

MİMARİ UYGULAMALARDA SES KONTROLÜ İÇİN 3D LABİRENT TİPİ AKUSTİK META MALZEME ÖNERİLERİ

Beyza Yazıcı¹, Zühre Sü Gül²

¹Bilkent Üniversitesi, Çankaya, Ankara, Türkiye
Tel: 312 290 34 63, e-posta: beyza.yazici@bilkent.edu.tr

²Bilkent Üniversitesi, Çankaya, Ankara, Türkiye
Tel: 312 290 26 41 e-posta: zuhre@bilkent.edu.tr

ÖZET

Bu araştırmanın amacı, mimari uygulamalarda ses kontrolü için “hacim sarmalı” prensibinde alternatif 3D labirent tipi akustik meta malzemeler geliştirmektir. Çalışmada ses yutma ve ses iletimi kontrolünde ekstrem özellikleri nedeniyle akustik meta malzemelerin (AMM), yapı ve oda akustiği uygulamalarındaki potansiyeli araştırılmaktadır. Etkin akustik performansları yanı sıra geleneksel akustik malzemelere kıyasla tozmayan, ince kesit kalınlıklarında ve kullanılan malzemeye bağlı olarak hafif alternatiflerin üretilebilmesi AMM’lerin avantajları arasında sıralanabilir. Bu çalışmada yer verilen AMM’lerin tasarım fikirleri, altın oran (GR) ve ağ yapılı labirent (WL) gibi doğada var olan sistemlerden gelmektedir. İlk adım olarak, tüm tasarım alternatifleri 3D olarak modellenir, ardından bir 3D CNC yazıcı tarafından basılmıştır. Son olarak, geliştirilen ürünlerin akustik özelliklerini gözlemlemek için empedans tüpü testleri yürütülmüştür. Benzer içerikte malzemenin standart çözümlerle kıyaslaması son bölümde ele alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akustik Meta Malzeme, Ses Yutma, Ses İletimi, 3D CNC yazıcı

PROPOSALS OF 3D LABYRINTHINE TYPE ACOUSTICAL META-MATERIALS FOR SOUND CONTROL IN ARCHITECTURE

ABSTRACT

The aim of this research is to develop a 3D labyrinthine type Acoustic Metamaterial(AMM) within the concept of ‘Space-Coiling’ for sound control in architectural applications. Acoustical Meta-materials (AMM) have a great potential on their application for building and room acoustics due to their extreme properties in sound absorption and transmission. They have many advantages than traditional acoustical materials. For example, thinner sections, they are healthier in terms of no dust emission, can be thinner in section and lighter depending upon the base material. In this study, AMMs are inspired from nature forms and ratios as of golden ratio (GR) and web labyrinthine (WL). Firstly, all design alternatives are modeled in architectural 3D software, then printed out in 3D CNC printer, finally, AMMs are tested in impedance tube. Alternatives with similar base material contents are compared with standard acoustic solutions.

Keywords: Acoustical Metamaterials, Sound Absorption, Transmission, 3D CNC Printing

