



Farklı Kalınlıktaki Modifiye Asfalt Yol Kaplamalarının Gerilme-Deformasyon ve Ses Yutma Performans Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation of Modified Asphalt Pavement with Different Thicknesses On Stress-Strain and Sound Absorption Performance Characteristics

Ahmet Sertaç Karakaş^{1*}, Tarık Serhat Bozkurt²

¹ İstanbul Üniversitesi Rektörlüğü, skarakas@istanbul.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0840-2878>

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, bozkurt@itu.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0001-5642-4986>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Ocak 2022
Revizyon 5 Nisan 2022
Kabul 5 Nisan 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK),
Stiren Butadien Stiren (SBS),
Numerik analiz,
Sonlu elemanlar metodu,
Ses emilimi

ÖZ

Bitümlü sıcak karışım asfalt (BSK) ile hazırlanan asfalt kaplama, yük ve yolcu trafiğinde tercih edilmektedir ve esnek üst yapı tiplerinden biri olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, yol kaplamalarında en çok kullanılan karışım tiplerinden biri olan BSK kaplamanın performans özellikleri çok büyük önem arz etmektedir. Yolun hizmet ömrü boyunca göstermesi beklenen performansı sağlaması gerekmektedir. BSK; yüksek karışım tasarımı, konforlu, güvenli ve bozulmaya karşı dirençli olmalıdır. Ayrıca yol imalatında kullanılan hammaddelerin kısıtlı olması da göz önünde tutulduğunda, asfalt yolların çevresel koşullara (iklim, trafik yoğunluğu, vs.) karşı daha uzun süreli hizmet verebilmesi için asfalt yol karışım içeriğinde katkı malzemelerinin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Katkı maddeleri arasında Stiren Butadien Stiren (SBS) polimerleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmada, farklı kalınlıklarda BSK ile hazırlanan SBS modifiyeli asfalt beton kaplamaların değişik kalınlıkları dikkate alınmıştır. Modifiye asfalt kaplamaların gerilme ve deformasyon davranışı sonlu elemanlar metodu uygulanarak numerik analiz yöntemi ile sayısal analizi karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve kalınlık artışının ses yutma katsayısına ile deformasyona olan etkisi araştırılmıştır. Asfalt kaplamalardaki kalınlık artışının, düşük frekanslardaki ses yutma performansını arttırabileceği anlaşılmıştır. Kalınlık artışının deformasyon oranını ciddi düzeyde azaltılabildiği numerik analiz sonucunda tespit edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 January 2022
Received in revised form 5 April 2022
Accepted 5 April 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Hot Mix Asphalt (HMA),
Styrene Butadiene Styrene (SBS),
Numerical analysis,
Finite element method,
Sound absorption

ABSTRACT

Asphalt pavement prepared hot mix asphalt (HMA) is preferred for both freight and passenger transport. HMA is often used as one of the flexible superstructures. Therefore, the performance properties of HMA coating, which is one of the most used mixture types in road pavements are important key. The road must provide the expected performance throughout its service life. HMA design should be comfortable, safe, and resistant to degradation as well. Besides, it was necessary to use additives in asphalt mixture content to asphalt roads to provide a longer service against environmental conditions (climate, traffic density, etc.) considering the limited amount of raw materials used in road construction. Styrene Butadiene Styrene (SBS) polymers are widely used among additives. In this study, SBS modified asphalt concrete pavements prepared with HMA were considered in different thicknesses. The stress and deformation behavior of modified asphalt pavements were examined comparatively by numerical analysis method and numerical analysis by applying the finite element method (FEM) and it was investigated the effect of thickness not only on increase in sound absorption coefficient but also its effect on deformation.. It is understood that the thickness of asphalt pavements can increase the sound absorption performance at low frequencies. As a result of numerical analysis, it has been determined significantly reduce the deformation rate of pavement with the increase in thickness

Doi: 10.24012/dumf.1062438

* Sorumlu Yazar

Giriş

Bitümlü sıcak karışım asfalt (BSK) kaplamada performans özelliklerini iyileştirmek ve yolun servis ömrünü arttırmak için modifiyer olarak adlandırılan katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Modifiyerler ile birlikte tasarlanan asfalt kaplamaların bozulmalara karşı çok daha dirençli oldukları ve özelliklerini daha uzun süre koruyabildikleri yapılan deneysel çalışmalar ve saha uygulamalarında gözlemlenmektedir. BSK tasarımında çevresel faktörlere karşı asfalt kaplamanın dayanımını ve servis ömrünü arttırmak için polimer esaslı katkılarda kullanılmaktadır. Polimer esaslı katkı malzemeleri arasından genellikle SBS (Styrene-Butadiene-Styrene) blok kopolimer katkı malzemesi yaygın olarak kullanılmaktadır.

BSK kaplamaların mühendislik özelliklerini ve servis ömürlerini iyileştirmek için literatürde SBS katkılı asfalt kaplamaların sıklıkla incelendiği görülmektedir.

SBS modifiyeli asfalt kaplamanın yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı direncinin arttığı, yorulma dayanımının arttığı ve düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı daha durabil olduğu anlaşılmaktadır [1-5]. Cong ve diğerleri, yapmış oldukları araştırmada modifiye edilmiş geri dönüşüm asfalt kaplamayı araştırmışlar, katkı malzemesinin eklenmesi ile birlikte daha iyi nem hassasiyetinin elde edildiği, tekerlek izi direncinin arttığı, düşük sıcaklıktaki çatlakların önlenmesine yönelik performansının arttığı belirtilmiştir [6]. Castillo ve ekibi, SBS/montmorillonit nanokompozit ile modifiye edilmiş asfaltın fiziksel ve reolojik özelliklerinin araştırmışlardır. Araştırmada, modifiye karışım sayesinde yüksek sıcaklıkta ayrışma problemlerinin azaldığı ve asfalt sertliğinin olumlu yönde iyileştiği gözlemlenmiştir [7]. Mulder & Whiteoak [8] yaptıkları araştırmada, polimer katkı maddeleri kullanarak asfaltın modifiye edilebileceğini ve bu şekilde yaşlanma etkilerinin azaltılabileceğini belirtmiştir. Benzer şekilde, Vonk ve arkadaşları [9], polimer katkı malzemelerin asfalt kaplamada kullanılmasını araştırmışlar ve katkı malzemesiyle birlikte asfalt kaplamanın zamana bağlı dayanım süresinin arttırılabileceğini açıklamışlardır. Karakas ve diğerleri [10], SBS modifiyeli sıcak karışım asfalt kaplamanın arazi performansını incelemişlerdir. SBS modifiyeli asfalt kaplamanın performans analizi için tekerlek izi, yorulma direnci, rijitlik modülü ve dolaylı çekme gerilmesi testleri uygulanmıştır. Araştırmada, deney sonuçlarının SBS katkı malzemesi sayesinde daha iyi olduğu belirtilmiştir [10].

