

## Modeling Sound Absorption Coefficient of Porous Asphalt Pavements: An Example of Thickness and Mixture Ratio

Tarık Serhat BOZKURT <sup>1,\*</sup>  Ahmet Sertaç KARAKAŞ <sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Istanbul Technical University, Department of Architecture, ORCID: 0000-0001-5642-4986, 34367, Şişli / İSTANBUL

<sup>2</sup> Istanbul University, Rectorate, ORCID: 0000-0002-0840-2878, 34134, Fatih / İSTANBUL

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 10.04.2022  
Revision: 21.06.2022  
Accepted: 29.08.2022

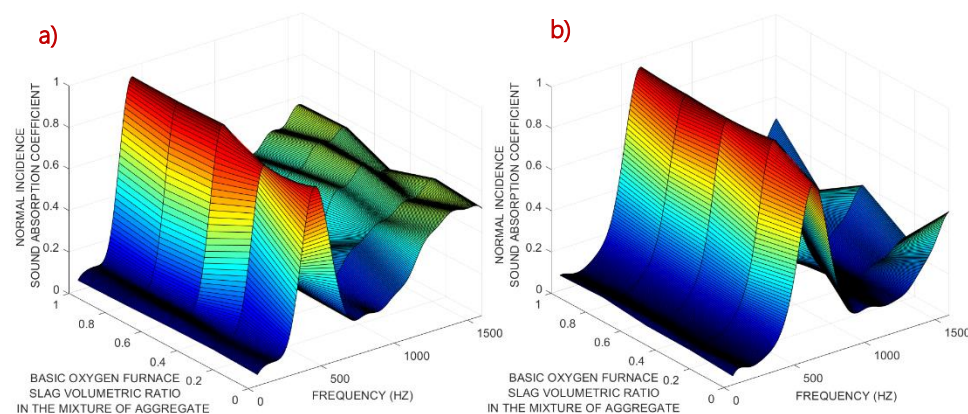
#### Highlights

- Reducing the Environmental Noise Level.
- Increasing the Sound Absorption Coefficient in Asphalt Pavements
- Numerical Modeling of Sound Absorption Coefficient in Asphalt Pavements

#### Keywords

Environmental noise control  
Sound absorption  
Porous asphalt  
Numerical analysis

In order to reduce the environmental noise level, increasing the sound absorption coefficient in asphalt pavements has been investigated. In this context, the sound absorption coefficient of porous asphalt pavements was modeled according to the mixture content and varying thicknesses. Thanks to the prepared sound absorption coefficient numerical model analysis, the sound absorption coefficient can be analyzed.



**Figure A.** 3-dimensional graph of the sound absorption coefficient according to the mixture ratio in the asphalt pavements, a) 10 cm, b) 6.35 cm

**Purpose:** In terms of human health, environmental noise should be reduced and kept under control. Increasing the sound absorption performance of asphalt pavements can reduce the environmental noise level. In this context, increasing the sound absorption coefficient and modeling of asphalt pavements were investigated.

**Theory and Methods:** In this study, the impedance tube sound absorption coefficient measurement results were used and modeled. The model curves were modeled in the MATLAB program with the curve fitting method.

**Results:** Changing the thickness and mixture content of asphalt pavements can increase sound absorption performance. In particular, the increase in asphalt coating thickness can increase the sound absorption coefficient in the range of 100 Hz to 500 Hz.

**Conclusion:** In this research, it was understood that the sound absorption coefficient of porous asphalt pavements can be increased by thickness variation and mixture content variation. With the model curves produced within the scope of the study, the sound absorption coefficient can be predicted according to the varying asphalt thicknesses.



## Modeling Sound Absorption Coefficient of Porous Asphalt Pavements: An Example of Thickness and Mixture Ratio

Tarık Serhat BOZKURT<sup>1,\*</sup> Ahmet Sertaç KARAKAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Istanbul Technical University, Department of Architecture, ORCID: 0000-0001-5642-4986, 34367, Şişli / İSTANBUL

<sup>2</sup> Istanbul University, Rectorate, ORCID: 0000-0002-0840-2878, 34134, Fatih / İSTANBUL

### Abstract

Environmental noise should be kept under control due to its negative effects on human health. The sound absorption performance of asphalt pavements is an important parameter in environmental noise control. Increasing the sound absorption performance of asphalt pavements can reduce the environmental noise level. In this study, increasing the sound absorption coefficient in asphalt pavements has been investigated. It is observed that the sound absorption coefficient can be increased by asphalt pavement thickness change or the asphalt pavement mixture content change. In the research, the sound absorption coefficient measurement results of porous asphalt pavements were modeled and analyzed in the MATLAB program. The use of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% basic oxygen furnace slag aggregate ratio in the aggregate mixture in asphalt pavement was investigated, and the sound absorption coefficient of asphalt pavements of different mixtures was modeled in the MATLAB program. Moreover, sound absorption performances of 3 cm, 6.35 cm, and 10 cm thick asphalt pavements were examined according to 1/3 octave band frequencies, and the sound absorption coefficient was modeled in MATLAB program by curve fitting method according to varying asphalt thicknesses. With the help of curve models, the sound absorption coefficient can be estimated according to the varying asphalt thickness value. The use of basic oxygen furnace slag as aggregate in the asphalt pavement mixture can increase the sound absorption performance not only at low frequencies but also at high frequencies. The increase in thickness of porous asphalt pavements can improve sound absorption performance at low frequencies.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 10.04.2022  
Düzeltilme: 21.06.2022  
Kabul: 29.08.2022

### Keywords

Environmental Noise  
Control  
Sound Absorption  
Coefficient  
Porous Asphalt  
Numerical Analysis

### Anahtar Kelimeler

Çevresel Gürültü Kontrolü  
Ses Yutma Katsayısı  
Gözenekli Asfalt  
Numerik Analiz

## Gözenekli Asfalt Kaplamalarda Ses Yutma Katsayısının Modellenmesi: Kalınlık ve Karışım Oranı Örneği

### Öz

Çevresel gürültünün insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle kontrol altında tutulması gerekir. Çevresel gürültü kontrolünde asfalt kaplamaların ses yutma performansı önemli bir parametredir. Asfalt kaplamadaki ses yutma performansının artırılması çevresel gürültü düzeyini azaltabilmektedir. Bu çalışmada asfalt kaplamalarda ses yutma katsayısının artırılması araştırılmıştır. Asfalt kaplama kalınlık değişimi veya asfalt kaplama karışım içeriği değişikliği ile ses yutma katsayısının artırılabilmesi gözlemlenmiştir. Araştırmada, gözenekli asfalt (poroz asfalt) kaplamaların ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları MATLAB programında modellenmiş ve analiz edilmiştir. Agregat karışım oranlarında %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında bazik oksijen fırını cürufu agreganın asfalt kaplamada kullanılması araştırılmış ve farklı karışımlara ait asfalt kaplamaların ses yutma katsayısı MATLAB programında modellenmiştir. Ayrıca, 3 cm, 6,35 cm ve 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların ses yutma performansları 1/3 oktav bant frekanslarına göre incelenmiş ve değişen asfalt kalınlıklarına göre ses yutma katsayısı eğri uyarlama yöntemi ile MATLAB programında modellenmiştir. Eğri modelleri yardımıyla, değişen asfalt kalınlık değerine göre ses yutma katsayısı öngörülebilir. Asfalt kaplama karışımında agregat olarak bazik oksijen fırını cürufunun kullanılması, sadece düşük frekans değerlerinde değil, aynı zamanda yüksek frekans değerlerinde de ses yutma performansını arttırabilmektedir. Gözenekli asfalt kaplamadaki kalınlık artışı düşük frekanslardaki ses yutma performansını iyileştirebilmektedir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çevresel gürültü kontrolünün sağlanması insan sağlığı açısından büyük öneme sahiptir. Daha iyi yaşam alanlarının elde edilmesi işitsel konfor koşullarının sağlanabilmesi ile elde edilmektedir. Aşırı gürültüye maruz kalındığı takdirde insan sağlığı olumsuz olarak etkilenebilmektedir. Bozkurt & Demirkale [1] çevresel gürültünün halk sağlığını dikkate değer düzeyde etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, Dünya Sağlık Örgütü [2] hava kirliliğini insan sağlığını olumsuz etkileyen birinci çevresel etki olarak açıklamış ve çevresel gürültüyü de insan sağlığını olumsuz etkileyen ikinci çevresel etki olarak belirlemiştir. Bu kapsamda, çevresel gürültünün azaltılması için gerekli önlemlerin alınması elzemdir. Çevresel gürültü problemlerinin başında ulaşım gürültüsü gelmektedir. Ulaşım gürültüsü kara yolu, demir yolu ve havayolu araçları tarafından meydana gelmektedir. Ulaşım sistemlerinde yol üst yapısı olarak asfalt kaplama yüzeyler sıklıkla kullanılabilir ve asfalt kaplamalar özellikle kara yolu ulaşımında büyük bir kullanım alanına sahip olmaktadır.

Trafik gürültüsünün insan sağlığını olumsuz etkilediği literatür araştırmalarında da gözlemlenmektedir. Che vd. [3], trafik gürültüsünün rahatsızlıklara neden olabileceğini açıklamışlar ve şehir hastalıklarından biri olduğunu belirtmişlerdir. Kleiziené vd. [4], Avrupa’da trafik gürültüsünün insan sağlığını etkilediği ve her yıl en az 1 milyon insanda kardiyovasküler rahatsızlıklara sebep olduğunu açıklamışlardır. Gilani & Mir [5], aşırı trafik gürültüsünün uyku kalitesini azalttığını ve uyku kalitesini olumsuz etkilediğini açıklamışlardır. Bu nedenlerden dolayı, trafik gürültüsünün kontrol altında tutulması ve çevresel gürültü düzeyinin azaltılması gerekmektedir.

Çevresel gürültü düzeylerinin azaltılmasında etkili olan unsurlardan biri de zemin kaplamalarıdır. Sesin serbest alanda yayılması sırasında gerçekleşen ses basınç düzeyindeki azalmalar ISO 9613-2 standardında [6] açıklanmaktadır ve bu standartta zemin emiliminin artırılması durumunda alıcıya ulaşan ses basınç düzeylerinin azaldığı anlaşılmaktadır. Bozkurt [7], zemin yüzey kaplamalarındaki ses yutma performansının artırılmasının önemli olduğunu belirtmiş ve zemin kaplamalarının ses yutma performansı artırıldığı takdirde çevresel gürültü düzeyinin azalabileceğini açıklamıştır. Bu bakış açısı ile asfalt yüzey kaplamaları kent ölçeğinde önemli bir yüzey alanına sahip olmaktadır. Ayrıca, karayollarındaki araç hareketlerinin yol üst yapısının üzerinde gerçekleşiyor olması nedeniyle asfalt kaplamalar gürültü kaynağına çok yakın olarak konumlanabilmektedir. Bu kapsamda asfalt kaplamaların yansıtıcılık özelliğinin azaltılması çevresel gürültünün azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Kotzen & English [8], gürültü azaltma stratejisi olarak yollarda ses emici özelliğe sahip asfalt yüzey kaplamalarının kullanılabilirliğini, ses emici yüzey kaplamaları olarak gözenekli asfalt kaplamanın Avrupa’da sıklıkla kullanıldığını ve Hollanda otoyollarının %70’inden fazlasının gözenekli asfalt kaplama ile kaplandığını belirtmişlerdir. Gözenekli asfalt kaplama aşınma tabakasında kullanılmaktadır ve literatürde gürültü azaltma stratejilerinden birinin gözenekli asfalt (poroz asfalt) kullanmak olduğu görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada da gözenekli asfalt sistemleri incelenmiştir. Asfalt yüzey kaplamalarının ses yutma katsayısının artırılması önemli bir gürültü azaltma stratejisidir. Barros vd. [9], gözenekli asfalt tipinin kullanılmasıyla, gürültüye maruz kalmada 2,8 dB’lik bir azalmanın tespit edildiğini belirtmişlerdir. Chen vd. [10], trafik gürültüsünü azaltmak için gözenekli asfalt kaplamanın kullanılabilirliğini açıklamıştır. Chu & Fwa [11], gözenekli asfalt kaplamaların birçok gelişmiş ülkede araç lastik gürültüsünü azaltmak için kullanıldığını ve akustik iyileştirme amacıyla pek çok uygulamalarda kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Bozkurt [7], yol kaplamalarının çevresel gürültünün azaltılmasında önemli bir parametre olduğunu açıklayarak, akustik özellikleri iyileştiren malzeme bazlı araştırmaların çok geniş bir araştırma konusu olduğuna değinmiştir. Sonuç olarak, gözenekli asfalt kaplama tipinin çevresel gürültüyü azaltmak için bir strateji olarak kullanılabilirliği görülmektedir.

Literatürde gözenekli asfalt kaplamanın ses yutma performansının yüksek olabileceği belirtilmiştir ve asfalt tabakasının gözeneklilik oranının ve hava boşluk oranının ses yutma performansını etkileyebileceği anlaşılmıştır. Wang vd.’nin çalışmasında [12], gözenekli asfalt betonunda ses yutma katsayısını artırmak için idealleştirilmiş gözenek yapısı parametreleri (gözenek yarıçapı, gözenek uzunluğu ve gözeneklilik oranı) araştırılmıştır. Gözenek yarıçapını değiştirmeden gözeneklilik oranı arttığında, 100 Hz ile 400 Hz arasındaki frekans aralığındaki ses yutma katsayısının artabileceğini göstermişlerdir. Liu vd. [13] ve Zhang vd. [14] tarafından asfalt kaplamalarındaki ses yutma performansı araştırılmış, hava boşluk oranının ses yutma katsayılarını etkileyebileceği belirtilmiş ve hava boşluk oranını artmasıyla ses yutma katsayılarının da

artabileceği gösterilmiştir. Kalauni & Pawar [15] araştırmalarında gözenekli asfalt yüzey kaplaması hakkında açıklamalar yapmışlar ve gözenekli asfaltın gözenekleri sayesinde gürültü azaltımı için kullanılabilirliğini açıklamışlardır. Gao vd. [16], gözenekli asfalt numunelerinin ses yutma katsayısının ölçülen hava boşlukları ile iyi bir doğrusal korelasyona sahip olduğunu ve hava boşluk oranı arttığında genel olarak ses yutma performansının da arttığını göstermişlerdir. Mikhailenko vd. [17], ses emiliminin en çok hava boşluğu içeriğinden (gözeneklilik oranından) etkilenecek şekilde davrandığını açıklamışlardır. Literatür çalışmalarında ses yutma performansı üzerinde gözeneklilik özellikleri ve hava boşluk oranının etkili olduğu görülmektedir.