1. GİRİŞ

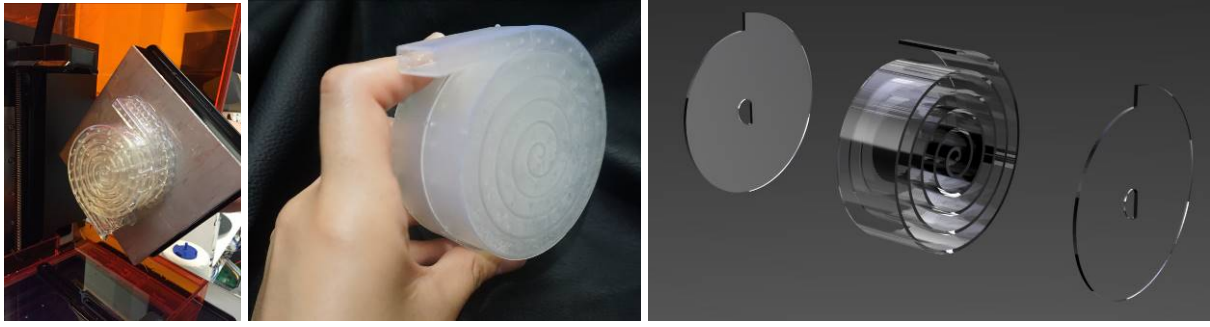
Meta malzemeler (MM), temel olarak, genel özellikleri sebebiyle oldukça farklı bileşenleri olan ve doğada henüz keşfedilmemiş kompozit, imal edilmiş malzemeler olarak tanımlanırlar [1-2]. Akustik meta malzemeler (AMM) ayrıca "... gazlarda, sıvılarda ve katılarda oluşabileceği için sesi sonik, infrasonik veya ultrasonik dalga formlarında kontrol etmek, yönlendirmek ve manipüle etmek için tasarlanmış yapay olarak üretilmiş malzemeler" olarak da nitelendirilir [1]. Meta malzemelerin (AMM) çeşitli kullanım alanlarından bazıları şu şekildedir: alt dalga boyları görüntüleme, akustik gizleme, iletim veya yansıma kontrolü ve yüzey dalgası manipülasyonu gibi [3]. Akustik meta malzemelerde negatif kırılma indisine ulaşmak için malzemenin yığınsal yoğunluğu (bulk density) ve hacimsel modülü/sıkışmazlık (bulk modulus) esas olarak dikkate alınan iki önemli parametredir [4-6]. Bu iki parametrenin değerlerinin her ikisi de negatif olursa, ses dalgalarının hızının negatif olacağı tahmin edilir [7]. Sistemin yapısı ve geometrisi uygun olarak biçimlendirildiğinde, aşırı/ekstrem özellikler elde edilebilir [8]. Bu nedenle, geliştirilen AMM'lerde hem malzeme özellikleri hem de malzemenin geometrik özellikleri temel olarak vurgulanmıştır. Özellikle, labirent tipi akustik malzemeler, belirli kombinasyonlarda geniş bant gürültü azalımı sağlayabilir ve karakteristik yapısal özellikleri nedeniyle oldukça yüksek etkili kırılma indeksi değerleri gösterebilir [9-10]. AMM'ler için zig-zag hareketi, saat yönü ve tersi yönü hareketin ses dalgalarının izlediği yolu manipüle ettiği gözlemlenmiştir [9]. Bu tip yapılara, labirent yapısı olarak da adlandırılan "hacim sarmalı" adı verilir. AMM'lerin boşluklu ve kıvrımlı yapısı, ses dalgalarının yalnızca belirli aralıklardan yapıya yayılmasını sağlar. Yapısal olarak iletildiğinde ses dalgalarının enerjisi belirli frekanslarda zayıflar [3]. Bu araştırmada, AMM önerileri geliştirilirken yapı ve geometrinin yanı sıra, üretimde kullanılan malzeme özellikleri de dikkate alınmıştır. Sarmal AMM araştırmalarının örnek üretimlerinde epoksi reçine kullanılan baz malzemelerden biridir [11], Bu malzeme şeffaf veya yarı şeffaf üretilir, bu nedenle belirli etkiler için, özellikle görsel ve dekoratif anlamda, ışıkla birlikte kullanılabilirler. Öte yandan, iç mekân hava kalitesi için tehlikeli olabilecek herhangi bir parçacık yaymaz. Tüm bu sebeplerden ötürü, reçineden üretilen AMM'ler, mimaride uygulanan geleneksel akustik malzemelere nispeten sürdürülebilir ürünlerdir. AMM numunelerinin tasarım, üretim ve test işlemlerinin detayları aşağıdaki bölümlerde sunulmaktadır.

2. MALZEMELER VE METODLAR

2.1. Malzemeler

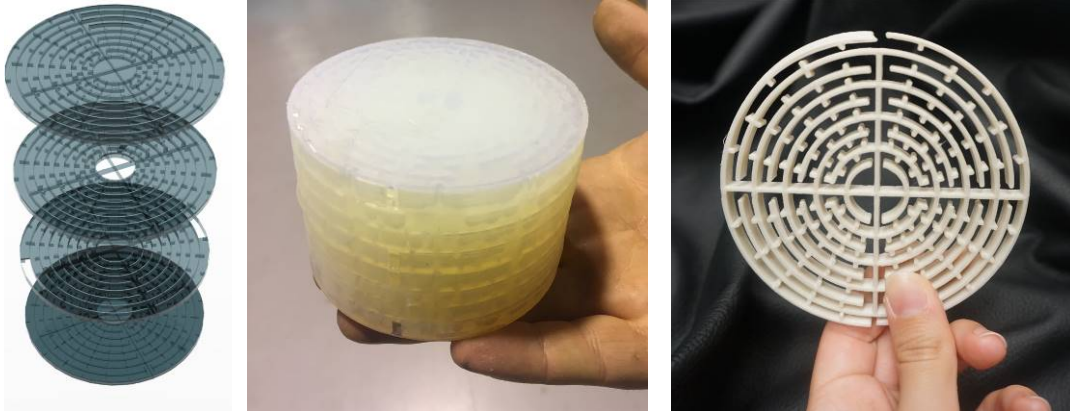
Tasarım sürecinde, önceki araştırmalara dayanarak [9-12], akustik bir meta malzemenin mantığında olası yapılar geliştirilir. İlk aşama ses dalgasının yolunu değiştirmek üzere boşluk ve dolulukların tasarlanmasıdır. Ana amaç, ses enerjisini sönümleme veya bir ortamdan diğer ortama geçişteki iletim kaybını arttırmaktır.

Şekil 1'de gösterilen yapı, altın oran (GR) esas alınarak tasarlanmış akustik meta malzemelerin ilk örneğidir. 180 derece çevrilmiş, her iki yüzünde de birer açıklık olan iki üniteden oluşmaktadır. Bu üniteler birbirlerine sadece merkezlerinden bağlıdır. Dolayısıyla, ön yüzün açık olan kısmından başlayan sarmal boşluk, diğer ünitenin sarmalına merkezden bağlanmakta ve tam ters yönde birimin diğer yüzüne açılmaktadır. GR ünite numunesinin yüksekliği 8 cm, çapı 10 cm'dir (bkz. Şekil 1).