Asfalt yol kaplamalarına ait numerik model analizleri bilgisayar ortamında gerçekleştirilmektedir ve bilgisayar ortamında gerçekleştirilen numerik modeller yeni asfalt kaplamaların tasarımına katkı sağlayabilmektedir. Hua ve ekibi [11], ANSYS programını kullanarak 3 boyutlu sonlu elemanlar (SE) ile asfalt tabakasının gerilme ve basınç analizini yapmışlardır. Kalıcı deformasyon ve tekerlek izi performansını test etmişlerdir. Orta tabakanın yanal deformasyonuna ve kesme gerilmesine karşı önemli bir rol oynadığı araştırmada görülmüştür. Vijapure ve

diğerleri [12], asfalt kaplamanın performansını ve asfalt kaplamanın çeşitli trafik durumlarındaki mekanik davranış özelliklerini öngörebilmek amacıyla 3B sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Elastik kaplama katmanında çekme modülünün artışına bağlı olarak gerilmenin arttığı, ancak taban ve alt taban katmanında ise çekme modülünün artışına bağlı olarak gerilmenin azaldığı görülmüştür. Caia ve diğerlerinin çalışmasında, asfalt filmin anizotropik malzeme özelliklerinin mekanik tepkisi ve alt tabaka katmanı / ara katman üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Numerik analizde, kaplama ve taban tabakası arasındaki ince film tabakasının anizotropik yapısının, kaplama tabakasının üst yapısına ait yol davranışına önemli katkılar sunduğu gösterilmiştir. [13]. Sonlu elemanlar yöntemi ile belirtilen gerilme ve basınç düzeyleri doğrultusunda kaplama malzemesinin özellikleri mekanik analizde kullanılmıştır ve bu durum düşük hacimli yollar için tasarım önerileri sunulmasına katkı sağlamaktadır [14].

Bu çalışmada, üstyapı yol kaplaması için 3B sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Sayısal analizde ampirik olarak türetilen parametreler kullanılmıştır. SBS ile modifiye edilmiş asfalt kaplamanın farklı kalınlıktaki yük gerilmesini ve deformasyon davranışını belirleyebilmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır ve bu yöntemle sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Asfalt kaplamalar kent ölçeğinde büyük yüzey alanlarına sahip olabilmektedirler ve kentsel tasarım ölçeğinde büyük yüzey alana sahip oldukları için önemli bir parametre olarak karşımıza çıkabilmektedirler. Özellikle bitişik nizam ve yoğun yerleşimlerde zemin kaplamaları önemli bir alan kaplamaktadır. Yeşil alanlar gözenekli ve emici zemin kaplaması özelliği sergileyebilmekte iken asfalt yollar yansıtıcı özellik gösterebilmektedirler. Yüzey kaplamaların sesin serbest alanda yayılırken ki etkisi ISO 9613-2 [15] standardında açıklanmaktadır. Bu standartta zeminin emicilik özelliği arttığında gürültünün serbest alanda yayılırken azaldığı anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda asfalt kaplamaların ses yutma performansının arttırılması çevresel gürültü düzeyini azaltabilmektedir [16].

Çevresel gürültünün kontrol altına alınması gereken önemli bir husustur. Bozkurt ve Demirkale [17] çevresel gürültünün, halk sağlığını ve insan faaliyetlerini önemli ölçüde etkileyebileceğinden bahsetmişlerdir ve işitsel konfor koşullarının sağlanabilmesi için çevresel gürültünün kontrol altına alınması gerektiğini açıklamışlardır. Dünya Sağlık Örgütü çevresel gürültüyü insan sağlığını olumsuz etkileyen ikinci çevresel etki olarak tanımlamıştır. İnsan sağlığını olumsuz etkileyen ilk çevre sorunu hava kirliliği iken, ikinci çevre sorunu gürültü kirliliğidir [18]. Çevresel gürültüler arasında en çok maruz kalınan gürültülerden biri ulaşım kaynaklı gürültülerdir. Ulaşımdan kaynaklanan gürültüler karayolu gürültüsü, demiryolu gürültüsü ve hava yolu gürültüsü olarak sınıflandırılabilir. Karayollarından kaynaklanan gürültüler de günümüzde tüm yerleşim alanlarını oldukça etkilemektedir. Asfalt kaplamanın tüm ulaşım sistemlerinde sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle asfalt kaplamaların akustik özelliklerinin

incelenmesi, ses yutma performansının artırılması ve karayolları nedeniyle aşırı gürültüye maruz kalan insan sayısının azaltılması büyük önem taşımaktadır. Chen ve diğerleri [19], yaşam kalitesini etkileyen ve rahatsızlıklara neden olabilen karayolu trafik gürültüsünün artan araç hacmi ile gözlenen şehir hastalıklarından biri olduğunu belirtmiştir. Kleiziené ve diğerleri [20] trafik gürültüsünün her yıl en az 1 milyon Avrupalıda kardiyovasküler hastalığa neden olduğunu tanımlamıştır. Gilani ve Mir'in [21] araştırmasında, aşırı trafik gürültüsünün uyku kalitesini azalttığı anlaşılmaktadır. Barros ve diğerleri [22] trafik gürültüsüne uzun süre maruz kalmanın kardiyovasküler hastalıklara, bilişsel işlev bozukluklarına ve uyku bozukluğu gibi sağlık sorunlarına neden olabileceğini açıklamışlardır.

