek daha çok yutulmaktadır. Gyroid yapısında ise birim hücrenin girintili çıkıntılardan değil, yüzeylerden oluşması sebebiyle akış direnci biraz daha düşüktür. Fakat Gyroid birim hücre yapısının kıvrımlılığının diğer hücre yapılarına kıyasla çok fazla olması, yüzey boyunca ilerleyen ses dalgalarının yolunu uzatmakta ve bu sayede sürtünme etkilerini artırıp ses yutumu sağlamaktadır.

Özetle, Octet birim hücre yapısı yüksek akış direnci, Gyroid birim hücre yapısı ise yüksek kıvrımlılık sağladığını söylemek mümkündür. Bu durumu daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla her bir açık hücre yapısı için sayısal akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu sayısal akış analizleri ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 2.4.2'de verilmiştir. Akış analizleri neticesinde akış direnci ile ilgili fikir sahibi olabilmek adına, açık hücre formuna sahip gözenekli numuneler içerisindeki akışta meydana gelen basınç kayıpları belirlenmiş (Şekil 3.3) ve akım çizgileri görselleştirilerek hücre yapılarının kıvrımlılıkları karşılaştırılmıştır (Şekil 3.4).

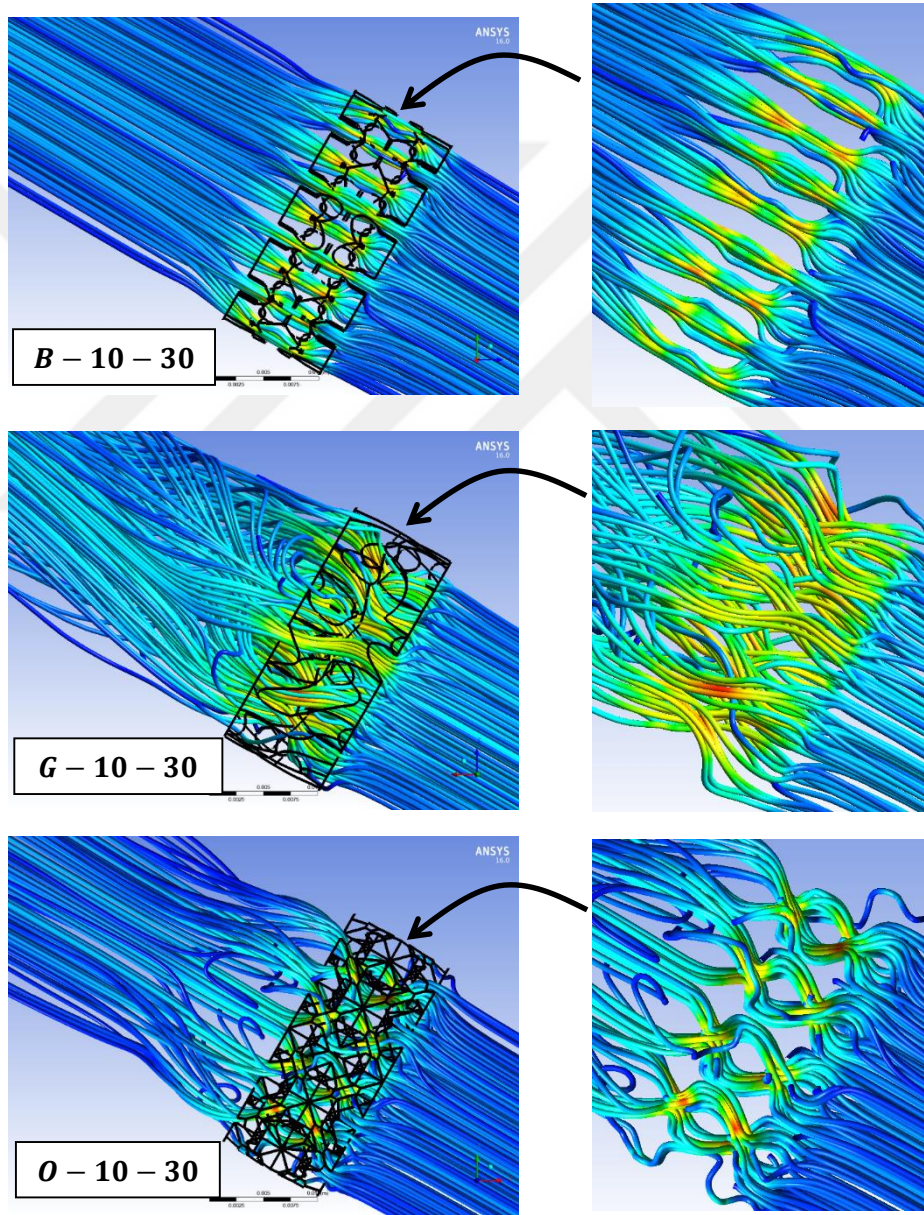


Şekil 3.3: 10 mm kalınlık ve %30 porozitede, farklı açık hücre yapılarının basınç gradyanlarına ait sayısal tahminler

Şekil 3.3’de 10 mm kalınlığa ve %30 poroziteye sahip B-10-30, G-10-30 ve O-10-30 açık gözenekli yapılar içerisinde meydana gelen akış esnasındaki basınç gradyanlarına ait sayısal tahminler verilmiştir. Sayısal sonuçlar açıkça göstermektedir ki, en yüksek basınç kaybı, en iyi ses yutma davranışı gözlenen, Octet birim hücre yapısına sahip O-10-30 numunesinde meydana gelmektedir. Açık hücre yapıları içerisinde, en düşük basınç kaybı ise BCC birim hücre yapısına sahip B-10-30 numunesinde ortaya çıkmaktadır. Basınç kaybının yüksek oluşu akış direncinin de yüksek olacağına en önemli göstergesidir. Bu durum, Şekil 3.1 ve 3.2’deki sonuçları destekler niteliktedir.

B-10-30, G-10-30 ve O-10-30 açık gözenekli yapılar içerisindeki akışa ait akım çizgileri Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Akım çizgileri, birim hücre yapılarının, ses yutma davranışını etkileyen diğer bir önemli parametre olan, kıvrımlılıklarını karşılaştırabilmek için önemli ipuçları sunabilir. Kıvrımlılığı yüksek olan birim hücre yapısının, iz bölgesindeki akım çizgilerinin de kıvrımlı bir yapıda olması beklenebilir. Buna göre, Octet ve Gyroid birim hücrelerine ait akım çizgileri incelendiğinde, iz bölgelerinin oldukça karmaşık bir yapıda olduğu göze çarpmaktadır. Özellikle Gyroid birim hücrelerine ait akım çizgilerinin daha kıvrımlı bir hal aldığı görülmektedir. Bu nedenle, Gyroid birim hücrelerinin, diğer hücre yapılarına kıyasla, çok daha yüksek

kıvrımlılık sağladığını söylemek mümkündür. Diğer taraftan, Octet ve Gyroid birim hücrelerine nispeten, BCC birim hücresinin iz bölgesinde akım çizgilerinin son derece düzgün olduğu gözlenmektedir. Bu durum, BCC birim hücresinin kıvrımlılığının, Octet ve Gyroid birim hücrelerine oranla daha düşük olduğunu işaret etmektedir. Şekil 3.3. ve 3.4 göz önüne alındığında, açık hücre yapıları arasında yüksek akış direnci ve yüksek kıvrımlılığa sahip Octet birim hücresinin en iyi ses yutma davranışına sahiptir. Buna karşın BCC birim hücresinin düşük akış direnci ve düşük kıvrımlılığa sahip olması, en kötü ses yutma davranışına sahip yapı olmasına sebep olduğu söylenebilir.

