



Effects of geometric parameters on sound absorption performance of acoustic metasurface with subwavelength thickness

Caner Baydur¹, Meral Bayraktar^{2*}

¹Institute of Acoustics, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Yıldız Technical University, 34349, Istanbul, Türkiye

Highlights:

- Effects of changes in geometric parameters of a sound-absorbing metasurface on acoustic performance
- Design of a perfect sound absorber based on a perforated panel and coiled-up channels
- Sound absorption in the low-frequency range with subwavelength thickness

Keywords:

- Acoustic metasurface
- Perfect absorption
- Perforated panel
- Coiled-up channel

Article Info:

Research Article

Received: 05.08.2022

Accepted: 02.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1155788

Acknowledgement:

Caner Baydur would like to thank the China Scholarship Council for their financial support during the duration of his master's courtesy the "Chinese Government Scholarship"

Correspondence:

Author: Meral Bayraktar
e-mail: mbarut@yildiz.edu.tr
phone: +90 212 383 2838

Graphical/Tabular Abstract

We present the effects of changes in geometric parameters of a sound-absorbing metasurface on acoustic performance. The metasurface consists of a perforated panel in its outer layer and coiled-up channels behind the panel. The impacts of perforation ratio, panel thickness, hole diameter and channel depth parameters on sound absorption performance were examined. Acoustic analyses were performed with the Pressure Acoustics module of the COMSOL Multi-Physics. As a result of the analyses, we present a sound-absorbing metasurface which provides perfect absorption ($\alpha = 0.99$) in the low-frequency region (150 Hz) of only 20 mm thickness ($\approx \lambda/157$). Theoretical and numerical results are in agreement. The metasurface may be an alternative to traditional materials in room acoustics and noise control due to its properties, which are ultra-thin and providing perfect sound absorption in the desired frequency range.

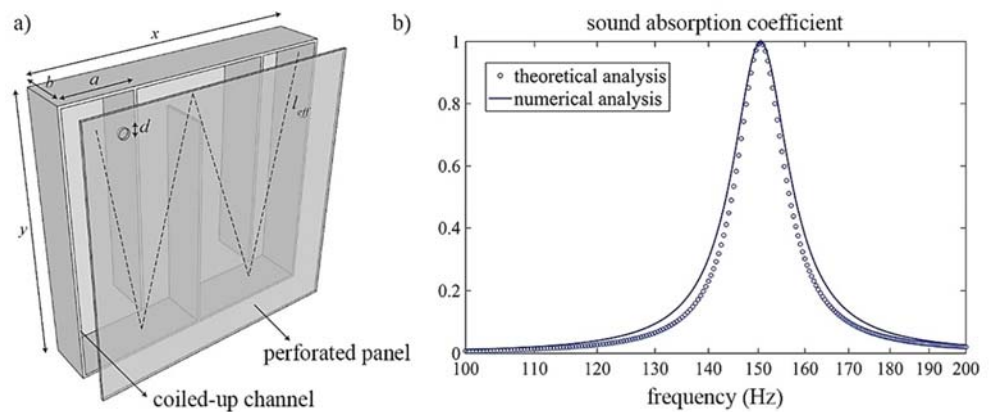


Figure A. Metasurface design and the acoustic performances

Purpose:

The purpose of the study is to design an acoustic metasurface that provides perfect absorption in the low-frequency region. It is aimed to discuss the effect of geometric parameters, including perforation ratio, panel thickness, hole diameter, and channel depth, on sound absorption performance.

Theory and Methods:

The sound absorption coefficient is determined by theoretical calculations. Moreover, acoustic analysis was performed in COMSOL Multiphysics. The results are in good agreement.

Results:

The metasurface provides perfect absorption in the low-frequency region (150 Hz) of only 20 mm thickness ($\approx \lambda/157$). As a result of analyses, to shift absorption peak towards low-frequency sounds, the perforation ratio and hole diameter should be decreased. Moreover, the panel thickness and channel depth should be increased.

Conclusion:

Geometric parameters of the metasurface have significant impacts on the acoustic performance. The sound absorption peak can be shifted to low-frequency region by altering these parameters. Yet, it should be considered that the amplitude may decrease.



Dalga boyu altı kalınlığındaki akustik metayüzeyin geometrik parametrelerinin ses yutum performansına etkileri

Caner Baydur¹ , Meral Bayraktar^{2*} 

¹Tongji Üniversitesi, Fizik Bilimleri ve Mühendisliği Fakültesi, Akustik Enstitüsü, 200092, Şanghay, Çin

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34349, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Ses yutucu metayüzeyin geometrik parametrelerindeki değişimin akustik performansına etkileri
- Hacimsel sarmallı kanallara ve delikli panele dayalı tam yutucu akustik metayüzey tasarımı
- Dalga boyu altı kalınlığında düşük frekans aralığında ses yutumu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.08.2022

Kabul: 02.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1155788

Anahtar Kelimeler:

Akustik metayüzey,

tam yutum,

delikli panel,

hacimsel sarmallı kanal

ÖZ

Mineral yünü ve delikli paneller gibi geleneksel ses yutucu malzemeler düşük frekans bölgesinde zayıf akustik performans göstermektedir. Buna karşın, akustik metayüzeyler yapısal özellikleri doğrultusunda istenilen frekans aralığında dalga boyu altı kalınlığında yüksek ses yutumu sağlayabilir. Bu çalışmada ses yutucu metayüzeyin geometrik parametrelerindeki değişimin akustik performansına etkilerini sunuyoruz. Metayüzey, dış katmanında delikli yüzey ve arkasında hacimsel sarmallı kanallardan oluşmaktadır. Delik sayısı, panel kalınlığı, delik çapı ve kanal derinliği parametrelerinin ses yutum performansına etkisi irdelenmiştir. Akustik analizler COMSOL Çoklu Fizik yazılımının Basınç Akustiği modülü ile gerçekleştirilmiştir. Teorik ve sayısal sonuçların uyumlu bir şekilde örtüştüğü görülmektedir. Tasarlanan metayüzey ince kesitli yapısı ile istenilen frekans aralığında yüksek ses yutumunu sağlayabilmektedir. Bu nedenle hacim akustiği ve gürültü kontrolü alanlarında geleneksel malzemelere seçenek olması beklenmektedir.

Effects of geometric parameters on sound absorption performance of acoustic metasurface with subwavelength thickness

HIGHLIGHTS

- Effects of changes in geometric parameters of a sound-absorbing metasurface on acoustic performance
- Design of a perfect sound absorber based on a perforated panel and coiled-up channels
- Sound absorption in the low-frequency range with subwavelength thickness

Article Info

Research Article

Received: 05.08.2022

Accepted: 02.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1155788

Keywords:

Acoustic metasurface,

perfect absorption,

perforated panel,

coiled-up channel

ABSTRACT

Conventional sound-absorbing materials such as mineral wool and perforated panels have inadequate acoustic performance in the low-frequency region. On the other hand, acoustic metasurfaces can provide high absorption with subwavelength thickness in the desired frequency range according to their structural properties. Herein, we present the effects of changes in geometric parameters of a sound-absorbing metasurface on acoustic performance. The metasurface consists of a perforated panel in its outer layer and coiled-up channels behind the panel. The impacts of hole numbers, panel thickness, hole diameter and channel depth parameters on sound absorption performance were examined. Acoustic analyses were performed with the Pressure Acoustics module of COMSOL MultiPhysics. Theoretical and numerical results are in agreement. The 6-metasurface provides perfect sound absorption in the desired frequency range with an ultra-thin scale. That makes it an alternative to traditional materials in room acoustics and noise control.