Şekil 1. Altın Oran (GR) 3D CNC’de yazma işlemi sonrası (solda), gerçek uygulamada yapısı korunacak iç kısım (ortada), 3D model-tek birimin patlamış hali (sağda)

İkinci tasarım önerisi, temelde Altın Oran ile aynı mantığa sahip ağ yapılı labirenttir (WL). Malzemenin karşılıklı iki tarafında açıklıklar bulunmaktadır. GR’den farklı olarak katmanlı bir yapıya sahiptir. Toplamda üst (birinci) ve alt (dördüncü) katmanlara sahip dört tür katman vardır. İkinci katmanın, açıklığı ortada, üçüncüsünün ise açıklıkları yanlardadır (bkz. Şekil 2). Yanlardaki ve yapının ortasındaki açıklıklar nedeniyle, bir katman bu açıklıklar boyunca bir başka üst ve alt katmanlara bağlanır. Aynı türdeki iki katmanın, katmanlar birleştirildiğinde üst üste gelmemesi; her katmanın öncekinden ve sonrakinden farklı olması gerekir. Katman tekrarı sayısında bir sınırlama yoktur. Uygulanacak yerin ihtiyacına ve genişliğine bağlıdır. WL numunesinin yüksekliği 8 cm ve çapı 10 cm’dir; ancak katman sayısına bağlı olarak yüksekliği değişebilir/ayarlanabilir (bkz. Şekil 2).



Şekil 2. Ağ yapılı labirent (WL) numunesinin patlatılmış katmanlarını gösteren 3D modeli (solda), 3D CNC’den yazdırılmış son hali-8 katman içerir (ortada), 3D CNC’den yazdırılmış, iç katmanın genel yapısını anlatan bir parça (sağda)

Her iki AMM seçeneğinde, iki yüzeydeki açıklıkların aktif olması sebebiyle kompozisyonunun ses geçiş kaybı için kullanılması daha olasıdır. Ünitelerin arka tarafındaki açıklıklar kapalı olması durumunda, AMM’ler Helmholtz Rezonatör’lere benzer şekilde çalışır [3 ve 13].

2.2. Yöntemler

2.2.1. 3D Yazıcı ile Üretim

Akustik ve estetik kaygılara ek olarak, üretim süreci tasarlanan ürünlerin hayata geçirilmesi için önemli bir aşamadır. Uzaysal boşlukları çeşitli labirent ve spiral formlarıyla sarmak, üretim açısından zorlu bir durumdur. Şu anda tasarlanan ünitelerin basılması önemli bir

zaman almaktadır (örnek başına 12 saat), ancak bu teknolojinin ileride daha da güçleneceği, böylece geliştirilen AMM örneklerinin üretiminin çok daha kolay olacağı varsayılmaktadır. Günümüz teknolojisinde, 3D CNC yazıcılar küçük ölçekli geometrileri üretmek için kullanılsa da hassas ölçülerde yeteri kadar verimlilik sağlayamamaktadır. Bu yüzden basım aşamasında bazı başarısız örnekler elde edilmiştir. AMM örnekleri, 1200 Hz'nin altındaki frekans aralığı için akustik özellikleri ölçmeye uygun, 10 cm çapında empedans tüpüne uyacak şekilde üretilmiştir. Bu yüzden örnekler yazıcıdan çıktıktan sonra etrafı, 8 cm yüksekliği ve 10 cm çapı olan bir silindir şeklinde epoksi ile kaplanmıştır. Kalıplara dökülen epoksinin kuruması yaklaşık olarak 20 saat almıştır. Malzeme dikey şekilde koyulduğunda 8 cm yüksekliği ifade etmektedir; ancak uygulamada Şekil 3'te de görüldüğü gibi yatay olarak yerleştirileceğinden, 8 cm yükseklik pratikte kalınlığı ifade edecektir.



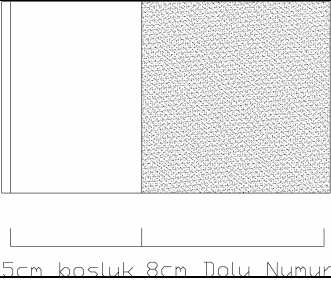
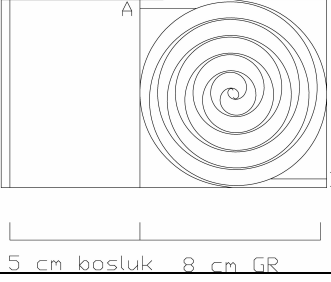
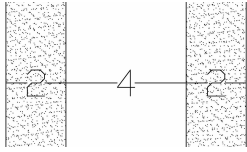
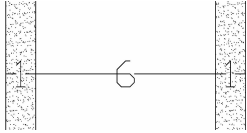
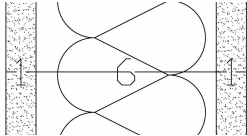
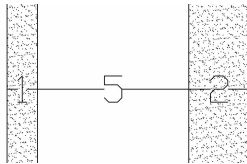
Şekil 3. GR ve WL numuneleri empedans tüpündeki ölçümler için hazır (solda), etrafına epoksi döküldükten sonra kalıpta kuruması beklenen WL prototipi (sağda)