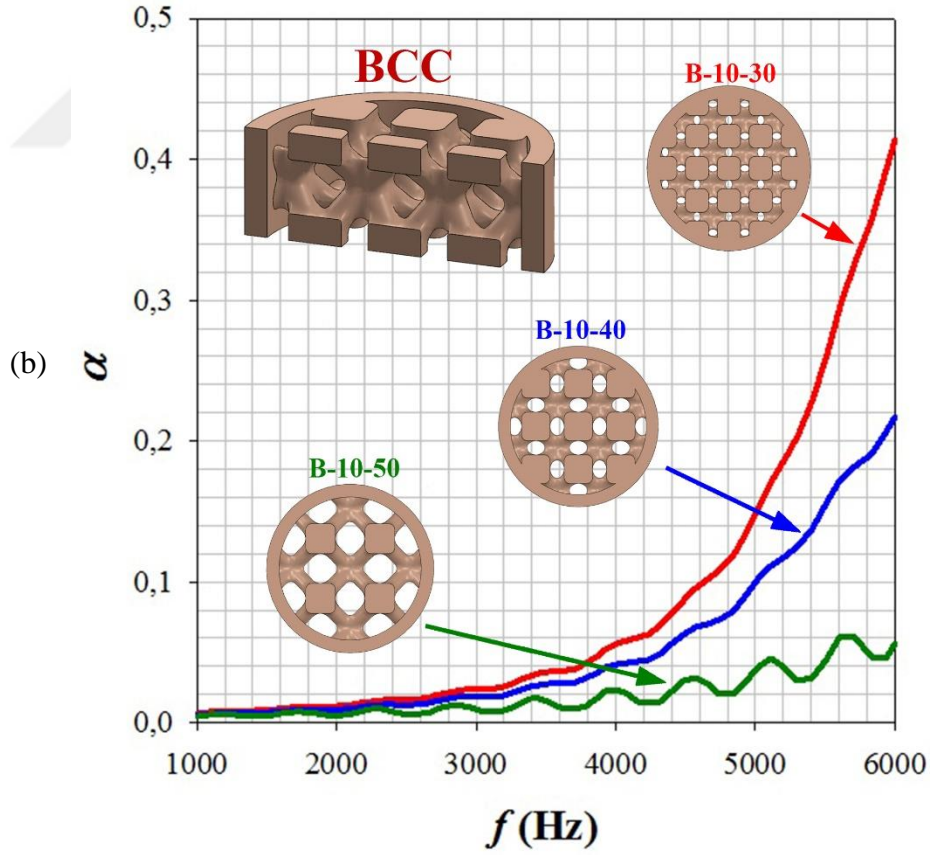
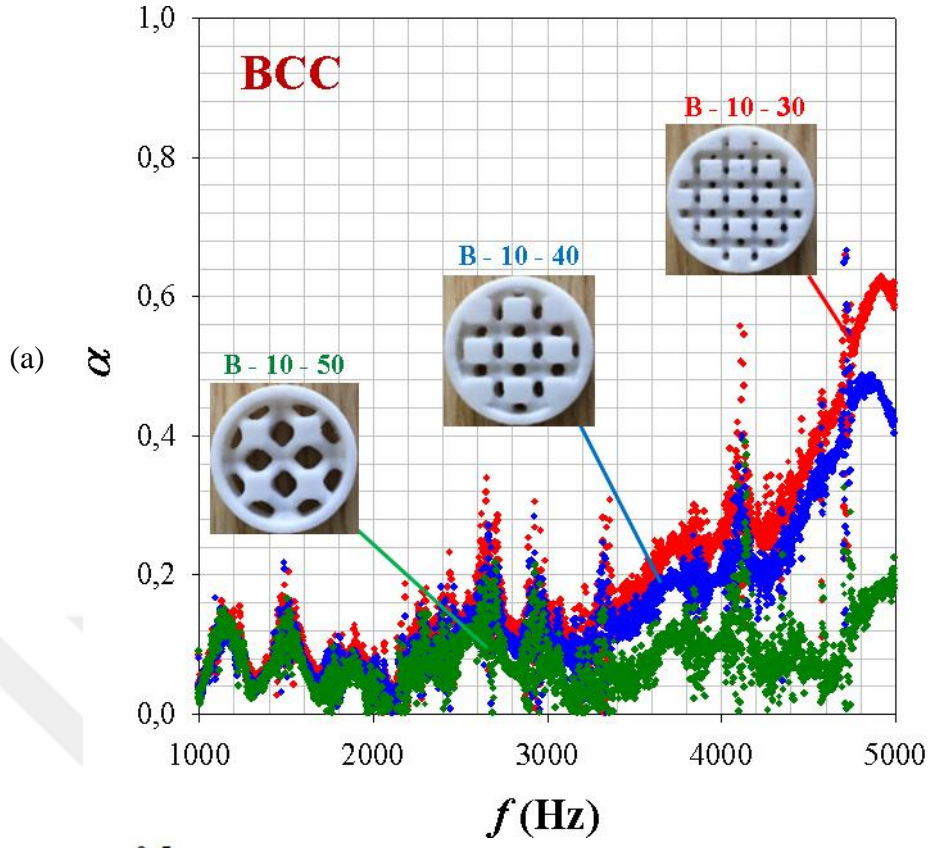


Şekil 3.4: 10 mm kalınlığa ve %30 poroziteye sahip BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapılarına ait akım çizgileri

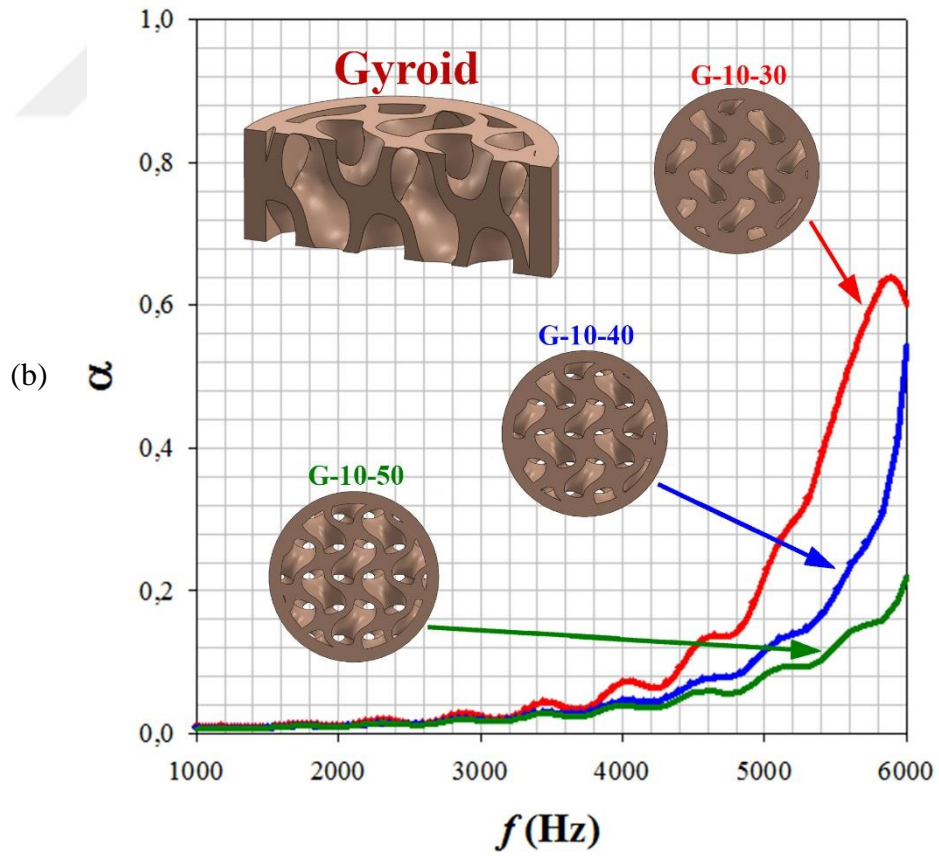
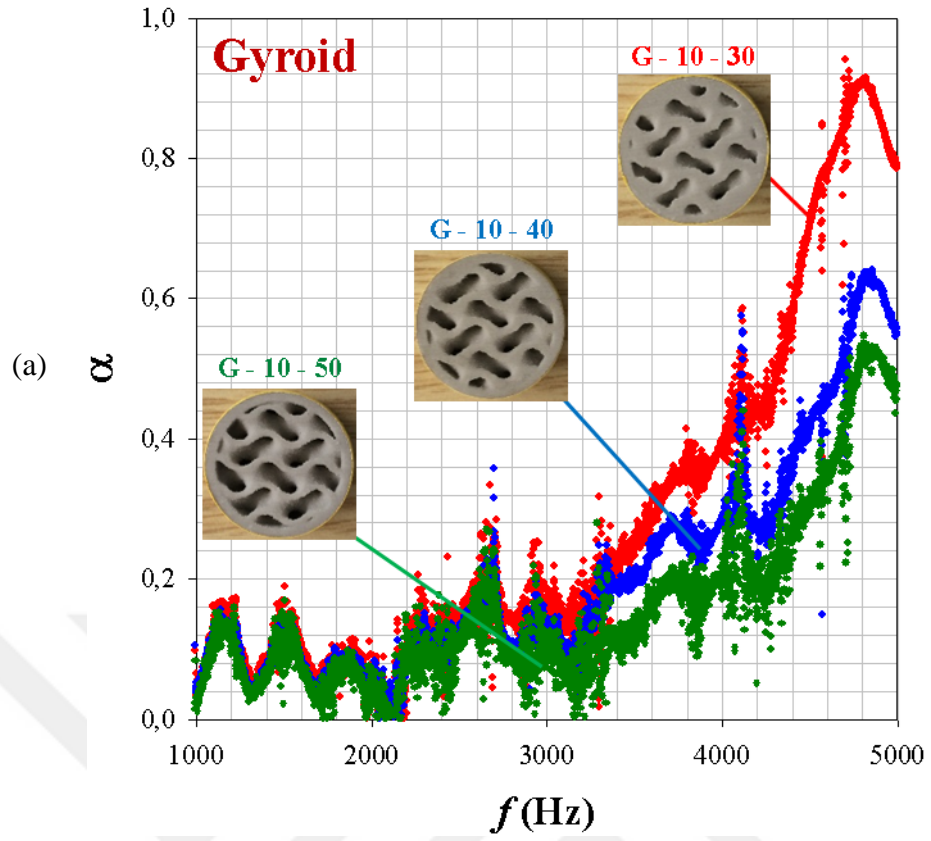
3.2 Porozitenin Ses Yutma Davranışına Etkisi

Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7’de açık hücreli %30, 40 ve 50 poroziteye sahip sırasıyla BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapıları için ses yutma katsayısı – frekans değişimlerine ait deneysel ve sayısal sonuçlar verilmiştir. Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7 porozitenin ses yutma davranışı üzerinde, özellikle $f > 3000$ Hz için, önemli bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlar BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapılarının her biri için porozite artışı ile ses yutma davranışının kötüleştiğini işaret etmektedir. Ayrıca, Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7 incelendiğinde, Octet ve Gyroid birim hücreli gözenekli yapıların ses yutma katsayısı değerlerinde, BCC birim hücre yapısına kıyasla, daha fazla azaldığı dikkatleri çekmektedir. Esasen artan porozite ile ses dalgalarının gözenekli yapı içerisine daha fazla nüfuz etmesi ve ses yutma davranışının iyileşmesi beklenebilir. Ancak Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6’da bunun aksi bir durum göze çarpmaktadır. Bu durumun temel sebebi olarak, artan porozite ile açık hücreli gözenekli yapıların akış direncinde meydana gelen azalma gösterilebilir. Zira gözenekli yapının porozitesinin artması ile ses dalgaları daha az dirençli ortam içerisinde yayılmaya başlamaktadır. Bu durum ses dalgalarının daha az sürtünmeye maruz kalmalarına ve netice itibari ile gözenekli yapının, Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7’de gözlemlendiği gibi, ses yutma davranışının kötüleşmesine neden olur. Daha önce de vurgulandığı üzere, gözenekli yapıların ses yutma davranışını iyileştirebilmek için, yüksek porozitenin yanında yüksek akış direncine de ihtiyaç vardır. Çünkü akış direnci, gözenekli yapı içerisindeki sürtünme etkilerinin büyüklüğünün en önemli göstergesidir. Ses dalgaları gözenekli yapı içerisinde ne kadar az sürtünmeye maruz kalırsa, enerjisinde o kadar az sönümlenme meydana gelir ve gözenekli yapının ses yutma davranışı kötüleşir.

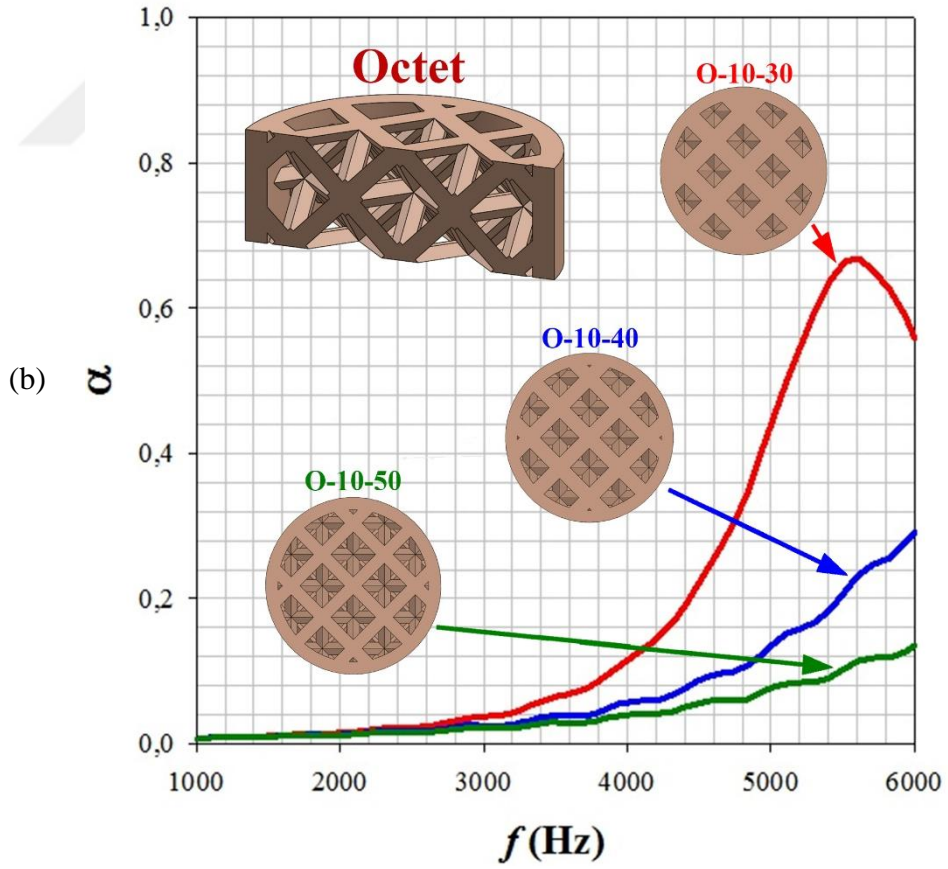
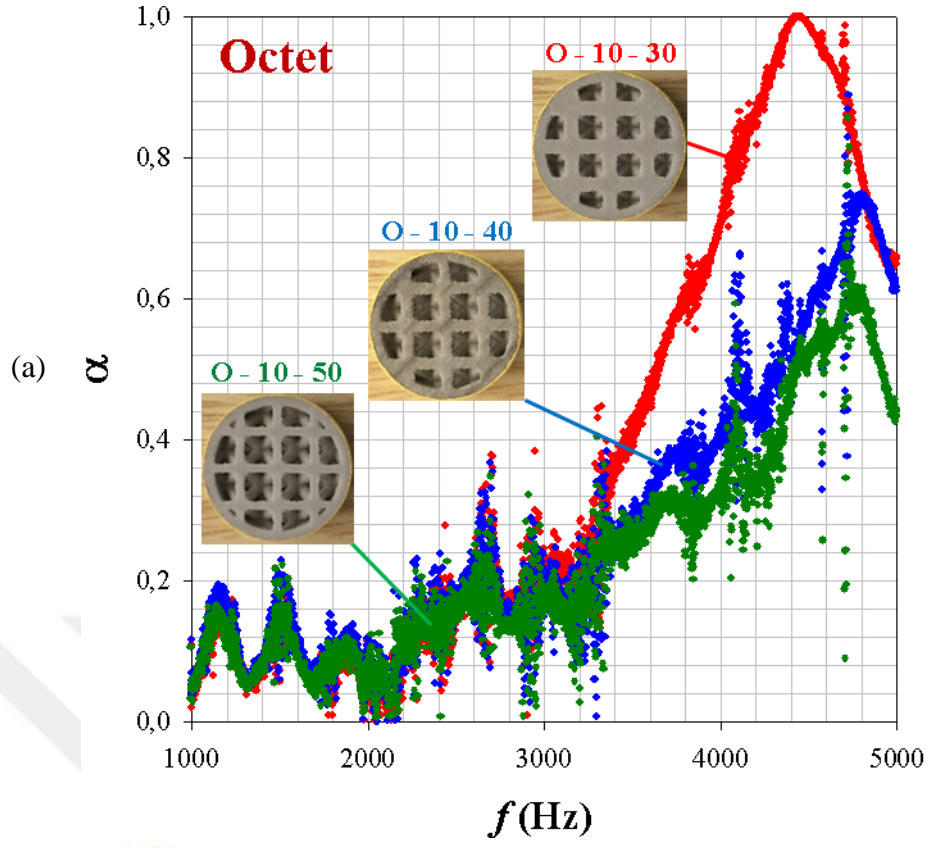
BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapılarında porozite artışının akış direnci üzerindeki etkilerini daha iyi gözlemleyebilmek ve akış direncinin en önemli işaretçisi olan basınç kayıplarını tahmin etmek amacı ile ANSYS-Fluent paket programında sayısal akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu akış analizleri ile ilgili detaylı bilgilere Bölüm 2.4.2’de ulaşılabilir. Şekil 3.8’de BCC, Octet ve Gyroid birim hücre yapılarının farklı porozite değerleri için basınç kayıpları ile ilgili sayısal sonuçları verilmiştir. Şekil 3.8’de açıkça görüldüğü üzere, artan porozite ile akış esnasında BCC, Octet ve Gyroid birim hücre yapılarında meydana gelen basınç kayıpları azalmaktadır.



Şekil 3.5: BCC hücre formunda, farklı porozitelere sahip numunelerin ses yutma katsayısı ölçümleri (a) deneysel ölçümler, (b) sayısal ölçümler



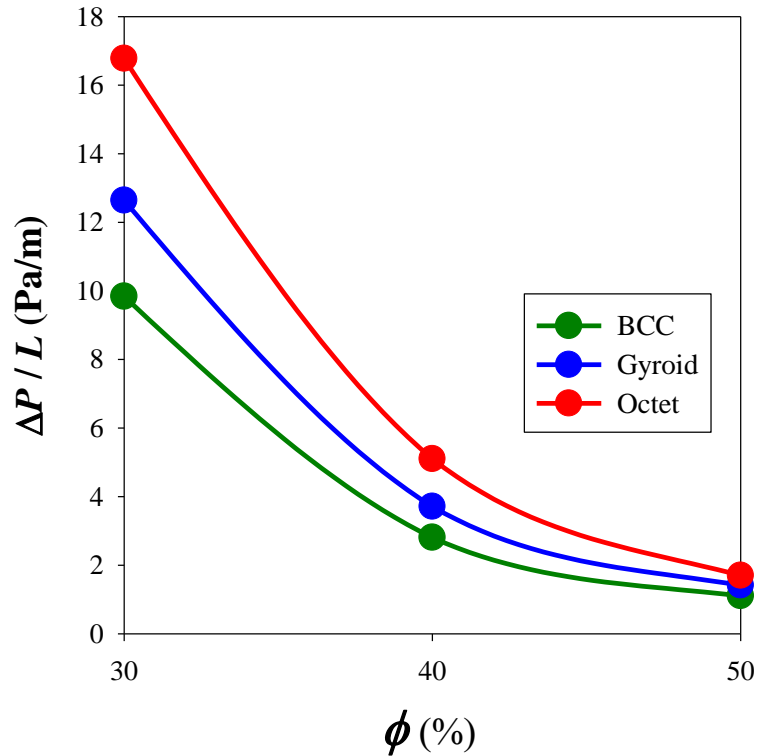
Şekil 3.6: Gyroid hücre formunda, farklı porozitelere sahip numunelerin ses yutma katsayısı ölçümleri (a) deneysel ölçümler, (b) sayısal ölçümler