1. Giriş (Introduction)

Gürültü, günümüzde ciddi bir çevresel ve sosyal sorun olarak kabul edilmekle birlikte çevre kirliliğine sebep olan ana etkenlerden biri olarak görülmektedir. Özellikle düşük frekanslı sesler (<500 Hz), işitme kaybı, baş ağrısı, uyku bozukluğu ve dikkat eksikliği gibi birçok sağlık sorununa neden olduğu için azaltılması önemlidir [1]. Gözenekli malzemelerin çalışma prensibi, esas olarak akustik enerjiyi ısı enerjisine dönüştüren termal ve viskoz kayıplara dayanmaktadır [2]. Bu tür malzeme yapısı gereği orta ve yüksek frekanslarda etkili yutum sağlayabilir. Ancak bu yutucuların düşük frekanslarda yüksek akustik performans sağlaması, malzemenin kalınlığı ve enerji yayılımı arasındaki doğrusal ilişkiyi içeren kütle yoğunluk yasasının belirlediği sınırlar sebebiyle zordur [2]. Ayrıca, geleneksel malzemelerdeki yutum olayı yüzeye gelen sesin dalga boyu ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek frekanslı sesler kısa dalga boyuna sahiptir. Örneğin, 1000 Hz'deki yüksek frekanslı sesin dalga boyu 0,43 metredir. Düşük frekanslı sesler ise, uzun dalga boyuna sahiptir. 100 Hz'deki düşük frekanslı sesin dalga boyu 3,43 metreye kadar ulaşabilir. Kısa dalga boylu sesler, gözenekli malzemelerin yapısında bulunan dar kanallarda enerjisini yitirebilmektedir. Yüksek frekanslı sesler uzun dalga boyları nedeniyle bu kanallarda başarılı bir şekilde enerji dönüşümünü gerçekleştirmez. Buna karşın rezonatörler, gözenekli malzemelere kıyasla daha geniş kanallara sahiptir ve düşük frekanslarda yüksek ses azaltımı sağlar. Ancak, bu malzemeler geniş bant aralığında etkin değildir [3-5]. Membran tipi yutucular [6] ise derin dalga boylu altı kalınlığında yüksek ses yutum performansı göstermektedir [7-10]. Bununla birlikte membranın esnekliği ve dayanıklılığı gibi karakteristik özelliklerinin korunması konusunda uygulamada zorluklar yaşanmaktadır [11]. Mikro delikli paneller [12-15], her ne kadar orta ve yüksek frekanslarda [16-19] tam ses yutumu sağlasalar da düşük frekanslarda etkin olabilmeleri için panel arkasında derin hava boşluğuna ihtiyaç duyarlar [20].

Özellikle son on beş yılda araştırmacılar akustik metamalzeme [21-24] adı verilen, doğada olmayan bu malzemelerin düşük frekansta [25, 26], geniş bantta [27, 28] ve ayarlanabilir ses yutum [29, 30], hafif [31-33] ve çok fonksiyonlu [34-37] ses yalıtım [38, 39] ve saçıcılık [40-42] özelliklerinin yanı sıra olağandışı yansıma [43, 44], akustik görünmezlik [45-47] gibi sıra dışı özelliklere sahip olabileceğini de göstermiştir. Ayrıca hava geçirgen metamalzeme [48-52] ses engelleme özelliklerine ek olarak hava akışını sağlayabildikleri için geleneksel gürültü bariyerlerine güçlü bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Akustik metamalzeme, istenilen performansın elde edilebilmesi için ses dalgalarının yapı içerisinde yönlendirecek şekilde malzemenin geometrik yapısından yararlanarak tasarlanmaktadır. Mikro delikli panel, rezonatör, membran ve hacimsel sarmallı sistemler ayrı ayrı metamalzemenin tasarımında kullanılmakla birlikte bu sistemler bir arada kullanılarak karma metayapı tasarımı da oluşturulabilir.

Akustik metayüzeyler, derin dalga boylu altı kalınlığında yüksek akustik performans sağlayabilen düzlemsel malzemelerdir. Eğer bir metamalzeme yuttuğu sesin dalga boyunun onda biri kalınlığının altındaysa metayüzey olarak adlandırılabilir [53]. Bu sıra dışı malzemeler asimetric iletim ve yansıma, akustik odaklanma ve tam yutum gibi özelliklere sahiptir. Akustik metayüzeyler Helmholtz rezonatörleri, membranlar ve hacimsel sarmallı kanal sistemleri gibi rezonans yapılarından oluşabilir. Akustik dalgalar metayapı içerisinde istenilen şekilde yönlendirilerek faz ve/veya genlikleri kontrol edilebilir [54]. Metayüzeylerin geometrik özellikleri tasarımın başarısını etkileyen faktörlerin başında gelir. Dolayısıyla, geometrik parametrelerin ses yutum katsayısı üzerindeki etkileri kritik önem taşıyor ve detaylı bir şekilde incelenmelidir. Uygun geometride olmayan metayüzeylerden istenen akustik performans sağlanamayabilir. Tablo

1'de çeşitli metayüzeylerin ses yutum performanslarını inceleyen çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışmalarda önerilen metayüzeyler birim hücre, birleşik hücre ve metayapı özelliklerine göre sınıflandırılmıştır. Birim hücre (unit cell), bir metamalzemenin veya metayüzeyin akustik özelliğini gösteren tek bir modülü olarak adlandırılır. Birim hücrelerden tam veya geniş bantta ses yutumu elde etmek bazı durumlarda güç olabilir. Bununla birlikte, geniş bantta yutum ve/veya ses yutum katsayısının artırılması için birim hücreler bir araya getirilerek birleşik hücre (supercell) oluşturulabilir. Eğer birleşik hücreler, farklı akustik özelliğe sahip birim hücrelerden oluşursa tasarlanan karma metamalzemenin performansı artırılabilir [56]. Metayüzeyden yüksek akustik performans elde etmek için birden fazla ses yutucu sistem bir araya getirilerek karma metayapı oluşturulabilir. Tablo 1'de görüleceği üzere, metayapılar delikli panellerin, mikro yarıklı panellerin, gömülü açıklığın ve labirent kanalların hacimsel sarmallı kanallar ile bütünleştirilmesiyle oluşturulabilir.

Bu çalışmada ön yüzeyinde delikli panel ve arkasında hacimsel sarmallı kanaldan oluşan ses yutucu metayüzeyin geometrik özelliklerinin akustik performansına etkilerini inceliyoruz. Araştırma kapsamında metayapının temel parametrelerinden olan delik sayısı (n), panel kalınlığı (t), delik çapı (d) ve kanal derinliği (b) özellikleri ele alınmış ve her bir parametre için dört farklı değer verilmiştir. Gerçekleştirilen değişimlerin ses yutum katsayısının frekansı, bant genişliği ve genliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sayısal analizler COMSOL Çoklu Fizik yazılımının Basınç Akustikliği modülünde gerçekleştirilmiştir. Teorik ve sayısal sonuçların uyumlu bir şekilde örtüştüğü görülmektedir. Çalışma kapsamında seçilen değişkenler üzerinde yapılan çeşitlemeler ile yapının akustik performansı istenilen değerlere ulaştırılabilir. Ayrıca, aşırı ince kesitli olmalarından dolayı yakın gelecekte metayüzeylerin mimarlık ve mühendislik alanında [69] yaygın bir biçimde kullanılacağı öngörülmektedir.

