

Farklı Katkıların Poliüretan Köpüklerin Termal ve Akustik Özellikleri Üzerine Etkileri

***Makale Bilgisi / Article Info**

Alındı/Received: 23.09.2024

Kabul/Accepted: 19.04.2025

Yayımlandı/Published: 01.10.2025

Effects of Different Additives on Thermal and Acoustic Properties of Polyurethane Foams

Öznur İSKENDER* , **Sena ARSLAN ATMACA** *Formfleks Otomotiv Yan Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bursa, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Poliüretan köpüklerin performansını ve işlevselliğini artırmak için katkı malzemeleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla beraber, katkı malzemesinin seçimi, kullanım miktarı poliüretan köpüğün sahip olduğu diğer özellikleri olumsuz etkilemeden iyileştirilmesi istenen özelliğine göre değişkenlik göstermektedir. Çalışma kapsamında, yarı esnek poliüretan köpüğün, fiziksel özelliklerinden ve akustik performansından ödün vermeden, ısı iletim katsayısının düşürülmesine yönelik silika aerogel, bentonit ve vermikülit katkı malzemeleri, poliöl içerisine poliole göre kütlece %1 oranında eklenmiştir. Elde edilen poliüretan numunelerin ısı iletkenlik ölçümlerinde, katkısız yarı esnek poliüretan köpüğe göre ısı iletkenlik değerinin aerogel katkısıyla %16,37, bentonit katkısıyla %15,91, vermikülit katkısıyla %17,30 oranında azaldığı görülmüştür. Ses yutum katsayısı sonuçları incelendiğinde, katkı malzemesi ilavesinin yarı esnek poliüretan köpüğün (YEPÜ) akustik performansını olumlu yönde etkilediği, düşük frekanslarda (160-500Hz) aerogel katkılı YEPÜ ile yüksek frekanslarda (800-6300Hz) ise vermikülit katkılı YEPÜ ile en iyi performansın elde edildiği tespit edilmiştir.

Abstract

Additives are frequently used to improve the performance and functionality of polyurethane foams. However, the choice of additive material and the amount of use varies according to the property of the polyurethane foam to be improved without adversely affecting the other properties of the polyurethane foam. Within the scope of the study, silica aerogel, bentonite and vermiculite additives were added to polyol at a rate of 1% by mass compared to polyol in order to reduce the thermal conductivity coefficient of semi-flexible polyurethane foam without compromising its physical properties and acoustic performance. In the thermal conductivity measurements of the obtained polyurethane samples, it was observed that the thermal conductivity value decreased by 16.37% with aerogel additive, 15.91% with bentonite additive and 17.30% with vermiculite additive compared to semi-flexible polyurethane foam without additive. When the sound absorption coefficient results were analysed, it was determined that the addition of additives positively affected the acoustic performance of semi-flexible polyurethane foam (SFPU) and the best performance was obtained at low frequencies (160-500Hz) with aerogel added SFPU and at high frequencies (800-6300Hz) with vermiculite added SFPU.

Anahtar Kelimeler Poliüretan; Katkı malzemesi; Isıl iletim kat sayısı; Ses yutum kat sayısı.

Keywords Polyurethane; Additive; Coefficient of thermal conductivity; Coefficient of sound absorption.

1. Giriş

Farklı formülasyonlara ve uygulama alanına bağlı olarak esnek, yarı sert ve sert köpük gibi çeşitleri bulunan poliüretan köpükler, üretim kolaylığı, esneklik, hafiflik, ısı ve ses yalıtımı, korozyon dayanıklılığı gibi avantajları sayesinde birçok sektörde kullanılmaktadır (Akdoğan, 2011). Bu avantajlara ek olarak, enerji tasarrufu sağlarken CO₂ emisyonunun azaltılmasına ihtiyaç duyulan alanlarda, poliüretan köpüklerin ısı iletkenlik değerlerinin daha da düşürülmesi istenmektedir (Verdolotti vd. 2015).

Poliüretan köpüklerin ısı iletkenlikleri sahip oldukları hücre tipine (König vd. 2020), hücre boyutuna (Rezgar vd. 2019) ve hücre boyut dağılımına (Zhu, 2020) bağlıdır. Düşük ısı iletkenlik değerleri elde etmek için konvektif ısı

transferini azalttığından dolayı kapalı hücreli köpüklerin üretimi tercih edilmektedir (Soloveva vd. 2022). Son yıllarda poliüretan köpüklerin ısı iletkenliğinin düşürülmesine yönelik çalışmalarda kapalı hücre yapısına sahip sert poliüretan köpükler üzerine yoğunlaşılmıştır. Erdem ve ark., bentonit ve organobentonit katkılamanın sert poliüretan köpüğün ısı iletkenliğindeki değişimini incelemişlerdir. Katkı maddesi eklenmesiyle elde edilen sert poliüretan köpük nanokompozitlerin ısı iletkenlik değerlerinde, katkı içermeyen sert poliüretan köpüğe (SPK) göre %10 oranında azalma tespit edilmiştir. Buna karşılık kapalı hücre içeriği ve yoğunluk değerlerinde ise artış gözlenmiştir (Erdem vd. 2017). Usta ve Aydoğan, gerçekleştirdikleri çalışmada, sert poliüretan köpük içerisine dolgu maddesi olarak kütle bazda %5, 10 ve 15