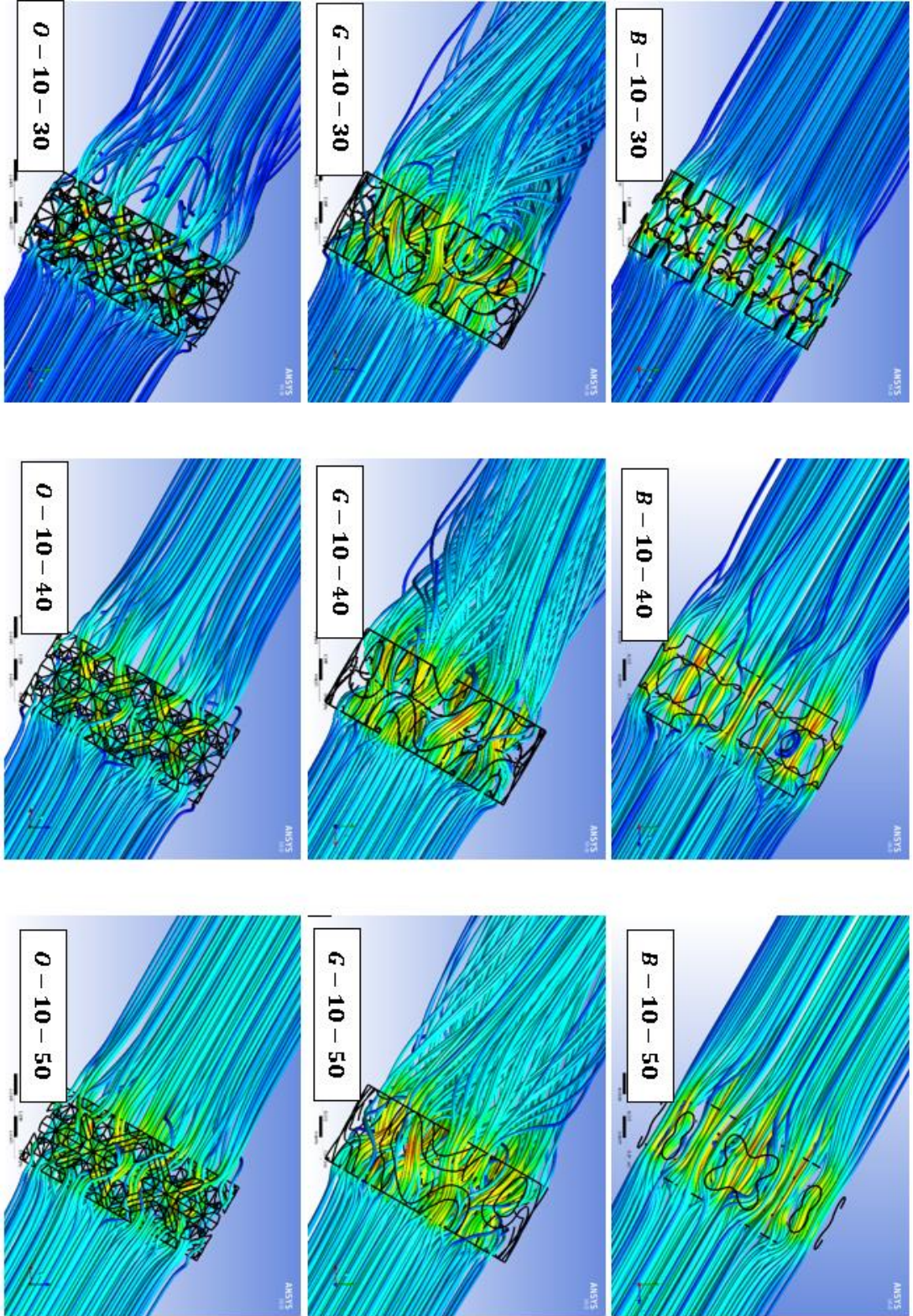
Şekil 3.7: Octet hücre formunda, farklı porozitelere sahip numunelerin ses yutma katsayısı ölçümleri (a) deneysel ölçümler, (b) sayısal ölçümler

Bu durum artan porozite ile BCC, Octet ve Gyroid birim hücre yapılarının akış dirençlerinin azaldığını ve buna bağlı olarak Şekil 3.5 - 3.7 de gözlendiği gibi ses yutma davranışının kötüleştiğini tam olarak destekler niteliktedir. Ayrıca, Şekil 3.8 yüksek porozite değerlerinde hücre yapıları içerisinde meydana gelen akışta ortaya çıkan basınç kayıplarının yakın seviyelerde olduğunu ve özellikle Gyroid ve Octet birim hücre yapılarında ortaya çıkan basınç kaybının, BCC birim hücre yapısına kıyasla çok daha yüksek seviyelerde olduğunu göstermektedir. Bu durum, Şekil 3.5-3.7'de gözlenen, Octet ve Gyroid birim hücreli gözenekli yapıların artan porozite ile ses yutma davranışlarının BCC birim hücre yapısına kıyasla, daha fazla kötüleşmesini desteklemektedir.

Şekil 3.9'da farklı porozite değerlerindeki BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapıları için yapılan akış analizleri neticesinde ortaya çıkan akım çizgileri gösterilmiştir. Artan porozite ile birlikte her bir birim hücre yapısının iz bölgesindeki akış yapısının giderek düzleştiği göze çarpmaktadır. Bu durum, porozite artışı ile birlikte BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapılarının, ses yutma davranışı açısından bir diğer önemli parametre olan, kıvrımlılıklarının da azaldığını yansıtmaktadır. Şekil 3.8 ve 3.9'deki bulgular, porozite artışının birim hücre yapılarının akış direnci ve kıvrımlılıklarını azalttığı ve buna mukabil ses yutma davranışlarını kötüleştirdiği göstermektedir.



Şekil 3.8: Her bir birim hücrede değişen porozitenin akış direnci üzerindeki etkisi



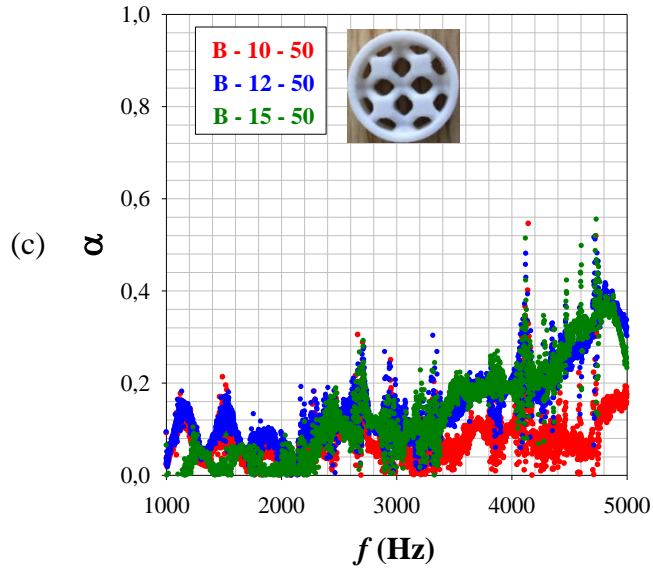
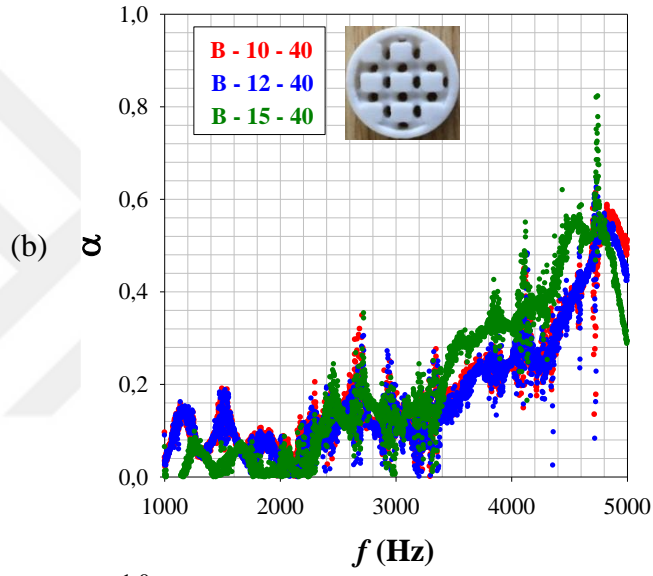
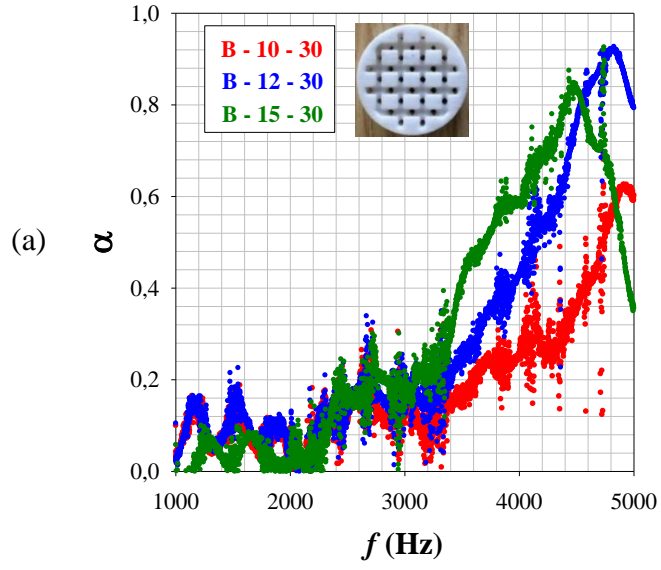
Şekil 3.9: 10 mm kalınlığa ve %30 – 40 – 50 poroziteye sahip BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapılarına ait akım çizgileri