2. Teorik Metot (Theoretical Method)

Ses yutum katsayısı (α), malzemenin yüzeyine gelen ses enerjisinin yutulma miktarını ifade eder. Bu katsayı empedansın sanal ve gerçel kısımları kullanılarak Eş. 1'den elde edilebilir [14, 70].

$$\alpha = \frac{4x_h}{(1+x_h)^2 + (y_h+y_c)^2}, \quad (1)$$

x_h ve y_h ise sırasıyla Eş. 2 ve Eş. 3 ile belirlenebilir [14, 70].

$$x_h = \frac{32\eta t}{\sigma c_0 d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}kd}{32t} \right), \quad (2)$$

$$y_h = \frac{\omega t}{\sigma c_0} \left(1 + \left(\sqrt{9 + \frac{k^2}{2}} \right)^{-1} + 0,85 \frac{d}{t} \right), \quad (3)$$

Burada, ρ_0 havanın yoğunluğunu, c_0 havada sesin hızını ifade eder ($\rho_0 = 1,21 \text{ kg/m}^3$ ve $c_0 = 343 \text{ m/s}$). η dinamik viskozite katsayısını ($\eta = 1,56 \times 10^{-5} \text{ Pas}$), t panelin kalınlığını, σ açıklık oranını ($\sigma = n \pi (d/2)^2 / S_y$), d delik çapını, n delik sayısını, S_y malzeme yüzeyinin alanını ($S_y = x \cdot y$), ω açısal frekansı ($\omega = 2\pi f$) ifade eder. k açıklık katsayısı Eş. 4 ile elde edilir.

$$k = d \sqrt{\omega/4\eta} \quad (4)$$

Kanalın akustik spesifik empedansı y_c Eş. 5 ile hesaplanabilir.

$$y_c = -j S_y / S_{ka} \cot(\omega \cdot l_{eff} / c_0) \quad (5)$$

Tablo 1. Çeşitli karma metalmalzemelerin ve metayüzeylerin akustik özelliklerinin karşılaştırılması
 (The comparison of the acoustic performances of various hybrid metamaterials and metasurfaces)

Ref.	Frekans aralığı	Birim Hücre				Birleşik Hücre					Metayapı	Yöntem	
		f [Hz]	α	BG [%]	T [mm]	f [Hz]	α	BG [%]	TBG [%]	T [mm]			
[55]	Düşük frekans	225	TY	50,6	51,28	355	0,95	54,9	82,2	-	MDP+ HSK	T S D	
		270	TY	53,7		470	0,96	64,9	82,2				
		330	TY	59,1		470	0,96	64,9	82,2				
[56]	Düşük frekans	252	0,98	-	22	318	0,93	-	65,0	-	MDP+ HSK	T S	
		308	0,97	-		364	0,95						
		368	1	29,8		364	0,95						
[57]	Düşük frekans	380	TY	-	17	450	0,93	-	-	-	MDP+ HSK	T S D	
		970	TY			1360	0,95						
[58]	Düşük frekans	146	0,99	-	27	109	>0,97	-	51,0	180	HSK	T S D	
						118							
						128							
						144							
						157							
[59]	Düşük frekans	410	TY	69,51	51,6	-	-	-	-	-	MDP+ HSK	T S D	
		336		58,04									
		355		58,31									
		378		54,50									
		322		54,3									
		346		54,91									
		361		58,45									
[60]	Yüksek frekans	1303	TY	-	4,2	-	-	-	-	-	DP+ HSK	T S	
[2]	Düşük frekans	156,1	0,82	-	17	269,2	0,86	-	-	17	DP+ HSK	S D	
						341,8	0,82						
						297,6	0,93						
[61]	Düşük frekans	121	TY	-	101	-	-	-	-	-	MDP+ HSK	T S D	
		375	>0,8										
[62]	Düşük frekans	248	0,99	27,0	16	274	0,97	46,3	-	14,5	MYP+ ÇHSK	T S D	
		279		34,0				49		13			
		313		44,5				49		13			
		344		60,0				49		13			
[63]	Düşük frekans	270	TY	36,5	30	370	TY	34,0	-	54,0	30	MYP+ HSK	T S D
		312	TY	41,0									
		160	YY	-									
		216	YY	-									
		137	TY	16,8									
		177	TY	21,0									
		210	TY	27,6									
[64]	Düşük frekans	146,75	TY	9,2	26	-	-	-	-	-	DP+ GA+ HSK	T S D	
		158	TY	8,5									
		168	YY	8,2									
		141	TY	11,8									
		141,25	TY	17,2									
		141	TY	20,4									

Düşük frekanslı ses: $f < 500$ Hz, Orta frekanslı ses: $500 \text{ Hz} < f < 1000$ Hz, Yüksek frekanslı ses: $1000 \text{ Hz} < f$
 TY: Tam yutum ($0,99 < \alpha$), TYY: Tam yutuma yakın ($0,95 < \alpha < 0,99$)
 BG: Bant Genişliği, TBG: Toplam Bant Genişliği

DP: Delikli panel, MDP: Mikro delikli panel, MYP: Mikro yarıklı panel, HSK: Hacimsel sarmallı kanal, ÇHSK: Çoklu hacimsel sarmallı kanal, GA: Gömülü açıklık, LK: Labirent kanal
 T: Metalmalzemenin toplam kalınlığı
 T: Teorik, S: Sayısal analiz, D: Deneysel Analiz

S_{ka} hacimsel sarmallı kanalın kesit alanını ($S_{ka} = a \cdot b$), a kanalın enini, b ise kanalın derinliğini gösterir. l_{eff} ise etkin kanal uzunluğunu ifade eder [55].

Eş. 3, Eş. 5'e eşit olması durumunda rezonans olayı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla Eş. 6 ile ifade edilen koşul sağlandığında

metayüzeyin empedansının sanal kısımlarının toplamı 0'a eşit olur. Aynı zamanda $x_h = 1$ olursa tam yutum ($\alpha = 1$) gerçekleşir [71].

$$\frac{\omega t}{\rho_0 c_0} \left(1 + \left(\sqrt{9 + \frac{k^2}{2}} \right)^{-1} + 0,85 \frac{d}{t} \right) = S_y / S_{ka} \cot(\omega \cdot l_{eff} / c_0) \quad (6)$$

Çalışmada ele alınan yapı (Şekil 1a), ön yüzeyi delikli bir panel ve arka yüzünde yer alan hacimsel sarmallı kanallardan oluşmaktadır. Şekil 1b’de teorik hesaplama ve sayısal analiz sonucunda elde edilen ses yutum katsayısı sunulmuştur. Sonuçların birbiriyle örtüştüğü görülmektedir. Burada panel kalınlığı 2 mm, delik çapı 3,5 mm, kanal derinliği 18 mm, kanalın eni 23,75 mm ve kanal uzunluğu (l_{eff}) 365 mm olarak alınmıştır. Metayüzeyin eni (x) ve boyu (y) ise 100 mm’dir.

3. Sayısal Analiz (Numerical Analysis)

Metayüzeyin ses yutum katsayısının hesaplanması için COMSOL Çoklu Fizik programının Basınç Akustiği modülü kullanılmıştır. Hesaplamalarda $\rho_0 = 1,21 \text{ kg/m}^3$, $c_0 = 343 \text{ m/s}$, $\eta = 1,56 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ olarak tanımlanmıştır. Analizde malzeme sınırları sert yüzey (hard boundary) olarak seçilmiştir. Ses yutum katsayısı, $\alpha = 1 - |R|^2$ olarak tanımlanmıştır. “R”, malzemenin ses yansıtıcılık katsayısını ifade etmektedir.