Yol üstünde suyun birikmemesi ve suyun drenajının sağlanabilmesi için de gözenekli asfalt kaplamaların kullanılabilirliği görülebilmektedir. Yağmurlu günlerde, asfalt kaplamaların üzerinde biriken suyu uzaklaştırabilmek amacıyla gözenekli asfalt sisteminin kullanılması faydalı olabilmektedir. Suyun asfaltta birikmemesi ve doğrudan alt katmanlara iletilmesi sürüş güvenliğini de olumlu yönde etkileyebilmektedir. Alber vd. [18], gözenekli asfalt tasarımının iyi drenaj sistemine sahip olması nedeniyle tercih edildiğini belirtmişlerdir. Chu & Fwa [19], kayma direncini artırmak için gözenekli asfalt kaplamaların kullanıldığını vurgulamışlardır. Bu kapsamda, poroz asfaltın suyu drene etme özelliği sayesinde, yağışlı havalarda, gözenekli asfalt kaplama yüzeylerin su ile kaplanması önlenmektedir. Suyun gözenekli asfalt kaplama yüzeyinde toplanmaması, yolun daha güvenli olmasına ve sürüş konforuna katkı sağlamaktadır. Ayrıca gözenekli asfalt kaplamanın kullanılması, suyun zararlı etkilerinin yol açtığı problemlere çözüm sunabilmektedir. Özellikle de soğuk havalarda donma, çözülme ve benzeri sorunlar bu doğrultuda önlenebilecektir. Gözenekli asfalt kaplamanın kullanılması, suyun yol açtığı nem hasarı, çatlak oluşumu, yorulma gibi servis ömrünü olumsuz yönde etkileyen unsurlar azaltılabilecektir. Dolayısıyla, yol ve sürüş güvenliği açısından gözenekli asfalt kaplamanın kullanımı çok önemli bir tercih sebebi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Shen vd. [20], gözenekli asfalt karışımında bazik oksijen fırını cürufun agrega yerine kullanılmasını araştırmışlardır ve ses yutma katsayısına olan etkisini deneysel araştırma ile incelemişlerdir. Bazik oksijen fırını cürufu malzemesinin, çelik üretim prosedüründeki işlenmiş demir üretimi sırasında elde edildiği belirtilmiştir. 1 ton dökme çelik üretim aşamasında 300 kg bazik oksijen fırını cürufu elde edildiği, 1 ton ham çelik üretiminde 130 kg bazik oksijen fırını cürufu elde edildiği belirtilmiştir. Çelik üretim sürecinden arta kalan bazik oksijen fırını cürufu, yol kaplamasında agrega olarak kullanılabilir. Çelik üretim sürecinden arta kalan malzemelerin kullanılması sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm açısından da büyük önem arz etmektedir. Bitümlü sıcak karışım üretim prosedüründe kullanılan bazik oksijen fırını cürufu geri dönüşümünün, asfalt kaplamanın performans özelliklerini iyileştirdiği, bu bağlamda da stabilite ve kayma direnci dayanımı gibi özellikleri artırdığı görülmüştür. Ayrıca, doğal agregalara göre gözenekli yapısı yüzünden daha yüksek ses emilimine sahip olduğu belirtilmektedir. Gözenekli asfalt kaplamalar sadece suyun drenajını sağlamakla kalmayıp yol yüzeyinde trafik gürültüsünü azaltabildiği ek olarak açıklanmıştır.

Bu çalışmada, Shen vd.'nin [20] çalışmasında sunulan deneysel ölçüm sonuçlarının incelenmesi gerçekleştirilmektedir. Farklı oranlardaki bazik oksijen fırını cüruf karışımlarının gözenekli asfaltı üzerindeki etkileri detaylandırılmıştır. Ayrıca değişen asfalt kalınlığına göre değişen ses yutma performansı incelenmiştir. Shen vd.'nin [20] araştırmasındaki deney ölçüm sonuçları bu çalışmada kullanılmış, ölçüm sonuçları numerik olarak MATLAB programında modellenmiş ve modeller üzerinden ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları analiz edilmiştir.

## 2. MALZEMELER VE YÖNTEMLER (MATERIALS AND METHODS)

Çalışmada kullanılan agregalar Shen vd.'nin araştırmasında [20] açıklanmış, iri dane boyutuna sahip olacak şekilde bazik oksijen fırını (BOF) cürufu agregalar ticari amaçlı çelik fabrikasından ve kırma taş agregalar da dere malzemelerinden elde edilmiştir. Polimer modifiyer olarak karışımında kullanılan SBS (styrene-butadiene-styrene) katkı asfalt binderin, ticari amaçlı satış yapan asfalt üreticilerinden tedarik edildiği çalışmada belirtilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan agrega ve katkı malzemelerinin fiziksel ve mekanik gibi mühendislik özellikleri açıklanarak gözenekli asfaltta kullanılabilirliği belirtilmiştir [20].

Hacimsel olarak agrega yerine kullanılan bazik oksijen fırını cürufunun (%0, %25, %50, %75, %100 oranlarında olmak üzere) beş farklı karışım oranında gözenekli asfalt kaplamalarda kullanılması

incelenmiştir. Tüm karışımlarda maksimum agrega dane boyutu 19 mm olarak belirtilmiştir. Japonya yol birliği tarafından açıklanan optimum asfalt içeriği tasarlanması prosedürleri gözenekli asfalt karışımların hazırlanmasında kullanılmıştır. Ayrıca, gözenekli asfalt karışımında kullanılan SBS polimer katkı malzemesinin, modifiyer olarak karışımda kullanılmasının ilgili şartnamede belirtilen standart limitlerini karşıladığı belirtilmiştir [20]. Shen vd. çalışmalarında farklı bazik oksijen cürufu oranlarında hazırlanan SBS katkılı gözenekli asfalt karışımlar Marshall test metodu kullanılarak hazırlanmış, özgül ağırlık, optimum bitüm oranları, stabilite ve akma değerleri elde edilmiştir [20]. Değişik fırın cürufu oranında hazırlanan SBS modifiye asfalt karışımlarda kullanılan BOF cüruf ve kırma taş agregaların özellikleri Tablo 1 verilmiştir. Aşınma tabakasında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 1 sunulmuştur. Agrega özelliklerinin AASHTO M283 ve ASTM D692 şartname standart limitlerini sağladığı görülmüştür. Agrega gradasyonu Şekil 2a'da gösterilmiştir. Agrega karışımı gradasyonu AASHTO T27 ve ASTM C136 standartları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Polimer modifiyeli asfalt bağlayıcılar gözenekli asfalt karışımlarında geniş ölçüde karışım dayanıklılığını ve sökülme direncini arttırmak için kullanılmaktadır. SBS polimer modifiye asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. BOF cürufu SBS modifiye gözenekli asfalt karışımların farklı BOF oranındaki mühendislik özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir [20]. Sonuçlar göstermektedir ki BOF cüruf, açılma şekli ve pürüzlü yüzeyi sayesinde asfalt binder ile mükemmel bir bağ kurmaktadır. BOF cüruf karışımı, benzer sebeplerle kırma taş karışımlarına göre yüksek Marshall stabilitesine sahiptir.

**Tablo 1. BOF cüruf ve kırma taş agreganın özellikleri [20]**

Özellikler	BOF cüruf	Kırma taş	Şartname limiti
Los Angeles Aşınma oranı, %	20.96	23.52	40 max.
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (NaSo4), %	1.35	3.16	12 min.
Yassılık indeksi	0.60	0.52	-
Su Emme %	2.2	1.3	-
Kırık yüzey oranı, %			
Bir veya daha fazla	100	100	90 min.
İki veya daha fazla	95	92	75 min.
Agrega özgül ağırlıkları, t/m <sup>3</sup> (4,75mm elek boyu)	3,49	2,67	-

**Tablo 2. SBS modifiyeli bitüm fiziksel özellikleri [20]**

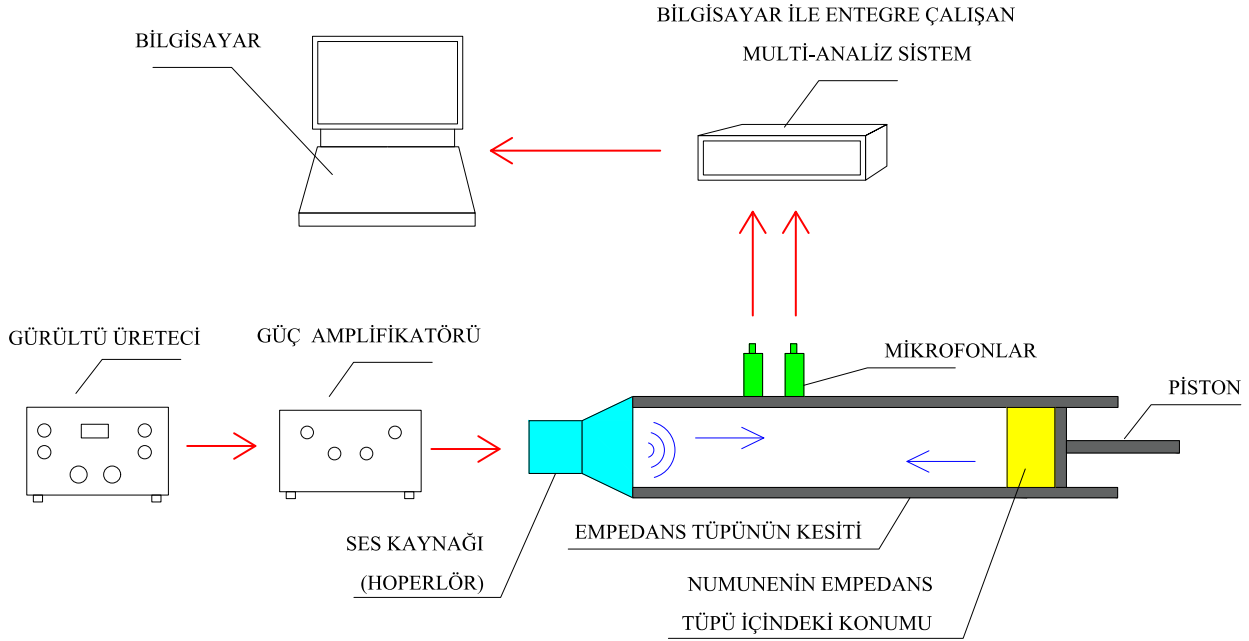
Özellikler	Spesifikasyon	Test edilmiş
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	-	1.034
Penetrasyon (25 C <sup>0</sup> , 1/10 mm)	35 Min	42
Viskozite (60 C <sup>0</sup> , denge(poise) )	8000 Min	8753
Viskozite (135 C <sup>0</sup> , cSt)	3000 Max	2850
Alev alma noktası	232 Min	297

**Tablo 3. Modifiye katkılı gözenekli asfalt karışımların mühendislik özellikleri [20]**

Karışım özellikleri	Şartname Limitleri	BOF cüruf oranı (%)				
		0	25	50	75	100
Opt. Asfalt İçeriği-(%)	-	5.50	5.55	5.60	5.64	5.75
Stabilite (kN)	3.5 Min	4.19	4.74	5.10	5.33	5.36
Akma (0,01 cm)	20-40	34.5	35.2	35.8	34.8	34.6
Hava Boşluğu (%)	20 ± 1%	20.2	19.7	20.5	20.8	20.7
Birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	-	2065	2125	2207	2281	2348
Su gideri (%)	0.3 Max	0.16	0.18	0.21	0.15	0.20
Geçirgenlik (cm/s)	0.01 Min	0.34	0.38	0.32	0.35	0.37

Ses yutma katsayısı ölçümü için literatürde iki temel yöntem kullanılmaktadır. İlk yöntemde ses yutma katsayısı ölçümleri ISO 354 standardı [21] doğrultusunda çınlama odasında ölçülmektedir. Çınlama odası ölçümlerinde yaygın yansıma ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları elde edilir. Literatürde kullanılan diğer ses yutma katsayısı ölçüm yöntemi ISO 10534-2 standardı [22] doğrultusunda gerçekleştirilen empedans tüpü yöntemidir. Empedans tüpü yönteminde dikey doğrultulu gelen sesin ses yutma katsayısı ölçülür. Çınlama odasında elde edilen yaygın yansıma ses yutma katsayısı ölçümleri empedans tüpü ile elde edilen dikey yansıma ses yutma katsayısı ölçümlerinden genellikle daha fazladır [23]. Çınlama odasında elde edilen ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları empedans tüpü ölçüm sonuçlarına göre daha güvenlidir çünkü

ölçümü gerçekleştirilen malzemenin alanı ve miktarı fazladır. Ancak empedans tüpü ölçümleri yardımı ile farklı numunelerin kıyaslanması çok az malzeme miktarı ile pratik olarak gerçekleştirilebilmektedir. Empedans tüpü yöntemi ile ses yutma ölçümleri çok hızlı bir şekilde ve az maliyetli olacak şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu sebepten dolayı çok farklı tiplerdeki malzemelerin karşılaştırılması yapılırken genellikle empedans tüpü ölçüm yönteminin kullanıldığı literatürde gözlemlenmektedir. Shen vd.'nin çalışmasında [20], da ses yutma katsayısı ölçümleri ASTM E1050 standardı [24] (ISO 10534-2 standardı Avrupa'da kullanılmakta olup benzeri Amerika'da ASTM E1050 standardı olarak tanımlanmıştır) doğrultusunda empedans tüpünde gerçekleştirilmiştir. Pulse multi analiz sistemi kullanılmış ve 10 cm çapındaki empedans tüpü ile ses yutma katsayısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler Marshall çekici yardımı ile 98 mm çapında üretilmiştir. Empedans tüpü içerisindeki iç duvar ile numune arasında oluşabilecek boşluğu önlemek amacıyla numunelerin etrafı sıkıca teflon tarzı bir malzeme ile kaplanmıştır. Şekil 1'de empedans tüpü ses yutma katsayısı ölçümüne ait akış şeması verilmiştir. Empedans tüpü ses yutma katsayısı ölçümlerinde gürültü üretici ve sonrasında güç amplifikatörü kullanılarak empedans tüpü içerisindeki ses kaynağı çalıştırılmıştır. Empedans tüpü içerisine yerleştirilen numunedan yansıyan ses ve hoparlörden gelen ses dalgalarının oluşturduğu basınç değişiklikleri iki farklı mikrofon yardımıyla ölçülmüştür. Bilgisayar ile entegre çalışan multi-analiz sistemi ile frekanslara göre ses yutma katsayısı ölçümleri elde edilmiştir. Ses yutma katsayısı ölçümleri farklı tip numune kalınlığına bağlı olarak sırasıyla 3 cm, 6,35 cm ve 10 cm olacak şekilde empedans tüpü sistemi içerisinde ölçülmüştür [20].