3.3 Numune Kalınlığının Ses Yutma Davranışına Etkisi

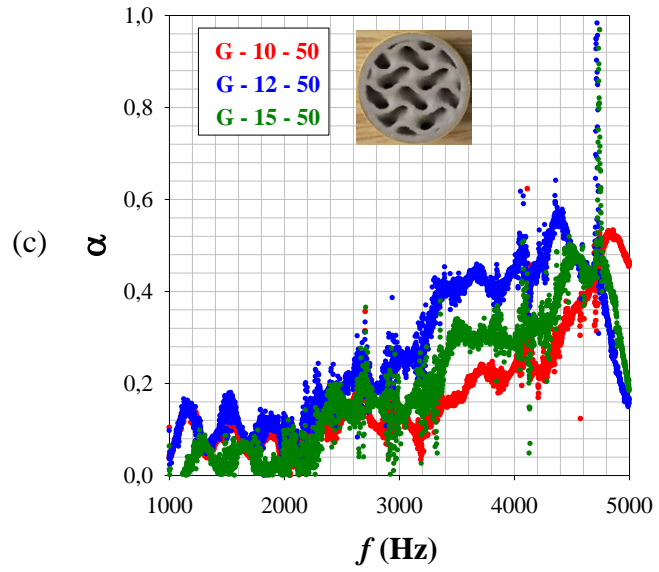
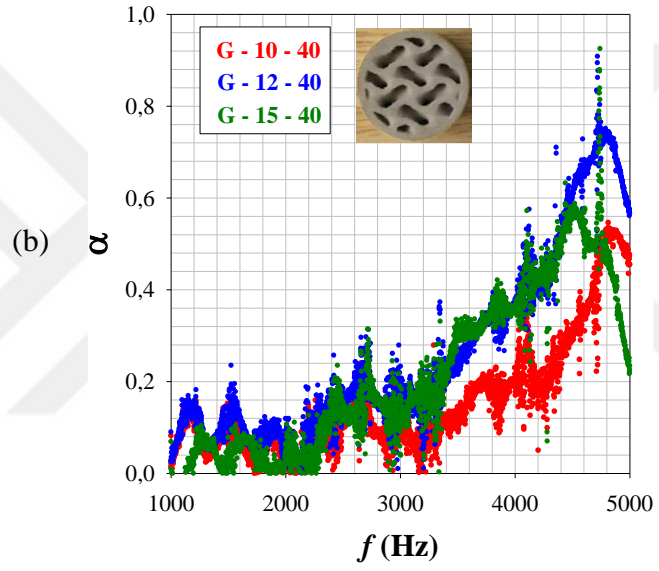
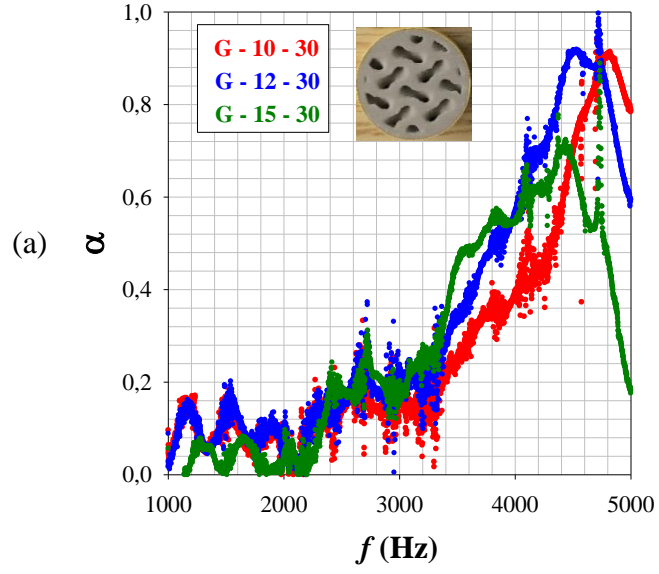
Numune kalınlığının ses yutma davranışı üzerindeki etkisini görmek amacıyla farklı kalınlıklarda açık hücre yapılarından oluşan numunelerin, ses yutma katsayıları deneysel olarak ölçülmüştür. Şekil 3.10, 3.11 ve 3.12’de farklı porozite değerlerinde 10, 12,5 ve 15 mm kalınlığa sahip, sırası ile BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapıları için ses yutma katsayısı-frekans değişimleri verilmiştir. Genel olarak Şekil 3.10, 3.11 ve 3.12 incelendiğinde, BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapıları için, %30 porozite değerinde kalınlık artışının, ses yutma davranışını değiştirdiği görülmektedir. Buna karşın, artan porozite ile birlikte kalınlık artışının ses yutma davranışı üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığını söylemek mümkündür. Zira porozite artışı, akış direnci ve kıvrımlılık gibi ses yutma davranışını etkileyen kritik parametrelerin azalmasına neden olduğu için, yüksek porozite değerlerinde kalınlık artışının ses yutma davranışı üzerinde belirgin bir etki meydana getirmemesine neden olmaktadır.

Bununla birlikte, Şekil 3.10, 3.11 ve 3.12, bütün birim hücre yapıları için, kalınlık artışının ses yutma katsayısı-frekans eğrisinde düşük frekanslara doğru bir etkinlik sağladığını ve kalınlık artışı ile birlikte maksimum ses yutma katsayısı değerinin daha düşük frekanslarda ortaya çıktığını göstermektedir. Esasen, düşük ve orta frekanslarda ses yutma etkinliğinin doğrudan kalınlıkla ilgili olduğu ve kalınlık artışının maksimum ses yutma katsayısı değerini değiştirmeksizin yalnızca ortaya çıktığı frekans değerini düşürdüğü bilinmektedir [73-75]. Bu bağlamda ele alındığında elde edilen sonuçlar literatür ile uyumlu olduğunu söylemek mümkündür.