4. Parametrelerin Ses Yutum Katsayısına Etkisi (Effects of The Parameters on Sound Absorption Coefficient)

Akustik metayüzey, ön yüzeyinde delikli panele ve arkasında hacimsel sarmallı kanallara sahiptir. Bu bileşenlerin parametrelerinin çeşitlendirilmesiyle birlikte malzemenin akustik performansı değişiklik göstermektedir. Çalışmamızda delik sayısını (n), panel kalınlığını (t), delik çapını (d) ve kanal derinliğini (b) değiştirerek geometrik parametrelerin metayüzeyin ses yutum katsayısına etkisini inceliyoruz. Bu doğrultuda her parametrenin etkisini araştırmak için 16 farklı metayüzey tasarımı oluşturulmuştur. Tablo 2’de ifade edildiği gibi delik sayısı 1 adet ile başlayıp birer artış ile 4’e kadar, panel kalınlığı ise 0,5 mm ile başlayıp 0,5 mm artış ile 2 mm’e kadar çıkartılmıştır. Delik çapının başlangıç değeri 2,5 mm olarak seçilmiş ve her tasarımda 0,5 mm’lik artırım sağlanmıştır. Son olarak, kanal derinliğinde 18 mm’den 24 mm’ye kadar her tasarımda 2 mm artış sağlanmıştır. Parametrelerin ses yutum katsayısına etkisini doğru biçimde inceleyebilmek için, değişkenler dışındaki kanal eni ($a = 23,75 \text{ mm}$) tüm simülasyonlarda sabit tutulmuştur.

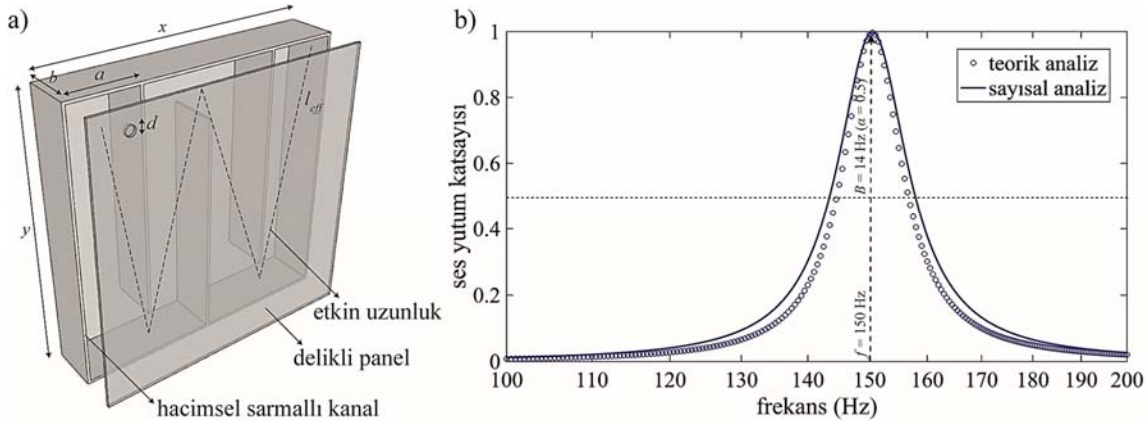
4.1. Delik Sayısının Ses Yutum Katsayısına Etkileri (Effects of Hole Number on Sound Absorption Coefficient)

Şekil 2’de görüleceği üzere, delik sayısının ses yutum katsayısının hem frekansını hem de genliğini değiştirmektedir. Sayısal hesaplamalara göre 1., 2., 3. ve 4. metayüzeylerden elde edilen en yüksek yutum katsayılarının rezonans frekansları sırasıyla 160 Hz,

189 Hz, 201 Hz ve 206 Hz olacak şekilde yer değiştirmiştir. $\alpha = 0,5$ ’teki bant genişliği için sırasıyla 14 Hz, 15 Hz, 15 Hz ve 15 Hz olduğu görülmektedir. Yutum genlikleri ise, sırasıyla 0,99, 0,92, 0,87 ve 0,84 değerlerine ulaşmıştır. Dolayısıyla, delik sayısının artışı metayüzeyde daha yüksek frekansta ve daha düşük genlikte ses yutumuna neden olmuştur. Ayrıca, frekanstaki en çarpıcı artış tek delik yerine iki delik oluşturulduğu zaman görülmektedir. Delik sayısının ikiden üçe çıkartılması nispeten daha az frekans yükselişi sağlamıştır. Hem frekans hem de genlikteki değişimin en az olduğu seçenek delik sayısının 3’ten 4’e çıkarıldığı durumdur. Bu doğrultuda düşük frekanslı ses yutucu malzeme elde etmek için en az sayıda delik oluşturularak açıklık oranının azaltılması doğru bir tasarım kararı olabilir. Şekil 2b, Şekil 2c, Şekil 2d ve Şekil 2e’de ses dalgasının kanal içindeki yayılımı siyah oklar ile gösterilmiştir. Ses dalgaları malzemenin ön yüzeyinde yer alan delikten kanal içine nüfuz eder. Rezonans frekansındaki en düşük ses basınç düzeyi delik ve kanal girişinde olmakla birlikte en yüksek düzey ise kanal sonunda görülmektedir. İlgili şekillerden anlaşılacağı üzere delik sayısında yapılan değişiklik basınç dağılımında anlamlı bir farklılık oluşturmamıştır.

Tablo 2. Metayüzey tasarımları ve geometrik parametreleri (Metasurfaces design with their geometric parameters)

	n	σ	t (mm)	d (mm)	b (mm)
Delik sayısı					
1. metayüzey tasarımı	1	0,13/100	2,0	4,0	18
2. metayüzey tasarımı	2	0,25/100	2,0	4,0	18
3. metayüzey tasarımı	3	0,38/100	2,0	4,0	18
4. metayüzey tasarımı	4	0,50/100	2,0	4,0	18
Panel kalınlığı					
5. metayüzey tasarımı	1	0,13/100	0,5	4,0	18
6. metayüzey tasarımı	1	0,13/100	1,0	4,0	18
7. metayüzey tasarımı	1	0,13/100	1,5	4,0	18
8. metayüzey tasarımı	1	0,13/100	2,0	4,0	18
Delik çapı					
9. metayüzey tasarımı	1	0,05/100	2,0	2,5	18
10. metayüzey tasarımı	1	0,07/100	2,0	3,0	18
11. metayüzey tasarımı	1	0,10/100	2,0	3,5	18
12. metayüzey tasarımı	1	0,13/100	2,0	4,0	18
Kanal derinliği					
13. metayüzey tasarımı	1	0,13/100	2,0	4,0	18
14. metayüzey tasarımı	1	0,13/100	2,0	4,0	20
15. metayüzey tasarımı	1	0,13/100	2,0	4,0	22
16. metayüzey tasarımı	1	0,13/100	2,0	4,0	24



Şekil 1. (a) Metayüzey tasarımı (b) Metayüzeyin frekansa bağlı ses yutum katsayısı grafiği. ((a) Metasurface design. (b) Sound absorption coefficient curve of the metasurface based on the frequency)

4.2. Panel Kalınlığının Ses Yutum Katsayısına Etkileri
(Effects of Panel Thickness on Sound Absorption Coefficient)

Panel kalınlığının azaltılması ses yutum katsayısında genlik ve frekans değişikliğine yol açmıştır. Delik sayısındaki değişime karşın panel kalınlığındaki farklılık yutum pikinde nispeten düzgün genlik azalışı ve frekans artışı beraberinde getirmiştir. Değişkenlere ait yutum eğrileri Şekil 3a’da yer almaktadır. Analizler sonucunda, sırasıyla $t = 2,0$ mm, 1,5 mm, 1,0 mm ve 0,5 mm değerleri için $\alpha = 0,99$, 0,97, 0,94 ve 0,88 değerleri elde edilmiştir. $\alpha = 0,5$ ’teki bant genişliği için sırasıyla 14 Hz, 14 Hz, 13 Hz ve 12 Hz olduğu görülmektedir. Bant genişliğindeki bu artışın genliğin yükselmesi ile ilişkilendirilebilir. Rezonans frekansları ise sırasıyla 160 Hz, 165 Hz, 171 Hz ve 178 Hz olarak yer değiştirmiştir. Diğer bir deyişle, panel kalınlığının artışı düşük frekanslarda yüksek ses yutum performansı sağlamaktadır. Metayüzeylerde yayılan akustik dalgaların rezonans frekanslarındaki basınç düzeyleri ise, Şekil 3b, Şekil 3c, Şekil 3d ve Şekil 3e’de gösterilmiştir. Basınç grafiklerinde belirgin bir değişiklik görülmektedir.