oranında barit ilave etmişlerdir. 5 µm (d50) ortalama çapa sahip baritin %15 oranına kadar eklendiği sert poliüretan köpük malzemelerin termal iletim katsayısında ± 2 'lik bir değişim gözlenmiştir. Dolgu malzemesi olarak kullanılan barit, %98,3 oranında baryum sülfat içermektedir (Usta ve Aydoğan, 2018). Yurtseven ve ark., sert poliüretan köpük malzemeye dolgu maddesi olarak farklı kimyasal bileşime sahip iki uçucu külü, toplam kütleyle % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında katkılantırmışlardır. Farklı kimyasal yapıdaki uçucu kül taneciklerinin 45 kg/m³ yoğunluk değerine sahip olan sert poliüretan köpük malzemesinin, hücre duvarlarına ve hücre birleşim bölgelerine yerleştiğini tespit etmişlerdir. Uçucu kül katkılantırmalarının sert poliüretan köpük malzemesinin termal iletim katsayısının iyileştirilmesinde etkili olduğunu belirtmişlerdir (Yurtseven vd. 2014). Nazeran ve Moghaddas, verimli termal yalıtım özelliklerine sahip silika aerogel/sert poliüretan köpük nanokompozitinin sentezi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, silika aerogelin çeşitli ağırlık yüzdeleri (%1-5 ağırlıkça) kullanılarak MDI matrisine ve polioli matrisine eklenmesine yönelik iki farklı metot uygulamışlardır. Elde ettikleri FTIR analiz sonucu silika aerogel ile MDI matrisi arasındaki reaksiyonu doğrularken, silika aerogel ile polioli matrisi arasında herhangi bir reaksiyon gerçekleşmediğini göstermektedir. Buna ek olarak ısı iletkenlik verileri, silika aerogel içeriğinin artırılmasıyla şişirici ajan olarak siklopentan kullanılan köpüklerin, ısı iletkenliğinin 0,0314 W/(m.K) değerinden 0,0268 W/(m.K) değerine düştüğünü belirtmişlerdir (Nazeran and Moghaddas, 2017). Termal yalıtımın yanı sıra akustik performansında aynı derece önemli olduğu otomotiv sektöründe, kullanıcı konforuna yönelik özellikle binek araçlarda taban kaplamalarının altında ses ve ısı izolasyonu sağlamak üzere yarı esnek poliüretan köpük malzemeler kullanılmaktadır. Literatürde, yarı esnek poliüretan köpüklerin mekanik özelliklerinden ödün vermeden, çeşitli dolgu malzemeleri katkılantırılarak akustik performansın artırılmasına yönelik çalışmalar da bulunmaktadır.

Silisyum oksit nano tozları ve karbon nanotüpleriyle güçlendirilmiş poliüretan kompozisyonunun akustik özelliklerinin araştırıldığı çalışmada, en iyi sonuca kütlece %0,2 karbon nanotüp eklenmiş poliüretan numunesinde ulaşılmıştır. Birbirleri ile yapılan kombinasyonlar içerisinde de kütlece %0,2 karbon nanotüp ve %1 p-tip nano-silika katılmış numunenin en iyi akustik değere sahip olduğu belirtilmiştir (Yıldırım, 2015). Asadi Khanouki ve Ohadi, akustik sönümleme performansını iyileştirmek üzere, yarı esnek açık hücreli poliüretan köpüklere SiO₂ nanoparçacıklarını eklemiştir. Ağırlıkça %0,05 nanoparçacık içeren poliüretan köpüğün, geleneksel