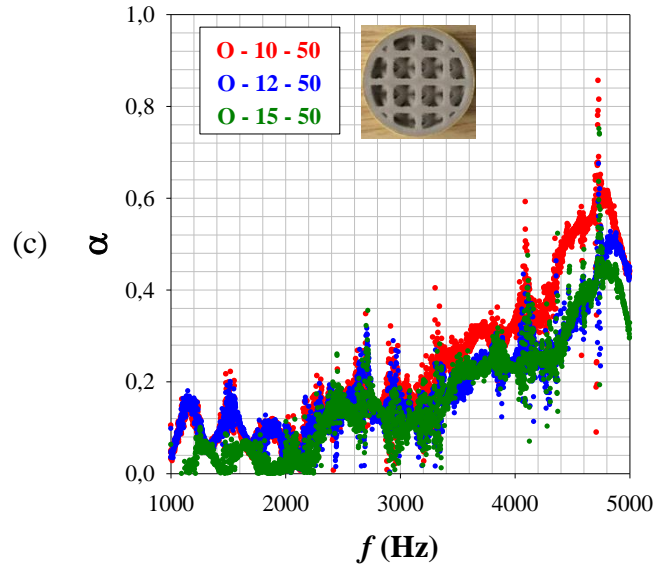
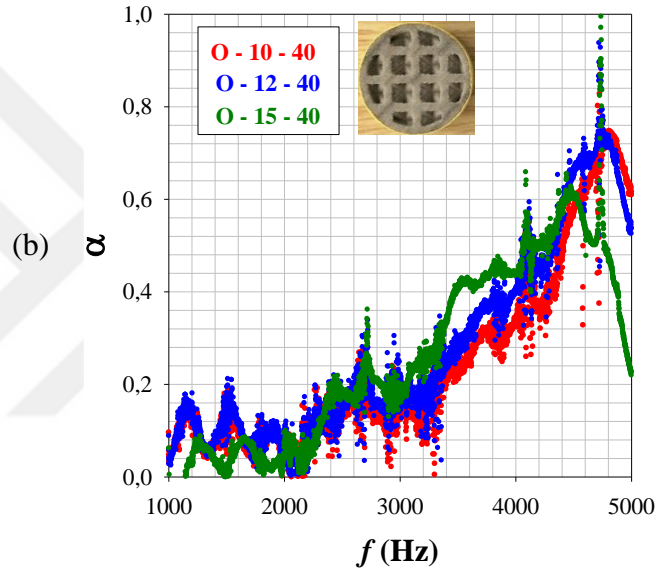
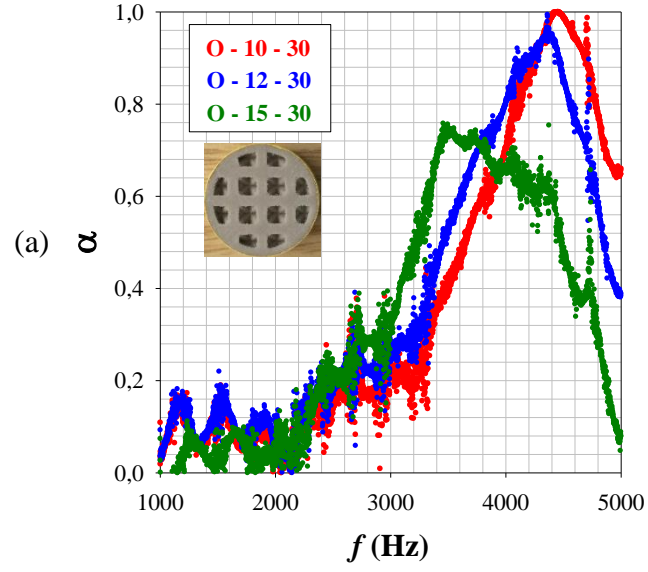
Ayrıca, şunu da vurgulamak gerekir ki, Gyroid gibi kıvrımlılığı yüksek olan birim hücre yapılarında, kalınlık artışıyla beraber numunenin içeride üretim sonrası kalan kalıntı tozların tam olarak temizlenmesi zorlaşmaktadır. Bu yüzden özellikle kıvrımlılığı yüksek ve porozitesi düşük kalın numuneler içerisinde bir miktar kalıntı tozlarının kalması muhtemeldir. Bu durumu Şekil 3.11a’da gözlemek mümkündür. Şekil 3.11a’da görüldüğü gibi 15 mm kalınlığa ve %30 poroziteye sahip Gyroid birim hücreli G-15-30 numunesinin ses yutma davranışının, beklenen aksine düşük frekanslara doğru kaymadığı ve maksimum ses yutma katsayısı değerinin 10 mm kalınlığındaki G-10-30 ve 12,5 mm kalınlığındaki G-12-30 numunelerine kıyasla daha düşük değerlerde olduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 3.10: BCC birim hücre için, numune kalınlığının ses yutumuna etkisi (a) %30 porozite, (b) %40 porozite, (c) %50 porozite



Şekil 3.11: Gyroid birim hücre için, numune kalınlığının ses yutumuna etkisi (a) %30 porozite, (b) %40 porozite, (c) %50 porozite



Şekil 3.12: Octet birim hücre için, numune kalınlığının ses yutumuna etkisi (a) %30 porozite, (b) %40 porozite, (c) %50 porozite

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Eklemeli Üretim yöntemlerinden Bağlayıcı Püskürtme Tekniği (Binder Jet) ile üretilmiş kapalı ve açık (BCC, Gyroid ve Octet) birim hücre yapısına sahip gözenekli alçı metamateryellerin ses yutma davranışları deneysel olarak araştırılarak hücre yapısının, porozitenin ve kalınlığın ses yutma katsayısı üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Bununla birlikte, üretilen gözenekli alçı yapıların ses yutma davranışlarını öngörmek ve deneysel çalışmalara yol göstermek amacıyla sayısal analizlerde gerçekleştirilmiş ve deneysel ve sayısal sonuçların benzer davranışlar sergilediği görülmüştür. Ayrıca gözenekli yapıların ses yutma davranışını üzerinde kritik öneme sahip olan akış direnci ve kıvrımlılık gibi parametreler ile ilgili fikir sahibi olabilmek adına, açık hücre yapıları için sayısal akış analizleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür:

- Gözenekli yapıda üretilen alçı numunelerinin, gözeneksiz referans numune ile kıyaslandığında, belirgin bir ses yutumu sağladığı gözlenmiştir.
- Açık hücre formundaki alçı numunelerin, kapalı hücre formuna göre çok daha etkin ses yutma davranışı sergilediği görülmüştür.
- Açık hücre yapıları içerisinde Octet birim hücre yapısına sahip numunelerin daha yüksek ses yutma performansı gösterdiği tespit edilmiştir.
- Akış analizleri neticesinde Octet birim hücre yapısının yüksek akış direnci ve kıvrımlılık sağladığı tespit edilerek bu bulgu desteklenmiştir.
- Deneysel ve sayısal incelemelerde neticesinde BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapılarının her biri için porozite artışı ile ses yutma davranışının kötüleştiği belirlenmiştir.
- Yapılan akış analizleri neticesinde, bu durumun temel sebebin artan porozite ile hücre yapılarının akış direnci ve kıvrımlılıklar düzeylerinin düşmesi olduğu tespit edilmiştir.
- BCC, Gyroid ve Octet birim hücre yapıları için, kalınlık artışının ses yutma katsayısı-frekans eğrisinde düşük frekanslara doğru bir etkinlik sağladığı ve

maksimum ses yutma katsayısı değerinin daha düşük frekanslarda ortaya çıktığı görölmüştür.

- Eklemeli Üretim teknolojisi kullanılarak, özellikle kalabalık iç mekân uygulamaları için farklı birim hücre yapılarına sahip alçı esaslı alternatif ses yutucu yapılar önerilmiştir.



5. ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Eklemeli Üretim teknolojisi kullanılarak, özellikle kalabalık iç mekân uygulamaları için farklı birim hücre yapılarına sahip alçı esaslı alternatif ses yutucu metamateryaller üretilmiş ve $1000 \leq f \leq 5000$ Hz frekans aralığı için ses yutma davranışları araştırılmıştır. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlara ilave olarak, konu ile ilgili ilerde düzenlenecek olası çalışmalara yol göstermesi adına şu önerileri yapmak mümkündür:

- $f < 1000$ Hz düşük frekans aralıkları için benzer incelemeler yapılabilir.
- Ses iletim kaybı gibi diğer akustik özelliklerin araştırılmasına yönelik benzer bir çalışma yapılabilir.
- Yüksek porozitelinin yanında yüksek akış direnci ve kıvrımlılığa sahip daha farklı birim hücre yapıları tasarlanarak ses yutma davranışları incelenebilir.
- Farklı birim hücre yapılarından oluşan katmanlı yapıların ses yutma performansları araştırılarak katman sıralamasının etkisi irdelenebilir.
- Metamateryal ve geleneksel doğal gözenekli yapılardan oluşan hibrid ses yutucu yapıların ses yutma davranışları incelenebilir.
- Metamateryal yapılar, akustik ve titreşim sönümleme amaçlı kullanılan, kalınlaşan akışkanlar (Shear-Thickening Fluid, STF) ile desteklenerek ses yutma performansları incelenebilir.
- Gözenekli yapıların ses yutma davranışlarını sayısal olarak tahmin etmek amacıyla kullanılan ampirik kestirim modellerinin tamamı geleneksel doğal gözenekli yapılar için geliştirilmiştir. Ancak metamateryal olarak adlandırılan yapay gözenekli yapılar için, literatürde önerilmiş herhangi bir model bulunmamaktadır. Bu yüzden sayısal veriler deneysel ölçümler ile niceliksel olarak örtüşmemektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak ve gözenekli metamateryal yapıların ses yutma davranışlarını sayısal olarak doğru bir şekilde tahmin etmek için uygun ampirik kestirim modelleri geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Milford, I., Aasebo, S. J., & Strommer, K. (2012). Value for Money in Road Traffic Noise Abatement. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 48, 1366–1374.
- [2] Mueller, N., Rojas-Rueda, D., Basagaña, X., Cirach, M., Cole-Hunter, T., Dadvand, P., Donaire-Gonzalez, D., Foraster, M., Gascon, M., Martinez, D., Tonne, G., Triguero-Mas, M., Valentín, A., & Nieuwenhuijsen, M. (2017). Health impacts related to urban and transport planning: A burden of disease assessment, *Environment International*, 107, 243–257.
- [3] Landaluze, J. (2003). Application of active noise control to an elevator cabin. *Control Engineering Practice*, 11(12), 1423–1431.
- [4] Yosun, M. (2018). *Gözenekli Ses Yalıtım Malzemelerinin Akustik Parametrelerinin Belirlenmesi*. (Yüksek Lisans tezi) Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [5] Yasin, S., Ahmed, Z., Chenyang, Z., & Juming, Y. (2014). Altering Sound Absorption in Acoustic Fabrics via Different Honeycomb Cell Patterns, *Research Journal of Textile and Apparel*, 18(3), 22–27.
- [6] Li, T.-T., Lou, C.-W., Huang, C.-H., Huang, C.-L., & Lin, J.-H. (2015). Thermoplastic polyurethanes/polyester/polypropylene composites: Effect of thermoplastic polyurethanes honeycomb structure on acoustic-absorbing and cushioning property, *Journal of Industrial Textiles*, 46(2), 578–595.
- [7] Xiaoning Tang, Xiong Yan. (2017). Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review, *Composites: Part A*, 101, 360–380.
- [8] Amares, S., Sujatmika, E., Hong, T. W., Durairaj, R., & Hamid, H. S. H. B. (2017). A Review: Characteristics of Noise Absorption Material, *Journal of Physics: Conference Series*, 908, 012005.
- [9] Cao, L., Fu, Q., Si, Y., Ding, B., & Yu, J. (2018). Porous materials for sound absorption, *Composites Communications*, 10, 25–35.
- [10] Cai, X., Yang, J., & Hu, G. (2015). Optimization on microlattice materials for sound absorption by an integrated transfer matrix method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(4), EL334–EL339.
- [11] 3D baskı ürünleri ve şaşırtan gelişmeler. (2017). Erişim: 14 Haziran 2019, <https://haberbilimteknoloji.com/2017/09/09/3d-baski-urunleri-ve-sasirtan-gelismeler/>
- [12] A. Sandeep Kranthi Kiran, Jagadeesh Babu Veluru, Sireesha Merum, A. V. Radhamani, Mukesh Doble, T. S. Sampath Kumar & Seeram Ramakrishna. (2018). Additive manufacturing technologies: an overview of challenges and perspective of using electrospraying, *Nanocomposites*, 4:4, 190-214, DOI: 10.1080/20550324.2018.1558499