Yapı elemanı ölçeğinde düşük frekansların ses yalıtımı, yüksek frekanslardan daha maliyetli ve daha zor olabilmektedir. Ginn [32], Metha ve diğerleri [33], Barron [34], Beranek & Ver [35], Everest & Pohlmann [27] ve Jaramillo & Stell [36] tarafından yapılan çalışmalarda, yapı elemanı ölçeğinde ses yalıtım ilkeleri açıklığa kavuşturulmuştur. Söz konusu kaynaklarda, alçak frekansların ses yalıtım düzeyinin artırılması için yapı elemanının kesit yoğunluğunun artırılması veya yapı elemanının kesit kalınlığının artırılmasının gerekebileceği gösterilmiştir. Özet olarak, kentsel ölçekte çevresel gürültü kontrol altında tutulmazsa bina cephelerinde kalın kesitler ve ağır pencere sistemleri kullanmak gerekebilmektedir. Bu kapsamda, yapı elemanları ölçeğinde ses yalıtım sorunlarına çözüm bulmak, kentsel ölçekten çok daha pahalı olabilmektedir. Bu nedenle kentsel ölçekte düşük frekanslı gürültünün önlenmesi önemli bir tasarım kararıdır. Trafik gürültüsünün spektrum özellikleri ISO 717-1 standardında [37] belirtilmiştir. Trafik gürültüsünün düşük frekanslarda etkili olduğu ISO 717-1 standardında anlaşılmaktadır. Mikhailenko ve ark. [38], asfalt kaplama

araştırmalarında 1200 Hz'e kadar ses yutma katsayısını göstermişler ve trafik gürültüsünün düşük frekanslarda etkili olduğunu tanımlamışlardır.

Asfalt kaplamada düşük frekanslı ses yutma performansının artırılması trafik gürültüsünü azaltmak için önemli parametrelerden biridir. Bu kapsamda, asfalt kaplamaların ses yutma performanslarının artırılması önem arz etmektedir ve araştırılması gereken önemli konulardan biri olmaktadır.

Literatürde, asfalt kaplamalarda düşük frekansların ses yutma performansı sıklıkla araştırılmakta ve etkileyen parametreler detaylandırılmaktadır. Önemli parametrelerden biri asfalt kaplama kalınlık artışının ses yutma performansına etkisidir. Araştırmalarda, asfalt kaplama kalınlığının artırılması, düşük frekanslardaki ses yutma katsayısını arttırabilmektedir. Chu ve ekibinin [39], Shen ve diğerlerinin [40], Wang ve arkadaşlarının [41], Peng ve diğerlerinin [42] çalışmalarında, asfalt tabakasının kalınlığı arttığında düşük frekanslardaki ses yutma katsayılarının artabileceği gözlemlenmektedir. Bu kapsamda, asfalt kaplama kalınlık artışı trafik gürültüsünün azaltılabilmesinde önemli bir tasarım kararlarından biri olabilmektedir. Belirlenen nedenlerle ulaşım gürültüsünün azaltılması ve kontrol altında tutulması kent sağlığı açısından zorunludur. Asfalt yüzey kaplamalarının ses yutma performansının yüksek olması göz önünde tutulması gereken önemli bir tasarım parametresi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu araştırmada, değişen asfalt kalınlıklarının ve değişen asfalt karışım içeriklerinin ses yutma performansına olabilecek etkisi incelenmek istenmiştir.

Asfalt kaplamalarda, belirli frekans aralığındaki ses yutma katsayısının arttırılabildiği literatür örnekleri ve ses yutma katsayısı artırma yöntemleri Tablo 1'de açıklanmıştır.

Tablo 1. Asfalt kaplamalarda, belirli frekans aralığındaki ses yutma katsayısının arttırılabildiği literatür örnekleri ve ses yutma performansı artırma yöntemleri (X: kullanılan yöntem tipi)

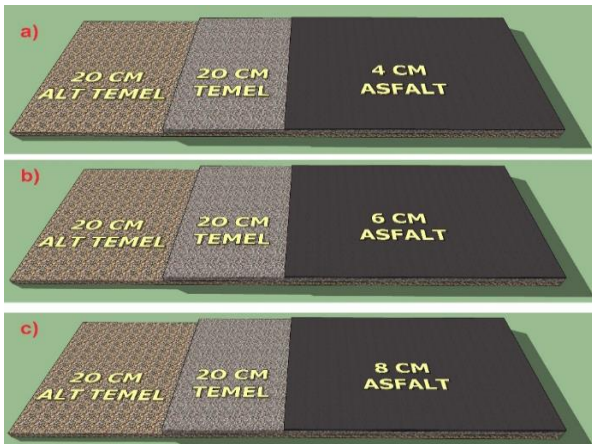
Literatür örnekleri	Asfalt kaplamadaki üst katman kalınlığının artırılması	Asfalt karışımı içerisindeki agrega dane boyutlarının değiştirilmesi	Asfalt Karışım içeriğinde kullanılan agrega tipinin değiştirilmesi	Asfalt karışımı içerisinde kırıntı kauçuk katkısının kullanılması	Asfalt kaplamalarda gözenekli asfalt sistemlerinin kullanılması	Asfalt karışımlarında lif katkısının kullanılması
Chu ve diğerleri [39]	X					
Shen ve diğerleri [40]	X		X			
Wang ve diğerleri [41]	X					
Peng ve diğerleri [42]	X					
Gardziejczyk ve diğerleri [43]		X				
Kolodziej ve diğerleri [44]		X				
Morcillo ve diğerleri [45]				X		
Mavridou & Kehagia [46]				X		
Vázquez ve diğerleri [47]				X		
Wang ve diğerleri [48]						X
Kalauni & Pawar [49]					X	
Li ve diğerleri [50]					X	
Vaitkus ve diğerleri [51,52]					X	

Bu çalışmada literatür araştırmalarını dikkate alınmıştır. Numerik model olarak kalınlık artışının deformasyon ve gerilme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca literatür araştırmaları doğrultusunda kalınlık artışının ses yutma performansını arttırabileceği literatür araştırmaları doğrultusunda öngörülmektedir.