**Şekil 1.** Empedans tüpü ölçüm süreci ve empedans tüpünün kesiti [20]

Gözenekli asfalt kaplamaların frekanslara göre ses yutma performansının değişimi araştırılmıştır. Gözenekli asfalt tabakası için yüksek ses yutma performansının elde edildiği frekans aralıkları literatür çalışmalarında incelenmiştir. Li vd. [25], gözenekli asfalt kaplamalarının 800 Hz ile 1600 Hz arasındaki frekans aralığında ses yutma performansının yüksek olabileceğini belirlemişlerdir. Vaitkus vd. [26], gözeneklilik artışının yüksek frekanslardaki (1000 Hz üzeri) lastik/yol gürültüsünün azaltılmasına katkı sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Vaitkus vd. [27], asfalt beton, taş mastik asfalt ve gözenekli asfalt olmak üzere üç farklı asfalt tipini araştırmışlardır. Araştırmalarında optimal bağlayıcı içeriği kullanılarak, 600 ile 2000 Hz arasındaki frekanslarda, gözenekli asfalt kaplama tipinden maksimum ses yutma performansı elde edilmiştir. Ding & Wang [28], çalışmalarında gözeneksiz ve gözenekli kaplama yüzeyleri üzerindeki ses basınç seviyelerinin araştırdılar ve gözenekli asfalt kaplama tipinin genellikle yüksek frekanslardaki lastik kaplama gürültüsünü azalttığını gösterdiler. Gözenekli asfalt kaplamalarda düşük frekanslarda yüksek ses yutma performansının elde edilemediği literatür çalışmalarında görülebilmektedir. Gözenekli asfalt kaplamalarda düşük frekans verimini artırmak için katman kalınlığının değiştirilmesi veya katkı maddeleri kullanılarak karışım içeriğinin değiştirilmesi gerekebilmektedir.

Asfalt kaplamanın karışım içeriği değiştirilerek ses yutma katsayısının iyileştirilebileceği literatür araştırmalarında gözlemlenebilmektedir. Agregada türü ve agregada tane boyutu, asfalt kaplamalarda ses yutma performansı üzerinde etkilidir. Gardziejczyk vd. [29], maksimum 5 mm parçacık boyutuna sahip bir agregada içeren poroelastik asfalt karışımının, maksimum agregada parçacık boyutu 8 mm olan karışımlardan daha iyi akustik özellikler ile karakterize edilebildiğini belirtmişlerdir. Kolodziej vd. [30], iki farklı agregada boyut aralığını araştırmışlar ve agregada boyut aralığı değiştiğinde ses yutma katsayısının artabileceğini göstermişlerdir. Agregada tipini değiştirmek veya agregada maksimum dane boyutunu (8 mm'den 5 mm'ye) azaltmak, ses yutma katsayısını iyileştirebilmektedir. Asfalt karışımına ilave edilen katkı malzemesi ile ses yutma katsayısının iyileştirilebileceği literatürde görülebilmektedir. Bu bağlamda kırıntı kauçuk katkı malzemesinin sıklıkla kullanıldığı anlaşılmaktadır. Morcillo vd. [31], ömrünü tamamlamış lastiklerden gelen kırıntı kauçukların ve plastik atık malzemelerin katkı malzemesi olarak kullanıldığı takdirde asfalt kaplamaların akustik özelliklerinin iyileştirebileceğini belirtmişlerdir. Mavridou & Kehagia [32] tarafından yapılan çalışmada, kauçuk katkılı asfalt kaplamaların çevresel gürültü düzeyini yaklaşık olarak 1-3dB azaltabileceğini açıklamışlardır. Vazquez vd. [33] asfalt kaplamanın ses emilimini iyileştirmek için kırıntı kauçuk ilavesini araştırmışlardır. Kırıntı kauçuk katkısı içeren asfalt karışım tipi ile kırıntı kauçuk katkısı içermeyen normal asfalt karışım tipi karşılaştırılmıştır. Araştırmada, kırıntı kauçuk katkı maddelerinin 200 Hz ile 500 Hz arasındaki frekans aralığındaki ses yutma performansını arttırdığını belirtmişlerdir. Kırıntı kauçuk katkı malzemesinin 200 Hz'in üzerindeki frekansların ses yutma katsayısını artırdığı görülmektedir. Asfalt karışımlarında katkı malzemesi olarak liflerin de kullanıldığı literatürde anlaşılmaktadır. Wang vd. [34], asfalt kaplamada bazalt elyaf katkısının kullanılmasının ses yutma katsayısına olan etkisini incelemişler ve bazalt elyaf katkı malzemesinin kullanılmasıyla asfalt kaplamalardaki ses yutma performansının arttırabileceğini açıklamışlardır. Gözenekli asfalt kaplamalarda, ses yutma katsayısının asfalt kaplamanın kalınlığına bağlı olarak değişebildiği gözlemlenebilmektedir. Asfalt kaplamanın kalınlığı arttırıldığı takdirde ses yutma katsayısı da artabilmektedir. Özellikle düşük frekanslardaki ses yutma katsayısının arttırılması istendiğinde asfalt kalınlığını arttırmak iyi bir metot olarak kabul edilebilir. Chu vd.'nin [35], Wang vd.'nin [36] ve Peng vd.'nin [37] çalışmalarında asfalt tabaka kalınlığı arttırdığında düşük frekanslardaki ses yutma performansının arttırıldığı anlaşılmaktadır.

Asfalt kaplama dışındaki ulaşım yollarında kullanılan farklı kaplama tiplerinin ses yutma performansının araştırıldığı görülmektedir. Bu kapsamda, harç karışımı ile üretilen malzemeler üzerinde yapılan araştırmaları da dikkate almak faydalı olabilmektedir. Zhao vd. [38], demiryollarında kullanılan gözenekli ses emici beton levhaları araştırmış ve çevresel gürültüyü azaltmak için ses yutma katsayısını analiz etmiştir. Ses yutma katsayısını arttırmak amacıyla farklı agregada tane boyutları araştırılmıştır ve çok ince agregada aralığı kullanılmasının ses yutma katsayısını olumsuz etkileyebileceği gösterilmiştir. Çalışmada, hafif agregada tipinin veya polipropilen lif katkı maddesinin kullanılması ile ses yutma katsayısının arttırılabileceği açıklanmıştır. Oancea vd. [39], farklı atık malzemeleri katkı malzemesi olarak kullanmış ve sürdürülebilir betonun ses yutma özelliklerini araştırmışlardır. Polistiren granülleri, polietilen tereftalat granülleri, mısır koçanı granülleri, kıyılmış ayçiçeği sapı ve koyun yününden yapılmış toprakları içeren beş farklı sürdürülebilir beton türü incelenmiştir. Oancea vd., sürdürülebilir betonların her birinin genel anlamda şehirlerdeki geleneksel betonlardan daha yüksek ses yutma performansına sahip olduğunu açıklamışlardır. Gürültü problemlerini ve atık malzemeleri azaltmak için sürdürülebilir beton türlerinin kullanılabileceğini tanımlamışlardır. Ses yutma katsayılarını arttırmak için literatürde farklı harç karışımı araştırmaları da bulunmaktadır. Bozkurt & Demirkale [40] tarihi sıvaların ses yutma özelliklerini araştırmıştır. Bu doğrultuda, hidrolik kireç ve dere kumu agregası ile hazırlanan harçların ses yutma özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmada, bağlayıcı oranının artırılmasının veya çok küçük agregada dane boyutu kullanılmasının ses yutma katsayısını olumsuz etkileyebileceği gösterilmiştir [41]. Ketten lifi katkısının veya kırıntı kauçuk katkısının harç karışımında kullanılması ile ses emilimini arttırabileceği gösterilmiştir [41,42,43]. Ayrıca harç karışımında hafif agregada türü kullanımının ses yutma katsayısını arttırabileceği vurgulanmıştır [42,43].

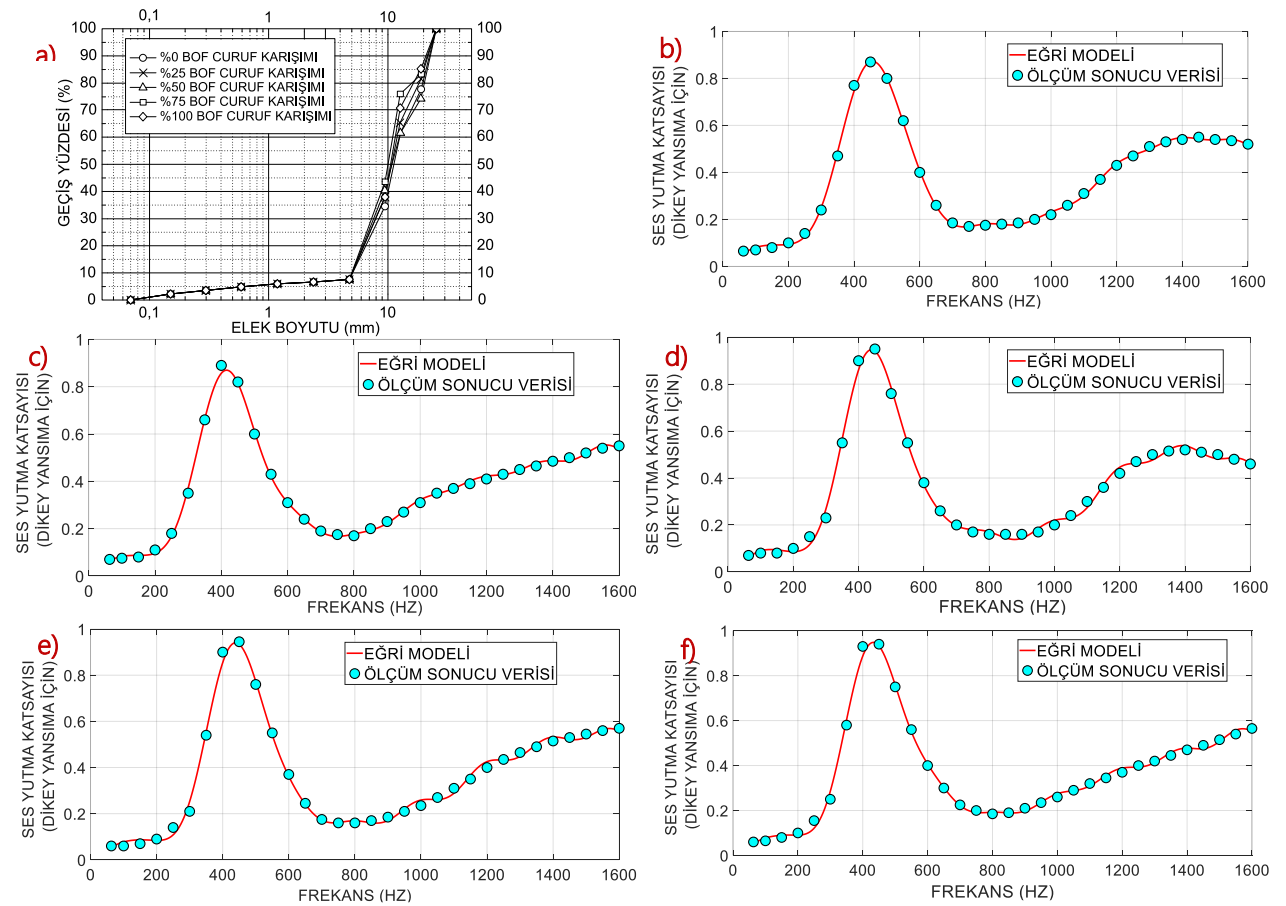
Bu araştırmada, Shen vd.'nin [20] ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları alınarak numerik model analizinde kullanılmıştır ve gözenekli asfalt kaplamalarda karışım oranı değişiminin ve kalınlık değişiminin ses yutma katsayısına olan etkisi numerik olarak MATLAB R2020b programında modellenmiştir.