- [13] **Additive Manufacturing with NX.** Erişim: 14 Haziran 2019, <https://www.bct-technology.com/en/support/tips-tricks/nx-1102-additive-manufacturing.html>
- [14] **Gibson I., Rosen D., Stucker B.** (2014). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing.* New York, Springer, 43-49.
- [15] **Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D.** (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196.
- [16] **ISO/ASTM52915-16.** (2016). Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2, West Conshohocken, PA, ASTM International
- [17] **Factors to Consider When 3D Printing or Additive Manufacturing Metal Parts.** (2017). Erişim: 14 Haziran 2019. <https://insights.globalspec.com/article/7447/factors-to-consider-when-3d-printing-or-additive-manufacturing-metal-parts>
- [18] **Melchels FPW, Feijen J, Grijpma DW.** (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering, *Biomaterials*, 2010;31: 6121–6130.
- [19] **Chartier, T., Chaput, C., Doreau, F., & Loiseau, M.** (2002). Stereolithography of structural complex ceramic parts, *Journal of Materials Science*, 37(15), 3141–3147.
- [20] **Chan, V., Zorlutuna, P., Jeong, J. H., Kong, H., & Bashir, R.** (2010). Three-dimensional photopatterning of hydrogels using stereolithography for long-term cell encapsulation, *Lab on a Chip*, 10(16), 2062.
- [21] **Provin, C., Monneret, S., Le Gall, H., & Corbel, S.** (2003). Three-Dimensional Ceramic Microcomponents Made Using Microstereolithography, *Advanced Materials*, 15(12), 994–997.
- [22] **Cheng, Y.-L., & Chen, F.** (2017). Preparation and characterization of photocured poly (ϵ -caprolactone) diacrylate/poly (ethylene glycol) diacrylate/chitosan for photopolymerization-type 3D printing tissue engineering scaffold application, *Materials Science and Engineering: C*, 81, 66–73.
- [23] **Osman, R. B., van der Veen, A. J., Huiberts, D., Wismeijer, D., & Alharbi, N.** (2017). 3D-printing zirconia implants; a dream or a reality? An in-vitro study evaluating the dimensional accuracy, surface topography and mechanical properties of printed zirconia implant and discs, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 75, 521–528.
- [24] **Shahzad, K., Deckers, J., Kruth, J.-P., & Vleugels, J.** (2013). Additive manufacturing of alumina parts by indirect selective laser sintering and post processing, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(9), 1484–1494.
- [25] **Salmoria, G. V., Ahrens, C. H., Klauss, P., Paggi, R. A., Oliveira, R. G., & Lago, A.** (2007). Rapid manufacturing of polyethylene parts with controlled pore size gradients using selective laser sintering, *Materials Research*, 10(2), 211–214.

- [26] Salmoria, G. V., Leite, J. L., Paggi, R. A., Lago, A., & Pires, A. T. N. (2008). Selective laser sintering of PA12/HDPE blends: Effect of components on elastic/plastic behavior, *Polymer Testing*, 27(6), 654–659.
- [27] Schmidt, M., Pohle, D., & Rechtenwald, T. (2007). Selective Laser Sintering of PEEK, *CIRP Annals*, 56(1), 205–208.
- [28] Williams, J. M., Adewunmi, A., Schek, R. M., Flanagan, C. L., Krebsbach, P. H., Feinberg, S. E., Hollister, S. J., & Das, S. (2005). Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering, *Biomaterials*, 26(23), 4817–4827.
- [29] Lu, K., & Reynolds, W. T. (2008). 3DP process for fine mesh structure printing, *Powder Technology*, 187(1), 11–18.
- [30] Seitz, H., Rieder, W., Irsen, S., Leukers, B., & Tille, C. (2005). Three-dimensional printing of porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering, *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 74B(2), 782–788.
- [31] Vorndran, E., Klarner, M., Klammert, U., Grover, L. M., Patel, S., Barralet, J. E., & Gbureck, U. (2008). 3D Powder Printing of β -Tricalcium Phosphate Ceramics Using Different Strategies, *Advanced Engineering Materials*, 10(12), B67–B71.
- [32] Godlinski, D., & Morvan, S. (2005). Steel parts with tailored material gradients by 3D-printing using nano-particulate ink, *Mater Sci Forum*. 492–493: 679–684.
- [33] Wauthle, R., Ahmadi, S. M., Amin Yavari, S., Mulier, M., Zadpoor, A. A., Weinans, H., Humbeeck, J. V., Kruth, J.P., & Schrooten, J. (2015). Revival of pure titanium for dynamically loaded porous implants using additive manufacturing, *Materials Science and Engineering: C*, 54, 94–100.
- [34] Rombouts, M., Kruth, J. P., Froyen, L., & Mercelis, P. (2006). Fundamentals of Selective Laser Melting of alloyed steel powders, *CIRP Annals*, 55(1), 187–192.
- [35] Weißmann, V., Bader, R., Hansmann, H., & Laufer, N. (2016). Influence of the structural orientation on the mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V open-porous scaffolds, *Materials & Design*, 95, 188–197.
- [36] Liu, Y. J., Wang, H. L., Li, S. J., Wang, S. G., Wang, W. J., Hou, W. T., Hao, Y. L., Yang, R., & Zhang, L. C. (2017). Compressive and fatigue behavior of beta-type titanium porous structures fabricated by electron beam melting, *Acta Materialia*, 126, 58–66.
- [37] Murr, L. E., Gaytan, S. M., Medina, F., Lopez, M. I., Martinez, E., & Wicker, R. B. (2009). Additive Layered Manufacturing of Reticulated Ti-6Al-4V Biomedical Mesh Structures by Electron Beam Melting, *25th Southern Biomedical Engineering Conference 2009*, Miami, Florida, USA, 23–28. 15 – 17 May 2009
- [38] Sames, W. J., Unocic, K. A., Helmreich, G. W., Kirka, M. M., Medina, F., Dehoff, R. R., & Babu, S. S. (2017). Feasibility of in situ controlled heat treatment (ISHT) of Inconel 718 during electron beam melting additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 13, 156–165.

- [39] Lapcevic, A. R., Jevremovic, D. P., Puskar, T. M., Williams, R. J., & Eggbeer, D. (2016). Comparative analysis of structure and hardness of cast and direct metal laser sintering produced Co-Cr alloys used for dental devices, *Rapid Prototyping Journal*, 22(1), 144–151.
- [40] Ciocca, L., Fantini, M., De Crescenzo, F., Corinaldesi, G., & Scotti, R. (2011). Direct metal laser sintering (DMLS) of a customized titanium mesh for prosthetically guided bone regeneration of atrophic maxillary arches, *Medical & Biological Engineering & Computing*, 49(11), 1347–1352.
- [41] Sirringhaus, H., & Shimoda, T. (2003). Inkjet Printing of Functional Materials, *MRS Bulletin*, 28(11), 802–806.
- [42] Ebert, J., Özkol, E., Zeichner, A., Uibel, K., Weiss, Ö., Koops, U., Telle, R., & Fischer, H. (2009). Direct Inkjet Printing of Dental Prostheses Made of Zirconia, *Journal of Dental Research*, 88(7), 673–676.
- [43] Fiocco, L., Elsayed, H., Badocco, D., Pastore, P., Bellucci, D., Cannillo, V., Detsch, R., Boccaccini A. R., & Bernardo, E. (2017). Direct ink writing of silica-bonded calcite scaffolds from preceramic polymers and fillers, *Biofabrication*, 9(2), 025012.
- [44] Eqtesadi, S., Motealleh, A., Perera, F. H., Pajares, A., & Miranda, P. (2016). Poly-(lactic acid) infiltration of 45S5 Bioglass® robocast scaffolds: Chemical interaction and its deleterious effect in mechanical enhancement, *Materials Letters*, 163, 196–200.
- [45] Li, V. C.-F., Dunn, C. K., Zhang, Z., Deng, Y., & Qi, H. J. (2017). Direct Ink Write (DIW) 3D Printed Cellulose Nanocrystal Aerogel Structures, *Scientific Reports*, 7(1).
- [46] Maurath, J., & Willenbacher, N. (2017). 3D printing of open-porous cellular ceramics with high specific strength, *Journal of the European Ceramic Society*, 37(15), 4833–4842.
- [47] Elsayed, H., Colombo, P., Bernardo, E. (2017). Direct ink writing of wollastonite-diopside glass-ceramic scaffolds from a silicone resin and engineered fillers, *Journal of the European Ceramic Society*, 37(13), 4187–4195.
- [48] Liao, J., Chen, H., Luo, H., Wang, X., Zhou, K., & Zhang, D. (2017). Direct ink writing of zirconia three-dimensional structures, *Journal of Materials Chemistry C*, 5(24), 5867–5871.
- [49] Ahn, S., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257.
- [50] Lee, B. H., Abdullah, J., & Khan, Z. A. (2005). Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object, *Journal of Materials Processing Technology*, 169(1), 54–61.
- [51] Drummer, D., Cifuentes-Cuellar, S., & Rietzel, D. (2012). Suitability of PLA/TCP for fused deposition modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 18(6), 500–507.
- [52] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). *Sheet lamination processes. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, NY: Springer, 219–244.