Malzemeler ve Yöntemler

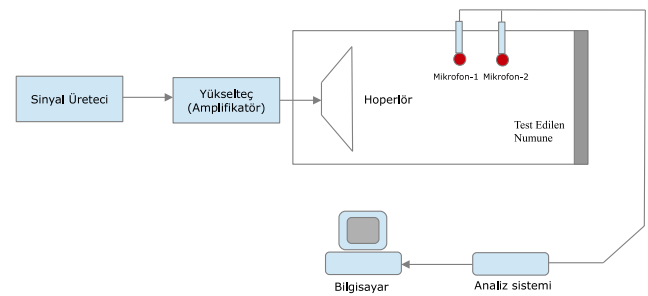
Çalışma kapsamında Türkiye Petrol Rafinerilerinde (TÜPRAŞ) temin edilen B50/70 sınıfında saf bitüm bağlayıcı ve KRATON D 1101 içeren SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) blok kopolimeri, modifiyer olarak kullanılmıştır. BSK'da, %5,24 optimum SBS modifiyeli bitüm oranı dizayn çalışmasında uygulanmıştır. BSK'da kullanılacak agregalar, Cebeci bölgesindeki kireç taşı kaynağından kırma taş agrega olarak elde edilmiştir. BSK'lar İstanbul Habibler bölgesinde yer alan plant şantiyesinde hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında yol üst yapısının dizayn çalışmasında tüm tabakalar (kaplama, temel ve alt temel) Karayolları Teknik Şartnamesi (KTS), [23] esasları dikkate alınarak belli kalınlıklarda modelde kullanılmak üzere dizayn özellikleri belirlenmiştir.

Numerik analizde alt katman olarak granüller taban katmanı uygulanmıştır. Yol üst yapılarında kullanılan alt temel ve temel kalınlıkları 20 cm olarak kurgulanmıştır. Numerik analiz çalışmasında kaplama tabakası kalınlıkları sırasıyla 4 cm, 6 cm ve 8 cm olmak üzere üç farklı kalınlıkta olacak şekilde belirlenmiş ve analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. KTS limit gereklilikler doğrultusunda malzemeler seçilmiştir. Bu çalışma, SBS katkısı ile üretilen asfalt kaplamaların davranışını farklı kalınlıklarda tahmin edebilen bir 3B sonlu eleman modellemesinin geliştirilmesini sunmaktadır. Hazırlanan modeller kullanılarak çeşitli parametrelerin verimliliği değerlendirilebilecektir. ANSYS yazılımı kullanılarak yolun üst yapısı için üç farklı model hazırlanmıştır. Karakas ve diğerleri [10] tarafından hazırlanan çalışmadan laboratuvar testlerinin sonuçları elde edilmiş ve sayısal modelin doğruluğu teyit edilmiştir. Benzer şekilde Karakas ve diğerlerinin [24] yaptığı model çalışmaları da dikkate alınmıştır. SBS modifiyeli asfalt betonunu çeşitlerinin farklı kalınlıkları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. SBS katkılı asfalt kaplama tasarımının farklı kalınlıkları, a) 4 cm asfalt kaplama, b) 6 cm asfalt kaplama, c) 8 cm asfalt kaplama

Ses yutma katsayısının ölçülmesinde 2 farklı standardın kullanılabilirdiği literatürde gözlemlenmektedir. ISO 354 standardı [25] doğrultusunda frekanslara göre ses yutma katsayısı ölçümleri çınlama odasında gerçekleştirilmektedir ve bu ölçüm yönteminde yaygın yansıma durumundaki ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları elde edilir. Literatürde yaygın kullanılan farklı bir ses yutma katsayısı ölçüm yöntemi de ISO 10534-2 standardında açıklanmıştır. ISO 10534-2 standardında [26] empedans tüpü yöntemi kullanılır ve yüzeye dik olarak gelen ses dalgalarının ses yutma katsayısı ölçümü gerçekleştirilir. Gerçek yaşam koşullarında ses dalgası bir yüzeye sadece dikey doğrultuda ulaşmaz ve farklı açılar ile yüzeye gelen ses dalgaları da mevcuttur. Bu sebeple çınlama odasında ISO 354 standardı doğrultusunda ölçümü yapılan ses yutma katsayısı sonuçları ile ISO 10534-2 standardı doğrultusunda empedans tüpünde yapılan ölçüm sonuçları birbirinden farklı olmaktadır. Çınlama odasında elde edilen yaygın yansıma durumundaki ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları, empedans tüpünden elde edilen dikey yansıma durumundaki ses yutma katsayısı ölçüm sonuçlarına göre daha yüksektir [27]. Empedans tüpünde ses yutma katsayısı ölçümü çok hızlı ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Çınlama odasında ölçüm yapabilmek için yüksek miktarda malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebepten dolayı, empedans tüpü yönteminde ses yutma katsayısı ölçümlerinin yapılması çok daha ekonomik olabilmektedir. Literatürde, çok sayıda farklı malzemelerin karşılaştırılması yapıldığında, empedans tüpü ses yutma katsayısı ölçüm yönteminin kullanıldığı sıklıkla görülmektedir. ISO 10534-2 standardında belirtilen empedans tüpü ses yutma katsayısı ölçüm yöntemi şematik olarak Şekil 2'de sunulmaktadır. Empedans tüpü içerisine numune yerleştirilir ve şekildeki farklı mikrofonların ölçüm verileri analiz edilerek test edilen numunenin ses yutma katsayısı elde edilir.



Şekil 2. ISO 10534-2 standardında belirtilen empedans tüpü ses yutma katsayısı ölçüm sisteminin şematik anlatımı [26]

Sonlu Elemanlar Analizi

Yol üst yapısında sonlu elemanlar modellerinde kullanılan tüm malzemelerin lineer elastik-izotropik davranışa sahip olduğu varsayılmıştır. Yol üst yapısındaki aşınma, temel

ve alt temel tabakalarının mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. İncelenen yol üst yapısının malzeme özellikleri

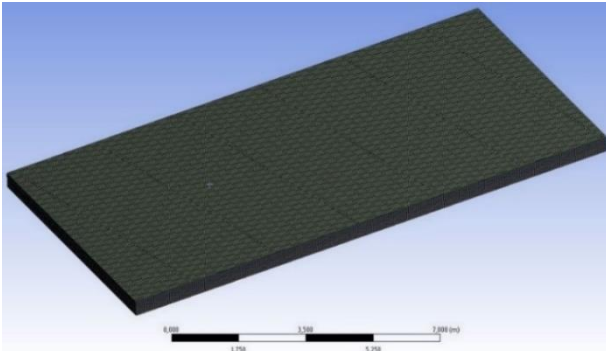
Katmanlar	Kalınlık (m)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	Yoğunluk (t/m ³)	Stabilite (kN)	Akma (mm)
Aşınma tabakası	0,10	3414	0,35	2,280	18,02	2,47
Granül temel tabakası	0,20	150	0,30	2,30	-	-
Alt temel tabakası	0,20	100	0,30	2,25	-	-