2.2.2. Empedans Tüpü Ölçümleri

Ölçümler, S.C.S. 'Kundt Tüpü' konfigürasyonu, ISO 10534-2: 1998'e göre, ses yutma katsayısı (α) ve akustik empedans ölçümleri (2 mikrofon - transfer fonksiyonu yöntemi) için kurulan temel, standart sistemi temsil eder. 'TL tüpler' konfigürasyonu, ses geçiş kaybı ölçümlerini sağlayan (4 mikrofon yöntemi) tüp düzenleme şemasını ifade etmektedir. Ses yutma ve geçiş kaybı ölçümlerinin oluşturduğu çift tüp küçük ve büyük tüpleri içerir. Bu çalışmada AMM numunelerinin düşük frekans aralığındaki (50Hz - 1200Hz) ölçümleri için Ø100mm tüplerden oluşan büyük tüp kullanılmıştır. Yüksek frekans aralığında ses dalgalarıyla çalışmak nispeten daha kolay olduğu için, bu araştırma temel olarak düşük frekanslardaki ses aktivitelerine odaklanır.

Her ürün tekrarlanabilirliği ve ölçümlerin güvenilirliğini kontrol etmek için yaklaşık 10 kez ölçülmüştür. Ses geçiş/iletim kaybı tahminleri için test edilen numuneler WL, GR ve karşılaştırmalı değerlendirmeler için 8 cm kalınlığında reçine dolu numunedir. Ses yutma analizinde, bir taraf kapalı ve iki taraf açık ünite arasındaki farkı kontrol etmek için daha fazla konfigürasyon test edilmiştir. Bu analizler için oluşturulan kompozisyonlar, WL 2 tarafı açık ve 1 taraf kapalı, GR 2 tarafı açık ve 1 taraf kapalıdır. Ayrıca, geliştirilen birimlerin bina sistemlerinde kullanılacağı kabul edildiğinden, AMM numunelerinin arkasında boşluk olması ve olmaması arasındaki fark anlamlıdır. Bu nedenle 5 cm aralıklı ve boşluksuz WL, 5 cm boşluklu ve boşluksuz GR, 5 cm 5 cm boşluklu ve boşluksuz 8 cm dolu model ses yutma katsayısı (α) ölçümleriyle test edilmiştir (Tablo 1).

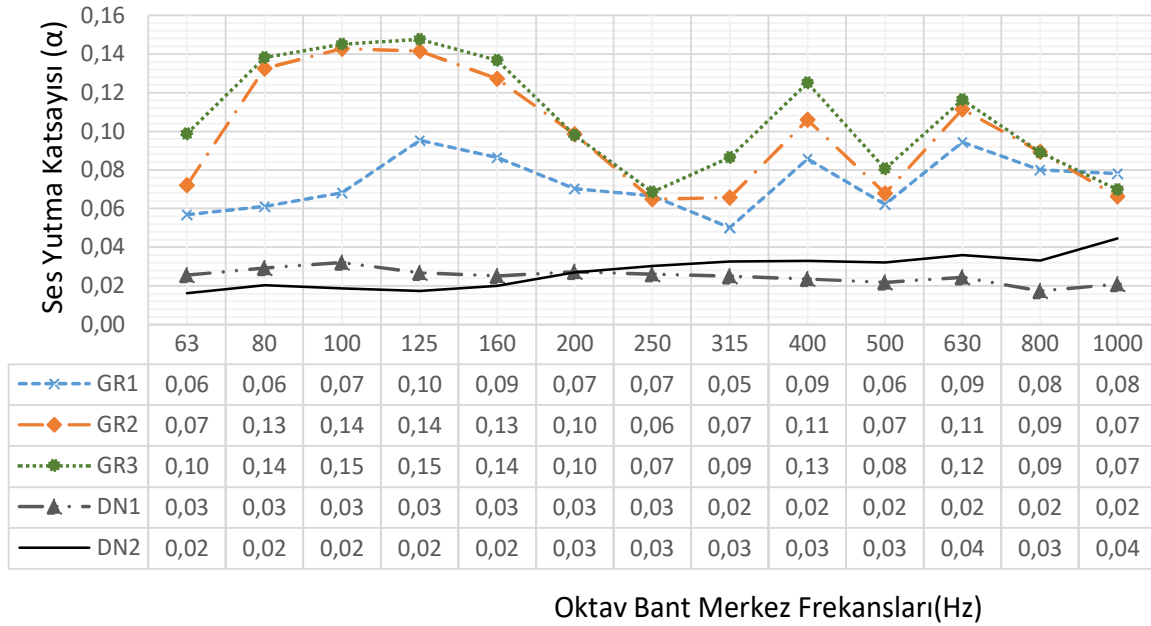
Tablo 1. Test edilen konfigürasyonların kod ve açıklaması