- [53] Mikler, C. V., Chaudhary, V., Borkar, T., Soni, V., Choudhuri, D., Ramanujan, R. V., & Banerjee, R. (2017). Laser additive processing of Ni-Fe-V and Ni-Fe-Mo Permalloys: Microstructure and magnetic properties, *Materials Letters*, 192, 9–11.
- [54] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). *Directed energy deposition processes. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, NY: Springer, 245–268.
- [55] Mikler, C. V., Chaudhary, V., Soni, V., Gwalani, B., Ramanujan, R. V., & Banerjee, R. (2017). Tuning the phase stability and magnetic properties of laser additively processed Fe-30at%Ni soft magnetic alloys, *Materials Letters*, 199, 88–92.
- [56] Mendoza, M. Y., Samimi, P., Brice, D. A., Martin, B. W., Rolchigo, M. R., LeSar, R., & Collins, P. C. (2017). Microstructures and Grain Refinement of Additive-Manufactured Ti-xW Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(7), 3594–3605.
- [57] Li, Y., Hu, Y., Cong, W., Zhi, L., & Guo, Z. (2017). Additive manufacturing of alumina using laser engineered net shaping: Effects of deposition variables, *Ceramics International*, 43(10), 7768–7775.
- [58] Tao, W., & Leu, M. C. (2016). Design of lattice structure for additive manufacturing. *2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA)*. doi:10.1109/isfa.2016.7790182
- [59] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). *Binder Jetting. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, NY: Springer, 205-217
- [60] Gokuldoss, P. K., Kolla, S., & Eckert, J. (2017). Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines, *Materials*, 10(6), 672.
- [61] Çelik, K., Özkan, A. (2017). Eklemeli İmalat Yöntemleri İle Üretim ve Onarım Uygulamaları, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 107 – 121.
- [62] **Binder Jetting (BJ), What is Binder Jetting?**. Erişim 14 Haziran 2019. <https://rapidfab.ricoh-europe.com/technologies/binder-jetting-bj>
- [63] **Introduction to Binder Jetting 3D printing**. Erişim: 14 Haziran 2019 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>
- [64] **Basic Frequency Analysis of Sound**. Erişim: 14 Haziran 2019. <http://nvh.org.cn/PostImage/20170510103415.pdf>
- [65] **What Is an Audiogram?**. Erişim: 14 Haziran 2019 <https://www.fairview.org/patient-education/83640>
- [66] Everest, F. A. (2001). *Master Handbook of Acoustics. Fourth Edition*. New York, McGraw-Hill, 179-229.
- [67] Cox, T.J. & D’Antonio, Peter. (2005). *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Applications*. London and New York, Spon Press.
- [68] Padhye, R., & Nayak, R. (Eds.). (2016). *Acoustic Textiles. Textile Science and Clothing Technology*. Melbourne, Springer.

- [69] **Küçükali, M.** (2010). *Akustik Özellikleri Geliştirilmiş Örme Kumaşlar*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul
- [70] **Amares, S., Sujatmika, E., Hong, T. W., Durairaj, R., & Hamid, H. S. H. B.** (2017). A Review: Characteristics of Noise Absorption Material, *Journal of Physics: Conference Series*, 908, 012005.
- [71] **Lee, Y. E., & Joo, C. W.** (2004). Sound absorption properties of thermally bonded nonwovens based on composing fibers and production parameters, *Journal of Applied Polymer Science*, 92(4), 2295–2302.
- [72] **Qiu, X.** (2016). Principles of Sound Absorbers. *Acoustic Textiles*, 58, 43–72. doi 10.1007/978-981-10-1476-5_3
- [73] **Berardi, U., & Iannace, G.** (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications, *Building and Environment*, 94, 840–852.
- [74] **Kaya, A. İ., & Dalgat, T.** Ses Yalıtımı Açısından Doğal Liflerin Akustik Özellikleri, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Özel Sayı, 1*: 25-37
- [75] **Qui, H., & Enhui, Y.** (2018). Effect of Thickness, Density and Cavity Depth on the Sound Absorption Properties of Wool Boards, *Autex Research Journal*, 18(2), 203–208.
- [76] **Arslan, E., & Çalışkan, M.** (2017). Gözenekli malzemelerin ses yutma katsayılarının ampirik ve sayısal yöntemlerle tahmini. *12. Ulusal Akustik Kongresi Ve Sergisi İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, Urla, İzmir. 14-15 Eylül
- [77] **Can, H.** (2018). Gözenekli malzemelerin ses yutma katsayılarının deneysel ve sayısal yöntemlerle bulunması, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 20(1), 555-564.
- [78] **Parvin, A., & Mohammad R. M.** (2018). 3D Simulation of Impedance Tube: Effect of Mesh Size on Sound Absorption Characteristic, *International Journal of Computer Science and Network Security*, 18(1), 179-182.
- [79] **Godbold, O. B., Soar, R. C., & Buswell, R. A.** (2007). Implications of solid freeform fabrication on acoustic absorbers, *Rapid Prototyping Journal*, 13(5), 298–303.
- [80] **Chaoyang J., Danielle M., & Con D.** (2017). Acoustic Absorption Of Porous Materials Produced By Additive Manufacturing With Varying Geometries. *Proceedings Of Acoustics 2017*, Perth, Australia. 19-22 Kasım
- [81] **Liu, Z., Zhan, J., Fard, M., & Davy, J. L.** (2016). Acoustic properties of a porous polycarbonate material produced by additive manufacturing, *Materials Letters*, 181, 296–299.
- [82] **Liu, Z., Zhan, J., Fard, M., & Davy, J. L.** (2017). Acoustic properties of multilayer sound absorbers with a 3D printed micro-perforated panel, *Applied Acoustics*, 121, 25–32.
- [83] **Matthew, D. G., Charles, A. R., Michael C. R., & Caleb F. S.** (2018). 3D printed acoustic metamaterial sound absorbers using functionally-graded sonic crystals. *Euronoise 2018*, Heraklion, Crete, Greece. 27-31 Mayıs
- [84] **Gao, N., & Hou, H.** (2018). Sound absorption characteristic of micro-helix metamaterial by 3D printing, *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 8(2), 63–67.

- [85] **Setaki, F., Tenpierik, M., Turrin, M., & Van Timmeren, A.** (2014). Acoustic absorbers by additive manufacturing, *Building and Environment*, 72, 188–200.
- [86] **Arun, A.** (2019). Acoustic absorption of passive destructive interference cavities, *Materials Today Communications*, 19, 68-75.
- [87] **Pallant, J.** (2016). *SPSS Survival Manual*, 6th edition. A&U Academic
- [88] **Yoon, G. H.** (2013). Acoustic topology optimization of fibrous material with Delany–Bazley empirical material formulation, *Journal of Sound and Vibration*, 332(5), 1172–1187.
- [89] **Kino, N.** (2015). Further investigations of empirical improvements to the Johnson–Champoux–Allard model, *Applied Acoustics*, 96, 153–170.
- [90] **Hurrell, A. I., Horoshenkov, K. V., & Pelegrinis, M. T.** (2018). The accuracy of some models for the airflow resistivity of nonwoven materials, *Applied Acoustics*, 130, 230–237.
- [91] **Akasaka, S., Kato, T., Azuma, K., Konosu, Y., Matsumoto, H., & Asai, S.** (2019). Structure-sound absorption property relationships of electrospun thin silica fiber sheets: Quantitative analysis based on acoustic models, *Applied Acoustics*, 152, 13–20.
- [92] **Çengel, Y., Cimbala, J.,M.** (2015). *Akışkanlar Mekaniği*, Üçüncü Baskıdan Çeviri. Ankara, Palme Yayıncılık.
- [93] **Patankar, S. V.** (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Kaliforniya, Hemisphere Publishing Corporation.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ramazan ASLAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 07.03.1994 BURSA
E-posta : ramazan.aslan@btu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Balıkesir Üniversitesi, MühendislikMimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Araştırma Görevlisi

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- ASLAN, R., TURAN, O. “Bağlayıcı Püskürtme Tekniği İle Üretilmiş Gözenekli Alçı Yapıların Ses Yutma Katsayılarının İncelenmesi” **4th International Congress On 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies And Digital Industry**. 11-14 Nisan 2019
-
-