### 3. NUMERİK MODEL ANALİZLERİ (NUMERICAL MODEL ANALYSIS)

Shen vd.'nin [20] asfalt kaplama üzerine gerçekleştirdiği ölçüm sonuçları makalede verilen grafiklerden yaklaşık olarak alınmıştır ve ses yutma katsayısı sonuçları doğrultusunda MATLAB programında numerik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Datalara ait bilgiler (ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları, asfalt kalınlığı, frekans değerleri) MATLAB programına metin belgesi (txt formatında) içerisinde aktarılmıştır. Asfalt kaplamalarda 10 cm, 6,35 cm ve 3 cm kaplama kalınlıkları analiz edilmiştir. Bu bölümde ses yutma katsayısının numerik olarak modellenmesi açıklanmaktadır. Asfalt kaplamada kullanılan agrega oranları doğrultusunda modelleme eğrileri hazırlanmış ve agrega içeriğinde kullanılan hacimsel olarak bazik oksijen fırını cürufu agrega oranına göre grafikler değerlendirilmiştir. Değişen asfalt kalınlıklarına göre 1/3 oktav bant frekanslarında eğri modelleri hazırlanmış ve değişen kalınlıklara göre analizler yürütülmüştür.

#### 3.1. 10 Cm Kalınlığındaki Asfalt Kaplamaların Numerik Analizi (Numerical Analysis of 10 Cm Thickness Asphalt Pavements)

63 Hz ile 1600 Hz arasındaki 32 noktanın ses yutma katsayısı ölçüm sonucu doğrultusunda eğri uyarlama yöntemi kullanılmış, sin8 numerik modelleme yöntemi seçilmiş ve eğri modelleri elde edilmiştir. 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada, hacimsel olarak agregada kullanılan bazik oksijen cürufu oranlarına göre elde edilen model eğrileri Şekil 2 'de sunulmaktadır. Tablo 4'de 10 cm'lik asfalt kaplama için MATLAB programında sin8 eğri uyarlama yöntemi doğrultusunda elde edilen model eğrilerinin formülleri tanımlanmıştır. Farklı bazik oksijen cürufu oranlarına göre tanımlanan formüller ilgili frekans değerindeki ses yutma katsayısını yaklaşık olarak hesaplanmasına yardımcı olabilecektir.



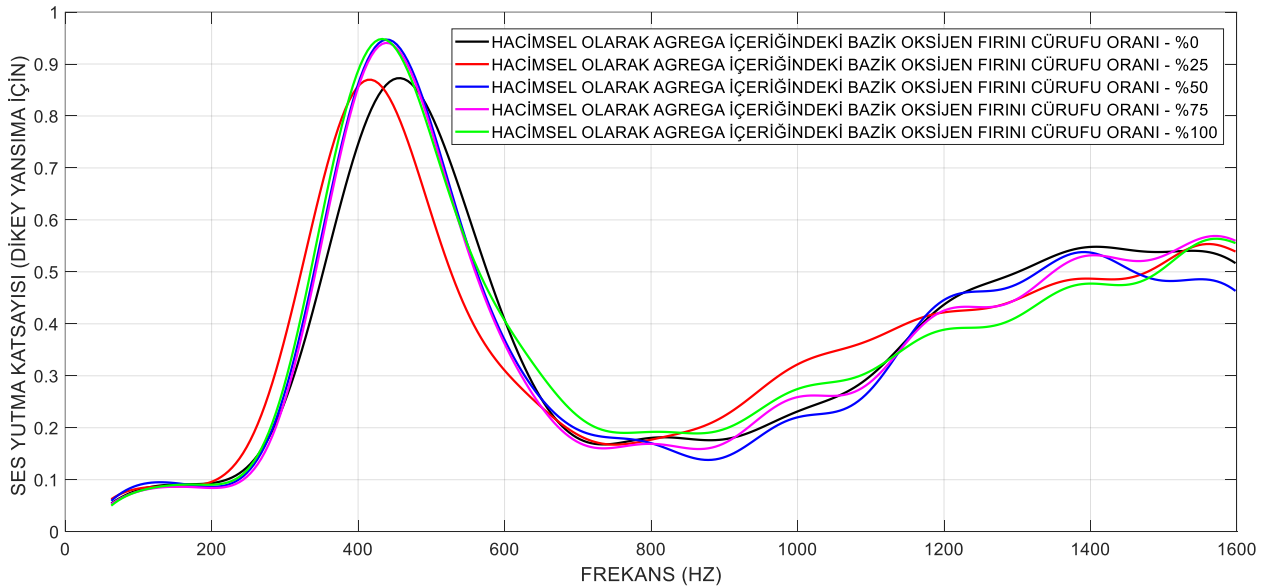
**Şekil 2.** Agrega gradasyonları ve 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agrega olarak kullanılan bazik oksijen fırını cürufu hacimsel oranlarına göre elde edilen model eğrileri, a) Agrega gradasyonları, b) %0, c) %25, d) %50, e) %75, f) %100

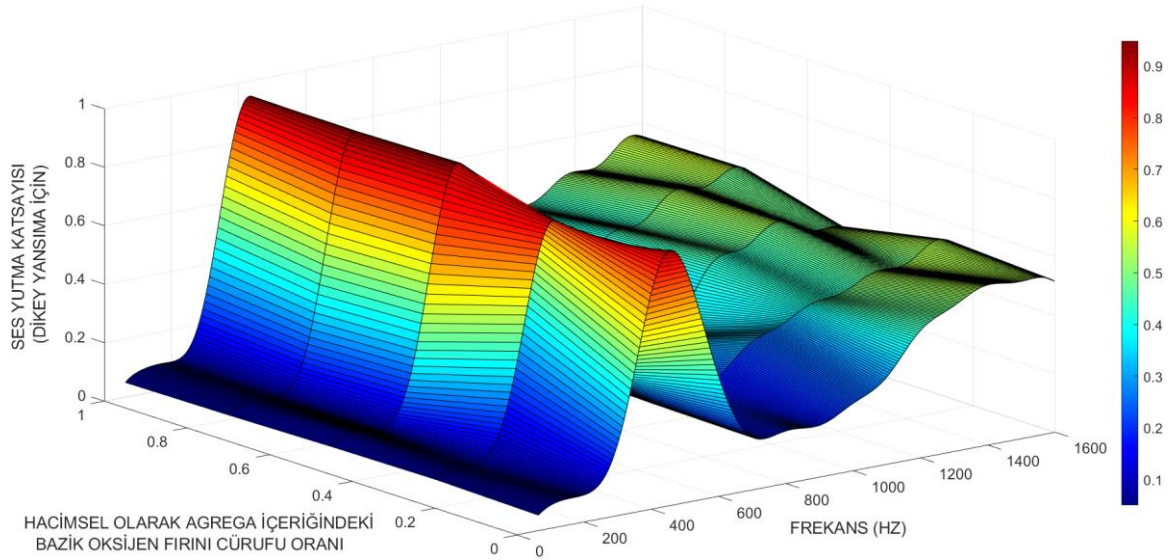


**Tablo 4.** 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agreganın içeriğindeki bazik oksijen firını cüruf oranına göre ses yutma katsayısının denklemleri (x: Frekans-Hz)

Oran Yüzdesi	Fonksiyon Denklemi
%0	$P(x) = 0,6991\sin(0,002102x-0,6144) + 0,4618\sin(0,003929x+0,7799) + 0,1497\sin(0,008473x-2,555) + 0,1158\sin(0,01277x+1,747) + 0,08506\sin(0,01629x+0,6224) + 0,03464\sin(0,02134x-2,154) + 0,01689\sin(0,02413x-2,317) + 0,007799\sin(0,03269x+0,2452)$
%25	$P(x) = 1,101\sin(0,001514x-0,6862) + 0,7034\sin(0,002946x+1,11) + 0,1838\sin(0,008201x-1,708) + 0,1214\sin(0,01388x+1,295) + 0,09399\sin(0,01689x+1,242) + 0,04044\sin(0,02174x-0,8483) + 0,01984\sin(0,02675x-3,001) + 0,01386\sin(0,03191x+1,224)$
%50	$P(x) = 0,6296\sin(0,002103x-0,5178) + 0,4037\sin(0,004084x+0,699) + 0,164\sin(0,008176x-2,327) + 0,09744\sin(0,01626x+0,695) + 0,1152\sin(0,01241x+2,097) + 0,05156\sin(0,02056x-1,047) + 0,02907\sin(0,02451x-2,496) + 0,01634\sin(0,0327x+0,4006)$
%75	$P(x) = 0,8967\sin(0,001677x-0,648) + 0,6053\sin(0,003216x+1,027) + 0,1866\sin(0,008471x-2,327) + 0,1309\sin(0,0132x+1,704) + 0,08557\sin(0,01687x+0,6049) + 0,04675\sin(0,02199x-2,014) + 0,01874\sin(0,03265x+0,4477) + 0,02851\sin(0,02467x-2,138)$
%100	$P(x) = 1,198\sin(0,001508x-0,7335) + 0,8099\sin(0,002961x+1,027) + 0,1856\sin(0,008477x-2,162) + 0,1313\sin(0,01397x+1,094) + 0,09601\sin(0,01709x+0,8467) + 0,03971\sin(0,02216x-1,46) + 0,02147\sin(0,02685x-3,329) + 0,01879\sin(0,03212x+0,9207)$

Şekil 3’de 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların MATLAB programında üretilen ses yutma katsayısı numerik model eğrileri verilmektedir. Şekil 3’deki numerik model eğrileri incelendiğinde, agreganın karışımında bazik oksijen cürufu kullanıldığında düşük frekansların ses yutma performansının artırılabilirdiği anlaşılmaktadır. Özellikle agreganın karışımında bazik oksijen cürufunun kullanılması 63 Hz ile 500 Hz arasındaki frekansların ses yutma performansını arttırabilmektedir. Agreganın karışımında bazik oksijen cürufunun kullanılması 500 Hz ile 600 Hz arasındaki ve 1250 Hz ile 1500 Hz arasındaki ses yutma performansını düşürebildiği numerik model eğrilerinden anlaşılmaktadır. Şekil 4’de numerik model eğrilerinin birleştirilmesi sonucu MATLAB programında elde edilen 3 boyutlu ses yutma grafiği bulunmaktadır. 3 boyutlu ses yutma grafiğinde agreganın karışımındaki bazik cüruf oranının ses yutma katsayısını önemli düzeyde etkileyebildiği anlaşılmaktadır. Agreganın karışımında bazik oksijen firını cürufunun oranı arttıkça maksimum emilimin gözlemlenebildiği tepe noktaları artabilmektedir. 10 cm’lik asfalt kaplamada agreganın karışımında bazik oksijen firını cürufunun kullanılması genel anlamda ses yutma performansını arttırabilirdiği anlaşılmaktadır. Agreganın içeriği değiştirilerek ses yutma katsayısı iyileştirilebilmektedir.

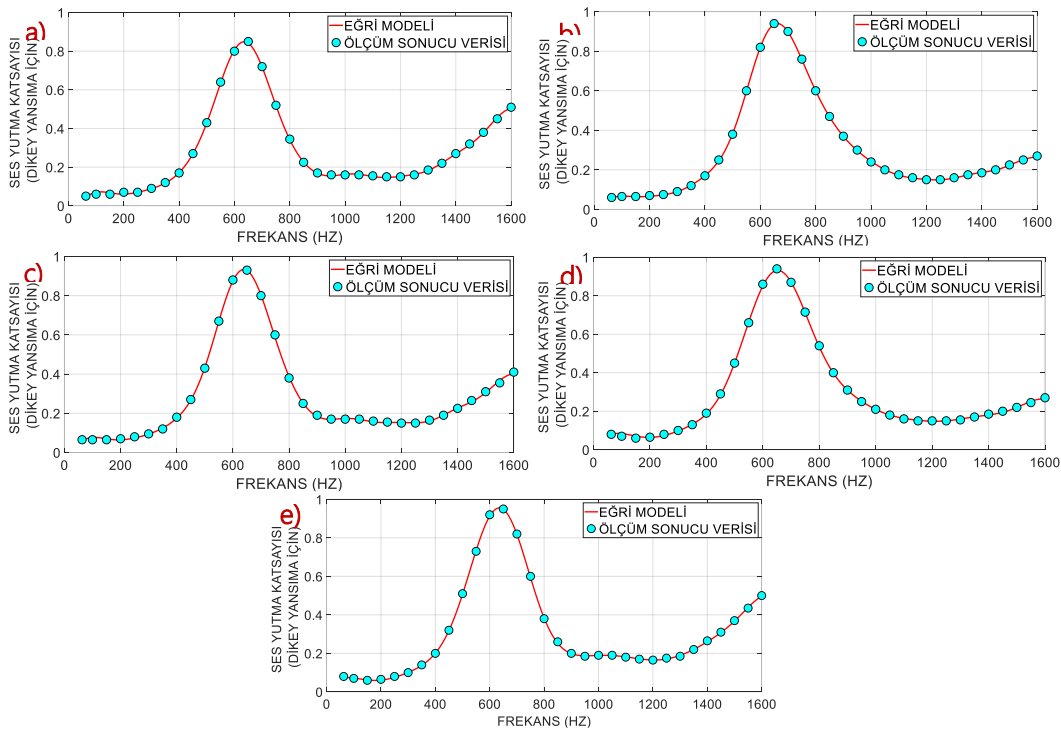
**Şekil 3.** 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların ses yutma katsayısı numerik model eğrileri



**Şekil 4.** 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların karışım oranına göre üç boyutlu ses yutma katsayısı grafiği

### 3.2. 6,35 Cm Kalınlığındaki Asfalt Kaplamaların Numerik Analizi (Numerical Analysis of 6,35 Cm Thickness Asphalt Pavements)

Eğri uyarlama yöntemi kullanılmış, 32 ölçüm sonucu doğrultusunda analiz gerçekleştirilmiş, sin8 nümerik modelleme yöntemi MATLAB programına girilmiş ve 63 Hz ile 1600 Hz arasında olan eğri modelleri elde edilmiştir. 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada, hacimsel olarak agregada kullanılan bazik oksijen cürufu oranlarına göre elde edilen model eğrileri Şekil 5 'de verilmektedir. MATLAB programında, eğri modellerinin güvenilirlik oranının %95 olduğu görülmüştür. Tablo 5'de 6,35 cm'lik asfalt kaplama için MATLAB programında sin8 eğri uyarlama yöntemi doğrultusunda elde edilen model eğrilerinin formülleri tanımlanmıştır.