TÜP		DN1	8 cm (reçine) dolu numune + 5 cm boşluk
		DN2	8cm (reçine) dolu numune boşluksuz
		DN3	8 cm (reçine) dolu numune, ses geçiş kaybı ölçümünde kullanılan varyasyon
TÜP		GR1	8 cm GR, iki taraf açık + 5 cm boşluk, A ve B açık
		GR2	8 cm GR, bir taraf kapalı + 5 cm boşluk, A kapalı ve B açık
		GR3	8 cm GR, iki taraf açık, boşluksuz
		A1	8 cm (reçine) dolu model kıyaslaması
		A2	4 cm (reçine) dolu model kıyaslaması
		B1	2cm reçine panel-4cm boşluk-2cm reçine panel
		B2	1cm reçine panel-6cm boşluk-1cm reçine panel
		B3	1cm reçine panel-6cm taş yünü (48kg/m3) -1cm reçine panel
		B4	1cm reçine panel-5cm boşluk-2cm reçine panel

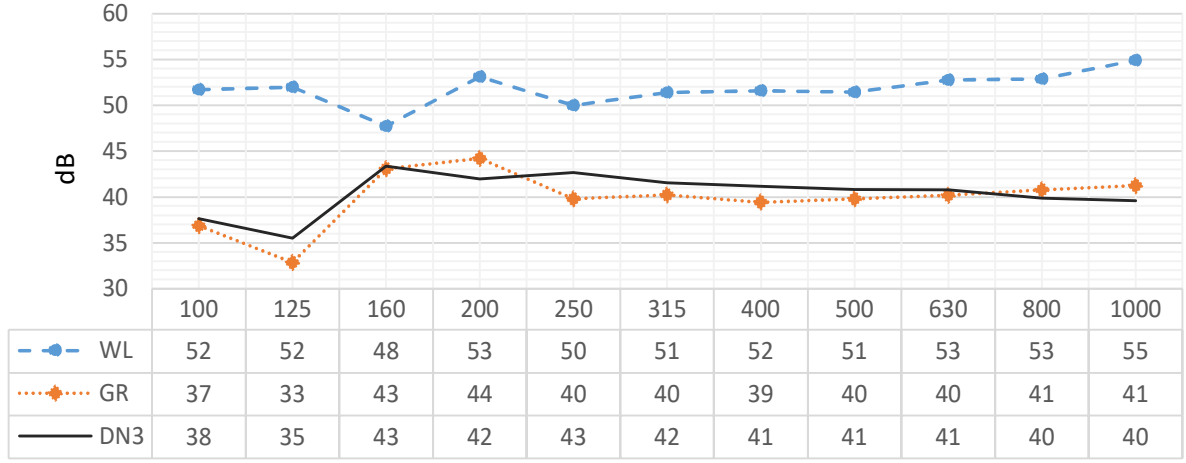
3. ÖLÇÜM VE ANALİZ SONUÇLARI

3.1. Tüp Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde GR ve WL örneklerinin ses yutma katsayısı (α) ölçümleri için tüpteki yerleşimi ve tanımları, ilk olarak Tablo 1'de listelenen farklı konfigürasyonların karşılaştırılmasıyla sunulmuştur. Ses yutma performansı ses yutma katsayısı (α) cinsinden frekansa bağlı olarak ifade edilmektedir. Şekil 4'te, GR numunesinin ses yutmadaki etkinliği değerlendirilmektedir. Her iki seçeneğin de DN1 ve DN2'den daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmüştür. Ses yutma katsayısı (α) değerleri, dolu numunede 0.02 ile 0.04 arasında değişir ve GR numunesinde 0.05 ile 0.15 arasında değişir. GR kompozisyonları kendi aralarında yorumlandığında, ses yutma davranışında GR1 örneği DN1'den daha iyi sonuç vermektedir ancak diğer GR konfigürasyonlarından en az verimli olandır. GR2, düşük frekanslarda 63 ve 200 Hz arasında daha yüksek ses yutma performansı gösterir. Genel olarak, dolu numuneye ve WL'ye kıyasla daha iyi ses yutma özelliği göstermektedir. GR3 ise en iyi genel ses yutma performansı sonuçlarını gösterir. Şekil 4'te de görüldüğü gibi, DN1-DN2 ile GR prototipi birbirlerinden iki ayrı grup oluşturacak değerlere sahiptir. Kesiştikleri herhangi bir nokta yoktur. Tüm WL seçenekleri dikkate alındığında ise, pratikte, ses yutumu açısından GR kadar iyi sonuçlar vermese de DN1 ve DN2'den daha iyi bir performans sergilemektedir.