Modele kuadratik tetrahedral eleman tipi atanmıştır. Her 3 modelin de kalınlıkları farklı olması sebebiyle, modeller farklı elemanlara veya düğümlere sahip olacak şekilde tanımlanmıştır ve bunun sayesinde modelin yüksek doğruluğa sahip olması amaçlanmıştır. Farklı üst yüzey kalınlıklarına sahip asfalt kaplamaların sonlu eleman modelleri hazırlanmıştır. Tüm modeller, 50 mm mesh boyutunda katı elemanlarla elemanlara ayrılmıştır. Modellerin mesh özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 3. Üst yol yapısının mesh özellikleri

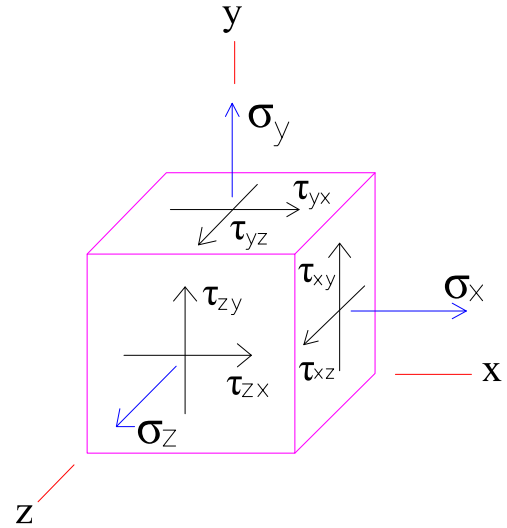
Model özellikleri	Eleman Sayısı	Düğüm sayısı
4 cm kalınlığındaki asfalt kaplaması	352800	1777881
6 cm kalınlığındaki asfalt kaplaması	392000	1935943
8 cm kalınlığındaki asfalt kaplaması	392000	1935943

Sonlu eleman analiz modelleri için gerekli sınır koşulları gerçek çalışma koşullarına göre tanımlanmıştır. Kaplamanın üst yüzeyine uygulanan kuvvet 18,02 kN olup, modellerin alt yüzeyleri sabit mesnet olarak atanmış, böylece herhangi bir yer değiştirme ve dönmeye izin verilmemiştir. Temas eden yüzeyler birbirine bağlı olduğu kabul edilmiştir ve ayrılma ve sürtünme ihmal edilerek analiz gerçekleştirilmiştir. 4 cm kalınlığında asfalt tabakasının mesh yapısının örnek modeli Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. 4 cm kalınlığında asfalt kaplama mesh yapısı [28]

Modellere ait gerilme-deformasyon ilişkilerinin belirlenmesinde kullanılan numerik analizde Von-Mises gerilmeleri elde edilmiştir. Von Mises gerilimi, belirli bir malzemenin akacağı veya kırılacağı belirlemek için kullanılan bir değerdir. Von Mises akma kriterine göre; bir malzemenin yük altındaki Von Mises gerilimi, aynı malzemenin basit gerilim altında akma sınırına eşit veya ondan büyükse, o zaman malzemenin akacağını belirtir. Şekil 4'te dizayn malzemesi üzerinde altı gerilim bileşeni tarafından ifade edilen Von Mises gerilim denklemi çıkarılmıştır [29].



Şekil 4. Von Mises gerilme eşitliğinin altı gerilme bileşeniyle belirlenmesi [29]

Şekil 4'te verilen Von Mises gerilme eşitliğinin alt gerilme bileşeniyle belirlenmesi ile ilgili formül Eşitlik-1'de sunulmaktadır.

Von Mises geriliminin koordinat ekseninde yüzey alanı üzerindeki gerilmelerinin gösterimleri ve farklı gerilme durumlarındaki Von Mises denklemleri Tablo 4'te verilmiştir.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1)$$

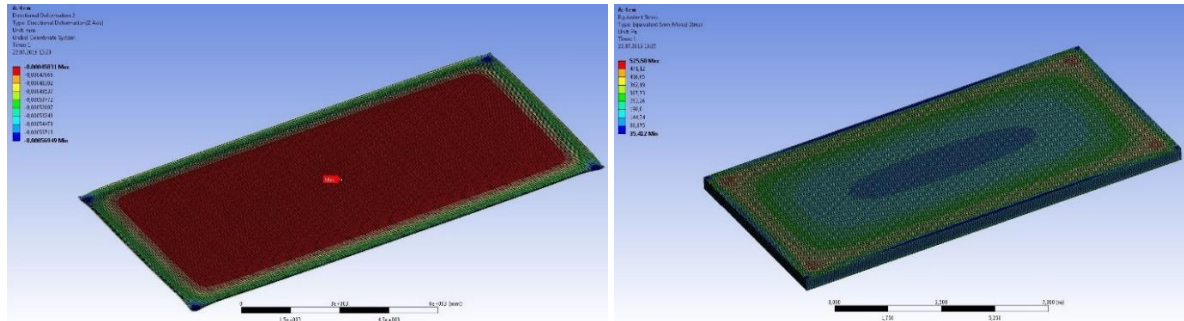
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ = kayma gerilmeler