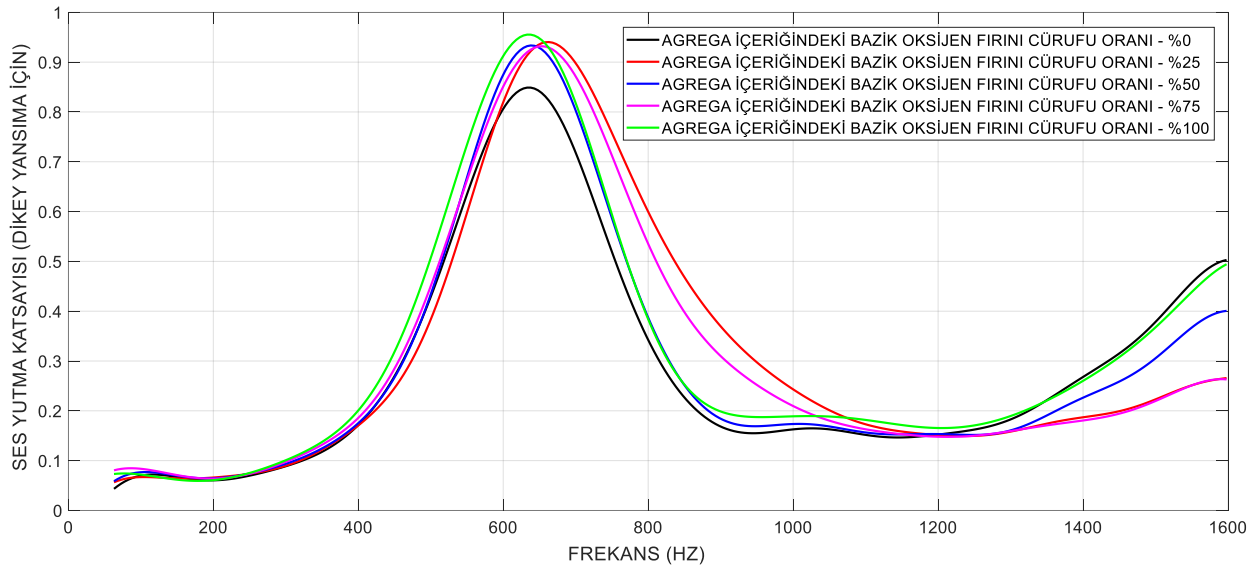


**Şekil 5.** 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agregada kullanılan bazik oksijen fırın cürufu hacimsel oranlarına göre elde edilen model eğrileri, a) %0, b) %25, c) %50, d) %75, e) %100

**Tablo 5.** 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agregada içeriğindeki bazik oksijen fırını cüruf oranına göre ses yutma katsayısının denklemleri (x: Frekans-Hz)

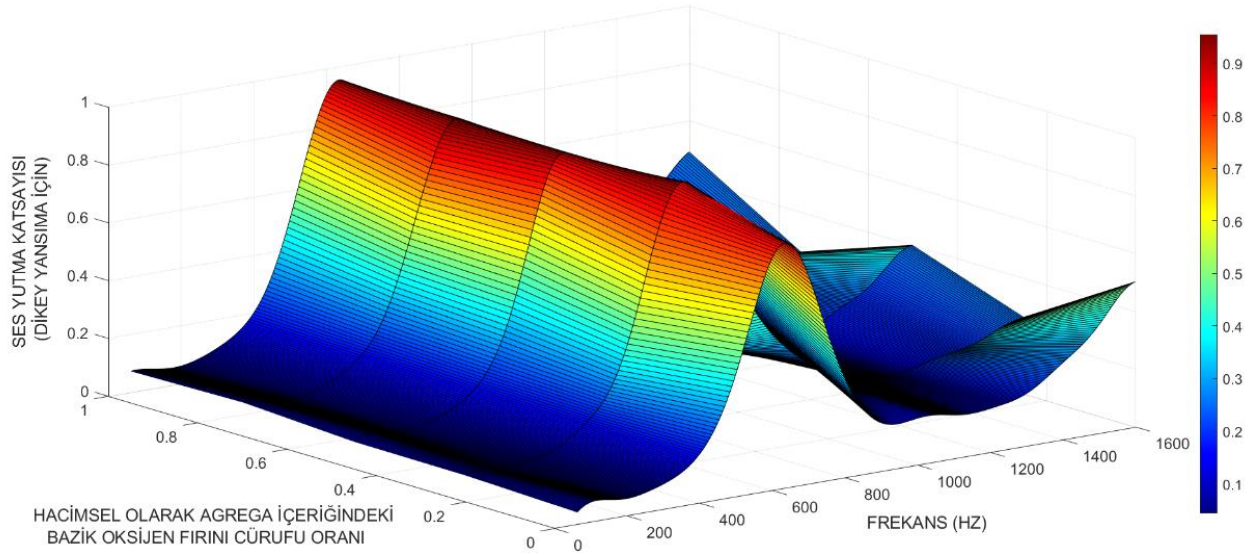
Oran Yüzdesi	Fonksiyon Denklemi
%0	$P(x) = 0,4668\sin(0,001841x-0,449) + 0,167\sin(0,00805x+2,363) + 0,1342\sin(0,01227x+0,2608) + 0,2754\sin(0,004066x-0,09212) + 0,02754\sin(0,02056x+0,8272) + 0,04427\sin(0,01686x-2,945) + 0,01234\sin(0,02485x-1,231) + 0,00558\sin(0,0325x-0,2715)$
%25	$P(x) = 0,5383\sin(0,001998x-0,5581) + 0,1783\sin(0,008237x+1,635) + 0,05249\sin(0,01697x-3,506) + 0,136\sin(0,01121x+0,7523) + 0,0277\sin(0,0212x+0,5875) + 0,3267\sin(0,003918x-0,2053) + 0,01019\sin(0,02705x-3,344) + 0,003921\sin(0,03237x+0,3527)$
%50	$P(x) = 0,4975\sin(0,001906x-0,5353) + 0,1772\sin(0,00827x+2,154) + 0,1453\sin(0,01208x+0,3775) + 0,05703\sin(0,01678x-3,063) + 0,03326\sin(0,02066x+0,8461) + 0,325\sin(0,00388x-0,03949) + 0,01275\sin(0,02509x-1,534) + 0,006199\sin(0,03232x+0,211)$
%75	$P(x) = 0,5201\sin(0,002183x-0,4038) + 0,196\sin(0,008264x+1,994) + 0,1241\sin(0,01215x+0,2435) + 0,04473\sin(0,01814x-4,521) + 0,02793\sin(0,01964x+2,258) + 0,2212\sin(0,004257x-0,2694) + 0,007856\sin(0,0246x-1,72) + 0,002057\sin(0,02762x+2,416)$
%100	$P(x) = 0,4839\sin(0,00196x-0,2) + 0,1953\sin(0,007695x+2,556) + 0,1615\sin(0,01202x+0,4719) + 0,2028\sin(0,004716x-0,4329) + 0,02572\sin(0,01974x+1,759) + 0,05366\sin(0,01727x-3,403) + 0,01203\sin(0,02446x-1,472) + 0,001906\sin(0,03035x+0,7405)$

Şekil 6'da MATLAB programında 6,35 cm asfalt kaplama için türetilen model eğrileri sunulmuştur. Sin8 eğri uyarılama yöntemi ile üretilen model eğrileri 63 Hz ile 1600 Hz arasındaki ses yutma performansı hakkında bilgi sunmaktadır. Agregada karışımında bazik oksijen cürufunun bulunması ses yutma performansını genel anlamda arttırdığı anlaşılmaktadır. Bazik oksijen fırını cürufunun agregada kullanılması sadece düşük frekanslarda ses yutma katsayısını arttırmakla kalmayıp orta frekans değerlerinde de ses yutma performansını arttırabilmektedir. Agregada karışımında bazik oksijen fırını cürufu agregada bulunan karışımlar genel olarak 63 Hz ile 1200 Hz arasında daha yüksek düzeyde ses yutma performansı sergileyebilmektedirler. Sadece 1400 Hz ile 1600 Hz arasında agregada karışımında bazik oksijen fırını cürufunun kullanılmaması ile ses yutma katsayısını arttırabilmektedir. Agregada karışımında maksimum cüruf oranına sahip olan karışım tipi, genel anlamda, 250 Hz ile 650 Hz arasında en yüksek düzeyde ses yutma performansına sahip olmaktadır.



**Şekil.6** 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların ses yutma katsayısı numerik model eğrileri

Şekil 7'de, hacimsel olarak agregada içeriğindeki bazik oksijen fırını cürufu oranı doğrultusunda, 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların 3 boyutlu ses yutma grafiği verilmiştir. Agregada bazik oksijen fırını cürufunun kullanılması, maksimum düzeyde ses yutma performansının gözlendiği tepe noktalarını arttırmaktadır. Ayrıca, Şekil 6 ve Şekil 7'deki grafiklerinden, agregada karışımında bazik oksijen cürufunun kullanılmasının ses yutma performansını genel anlamda iyileştirebildiği anlaşılmaktadır. 6,35 cm'lik asfalt kaplama analizinde de agregada içeriğinin değiştirilmesi ile ses yutma performansını arttırılabildiği anlaşılmaktadır.



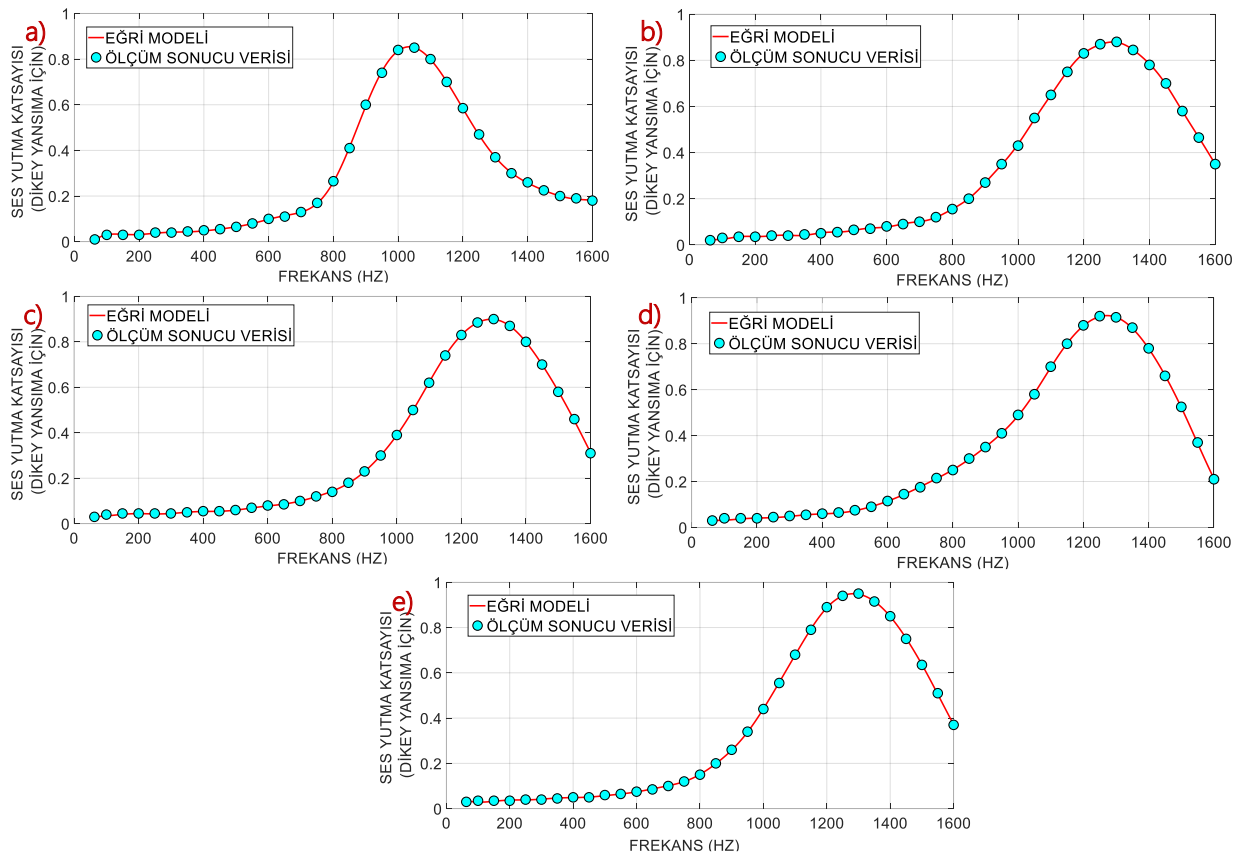
**Şekil 7.** 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların karışım oranına göre üç boyutlu ses yutma katsayısı grafiği

### 3.3. 3 Cm Kalınlığındaki Asfalt Kaplamaların Numerik Analizi (Numerical Analysis of 3 Cm Thickness Asphalt Pavements)

63 Hz ile 1600 Hz arasındaki 32 noktanın ses yutma katsayısı ölçüm sonucu göz önünde tutulmuş, maksimum 50 Hz aralıklarla ölçüm noktaları analiz edilmiş, MATLAB programında sin8 eğri uyarılama yöntemi kullanılarak 32 ölçüm sonucuna göre model eğrileri türetilmiştir. 3 cm asfalt kaplamalarda, hacimsel olarak agrega içeriğinde bulunan bazik oksijen fırını cürufunun oranlarına göre türetilen model eğrileri Şekil 8 'de verilmektedir. 3 cm kalınlıktaki asfalt kaplamalar için MATLAB programında sin8 eğri uyarılama yöntemi doğrultusunda elde edilen model eğrilerinin formülleri Tablo 6'da sunulmaktadır. İlgili frekanslardaki ses yutma katsayısı, Tablo 6'da verilen formüller yardımı ile yaklaşık olarak öngörülebilecektir. Eğri modellerinin güvenilirlik oranının %95 olduğu MATLAB programında belirtilmiştir.