Şekil 4. GR1, GR2, GR3, D1, DN2 empedans tüpü deney sonuçları, 1000 Hz'e kadar 1/3 oktav bantlarda ses yutma katsayıları



Oktav Bant Frekansları (Hz)

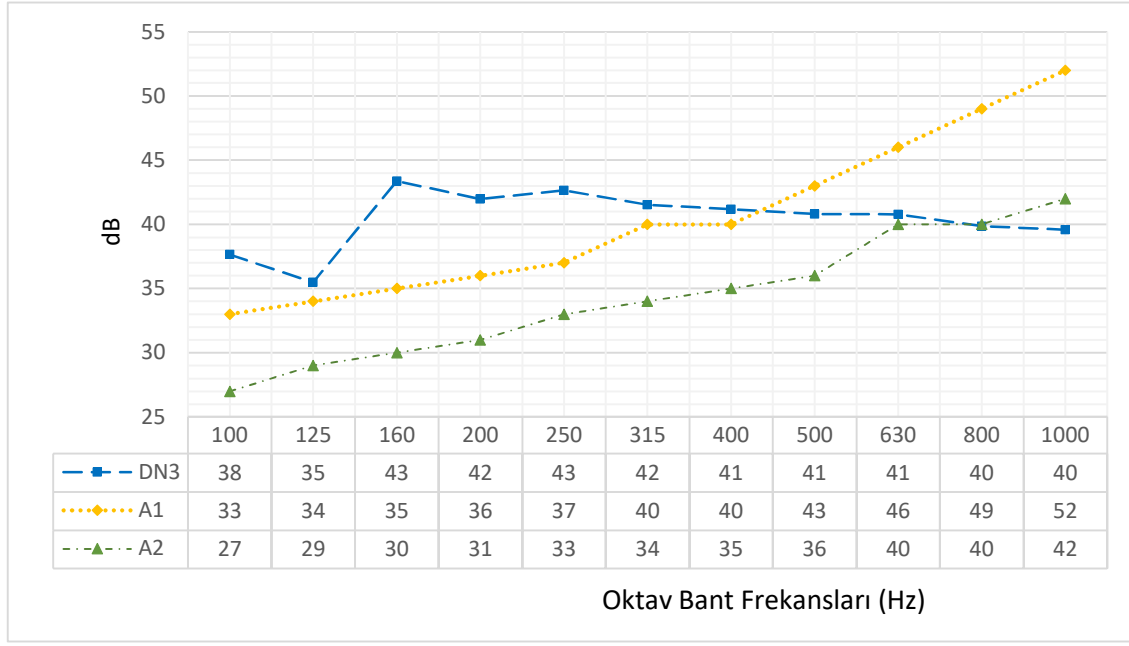
Şekil 5. WL, GR ve DN3 empedans tüpü deney sonuçları, 1000 Hz'e kadar 1/3 oktav bantlarda ses geçiş kaybı değerleri

Ses geçiş kaybı açısından, Şekil 5'te de görüldüğü gibi, GR'nin DN3'e kıyasla kayda değer bir farkı yoktur, neredeyse tüm frekanslarda aynı değerlere sahiptir. Ses geçiş kaybında GR ve DN3 değerleri ortalama 33 - 44 dB arasında değişmektedir. Öte yandan, WL örneği ses yutma performansı açısından kullanılabilir bir ürün değildir. Ses geçiş kaybı, diğer bir deyişle iki yüz arasında hedeflenen düşük frekanslarda ses yalıtımı amacıyla kullanılmalıdır. Uygulamada WL iki mekân arasında ayırıcı duvar şeklinde düşünülebilir. 1 kHz'in altındaki frekans aralığı için WL ses geçiş kaybı değerleri, DN3'e kıyasla önemli bir gelişme göstermektedir. Örneğin, DN3'ün değerleri 125 ve 160 Hz aralığında 35 ile 43 dB arasında değişirken, WL değerlerinin ses geçiş kaybı 48 ile 55 dB aralığına yükselmiştir. Aynı kalınlıktaki DN3'e kıyasla, WL numunesinin ses geçiş kaybı değerlerinde ortalama 12 dB artış vardır. Bu sonuçlar WL örneğinin mimaride gürültü kontrolü uygulamalarında potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle, birimler kafes benzeri bir yapıda iç bölme olarak çoklu yerleştirildiğinde, genel performans daha da yüksek olacaktır.