4.3. Delik Çapının Ses Yutum Katsayısına Etkileri
(Effects of Hole Diameter on Sound Absorption Coefficient)

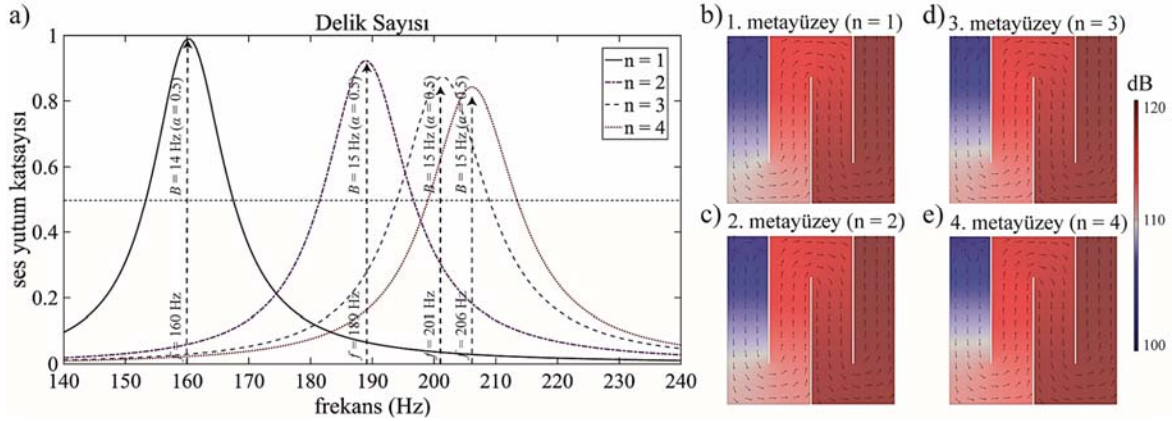
Delik çapındaki çeşitlendirme genlik ve rezonans frekansında değişime yol açmıştır. Delik çapının 4,00 mm’den 3,5 mm’e indirilmesi 0,98 olan ses yutum genliğini 0,99’a artırmıştır (Şekil 4a). Bununla birlikte rezonans frekansını 160 Hz’den 10 Hz kaydırarak 150 Hz’e düşürmüştür. Delik çapının sırasıyla 3,0 mm ve 2,5 mm

olarak ayarlanması ise frekansları 139 Hz ve 124 Hz’e kaydırmıştır. Ancak genlikler sırasıyla 0,96 ve 0,84 olmuştur. $\alpha = 0,5$ ’teki bant genişliği için 9. metayüzeyde 13 Hz olmakla birlikte diğer tasarımlarda 14 Hz olduğu görülmektedir. Genel olarak delik çapındaki azalış yutum pikini düşük frekanslara kaydırır da genlik azalışına da sebep olabilir. Şekil 4b, Şekil 4c, Şekil 4d ve Şekil 4e’de ilgili çeşitlendirmelerin basınç grafikleri yer almaktadır ve dağılımlarda belirgin bir değişiklik görülmektedir.

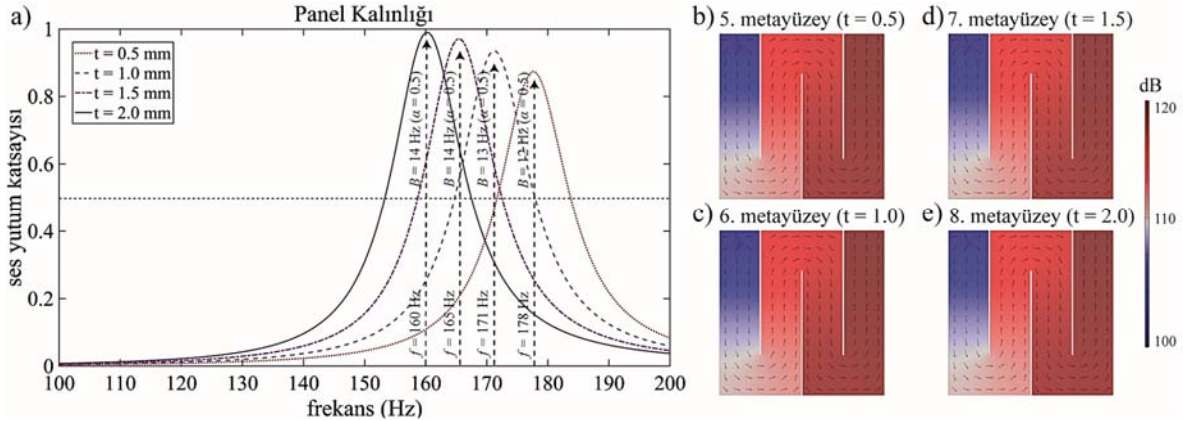
4.4. Kanal Derinliğinin Ses Yutum Katsayısına Etkileri
(Effects of Channel Depth on Sound Absorption Coefficient)

Kanal derinliğinin ses yutumuna etkisi Şekil 5a’da gösterilmiştir. Rezonans frekansları 13., 14., 15. ve 16. Metayüzey tasarımları için sırasıyla 160 Hz, 155 Hz, 150 Hz ve 146 Hz olmuştur. Bu değişiklikte gerçekleştirilen 2 mm’lik artışlar yutum genliğini sırasıyla 0,99, 0,98, 0,97 ve 0,97 olarak azaltmıştır. Tüm metayüzeylerin bant genişliği 14 Hz olmuş ve değişiklik gözlenmemiştir. Şekil 5b, Şekil 5c, Şekil 5d ve Şekil 5e’de yer alan basınç grafiklerinde görüleceği üzere değişken, ses yayılımında farklılık yaratmamıştır.