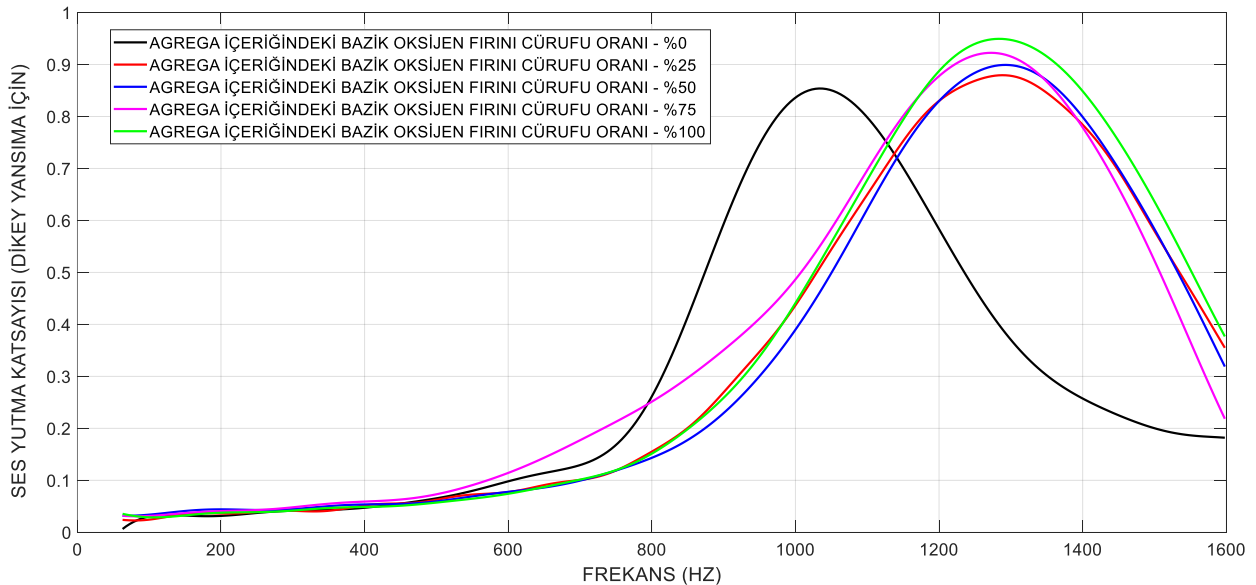
**Tablo 6.** 3 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agrega içeriğindeki bazik oksijen fırını cüruf oranına göre ses yutma katsayısının denklemleri (x: Frekans-Hz)

Oran Yüzdesi	Fonksiyon Denklemi
%0	$P(x) = 0,5228\sin(0,00201x-0,6681) + 0,2409\sin(0,007083x+0,3993) + 0,09017\sin(0,01258x+1,195) + 0,004692\sin(0,0006031x+0,1959) + 0,02015\sin(0,0189x+1,771) + 0,00531\sin(0,02302x-0,1675) - 0,00203\sin(0,03053x-2,633) - 0,004012\sin(0,0273x+4,049)$
%25	$P(x) = 0,5448\sin(0,002017x-0,4299) + 0,3705\sin(0,004139x+2,044) + 0,08529\sin(0,008176x-2,553) + 0,01638\sin(0,01226x-1,255) + 0,002267\sin(0,049x+0,3532) + 0,00364\sin(0,01634x-1,238) + 0,001993\sin(0,02043x-3,075) + 0,002398\sin(0,02453x-2,215)$
%50	$P(x) = 0,5618\sin(0,00218x-0,5717) + 0,3977\sin(0,004309x+1,788) + 0,09287\sin(0,008271x-2,914) + 0,02121\sin(0,01252x-1,621) + 0,003291\sin(0,01864x-1,83) + 0,001144\sin(0,0233x-2,032) + 0,001146\sin(0,02556x+4,641) + 0,001686\sin(0,03223x+2,151)$
%75	$P(x) = 0,5826\sin(0,002104x-0,4913) + 0,3607\sin(0,004477x+1,822) + 0,08427\sin(0,008434x-3,14) + 0,02738\sin(0,01259x-2,02) + 0,004071\sin(0,01989x+3,648) + 0,00295\sin(0,02336x-1,25) + 0,001124\sin(0,02879x+1,92) + 0,001706\sin(0,03215x+2,999)$
%100	$P(x) = 0,5863\sin(0,00206x-0,43) + 0,426\sin(0,004078x+2,07) + 0,09818\sin(0,008192x-2,637) + 0,02112\sin(0,01226x-1,372) + 0,00243\sin(0,02044x+2,595) + 0,001719\sin(0,02453x-2,968) + 0,001345\sin(0,02862x+2,91) + 0,001255\sin(0,03679x+1,412)$



**Şekil 8.** 3 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agrega olarak kullanılan bazik oksijen fırını cürufu hacimsel oranlarına göre elde edilen model eğrileri, a) %0, b) %25, c) %50, d) %75, e) %100

Şekil 9’da numerik model eğrilerinin tek bir grafikte gösterimi yapılmıştır. Şekil 9’da agrega içerisinde bazik oksijen fırını cürufunun kullanılmasıyla maksimum ses yutma performansının gözlemlendiği tepe noktaların yüksek frekanslara doğru kaydığı anlaşılmaktadır. Agrega karışımında bazik oksijen fırını cürufunun kullanılması, 63 Hz ile 800 Hz aralığındaki frekansların ses yutma performansını iyileştirebilmektedir. Ayrıca agrega karışımında bazik oksijen fırını cürufu kullanıldığı takdirde 1100 Hz ile 1600 Hz aralığındaki ses yutma katsayısı artmaktadır. Yaklaşık olarak 800 Hz ile 1100 Hz aralığında bazik oksijen fırını cürufunun agrega karışımında kullanılması ses yutma katsayısını azaltmıştır.



**Şekil 9.** 3 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların ses yutma katsayısı numerik model eğrileri

### 3.4. Değişen Asfalt Kaplama Kalınlıklarına Göre Analizler (Analysis According to Changing Asphalt Pavement Thicknesses)

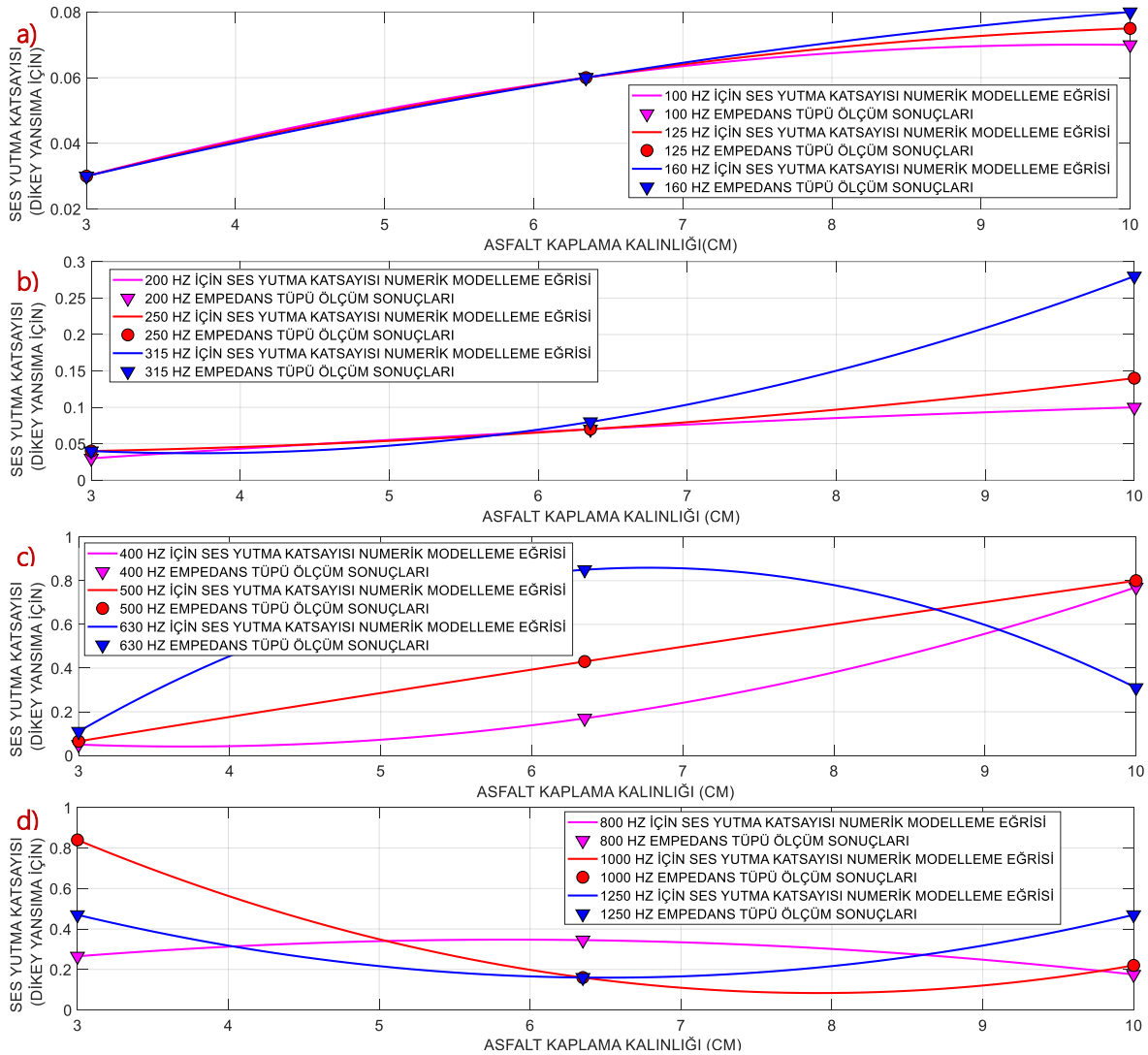
Asfalt kaplamalarda düşük frekanslardaki ses yutma performansının artırılması yapı maliyetlerini azaltabilmektedir. Bina ölçeğindeki ses yalıtım problemlerine çözüm sunulması gerekir ve düşük frekanslardaki ses yalıtımının sağlanabilmesi için ağır ve kalın bina kesitlerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Literatürdeki sunulmuş olan mimari akustik konusundaki çalışmalarda, düşük frekansların ses yalıtım performansının artırılması için ağır ve kalın bina kesitlerine ihtiyaç duyulabildiği açıklanmaktadır [44-48]. Bu kapsamda, düşük frekanslardaki ses yalıtımının sağlanması bina yükünü ve maliyetini arttırabilmektedir. Eğer kent ölçeğinde düşük frekansların gürültü düzeyi azaltılabilirse bina kesiti detaylarında daha ekonomik çözümler sunulabilecektir. ISO 717-2 standardında [49] trafik gürültüsünün gürültü spektrumu tanımlanmış ve düşük frekansların trafik gürültüsünde etkin olduğu belirtilmiştir [17]. Tüm bu sebeplerden dolayı, asfalt kaplamalarda düşük frekanslardaki ses yutma performansının artırılması çok büyük öneme sahiptir. Bu sebeple, bu çalışmada kalınlık değişiminin 1/3 oktav bant frekanslarındaki ses yutma performansı incelenmiştir.

Asfalt kaplamalarda değişen kalınlık değerlerine göre numerik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Aynı karışım içeriğine sahip asfalt kaplamaların değişen asfalt kaplama kalınlıklarına göre MATLAB programında eğri uyarlama metoduyla numerik model eğrileri üretilmiştir. Bu sayede, ses yutma katsayısı ölçümü gerçekleştirilmeyen ara kalınlık değerlerindeki ses yutma katsayısı değerleri numerik model eğrileri sayesinde yaklaşık olarak hesaplanabilecektir. MATLAB programında eğri uyarlama yöntemi kullanılarak numerik model eğrileri 100 Hz ile 1250 Hz aralığında bulunan 1/3 oktav bant frekanslar için üretilmiştir. Agregata karışımındaki bazik oksijen fırını cürufunu oranının %0 ve %100 olmasına göre analizler yürütülmüştür. Shen ve arkadaşlarının [20] çalışmasından alınan empedans tüpü 1/3 oktav bant ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları Tablo 7’de sunulmaktadır. Tablo 7’te verilen ölçüm sonuçlarına göre numerik model eğrileri değişen asfalt kaplama kalınlıklarına göre türetilmiştir. Modelleme sürecinde 3 cm, 6,35 cm ve 10 cm asfalt kalınlıkları göz önünde tutulmuş ve üç ölçüm noktasına göre nümerik eğri modelleri üretilmiştir. MATLAB programında eğri uyarlama metodundaki Poly2 eğri uyarlama modeli kullanılmıştır. Üretilen model eğrileri yardımıyla analizi yapılan asfalt kaplamaların ses yutma performansı değişen asfalt kalınlıklarına göre öngörülebilecektir (3 ile 10 cm kalınlık aralığında). Üretilen eğri modellerine ait formüller Tablo 8’de sunulmuştur. Poly2 eğri uyarlama modeli ile üretilen eğrilerin eğri uyarlama kalitesi MATLAB programında fit komutunun çıktılarında olan gof (Goodness of Fit) değişkeni ile kontrol edilmiştir. Fit komutunun çıktılarında olan gof değişkeni komutu ile değişen asfalt kalınlıklarına göre türetilen model eğrilerin R-kare (R-square) değeri 1 olarak elde edilmiştir. Şekil 10, Şekil 11 ve Tablo 8’de verilen model eğrilerinin R-kare değeri 1’e eşit olmaktadır. Model eğrilerinin ölçüm noktası sonuçlarına göre çok uyumlu bir şekilde türetildiği belirlenmiştir.