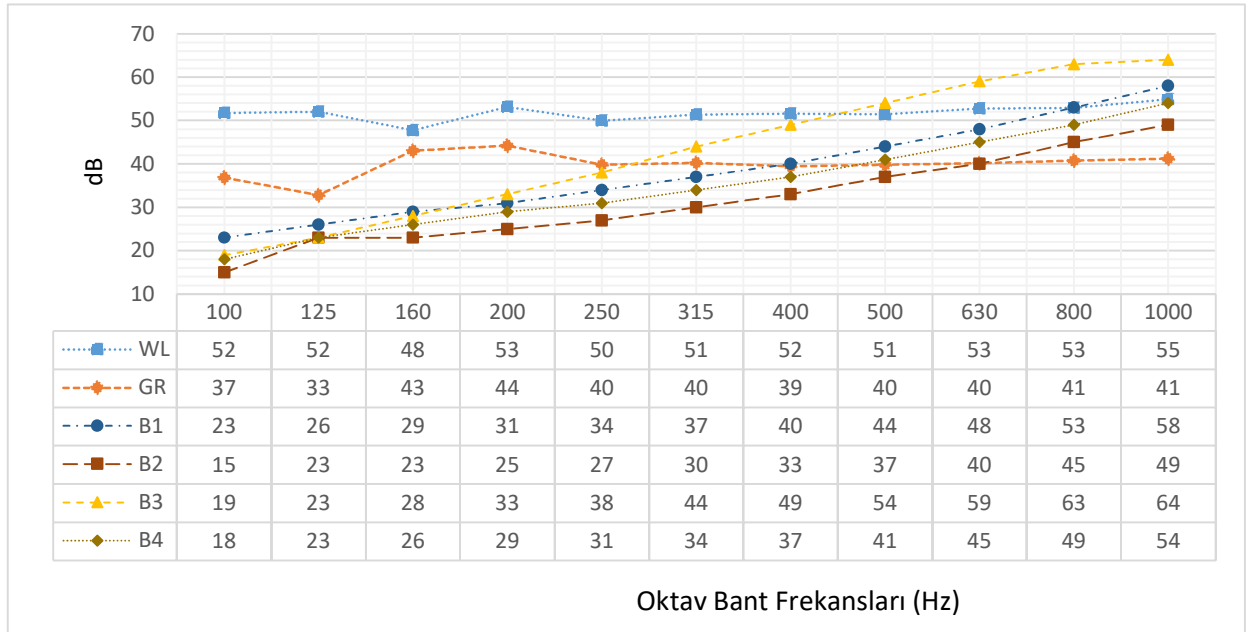
3.2. Kuramsal Ses Geçiş Kaybı Tahminleri Test Sonuçları

Insul 7.0.13 versiyon yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Kuramsal ses geçiş kaybı tahminleri iki sebeple yürütülmüştür. Birincisi, taş yünü gibi geleneksel olarak kullanılan malzemelere kıyasla lifli malzeme kullanılmadan elde edilen değerlerin etkinliğini ölçmektir. Diğer, daha ince kesitlerde oluşturulan bileşimlerin standart uygulamalara kıyasla nasıl çalışacağını gözlemlemektir.

Gerçekte deneyi yapılmış DN3 ile aynı özelliklere sahip malzeme kesiti ses geçiş kaybı kuramsal benzetimleri ile öncelikle karşılaştırılmıştır. Şekil 6'da gösterildiği üzere %10 seviyesinde yakın değerler elde edilmiştir. Bu doğrulamadan sonra epoksi reçine malzemesi gerçek uygulamalara örnek olabilecek standart kompozisyonlarda çeşitlendirilmiştir.



Şekil 6. DN3'ün ses geçiş kaybı sonuçları ile A1 ve A2 ses geçiş kaybı sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 7. WL ve GR örneklerinin ses geçiş kaybı sonuçları ile standart uygulama kompozisyonların karşılaştırılması. WL, GR, B1, B2, B3, B4

Test edilen / geliştirilen ürünlerden elde edilen empedans tüpü sonuçlarına ve standart uygulamalarla kıyaslamalarına Şekil 7'de yer verilmiştir. Şekilde yer alan örneklerin kesit açıklamaları Tablo 1'de yer almaktadır. Bu örneklerin her birinin toplam kalınlıkları AMM modellerinin kalınlığı ile aynı şekilde 8 cm'dir. Toplam kalınlık korunacak şekilde farklı varyasyonlar oluşturulup, kıyaslamaya başka örnekler de dahil edilebilir. Gerçekte yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara göre WL numunesi ses geçiş kaybında verimlilik gösterirken GR hemen hemen DN3 ile aynı sonucu göstermiştir. Şekil 7'de ise, her iki numunenin de

standart uygulamalardan daha iyi performans sergilediği aralıklar mevcuttur. 250 Hz'ye kadar GR numunesi, herhangi bir duvar sistemi için aynı malzemeden oluşan farklı boşluklu katmanların kuramsal benzetimleri sonundu elde edilen değerlerden daha iyi sonuçlar verir. 500 Hz'e kadar, WL numunesi genel olarak en iyi sonucu gösterir. 500 Hz'den sonra, B3 kompozisyonu doğrusal artış ile diğerlerinden daha iyi sonuçlar vermeye başlar. Ancak, bu araştırma çoğunlukla düşük frekans aralığına odaklandığından, 500 Hz'den sonra daha yüksek frekanslardaki sonuçlar çalışma kapsamında çok kritik bir konu değildir. Ek olarak, taş yünü hijyenik ve sağlıklı olmadığından ve karbon emisyonu yüksek olduğundan sürdürülebilir bir malzeme değildir. WL ve GR örnekleri diğer standart uygulama kompozisyonlarıyla karşılandığında, WL 1000 Hz'ye kadar her ses aralığı için B2'den ve B4'ten daha iyi sonuç göstermektedir. 800 Hz'den sonra B1 daha iyi bir performans göstermeye başlasa da kayda değer bir farklılık göstermemektedir. GR ise 400 Hz'ye kadar B1, B2 ve B4'ten daha iyi bir performans sergilemektedir. AMM numunelerinde reçine kullanımı yoğundur. Bu nedenle, hem daha ağır hem de daha fazla malzeme gerektirmesi bir dezavantajdır; ancak sergilediği verimlilik nedeniyle ses geçiş kaybında avantaj sağlar. Ayrıca, ilerleyen çalışmalarda, meta malzeme çalışmalarına uygun daha hafif alternatif malzemeler de değerlendirilebilir.