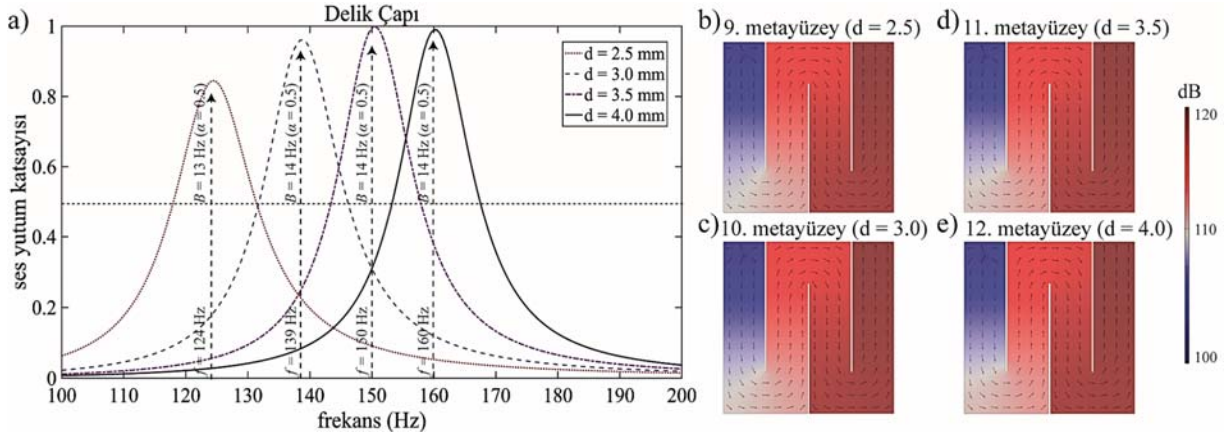
Parametrelerde gerçekleştirilen değişikliklerle elde edilen 16 adet metayüzey tasarımının (MT) akustik performansı Tablo 3’te verilmiştir. Analizler sonucunda, 11. metayüzey, tasarımlar arasında en düşük dalga boyu altı kalınlığına sahiptir. Diğer bir deyişle 19 mm toplam yapı kalınlığı ile 2,29 metre uzunluğundaki 150 Hz’deki gelen ses dalgasının %99’unu yutmaktadır. Sunulan tasarımlar birim hücre ve dar frekans bandında çalışmaktadır. Geniş bantlı ses



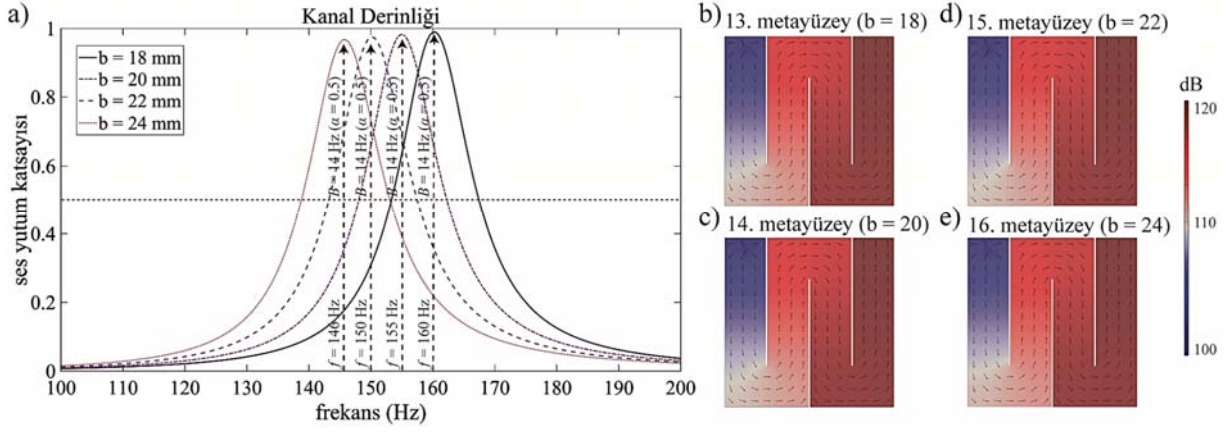
Şekil 2. (a) Delik sayısının ses yutum katsayısına etkileri. (b) 1., (c) 2., (d) 3. ve (e) 4. metayüzeylerde oluşan ses basınç dağılımı ((a) Effects of hole number on sound absorption coefficient. (b) 1., (c) 2., (d) 3. ve (e) 4. Sound pressure map of the metasurfaces)



Şekil 3. (a) Panel kalınlığının ses yutum katsayısına etkileri. (b) 5., (c) 6., (d) 7. ve (e) 8. metayüzeylerde oluşan ses basınç dağılımı ((a) Effects of panel thickness on sound absorption coefficient. (b) 5., (c) 6., (d) 7. ve (e) 8. Sound pressure map of the metasurfaces)



Şekil 4. (a) Delik çapının ses yutum katsayısına etkileri. (b) 9., (c) 10., (d) 11. ve (e) 12. metayüzeylerde oluşan ses basınç dağılımı
 ((a) Effects of hole diameter on sound absorption coefficient. (b) 9., (c) 10., (d) 11. ve (e) 12. Sound pressure map of the metasurfaces)



Şekil 5. (a) Kanal derinliğinin ses yutum katsayısına etkileri. (b) 13., (c) 14., (d) 15. ve (e) 16. metayüzeylerde oluşan ses basınç dağılımı
 ((a) Effects of channel depth on sound absorption coefficient. (b) 13., (c) 14., (d) 15. ve (e) 16. Sound pressure map of the metasurfaces)

yutumu için farklı özelliklere sahip birim hücrelerin bir araya getirilerek birleşik hücre oluşturulması sağlanabilir.

Tablo 3. Metayüzeylerin akustik performansı
 (Acoustic performances of the metasurfaces)

	f [Hz]	α	B [Hz]	dalga boyu kalınlığı
1. MT	160	0,99	14	($\approx \lambda/119$)
2. MT	189	0,92	15	($\approx \lambda/101$)
3. MT	201	0,87	15	($\approx \lambda/95$)
4. MT	206	0,84	15	($\approx \lambda/93$)
5. MT	178	0,88	12	($\approx \lambda/107$)
6. MT	171	0,94	13	($\approx \lambda/111$)
7. MT	165	0,97	14	($\approx \lambda/115$)
8. MT	160	0,99	14	($\approx \lambda/119$)
9. MT	124	0,84	13	($\approx \lambda/154$)
10. MT	139	0,94	14	($\approx \lambda/137$)
11. MT	150	0,99	14	($\approx \lambda/157$)
12. MT	160	0,98	14	($\approx \lambda/119$)
13. MT	160	0,99	14	($\approx \lambda/119$)
14. MT	155	0,98	14	($\approx \lambda/111$)
15. MT	150	0,97	14	($\approx \lambda/104$)
16. MT	146	0,97	14	($\approx \lambda/98$)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada ön yüzeyinde delikli panel ve arkasında hacimsel sarmallı kanallardan oluşan akustik metayüzeyin geometrik özelliklerinin ses yutum katsayısına etkileri incelenmiştir. Tasarım parametreleri olarak delik sayısı (n), panel kalınlığı (t), delik çapı (d) ve kanal derinliği (b) belirlenmiş ve her bir değişken için dört farklı değer verilmiştir. COMSOL Çoklu Fizik yazılımında gerçekleştirilen analizler sonucunda tanımlanan değişkenlerin hem rezonans frekansına hem de genliğine etki ettiği gösterilmiştir. Delik sayısının artırılması sonucunda metayüzeyin daha yüksek frekansta ve daha düşük genlikte ses yutumu gerçekleştirdiği görülmüştür. Paralel olarak, panel kalınlığının azaltılması ses yutum katsayısının daha düşük genlik ile yüksek frekanslara kaymasına yol açmıştır. Delik çapının azaltılması daha düşük frekanslarda düşük ses yutum katsayısı elde edilmesine sebep olmuştur. Kanal derinliğinin artırılması ise benzer şekilde daha düşük frekanslarda daha düşük ses yutum genliğinin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Teorik ve sayısal sonuçların uyumlu bir şekilde örtüştüğü görülmektedir. Çalışma kapsamında seçilen değişkenler üzerinde yapılan çeşitlenmeler ile yapının akustik performansı istenilen değerlere ulaştırılabilir. Metayüzeyler, geleneksel malzemelere kıyasla düşük frekanslarda istenilen frekans aralığında dalga boyu altı kalınlığında ses yutumu gerçekleştirebilir. Bu yapının, mühendislikte düşük frekanslı gürültü kontrolü

uygulamalarında geleneksel akustik malzemelere güçlü bir seçenek olacağı düşünülmektedir.