**Tablo 7.** Agregata karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranına ve değişen asfalt kalınlıklarına göre 1/3 oktav bant ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları (dikey yansıma için) [20]

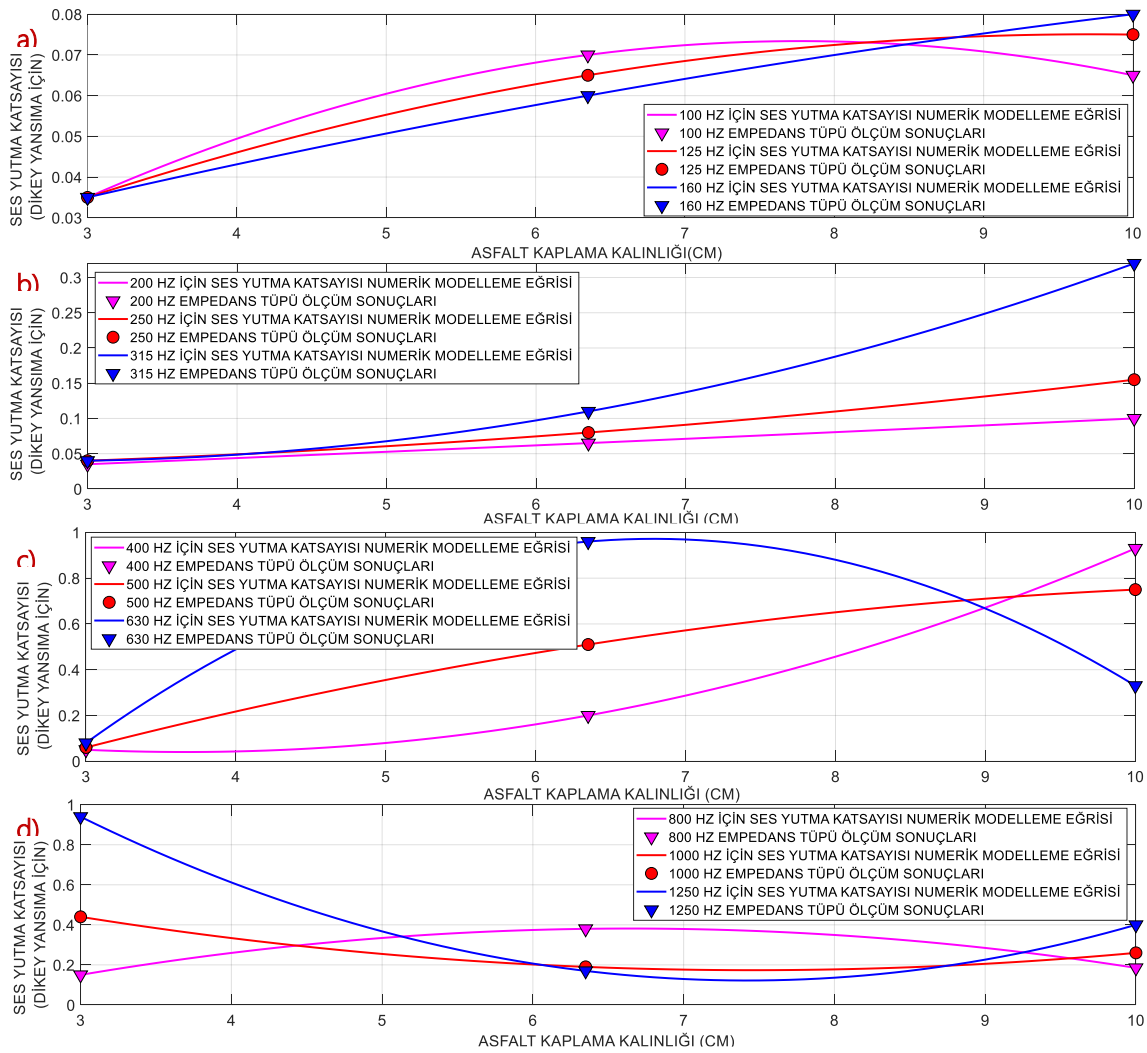
Frekans (Hz)	Agregata karışımında bazik oksijen fırını cürufunun %0 oranında olması			Agregata karışımında bazik oksijen fırını cürufunun %100 oranında olması		
	3 cm	6,35 cm	10 cm	3 cm	6,5 cm	10 cm
	Kalınlığında Numune	Kalınlığında Numune	Kalınlığında Numune	Kalınlığında Numune	Kalınlığında Numune	Kalınlığında Numune
100 Hz	0,03	0,06	0,07	0,035	0,07	0,065
125Hz	0,03	0,06	0,075	0,035	0,065	0,075
160Hz	0,03	0,06	0,08	0,035	0,06	0,08
200 Hz	0,03	0,07	0,1	0,035	0,065	0,1
250 Hz	0,04	0,07	0,14	0,04	0,08	0,155
315 Hz	0,04	0,08	0,28	0,04	0,11	0,32
400 Hz	0,05	0,17	0,77	0,05	0,2	0,93
500 Hz	0,065	0,43	0,8	0,06	0,51	0,75
630 Hz	0,11	0,85	0,31	0,08	0,96	0,33
800 Hz	0,265	0,345	0,175	0,15	0,38	0,185
1000 Hz	0,84	0,16	0,22	0,44	0,19	0,26
1250 Hz	0,47	0,16	0,47	0,94	0,17	0,4

Agrega karışımında bazik oksijen fırını cürufunun %0 oranında olması durumuna göre türetilen ve 1/3 oktav bant frekanslarına göre hazırlanan model eğrileri Şekil 10'da sunulmaktadır. Tablo 8'de, BOF cürufu oranı %0 olan karışım için 1/3 oktav bant frekanslarında türetilen model eğrilerinin denklemleri verilmiştir. Şekil 10'da ve Tablo 8'de asfalt kalınlıkları 3 ile 10 cm arasında değişmektedir ve model eğrileri bu aralık değerine göre analiz edilmektedir. 100 Hz ile 1250 Hz arasındaki 1/3 oktav bant frekansları için hazırlanmış olan model eğrileri, aynı karışım tipinde 3 cm ile 10 cm arasındaki ölçümü gerçekleştirilmeyen ara kalınlık değerlerinin ses yutma katsayısı hakkında bilgi sunmaktadır. Şekil 10a'da 100 Hz, 125 Hz ve 160 Hz numerik model eğrileri sunulmuştur ve bu frekans değerlerinde asfalt kaplama kalınlığı arttıkça ses yutma katsayısı artmaktadır. Şekil 10b'de 200 Hz, 250 Hz ve 300 Hz numerik model eğrileri sunulmuş ve asfalt kalınlığı arttıkça ses yutma katsayısı da artış göstermiştir. 315 Hz değerine ses yutma katsayısı kalınlığa bağlı olarak dikkate değer düzeyde artmaya başladığı anlaşılmaktadır. Şekil 10c'de 400 Hz, 500 Hz ve 630 Hz model eğrileri verilmiştir. 500 Hz ve 400 Hz değerlerindeki numerik model eğrilerinde, kalınlık artışına bağlı olarak ses yutma katsayısı çok yüksek düzeyde artmıştır ve en yüksek düzeyde ses yutma performansı artışı gözlemlenmiştir. Şekil 10d'de 800 Hz, 1000 Hz ve 1250 Hz modelleme eğrileri verilmiştir. 630 Hz, 800 Hz, 1000 Hz ve 1250 Hz frekanslarındaki modelleme eğrilerinde kalınlık artışına bağlı olarak dalgalanmalar gözlemlenmektedir ve ses yutma katsayısı asfalt kaplama kalınlık artışına bağlı olarak azalabildiği anlaşılmaktadır. Özet olarak 100 Hz ile 500 Hz arasındaki 1/3 oktav bant numerik model eğrilerinde asfalt kaplamanın kalınlık artışında ses yutma katsayısının arttığı gözlemlenmektedir. Asfalt kaplamanın kalınlık artışı düşük frekanslardaki ses yutma katsayısını arttırabilmektedir.



**Şekil 10.** Agregada karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranının %0 olduğu asfalt kaplamalarda değişen asfalt kalınlıklarına göre 1/3 oktav bant modelleme eğrileri, a) 100 Hz ile 160 Hz arası, b) 200 Hz ile 315 Hz arası, c) 400 Hz ile 630 Hz arası, d) 800 Hz ile 1250 Hz arası

Agrega karışımındaki bazik oksijen fırını cürufu oranının %100 olduğu asfalt kaplamalara ait, eğri uyarlama metodu ile üretilen 1/3 oktav bant frekanslarındaki modelleme eğrileri Şekil 11'de verilmektedir ve 1/3 oktav bant frekanslarında üretilen eğri modellerinin denklemleri Tablo 8'de sunulmuştur. Şekil 11'de verilen numerik model eğrileri yardımı ile veya Tablo 8'de verilen numerik model eğrilerinin denklemleri ile (3 cm ile 10 cm kalınlık aralığında olan) aynı karışım içeriğine sahip asfalt kaplamaların ses yutma katsayısı değeri katman kalınlığına göre öngörülebilir. Ölçümü gerçekleştirilmeyen ara katman kalınlıklarındaki değerler eğri modelleri sayesinde yaklaşık olarak belirlenebilir. Şekil 11a'da 100 Hz, 125 Hz ve 160 Hz 1/3 oktav bant frekanslarındaki ses yutma katsayısı eğri modelleri verilmiş ve kalınlık artışının düşük frekanslardaki ses yutma performansını arttırabildiği gösterilmiştir. Şekil 11b'da 200 Hz, 250 Hz ve 315 Hz model eğrileri verilmiş ve kalınlık artışına bağlı olarak ses yutma performansı artmış, frekans arttıkça kalınlığa bağlı ses yutma performansı artışı da artmıştır. Şekil 11c'de 400 Hz, 500 Hz ve 630 Hz frekanslarındaki eğri modelleri gösterilmiş ve kalınlık artışına bağlı olarak 400 Hz ve 500 Hz frekans değerlerindeki ses yutma performansı en fazla artış karakteri sergilemiştir. Asfalt kalınlık artışı, 400 Hz ve 500 Hz frekanslarının ses yutma performansını çok yüksek düzeyde arttırabilmiştir. Şekil 11d'de 800 Hz, 1000 Hz ve 1250 Hz numerik model eğrileri verilmiştir. 500 Hz değerinden sonraki 1/3 oktav bant frekanslarındaki (630 Hz, 800 Hz, 1000 Hz ve 1250 Hz) numerik model eğrilerinde dalgalanmalar gözlemlenmekte ve kalınlık artışına bağlı olarak ses yutma katsayısı azalabilmektedir. Düşük frekanslardan 500 Hz değerine kadar asfalt kaplama kalınlığının artması ses yutma performansını arttırmıştır. Düşük frekansların ses yutma performansını arttırabilmek için asfalt kaplama kalınlığının arttırılması faydalı olabilmektedir.



**Şekil 11.** Agregada karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranının %100 olduğu asfalt kaplamalarda değişen asfalt kalınlıklarına göre 1/3 oktav bant modelleme eğrileri, a) 100 Hz ile 160 Hz arası, b) 200 Hz ile 315 Hz arası, c) 400 Hz ile 630 Hz arası, d) 800 Hz ile 1250 Hz arası



**Tablo 8.** *Agrega karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranının %0 ve %100 olduğu asfalt kaplamalarda değişen asfalt kalınlıklarına göre 1/3 oktav bant modelleme eğrilerinin formülleri (x = asfalt kaplama kalınlığı, 3 ile 10 cm arası)*

Frekans (Hz)	Fonksiyon Denklemleri	
	%0 BOF Cüruf Karışımı	%100 BOF Cüruf Karışımı
100 Hz	$P(x) = -0,0008879x^2 + 0,01726x - 0,01378$	$P(x) = -0,001688x^2 + 0,02623x - 0,0285$
125 Hz	$P(x) = -0,0006922x^2 + 0,01543x - 0,01005$	$P(x) = -0,0008879x^2 + 0,01726x - 0,008781$
160 Hz	$P(x) = -0,0004965x^2 + 0,0136x - 0,006325$	$P(x) = -0,0002833x^2 + 0,01011x + 0,007215$
200 Hz	$P(x) = -0,0005316x^2 + 0,01691x - 0,01595$	$P(x) = 0,00009055x^2 + 0,008109x + 0,009859$
250 Hz	$P(x) = 0,00146x^2 - 0,0047x + 0,04096$	$P(x) = 0,00123x^2 + 0,0004429x + 0,0276$
315 Hz	$P(x) = 0,006122x^2 - 0,0453x + 0,1208$	$P(x) = 0,005234x^2 - 0,02804x + 0,07702$
400 Hz	$P(x) = 0,01837x^2 - 0,1359x + 0,2924$	$P(x) = 0,02217x^2 - 0,1626x + 0,3381$
500 Hz	$P(x) = -0,001084x^2 + 0,1191x - 0,2825$	$P(x) = -0,009796x^2 + 0,2259x - 0,5296$
630 Hz	$P(x) = -0,05269x^2 + 0,7136x - 1,556$	$P(x) = -0,06218x^2 + 0,8441x - 1,893$
800 Hz	$P(x) = -0,01007x^2 + 0,118x + 0,001617$	$P(x) = -0,01744x^2 + 0,2317x - 0,3882$
1000 Hz	$P(x) = 0,03135x^2 - 0,4961x + 2,046$	$P(x) = 0,0134x^2 - 0,1999x + 0,9192$
1250 Hz	$P(x) = 0,02535x^2 - 0,3296x + 1,231$	$P(x) = 0,04184x^2 - 0,621x + 2,427$

Agrega karışımında %0 oranında bazik oksijen cürufunun kullanılması ile agregada karışımında %100 oranında bazik oksijen fırını cürufunun kullanılması durumlarında kalınlık değişimine bağlı olarak ses yutma katsayısı değişimi benzer özellikler sergileyebilmektedir. Her iki karışım tipi analizinde de 100 Hz' den 500 Hz değerine kadar olan 1/3 oktav bantlardaki ses yutma performansı kalınlık artışına bağlı olarak artmaktadır. Düşük frekanslardaki ses yutma performansının iyileştirilmesi için asfalt katman kalınlığının artırılması gerekebilmektedir.