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = eksenel gerilmeler

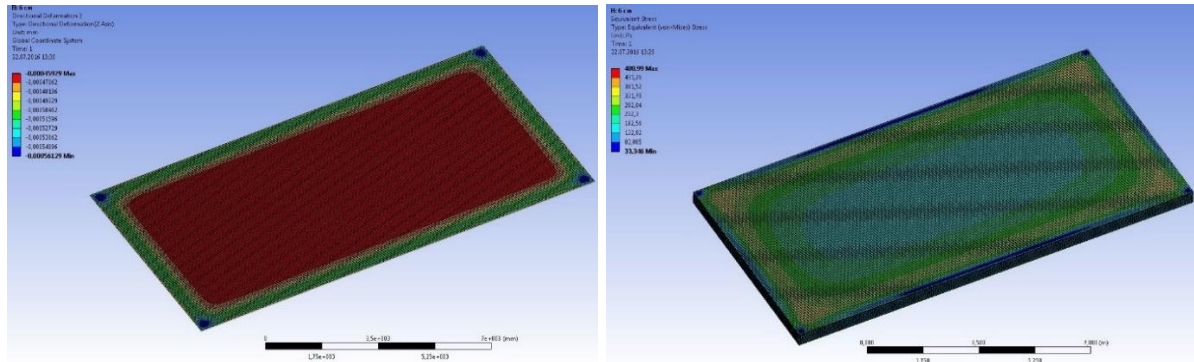
Tablo 4. Farklı Gerilme Durumlarındaki Von Mises Denklemi Uygulamaları [30]

Yükleme Senaryoları	Sınırlamalar	Sadeleştirilmiş Von Mises Denklemleri
Genel	Sınırlama yok	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)]}$
Asal Gerilmeler	Sınırlama yok	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$
Genel düzlem gerilmeleri	$\sigma_3 = 0$ $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 3\sigma_{12}^2}$
Başlıca düzlem gerilmeleri	$\sigma_3 = 0$ $\sigma_{12} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$
Saf kesme gerilmeleri	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{3} \sigma_{12} $
Tek eksenli	$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ $\sigma_{12} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sigma_1$

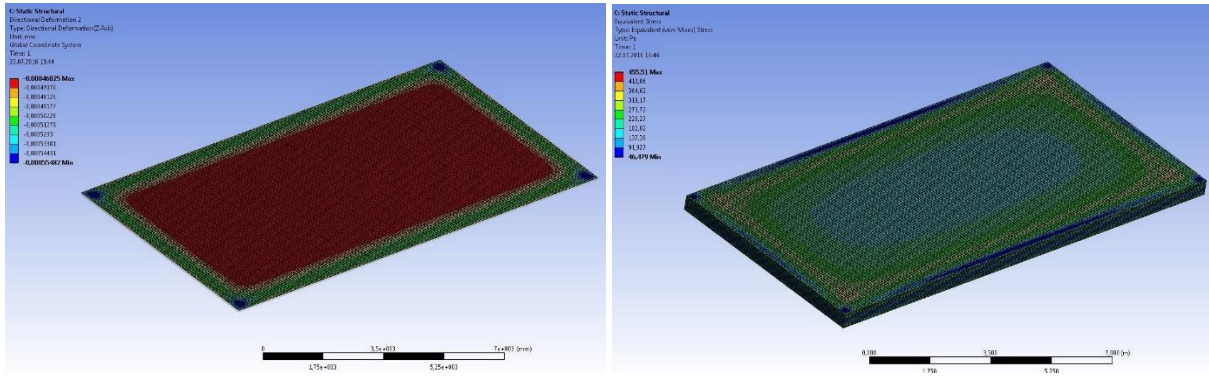
Farklı kalınlıklardaki asfalt kaplamaların eşdeğeri gerilme-deformasyon yapısı (Von-Mises) sırasıyla Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 5. 4 cm kalınlığındaki asfalt kaplamasının eşdeğer gerilme-deformasyon yapısı (Von-Mises)



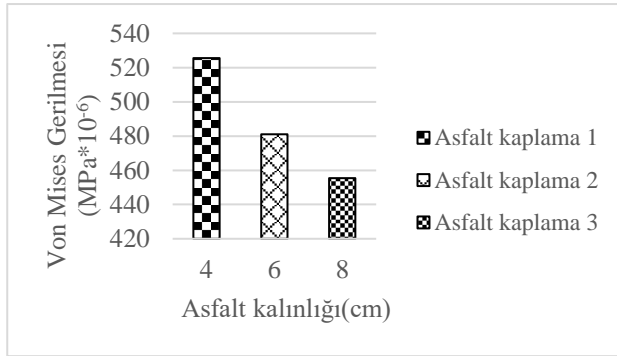
Şekil 6. 6 cm kalınlığındaki asfalt kaplamasının eşdeğer gerilme-deformasyon yapısı (Von-Mises)



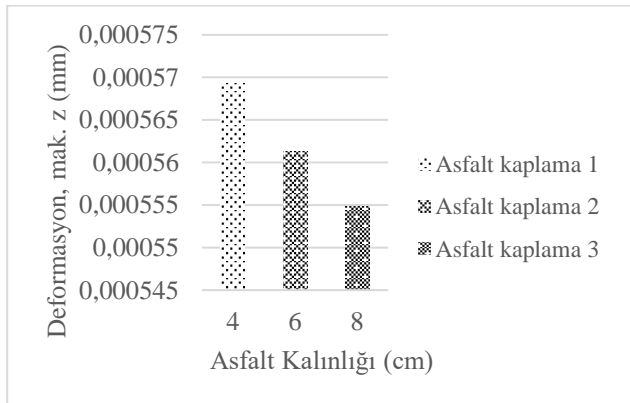
Şekil 7. 8 cm kalınlığındaki asfalt kaplamanın eşdeğer gerilme-deformasyon yapısı (Von-Mises)

Bulgular ve Tartışma

Ampirik deneysel parametreler [31] ile analizler yapılmış ve uygun analiz yöntemi ile numerik analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı kalınlıktaki asfalt kaplamaların Von Mises gerilmesi ve deformasyonu sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. Farklı asfalt kaplama kalınlıkları için Von Mises gerilmesi