Teşekkürler (Acknowledgement)

Caner Baydur, Çin Devlet Bursu kapsamında yüksek lisans eğitimi süresince sağladıkları maddi destekleri için Çin Burs Konseyi'ne (CSC) ve 2021-2022 yılları arasında sağladığı burs desteği için Türk Fizik Vakfı'na teşekkür eder.

Kaynaklar (References)

- Liu C.R., Wu J.H., Yang Z., Ma F., Ultra-broadband acoustic absorption of a thin microperforated panel metamaterial with multi-order resonance, *Compos. Struct.*, 246, 112366, 2020.
- Chen S., Fan Y., Yang F., Jin Y., Fu Q., Zheng J., Zhang F., Engineering coiling-up space metasurfaces for broadband low-frequency acoustic absorption, *Phys. Status Solidi RRL*, 1900426, 2019.
- Selamet A., Lee I., Helmholtz resonator with extended neck, *J. Acoust. Soc. Am.*, 113 (4), 1975-1985, 2003.
- Griffin S., Lane S.A., Huybrechts S., Coupled helmholtz resonators for acoustic attenuation, *Journal of Vibration and Acoustics*, 123 (11), 2001.
- Xu M.B., Selamet A., Kim H., Dual helmholtz resonator, *Appl. Acoust.*, 71, 822–829, 2010.
- Mei J., Ma G., Yang M., Yang Z., Wen W., Sheng P., Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound, *Nat. Commun.*, [DOI: 10.1038/ncomms1758](https://doi.org/10.1038/ncomms1758), 2012.
- Ma G., Yang M., Xiao S., Yang Z., Sheng P., Acoustic metasurface with hybrid resonances, *Nat. Mater.*, 13, 873-878, 2014.
- Fu C., Zhang X., Yang M., Xiao S., Yang Z., Hybrid membrane resonators for multiple frequency asymmetric absorption and reflection in large waveguide, *Appl. Phys. Lett.* 110, 021901, 2017.
- Chen Y., Huang G., Zhou X., Hu G., Sun, C.T., Analytical coupled vibroacoustic modeling of membrane-type acoustic metamaterials: Plate model, *J. Acoust. Soc. Am.*, 136 (6), 2926-2934, 2014.
- Xing T., Gai X., Zhao J., Li X., Cai Z., Guan X., Wang F., Low frequency sound absorption of adjustable membrane-type acoustic metamaterials, *Appl. Acoust.*, 188, 108586, 2022.
- Ang L.Y.L., Koh Y.K., Lee H.P., Plate-type acoustic metamaterials: experimental evaluation of a modular large-scale design for low-frequency noise control, *Acoustics*, 1, 354–368, 2019.
- Maa D.Y., Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions, *Scientia Sinica*, 18 (1), 1975.
- Maa D.Y., Design of microperforated panel constructions, *Acta Acustica*, 13 (3), 1988.
- Maa D.Y., Potential of microperforated panel absorbers, *J. Acoust. Soc. Am.*, 104 (5), 1998.
- Cobo P., Colina C., Roibás-Millán E., Chimenó M., Simón F., A wideband triple-layer microperforated panel sound absorber, *Compos. Struct.*, 226, 111226, 2019.
- Wang C., Huang L., On the acoustic properties of parallel arrangement of multiple micro-perforated panel absorbers with different cavity depths, *J. Acoust. Soc. Am.*, 130 (1), 208-118, 2011.
- Stinson M.R., The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-sectional shape, *J. Acoust. Soc. Am.*, 89 (2), 550-558, 1991.
- Sakagami K., Nakamori T., Morimoto M., Yairi M., Double-leaf microperforated panel space absorbers: A revised theory and detailed analysis, *Appl. Acoust.*, 70, 703–709, 2009.
- Mosa A.I., Putra A., Ramlan R., Prasetyo I., Esraa A.A., Theoretical model of absorption coefficient of an inhomogeneous MPP absorber with multi-cavity depths, *Appl. Acoust.*, 146, 409–419, 2019.
- Li X., Wu Q., Kang L., and Liu B., Design of multiple parallel-arranged perforated panel absorbers for low frequency sound absorption, *Materials*, 12, 2099, 2019.
- Tang Y., Ren S., Meng H., Xin F., Huang L., Chen T., Zhang C., Lu T.J., Hybrid acoustic metamaterial as super absorber for broadband low-frequency sound, *Sci. Rep.*, 7:43340, DOI: 10.1038/srep43340.
- Wu P., Mu Q., Wu X., Wang L., Li X., Zhou Y., Wang S., Huang Y., Wen W., Acoustic absorbers at low frequency based on split-tube metamaterials, *Phys. Rev. A*, 383, 2361–2366, 2019.
- Peng X., Ji J., Jing Y., Composite honeycomb metasurface panel for broadband sound absorption, *J. Acoust. Soc. Am.*, 144, EL255-EL261, 2018.
- Zhang C., Hu X., Three-dimensional single-port labyrinthine acoustic metamaterial: perfect absorption with large bandwidth and tunability, *Phys. Rev. Applied*, 6, 064025, 2016.
- Shao C., Long H., Cheng Y., Liu X., Low-frequency perfect sound absorption achieved by a modulus-near-zero metamaterial, *Sci. Rep.*, 9:13482, 2019.
- Tang Y., Xin F., Huang L., Lu T., Deep subwavelength acoustic metamaterial for low-frequency sound absorption, *EPL*, 118, 44002, 2017.
- Yang M., Chen S., Fu C., Sheng P., Optimal sound-absorbing structures, *Mater. Horiz.*, 4, 673-680, DOI: 10.1039/C7MH00129K, 2017.
- Zhou Z., Huang S., Li D., Zhu J., Li Y., Broadband impedance modulation via non-local acoustic metamaterials, *Natl. Sci. Rev.* <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab171>, 2021.
- Duan M., Yu C., Xin F., Lu T.J., Tunable underwater acoustic metamaterials via quasi-Helmholtz resonance: From low-frequency to ultra-broadband *Appl. Phys. Lett.*, 118, 071904, 2021.
- Xu Z.X., Meng H.Y., Chen A., Yang J., Liang B., Cheng J.C., Tunable low-frequency and broadband acoustic metamaterial absorber, *J. Appl. Phys.*, 129, 094502, 2021.
- Sui N., Yan X., Huang T.Y., Xu J., Yuan F.G. Jing Y., A lightweight yet sound-proof honeycomb acoustic metamaterial, *Appl. Phys. Lett.*, 106, 171905, 2015.
- Wang X., Luo X., Zhao H., Huang Z., Acoustic perfect absorption and broadband insulation achieved by double-zero metamaterials, *Appl. Phys. Lett.*, 112, 021901, 2018.
- Yang Z., Dai H.M., Chan N.H., Ma G.C., Sheng P., Acoustic metamaterial panels for sound attenuation in the 50–1000 Hz regime, *Appl. Phys. Lett.*, 96, 041906, 2010.
- Melnikov A., Maeder M., Friedrich N., Acoustic metamaterial capsule for reduction of stage machinery noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, 147, 1491, 2020.
- Jung J.W., Kim J.E., Lee J.W., Acoustic metamaterial panel for both fluid passage and broadband soundproofing in the audible frequency range, *Appl. Phys. Lett.*, 112, 041903, 2018.
- Kim S.H., Lee S.H., Air transparent soundproof window, *AIP Adv.*, 4, 117123, 2014.
- Shen C., Xie Y., Li J., Cummer S.A., Jing Y., Acoustic metacages for sound shielding with steady air flow, *J. Appl. Phys.*, 123, 124501, 2018.
- Ge Y., Sun H.-X., Yuan S.-Q., Lai Y., Broadband unidirectional and omnidirectional bidirectional acoustic insulation through an open window structure with a metasurface of ultrathin hooklike meta-atoms, *Appl. Phys. Lett.*, 112, 243502, 2018.
- Kumar S., Bhushan P., Prakash O., Bhattacharya S., Double negative acoustic metastructure for attenuation of acoustic emissions, *Appl. Phys. Lett.*, 112, 101905, 2018.
- Zhu Y., Fan X., Liang B., Cheng J., Jing Y., Ultrathin acoustic metasurface-based Schroeder diffuser, *Phys. Rev. B*, 7, 021034, 2017.
- Jiménez N., Groby J.-P., García V.R., Spiral sound-diffusing metasurfaces based on holographic vortices, *Sci. Rep.*, 11, 10217, 2021.
- Jiménez N., CoX T.J., García V.R., Groby J.P., Metadiffusers: Deep-subwavelength sound diffusers, *Sci. Rep.*, 7, 5389, 2017.
- Li Y., Liang B., Gu Z.M., Zou X.Y., Cheng J.C., Reflected wavefront manipulation based on ultrathin planar acoustic metasurfaces, *Sci. Rep.*, 3, 2546, DOI: 10.1038/srep02546, 2013.
- Xie Y., Wang W., Chen H., Konneker A., Popa B.I., Cummer S.A., Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface, *Nat. Commun.*, 5, 5553, DOI: 10.1038/ncomms6553, 2014.
- Zhang S., Xia C., Fang N., Broadband acoustic cloak for ultrasound waves, *Phys. Rev. Lett.*, 106, 024301, 2011.
- Zigoneanu L., Popa B.I., Cummer S.A., Three-dimensional broadband omnidirectional acoustic ground cloak, *Nat. Mater.*, 13, 352-355, DOI: 10.1038/NMAT3901, 2014.
- Popa B.I., Zigoneanu L., Cummer S.A., Experimental acoustic ground cloak in air, *Phys. Rev. Lett.*, 106, 253901, DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.253901, 2011.
- Ghaffarivardavagh R., Nikolajczyk J., Anderson S., Zhang X., Ultra-compact acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference, *Phys. Rev. B*, 99, 024302, DOI: 10.1103/PhysRevB.99.024302, 2019.