Agrega olarak bazik oksijen fırını cürufunun gözenekli asfalt kaplamada agregada olarak kullanılması modellenmiştir ancak bazik oksijen fırını cürufunun su ve havadaki nem ile temasa geçerek korozyona uğraması göz önünde tutulmamıştır. Bu etkinin net olarak belirlenebilmesi için uzun zamana yayılan bir araştırma yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada korozyon etkisi ihmal edilerek modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Araştırma kapsamında gözenekli asfalt kaplamalar için gerçekleştirilen ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları MATLAB programında modellenmiş ve analiz edilmiştir. Asfalt kaplamaların agregada karışımındaki bazik oksijen fırını cürufu oranına göre eğri modelleri MATLAB programında türetilmiştir. Elde edilen eğri modelleri üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Agregada karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranı sırasıyla %0, %25, %50, %75 ve %100 olan beş farklı gözenekli asfalt kaplama için numerik eğri modelleri hazırlanmış, farklı gözenekli asfalt karışım tipleri kendi arasında karşılaştırılmıştır. 3 cm, 6,35 cm ve 10 cm kalınlığında asfalt kaplamalar, karışım içeriğine göre ayrı ayrı analiz edilmiş ve toplam 15 farklı ses yutma katsayısı eğrisi numerik olarak elde edilmiştir. Ayrıca, aynı karışım içeriğine sahip farklı kalınlıklardaki asfalt numunelerin ses yutma katsayısı 1/3 oktav bant frekanslarında eğri uyarılama yöntemi ile modellenmiştir. Elde edilen eğri modelleri kullanılarak asfalt kaplama kalınlığı değişimine göre ses yutma katsayısı tahminleri yaklaşık olarak yapılabilecektir. Gözenekli asfalt kaplamalarda ses yutma performansının artırılması ile ilgili araştırma sonuçları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Asfalt kaplamalarda, kalınlık artışı ses yutma katsayısını arttırılabilmektedir.
- Gözenekli asfalt kaplamaların karışım içeriği değiştirilerek belirli frekans değerlerinde ses yutma performansı iyileştirilebilmektedir.
- Agregada karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranının artması düşük frekanslardaki ve yüksek frekanslardaki ses yutma performansını arttırılabilmektedir.

- Gözenekli asfalt kaplamaların karışım içeriğinde bazik oksijen firını cürufu oranının artması maksimum ses yutma performansının gözlemlendiği tepe noktalarının artmasına sebep olabilmektedir.
- Gözenekli asfalt kaplamanın kalınlığı arttığında, (3cm ile 10 cm asfalt kaplama kalınlığı aralığında) 100 Hz ile 500 Hz frekans aralığındaki ses yutma katsayısının arttığı tespit edilmiştir.
- Gözenekli asfalt kaplamalarda, asfalt kalınlığının artırılması özellikle düşük frekanslardaki ses yutma performansını arttırabilmektedir.

Asfalt kaplamalardaki karışım içeriğinin değiştirilmesi ile ses yutma performansının artırılması çok geniş bir araştırma konusu olmaktadır. Bununla birlikte, gözenekli asfalt kaplamaların mekanik açıdan tasarımı ve gözenekli asfalt kaplamalarda yol güvenliğinin sağlanmasının araştırılması gereken önemli konular arasındadır. Özellikle gözenekli asfaltın yağmur sularını hızlı drenajını sağlaması sürüş konforuna katkı sunabilecektir. Ayrıca, yağmur sularının zararlı etkileri azaltılarak asfalt kaplamanın servis ömrü arttırılabilecektir. Bunun yanında, gözenekli asfalt kaplamalarda kullanılan agregalarda, korozyon etkisinin de incelenmesi asfalt kaplamanın dayanımı ile ilgili yeni verilerin elde edilmesine katkı sunacağı düşünülmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bozkurt, T.S., Demirkale, S.Y., The field study and numerical simulation of industrial noise mapping, Journal of Building Engineering, Volume 9, January 2017, Pages 60-75, <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.11.007>
- [2] World Health Organization, (2018), Environmental Noise Guidelines for the European Region, ISBN 978 92 890 5356 3
- [3] Chen, D., Ling C., Wang T., Su, Q., Ye, A., Prediction of tire-pavement noise of porous asphalt mixture based on mixture surface texture level and distributions, Construction and Building Materials 173 (2018) 801–810, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.062>
- [4] Kleizienė R., Šernas O., Vaitkus A., Simanavičienė R., Asphalt Pavement Acoustic Performance Model. Sustainability. 2019; 11(10):2938. <https://doi.org/10.3390/su11102938>
- [5] Gilani, T.A., Mir, M.S. A study on the assessment of traffic noise induced annoyance and awareness levels about the potential health effects among residents living around a noise-sensitive area. Environ Sci Pollut Res 28, 63045–63064 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15208-3>
- [6] ISO 9613–2:1996, Acoustics, Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: General method of calculation
- [7] Bozkurt, T.S., Preparation of Industrial Noise Mapping and Improvement of Environmental Quality, Current Pollution Reports (2021), Volume 7, Pages: 325 - 343, <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00195-3>
- [8] Kotzen, B., English, C., (2009), Environmental Noise Barriers, Second edition, Taylor & Francis Group, ISBN 0-203-93138-6 Master e-book ISBN, ISBN10: 0–203–93138–6 (ebook), ISBN13: 978–0–203–93138–7 (ebook)
- [9] Barros, A.G.D., Kampen, J.K., Vuye, C., The Impact of Thin Asphalt Layers as a Road Traffic Noise Intervention in an Urban Environment, Sustainability 2021, 13, 12561. <https://doi.org/10.3390/su132212561>
- [10] Chen, D., Ling C., Wang T., Su, Q., Ye, A., Prediction of tire-pavement noise of porous asphalt mixture based on mixture surface texture level and distributions, Construction and Building Materials 173 (2018) 801–810, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.062>

- [11] Chu L., Fwa T.F., Functional sustainability of single- and double-layer porous asphalt pavements, *Construction and Building Materials* 197 (2019) 436–443, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.162>
- [12] Wang, H., Ding, Y., Liao, G., Ai, C., Modeling and Optimization of Acoustic Absorption for Porous Asphalt Concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, Volume 142, Issue 4, April 2016, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001037](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001037)
- [13] Liu, M., Huang, X., Xue, G., Effects of double layer porous asphalt pavement of urban streets on noise reduction, *International Journal of Sustainable Built Environment* (2016) 5, 183–196, <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.02.001>
- [14] Zhang, H., Liu, Z., Meng, X., Noise reduction characteristics of asphalt pavement based on indoor simulation tests, *Construction and Building Materials* 215 (2019) 285–297, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.220>
- [15] Kalauni, K., Pawar, S.J., A review on the taxonomy, factors associated with sound absorption and theoretical modeling of porous sound absorbing materials. *J Porous Mater* 26, 1795–1819 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10934-019-00774-2>
- [16] Gao, L., Wang, Z., Xie, J., Wang, Z., Li, H., Study on the sound absorption coefficient model for porous asphalt pavements based on a CT scanning technique, *Construction and Building Materials* 230 (2020) 117019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117019>
- [17] Mikhailenko, P., Piao, Z., Kakar, M.R., Athari, S., Bueno, M., Poulikakos, L.D., Effect of waste PET and CR as sand replacement on the durability and acoustical properties of semi dense asphalt (SDA) mixtures, *Sustainable Materials and Technologies* 29 (2021) e00295, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00295>
- [18] Alber, S., Ressel, W., Liu, P., Hu, J., Wang, D., Oeser, M., Uribe, D., Steeb, H., Investigation of microstructure characteristics of porous asphalt with relevance to acoustic pavement performance, *International Journal of Transportation Science and Technology* 7 (2018) 199–207, <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.06.001>
- [19] Chu L., Fwa T.F., Functional sustainability of single- and double-layer porous asphalt pavements, *Construction and Building Materials* 197 (2019) 436–443, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.162>
- [20] Shen, D.-H., Wu, C.-M., Du, J.-C., Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials* 23(1), 453–461 (2009), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001>
- [21] ISO 354:2003, Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room
- [22] ISO 10534-2, Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method
- [23] Everest, F. A., Pohlmann, K. C., (2009), *Master Handbook of Acoustic*, Fifth Edition, McGraw-Hill, ISBN: 978-0-07-160333-1
- [24] ASTM E1050, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System
- [25] Li, M., Keulen, W.N., Tijss, E., Ven, M.V.D., Molenaar, A., Sound absorption measurement of road surface with in situ technology, *Applied Acoustics* 88 (2015) 12–2, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.07.009>

- [26] Vaitkus, A., Čygas, D., Vorobjovas, V., Andriejauskas, T., Traffic/Road Noise Mitigation under Modified Asphalt Pavements, *Transportation Research Procedia* 14 (2016) 2698 – 2703, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.446>
- [27] Vaitkus A., Andriejauskas T., Vorobjovas V., Jagniatinskas A., Fiks, B., Zofka, E., Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction, *Construction and Building Materials*, Volume 152, 15 October 2017, Pages 345-356, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.130>
- [28] Ding Y., Wang H., FEM-BEM analysis of tyre-pavement noise on porous asphalt surfaces with different textures, *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, VOL. 20, NO. 9, 1090–1097, <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1388507>
- [29] Gardziejczyk, W., Jaskula, P., Ejsmont, J.A., Motylewicz, M., Stienss, M., Mioduszewski, P., Gierasimiuk, P., Zawadzki, M., Investigation of Acoustic Properties of Poroelastic Asphalt Mixtures in Laboratory and Field Conditions, *Materials* 2021, 14, 2649, <https://doi.org/10.3390/ma14102649>
- [30] Kolodziej, V.M., Triches, J.S. Ledezma, G.C., Carlesso, L.M., Jardin, L.M., Knabben, R.M., Functional and durability properties evaluation of open graded asphalt mixes, *Transport Infrastructure and Systems*, 2017, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-03009-1
- [31] Morcillo, M.A., Hidalgo, M.E., Pastrana, M.d.C., García, D., Torres, J., Arroyo, M.B., LIFE SOUNDLESS: New Generation of Eco-Friendly Asphalt with Recycled Materials. *Environments* 2019, 6, 48. <https://doi.org/10.3390/environments6040048>
- [32] Mavridou, S., Kehagia, F., Environmental Noise Performance of Rubberized Asphalt Mixtures: Lamia’s case study, *Procedia Environmental Sciences* 38 (2017) 804 – 811, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.165>
- [33] Vázquez, V.F., Terán, F., Huertas, P., Paje, S.E., Asphalt Pavement With High Content Of Crumb Rubber. Acoustic Assessment, *WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*, 4th International Conference, September 2017, ISSN 2183-0568
- [34] Wang, W., Cheng, Y., Chen, H., Tan, G., Lv, Z., Bai, Y., Study on the Performances of Waste Crumb Rubber Modified Asphalt Mixture with Eco-Friendly Diatomite and Basalt Fiber. *Sustainability* 2019, 11, 5282. <https://doi.org/10.3390/su11195282>
- [35] Chu L., Fwa, T. F., Tan, K.H., Evaluation of wearing course mix designs on sound absorption improvement of porous asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, Volume 141, 15 June 2017, Pages 402-409, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.027>
- [36] Wang, Z., Xie, J., Gao, L., Liu, M., Liu, Y., Improvement of acoustic model and structural optimization design of porous asphalt concrete based on meso-structure research, Volume 265, 30 December 2020, 120327, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120327>
- [37] Peng, B., Han, S., Han X., (2021): Laboratory and field evaluation of noise characteristics of porous asphalt pavement, *International Journal of Pavement Engineering*, <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1893319>
- [38] Zhao, C., Wang, P., Wang, L., Liu, D.: Reducing railway noise with porous sound-absorbing concrete slabs. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014, 11 (2014). <https://doi.org/10.1155/2014/206549>
- [39] Oancea, I., Bujoreanu, C., Budescu, M., Benchea, M., Grădinaru, M., C., Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements, *Journal of Cleaner Production*, Volume 203, 1 December 2018, Pages 301-312, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.273>

- [40] Bozkurt, T.S., Demirkale, S.Y., Laboratory analyses and numerical simulation for sound absorption of plasters in historical buildings, *Journal of Cultural Heritage*, Volume 36, March–April 2019, Pages 103-117, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.09.012>
- [41] Bozkurt, T.S., Demirkale, S.Y., The laboratory analyses for the plasters prepared with river sand aggregate and hydraulic lime binder, *Construction and Building Materials*. 190, 691–709 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.073>
- [42] Bozkurt, T.S., Demirkale S.Y., Investigation and development of sound absorption of plasters prepared with pumice aggregate and natural hydraulic lime binder, *Applied Acoustics*, Volume 170, 15 December 2020, 107521, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107521>
- [43] Bozkurt, T.S., Demirkale, S.Y., The experimental research of sound absorption in plasters produced with perlite aggregate and natural hydraulic lime binder. *Acoust Aust* 48, 375–393 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40857-020-00203-4>
- [44] Ginn K. B., (1978), *ARCHITECTURAL ACOUSTICS*, Brüel & Kjaer, ikinci Baskı, ISBN: 87 87355 24 8
- [45] Mehta, M., Johnson, J. and Rocaford J., (1999), *Architectural Acoustics Principles and Design*, Prentice Hall, ISBN: 0-13-793795-4
- [46] Barron, R. F., (2003), *Industrial Noise Control and Acoustics*, Marcel Dekker Inc., Newyork, Basel. ISBN:0-8247-0701-X
- [47] Beranek, L. L., Ver, I. L., (2006), *Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications*, John Wiley&Sons, Inc., ISBN-13: 978-0471-44942-3 ve ISBN-10: 0471-44942-3
- [48] Jaramillo, A. M., Stell, C., (2015), *Architectural Acoustics*, Taylor & Francis Group, ISBN: 978-1-315-75284-6 (ebk)
- [49] ISO 717-1:2013, *Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements- Part 1: Airborne sound insulation*