3. SONUÇ DEĞERLENDİRMELER

Araştırmada, iki tip AMM tasarlanmış ve modeller 3D CNC yazıcıda basılmıştır. Şu an çalışma kapsamında ulaşılabilecek üretim tekniği 3D CNC yazıcı olduğu için bu yöntem kullanılmıştır; ancak, ilerleyen zamanlarda, farklı koşullar altında daha faydalı olabilecek farklı basım teknikler de önerilebilir. Bunlardan biri additif üretim teknolojisidir. Meta malzeme örneklerinin etkinliğini anlamak için, AMM seçeneklerinin yanı sıra hem aynı kesitte dolu örnek hem de içi boşluklu sistemlerle karşılaştırılmıştır. Tüm ölçümler 1250 Hz'in altında GR, WL ve dolu numunelerin ses yutma katsayısı(α) ve ses geçiş kaybı(dB) değerlendirmeleri için empedans tüpünde ölçülmüştür. Elde edilen değerler doğrultusunda çoklu kullanımlar için uygun olan akustik meta malzeme birimleri üzerinde optimizasyon çalışması devam etmektedir. Bu kapsamda, ilk prototipleri oluşturulan ürünlerin konfigürasyonlarına bağlı olarak ses yutma veya ses geçiş kaybı özelliklerinin daha geniş frekans aralığında etkin olmasına yönelik üzerlerinde deneysel ve numerik çalışmalar sürdürülmektedir.

TEŞEKKÜRLER

Yazarlar, akustik meta malzeme üzerindeki çalışmalara verdiği başlangıç motivasyonu ve ürünlerin 3D CNC yazıcıda üretimi için sunduğu imkânlardan ötürü, Nurus'un Partner'i ve Baş Tasarımcısı Renan Gökyay'a ayrıca, çalışma süreci içerisinde değerli katkılarından ötürü Prof. Mehmet Çalışkan'a ve yapılan testler için empedans tüpü laboratuvar olanağı sağlayan Mezzo Stüdyo'ya teşekkürlerini sunmaktadırlar.

4. KAYNAKLAR

- [1] Mendhe, S.E., Metamaterial Properties and Applications, International Journal of Information Technology and Knowledge Management 4, pp.85-89, 2011.
- [2] Landy, N.I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., Smith, D.R., Padilla, W.J., Perfect Metamaterial Absorber, Phys. Rev. Lett. 100, No. 207402, 2008.

- [3] Xie, Y., Popa, B.I., Zigoneanu, L., Cummer, S.A., Measurement of a Broadband Negative Index with Space-Coiling Acoustic Metamaterials, *Phys. Rev. Lett.* 110, No. 175501, 2013.
- [4] Maurya, S.K., Pandey, A., Shukla S., Saxena, S., Double Negativity in 3D Space Coiling Metamaterials, *Scientific Reports* 6, No. 33683, 2016.
- [5] Yang, M., Ma, G., Yang, Z., Sheng, P., Coupled Membranes with Doubly Negative Mass Density and Bulk Modulus, *Phys. Rev. Lett.* 110, No. 134301, 2013.
- [6] Fok, L., Ambati, M., Zhang, X., Acoustic Metamaterials, *MRS Bulletin* 33, pp. 931-934, 2008.
- [7] Lee, S.H., Park, C.M., Seo, Y.M., Wang, Z.G., Kim, C.K., Acoustic Metamaterial with Negative Density, *Physics Letters A* 373, pp.4464-4469, 2009.
- [8] Huang, H.H., Sun, C.T., Huang, G.L., On the Negative Effective Mass Density in Acoustic Metamaterials, *International Journal of Engineering Science* 47, pp.610-617, 2009.
- [9] Liu, C., Xia, B., Yu, D., The Spiral-Labyrinthine Acoustic Metamaterial by Coiling up Space, *Physics Letters A* 381, pp.3112-3118, 2017.
- [10] Sihvola, A., Metamaterials in Electromagnetics, *Metamaterials I*, pp.2-11, 2007.
- [11] Yuan, B., Cheng, Y., Liu, X., Conversion of Sound Radiation Pattern via Gradient Acoustic Metasurface with Space-Coiling Structure, *Applied Physics Express* 8, 2015.
- [12] Krushynska, A. O., Bosial, F., Miniaci, M., Pugno, N.M., Spider Web-Structured Labyrinthine Acoustic Metamaterials for Low-Frequency Sound Control, *New Journal of Physics* 19, 2017.
- [13] Kim, N., Yoon, Y.J., Allen, J.B., Generalized Metamaterials: Definitions and Taxonomy, *The Journal of the Acoustical Society of America* 139, No.3412, 2016.