49. Sun M., Fang X., Mao D., Wang X., Li Y., Broadband acoustic ventilation barriers, *Phys. Rev. Applied* 13, 044028, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.044028, 2020.
50. Dong R., Mao D., Wang X., Li Y., Ultrabroadband acoustic ventilation barriers via hybrid-functional metasurfaces, *Phys. Rev. Applied*, 15, 024044, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.024044, 2021.
51. Xiang X., Wu X., Li X., Wu P., He H., Mu Q., Wang S., Huang Y., Wen W., Ultra-open ventilated metamaterial absorbers for sound-silencing applications in environment with free air flows, *Extreme Mech. Lett.*, 39, 100786, 2020.
52. Xiang X., Tian H., Huang Y., Wu X., Wen W., Manually tunable ventilated metamaterial absorbers, *Appl. Phys. Lett.*, 118, 053504, <https://doi.org/10.1063/5.0037547>, 2021.
53. Palma G., Mao H., Burghignoli L., Göransson P., Iemma U., Acoustic metamaterials in aeronautics, *Appl. Sci.*, 8, 971, DOI:10.3390/app8060971, 2018.
54. Assouar B., Liang B., Wu Y., Li Y., Cheng J-C., Acoustic metasurfaces, *Nat. Rev. Mater.*, 3, 460-472, [http:// dx.DOI.org/10.1038/s41578-018-0061-4](http://dx.doi.org/10.1038/s41578-018-0061-4).
55. Wu F., Xiao Y., Yu D., Zhao H., Wang Y., Wen J., Low-frequency sound absorption of hybrid absorber based on micro-perforated panel and coiled-up channels, *Appl. Phys. Lett.* 114 (15), 151901, 2019.
56. Wang Y., Zhao H., Yang H., Zhong J., Wen J., A space-coiled acoustic metamaterial with tunable low-frequency absorption, *EPL*, 120, 54001, 2017.
57. Liu C.R., Wu J.H., Chen X., Ma F., A thin low-frequency broadband metasurface with multi-order sound absorption, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 52, 105302, 2019.
58. Zhang C., Hu X., Three-dimensional single-port labyrinthine acoustic metamaterial: Perfect absorption with large bandwidth and tunability, *Phys. Rev. Applied*, 6, 064025, 2016.
59. Liu Y., Ren S., Sun W., Lei Y., Wang H., Zeng X., Broadband low-frequency sound absorbing metastructures based on impedance matching coiled-up cavity, *Appl. Phys. Lett.*, 119, 101901, 2021.
60. Liu C.R., Wu J.H., Yang Z., Ma F., Ultra-broadband acoustic absorption of a thin microporated panel T metamaterial with multi-order resonance, *Compos. Struct.*, 246, 112366, 2020.
61. Liang Q., Lv P., He J., Wu Y., Ma F., Chen T., A controllable low-frequency broadband sound absorbing metasurface, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 54, 355109, 2021.
62. Almeida G.N., Erasmo F. Vergara, Leandro R. Barbosa, Ricardo Brum, Low-frequency sound absorption of a metamaterial with symmetrical-coiled-up spaces, *Appl. Acoust.*, 172, 107593, 2021.
63. Chen W., Wu F., Wen J., Ju Z., Yao L., Zhao H., Wang Y., Xiao Y., Low-frequency sound absorber based on micro-slit entrance and space-coiling channels, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 59 045503, 2020.
64. Huang S., Fang X., Wang X., Assouar B., Cheng Q., Li Y., Acoustic perfect absorbers via spiral metasurfaces with embedded apertures, *Appl. Phys. Lett.*, 113, 23350, <https://doi.org/10.1063/1.5063289>, 2018.
65. Kong D., Huang S., Li D., Cai C., Zhou Z., Liu B., Cao G., Chen X., Li Y., Liu S., Low-frequency multi-order acoustic absorber based on spiral metasurface, *J. Acoust. Soc. Am.*, 150, (12), <https://doi.org/10.1121/10.0005134>, 2021.
66. Donda K., Zhu Y., Fan S.W., Cao L., Li Y., Assouar B., Extreme low-frequency ultrathin acoustic absorbing metasurface, *Appl. Phys. Lett.*, 115, 173506, <https://doi.org/10.1063/1.5122704>, 2019.
67. Li D., Huang S., Mo F., Wang X., Li Y., Low-frequency broadband absorbers based on coupling micro-perforated panel and space-curling chamber, *Chin. Sci. Bull.*, 65, 1420-1427, <https://doi.org/10.1360/TB-2019-0703>, 2020.
68. Donda K., Zhu Y., Merkel A., Fan S.W., Cao L., Wan S. Assouar B., Ultrathin acoustic absorbing metasurface based on deep learning approach, *Smart Mater. Struct.*, 30 (8), 085003, 2021.
69. Atmaca M., Mazlumcu B., Numerical and experimental investigation of flow properties of generator cabinets, *Journal of the Faculty on Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (2), 807-820, 2023.
70. Li Yong, Assouar B., Acoustic metasurface-based perfect absorber with deep subwavelength thickness, *Appl. Phys. Lett.*, 108 (6), 063502, 2016.
71. Huang, S., Zhou, Z., Li, D., Liu, T., Wang, X., Zhu, J., & Li, Y., Compact broadband acoustic sink with coherently coupled weak resonances. *Sci. Bull.*, 65 (5), 373-379, 2020.