Şekil 9. Farklı asfalt kaplama kalınlıklarının deformasyonu

Ampirik çalışmalardan elde edilen parametrelerle sonlu elemanlar yöntemi uygulanmış ve asfalt kaplamanın farklı katmanlarının Von Mises gerilme-deformasyon

yapısı analiz edilmiştir. Üstyapı asfalt kaplama kalınlık değişimlerinin gösterildiği Şekil 5-7'de asfalt kaplama kalınlığı arttıkça Von Mises gerilmesinin azaldığı anlaşılmaktadır. 4 cm kalınlığındaki SBS katkılı asfalt kaplamanın Von Mises gerilmesi 525.58 Pa ile maksimum düzeye sahip olduğu belirlenmiş ve 8cm kalınlığındaki SBS katkılı asfalt kaplamanın Von Mises gerilmesi 455.51 Pa ile minimum düzeye sahip olduğu tespit edilmiştir. Asfalt kaplama tabaka kalınlığının iki katına çıktığı takdirde Von Mises gerilmesinin, %15,4 civarında azaldığı numerik analiz sonucunda gözlemlenmiştir. Deformasyon düzeyi ile asfalt kalınlığı arasındaki ilişki analiz edilmiş, asfalt üst kaplama kalınlığı 4cm olduğunda deformasyon miktarının 56949×10^{-8} mm olduğu gözlemlenmiş, asfalt üst kaplama kalınlığı 8cm olduğunda ise deformasyon miktarının 55482×10^{-8} mm olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere asfalt kaplama kalınlığındaki artış yol üstyapısında Von Mises gerilmelerinde ve deformasyonlarda azalmalara yol açmıştır. Yol üstyapısında en fazla trafik yüklerine maruz kalan asfalt kaplama kalınlığı miktarındaki artış, kaplamanın uygun dizayn ve sıkıştırma koşullarında aşınmalara, tekerlek izi ve yorulmalara karşı daha durabil, trafik ve iklim gibi çevresel koşullara karşı asfalt kaplamanın gerilme dayanımı yüksek olarak deformasyonu dikkate değer düzeyde azaltacaktır. Asfalt üst kaplama kalınlığı ile Von Mises gerilme ve deformasyon miktarı arasındaki korelasyon ilişkisi numerik model analizi ile incelenmiştir. Asfalt üst kaplama kalınlığına bağlı olarak Von Mises gerilme-deformasyon fonksiyon denklemleri çıkarılmış fonksiyon tipleri polinom olarak kabul edilmiş, korelasyon katsayılarında güçlü bir ilişki görülmüştür. Asfalt üst kaplama kalınlığına bağlı olarak elde edilen regresyon modellerindeki matematiksel fonksiyon denklemleri ve korelasyon katsayıları Tablo 5'te gösterilmektedir.

Tablo 5. Regresyon modellerindeki stres ve deformasyona göre fonksiyon tipi ve matematiksel denklem tipi

Regresyon modelleri	Model Tipi	Fonksiyon Tipleri	Fonksiyon Denklemi	R ²
Değişen asfalt kalınlıklarına göre	Von Mises	Polinom	$y = 9,555x^2 - 73,255x + 589,28$	1
Değişen asfalt kalınlıklarına göre	Deformasyon, z	Polinom	$y = 8E-07x^2 - 1E-05x + 0,0006$	1

Asfalt kaplamalarda, belirli frekans aralıklarındaki ses yutma performansını artırılması için kullanılan yöntemler literatürde araştırılmıştır. Asfalt kaplamadaki kalınlık artışından farklı olarak asfalt karışımı içeriğinde gerçekleştirilen birtakım değişikliklerin de ses yutma katsayısını arttırabildiği gözlemlenmektedir. Asfalt karışım içeriğinde kullanılan agrega dane boyutunun değiştirilmesi veya asfalt karışım içeriğinde kullanılan agrega tipinin değiştirilmesi belirli frekans aralığındaki ses yutma performansını arttırabilmektedir. Asfalt karışım içeriğine kırıntı kauçuk malzemesinin eklenmesi ses yutma katsayısını belirli frekans aralığında iyileştirebildiği görülmektedir. Asfalt kaplamalarda lif katkısının kullanılması ses yutma katsayısını belirli frekans aralıklarında arttırabildiği literatürde verilmiştir. Literatürde, ses yutma katsayısının belirli frekans aralığında arttırılması için gözenekli asfalt kaplama sistemlerinin kullanılabilirliği gözlemlenebilmektedir. Asfalt karışım içeriğinde yapılacak değişiklikler ile ses yutma katsayısının arttırılması çok geniş bir araştırma konusudur.

Sonuç

Asfalt kaplamalarda istenilen performansı gösterebilmek için iklim ve tasarım çalışmaları gibi trafik ve çevre koşulları dikkate alınarak tasarlanan koşulların göz önünde tutulması gerekmektedir. Aksi takdirde birçok kaplamada bozulmaların gözlemleneceği öngörülmektedir. Hammadde miktarının sınırlı olması, üst asfalt kaplamanın araçlara bağlı olarak yüke maruz kalması nedeniyle, SBS gibi polimer katkı maddelerinin kullanılmasının tasarlanması ve gerilme mukavemetin arttırılması için katman kalınlığının belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca arazide yol uygulanması sırasında arazinin topoğrafyası dikkate alınarak ve yolun eğimi yanında yolun tasarımında sıkıştırma derecesine dikkat edilerek yolun standart geometrik koşulları sağlanmalıdır.

Çevresel gürültünün kontrol altında tutulması gerekmektedir ve asfalt kaplamaların ses yutma performansı çevresel gürültü kontrolünde etkili bir parametredir. Bu kapsamda, asfalt kaplamanın ses yutma katsayısının arttırılması çevresel gürültü düzeyini azaltabilmektedir. Bu çalışmada üç farklı kalınlıkta katman kalınlığının (4 cm, 6 cm ve 8 cm) deformasyon ve gerilme üzerine etkisi numerik model olarak incelenmiştir. Literatür çalışmalarında asfalt kaplamada kalınlık artışının düşük frekanslardaki ses yutma katsayısını arttırabildiği gözlemlenebilmektedir. Bu doğrultuda, asfalt kaplamadaki üst katman kalınlığının

arttırılmasının düşük frekanslardaki ses yutma katsayısının arttırabileceği ön görülmektedir. Ses yutma katsayısının arttırılabilmesi için asfalt karışım içeriğinde yapılabilecek değişiklikler ve literatürde kullanılan yöntemler hakkında bilgiler açıklığa kavuşturulmuştur.

Bu çalışmada, farklı asfalt kalınlıklarına sahip üç modelden elde edilen sayısal sonuçlar, önerilen modellemenin doğruluğunu göstermektedir ve önerilen modeller referans deneysel çalışma ile iyi bir uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır.

Referanslar

- [1] Lu, X. and Isacson, U., Laboratory study on the low temperature physical hardening of conventional and polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, 14, 79-88 (2000), [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00012-X)
- [2] Navarro, F.J., Patal, P., Martinez-Boza, F., Valencia, C. and Gallegos, C., Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens, *Chemical Engineering Journal*, 89, 53-61 (2002), [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00023-2)
- [3] Airey, G.D., Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens, *Fuel*, 82, 14, 1709- 1719 (2002), [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00146-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00146-7)
- [4] Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L. and Rollings, R., Effect of styrene-butadiene- styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures, *Transportation Research Record*, 1417, 178-186. (1993).
- [5] Khattak, M.J. and Baladi, G.Y., Engineering properties of polymer – modified asphalt mixtures, *Transportation Research Record*, 1638, 12-22. (1998), <https://doi.org/10.3141/1638-02>
- [6] Peiliang Cong, Yihan Zhanga, Ning Liua, Investigation of the Properties of asphalt mixtures incorporating reclaimed SBS modified asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, 113, 334–340 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.059>
- [7] Samuel Zapién-Castillo, José Luis Rivera-Armenta, , María Yolanda Chávez-Cinco, Beatriz Adriana Salazar-Cruz, Ana María Mendoza-Martínez, Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite, *Construction and Building Materials*, 106, 349–356 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.099>

- [8] Mulder, E.A. and Whiteoak, C.D., An Objective Assessment of the In-Service Performance Of Thermoplastic Rubber Modified Bitumens for Road Applications, Proceedings, 16th Arrb Conference, Perth, Western Australia, 16, 2, 309-334 (1992).
- [9] Vonk, W.C., Phillips, M.C. and Roele, M., Ageing Resistance of Bituminous Road Binders: Benefits of SBS Modification, Proceedings of 5th Eorobitume Congress, Stockholm, IA, 156-160 (1993).
- [10] Karakas, A.S., Kuloglu, N., Kok, B.V., Yilmaz, M., The evaluation of the field performance of the neat and SBS modified hot mixture asphalt, Construction and Building Materials, 98, 678-684, (2015), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.140>
- [11] Xiaodi Hua, Shen Zhonga and Lubinda F. Walubitab, Three-dimensional modelling of multilayered asphalt concrete pavement structures: strain responses and permanent deformation, Road Materials and Pavement Design, 16, 3, (2015), <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1028968>
- [12] Prasad Vijapure, Prateek Shurpali, Pawan Agarwal, Srinivas Allapur, Finite Element Analysis of Flexible Pavement, International Journal of Computer & Mathematical Sciences, 4, 5, (2015).
- [13] Yingchun Caia, Ali Sangghalehb, Ernian Panb, Effect of anisotropic base/interlayer on the mechanistic responses of layered pavements, Computers and Geotechnics, 65, 250–257, (2015), <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.12.014>
- [14] Ankit Gupta, Praveen Kumar & Rajat Rastogi, Mechanistic–empirical approach for design of low volume pavements, International Journal of Pavement Engineering, 16, 9, (2015), <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.960999>
- [15] ISO 9613–2:1996, Acoustics, Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: General method of calculation
- [16] 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>
- [17] 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.jobe.2016.11.007>
- [18] World Health Organization, (2018), Environmental Noise Guidelines for the European Region, ISBN 978 92 890 5356 3
- [19] 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>
- [20] Kleizienė R., Šernas O., Vaitkus A., Simanavičienė R., Asphalt Pavement Acoustic Performance Model. Sustainability. 2019; 11(10):2938. <https://doi.org/10.3390/su11102938>
- [21] 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>
- [22] Grangeiro de Barros, A., 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>
- [23] Karayolları Teknik Şartnamesi, Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013
- [24] Karakas A.S., Bozkurt T.S., Sayin B., and Ortes F., An assessment of SBS modified asphalt concrete pavements performance features performing numerical analysis, AIP Conference Proceedings 1863, 540002 (2017) <https://doi.org/10.1063/1.4992679>
- [25] ISO 354:2003, Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room
- [26] ISO 10534-2, Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method
- [27] Everest, F., A. Pohlmann, K., C., (2009), Master Handbook of Acoustics, McGraw-Hill, Beşinci Baskı, ISBN: 978-0-07-160333-1
- [28] ANSYS Workbench, version 14.5. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, (2012).
- [29] Reena R. Patel, Guillermo Riveros, Edward Perkins, A Transdisciplinary Approach for Analyzing Stress Flow Patterns in Biostructures, Mathematical and Computational Applications 24(2):47, April 2019, DOI:10.3390/mca24020047
- [30] Gere, J.M., and Timoshenko, S.P. Mechanics of Materials, Second Edition, Wadsworth, Inc., Belmont, California, 1984; p.351-355, 414-415.
- [31] Karakaş, A.S., Sayin, B., Kuloglu, N. The changes in the mechanical properties of neat and SBS-modified HMA pavements due to traffic loads and environmental effects over a one-year period. Construction and Building Materials, 71, 406–415 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.060>
- [32] Ginn K. B., (1978), ARCHITECTURAL ACOUSTICS, Brüel & Kjaer, ikinci Baskı, ISBN: 87 87355 24 8
- [33] Mehta, M., Johnson, J. and Rocaford J., (1999), Architectural Acoustics Principles and Design, Prentice Hall, ISBN: 0-13-793795-4
- [34] Barron, R. F., (2003), Industrial Noise Control and Acoustics, Marcel Dekker Inc., Newyork, Basel. ISBN:0-8247-0701-X
- [35] 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
- [36] Jaramillo, A. M., Stell, C., (2015), Architectural Acoustics, Taylor & Francis Group, ISBN: 978-1-315-75284-6 (ebk)
- [37] ISO 717-1:2013, Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation

- [38] 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>
- [39] 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>
- [40] Shen, D.-H., Wu, D.-H., Du, J.-C.: Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Constr. Build. Mater.* 23(1), 453–461 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001>
- [41] 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>
- [42] 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>
- [43] 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>
- [44] 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
- [45] 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>
- [46] 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>
- [47] 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
- [48] 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>
- [49] 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>
- [50] Li, M., Keulen, W.N., Tijs, 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>
- [51] 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>
- [52] Vaitkus A., Andriejauskas T., Vorobjovas V., Jagniatinskis 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>