köpüklerin ses emiliminden yaklaşık %90 daha fazla ses emme kabiliyeti gösterdiğini ortaya koymuşlardır (Asadi Khanouki and Ohadi, 2018). Nanokil, poliakrilonitril (PAN) nanolifler ve polivinil florür (PVDF) nanolif kullanımının esnek poliüretan köpüklerin ses absorpsiyon özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmada ise, bahsedilen katkıların ses emme katsayısını orta frekanslarda iki kattan fazla, düşük frekanslarda ise %30'dan fazla arttırabileceği tespit edilmiştir (Hajizadeh vd. 2019). Akdoğan ve ark., termoplastik poliüretan malzemelere kütlece %5 oranında alüminyum tri hidroksit (ATH, (Al₂O₃ 3H₂O)) ve magnezyum hidroksit (MgOH, (Mg(OH)₂)) ilave etmişlerdir. Oluşturulan kompozit yapının yanmaya karşı direncini artırmak için inorganik alev geciktiriciler ile birlikte kabaran alev geciktirici olarak amonyum polifosfat (APP) da ayrıca ilave edilmiştir. ATH ilavesinin poliüretan malzemesinin çekme dayanımı ve yırtılma dayanımında düşüşe sebep olmasına rağmen, Mg(OH)₂ ilavesinin bir miktar arttırdığı görülmüştür. Her iki katkı maddesinin de sertlik ve Izod darbe deneyleri sonucunda ise olumsuz bir etki oluşturmadığı görülmüştür (Akdoğan vd. 2015). Sert poliüretan köpüklere (SPKK) yumurta kabuğu tozunun (YKT) katkılantırıldığı çalışma sonucunda elde edilen SPKK'lerin, ortalama hücre boyutu ve termal iletkenlik değerlerinde katkı içermeyen sert poliüretan köpüğe (SPK) kıyasla azalma gözlenirken, kapalı hücre oranı ve yoğunluk değerlerinde artış tespit edilmiştir. %7 YKT katkılama ile poliüretan köpüğün termal iletkenliği yaklaşık %8 mertebesinde azalmıştır. Düşük katkı oranlarında SPKK'ler için basma mukavemeti değerleri SPK'ye kıyasla yüksek olmuş, katkı miktarındaki artış ile birlikte mukavemet değerleri düşmüştür. LOI değerleri, YKT varlığında az da olsa artmıştır. SPK için %19,7 olan LOI değeri, %25 YKT varlığında %20,4'e yükselmiştir. Konik kalorimetre sonuçları, kompozitlerin yanma performans indeksi değerlerinin SPK'ye kıyasla daha iyi olduğunu ortaya koymuştur (Erdem vd. 2018).

Demir (II, III) oksit partiküllerinin rijit poliüretan köpüklerin elektrik ve termal iletkenlikleri ile termal geçişlerine ve dolayısıyla bu gözenekli malzemelerin nihai yoğunluğu ve mikroyapısına etkisinin araştırıldığı çalışmada, termal geçiş sonuçları incelendiğinde, magnetit oranı arttıkça yumuşak segmentler için camsı geçiş sıcaklığında %32 oranında gözle görülür bir düşüşün ortaya çıktığı ve sert segmentleri temsil eden camsı geçiş sıcaklığının sabit kaldığı tespit edilmiştir. Elektriksel iletkenlik ölçümlerinin sonuçlarında, katkısız poliüretan köpüğe kıyasla ağırlıkça %50 katkı oranına kadar %17 oranında önemli bir artış gözlenmiştir. Demir (II, III) oksit eklenmiş rijit poliüretan köpük nanokompozitlerin termal iletkenlik sonuçlarına bakıldığında ise, ağırlıkça %4 katkı

oranı için 0.02431W/m.K değerinden 0.02648W/m.K değerine kadar gözlemlenen hafif bir artıştan sonra termal iletkenliğin azalması ve stabilizasyonu nedeniyle manyetit parçacıklarının ısı yalıtım etkisini ortaya çıkardığı belirlenmiştir (Akkoyun, 2021).

Başka bir çalışma, rijit PU köpüklerin yangına dayanıklılığını artırmayı amaçlayarak %5, %10 ve %15 ağırlıkça nano kil ve genleşen yangın geciktirici (FR) katkıları kullanılmıştır. Deneysel bulgular, termal iletkenlikte hafif bir artış olmasına rağmen, nano kil veya genleşen yangın geciktirici ilavesinin köpüklerin termal iletkenliğini, termal stabilitesini ve yangına dayanıklılığını artırdığını göstermiştir (Aydoğan ve Usta, 2019).

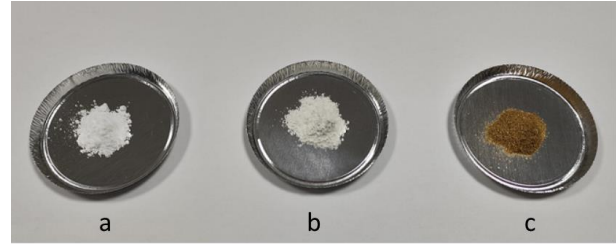
Genel olarak poliüretan köpüklerin performansını ve işlevselliğini artırmak için katkı malzemeleri sıklıkla kullanılmaktadır. Katkı malzemesinin seçimi, kullanım miktarı poliüretan köpüğün sahip olduğu diğer özellikleri olumsuz etkilemeden iyileştirilmesi istenen özelliğine göre değişkenlik göstermektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar sert poliüretan köpüklere yönelik olmakla birlikte özellikle yarı esnek poliüretan köpüklerin performansını geliştirmeye odaklanan bir çalışma yapılmamış ve literatürde belirgin bir boşluk oluşmuştur. Bu kapsamda, akustik performansından ödün vermeden, ısı iletim katsayısının düşürülmesine yönelik olarak yarı esnek poliüretan köpüklere aynı oranda silika aerojel, bentonit ve vermikülit katkı malzemesi olarak katkılандırılmıştır. Elde edilen poliüretan numunelerin termal ve akustik performansları, ısı iletkenlik ve ses

yutumu katsayısı ölçümü testleriyle ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar katkı içermeyen esnek poliüretan köpük ve birbiri ile kıyaslanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Yarı esnek poliüretan (YEPÜ) köpük hammaddeleri olan poliöl ve izosiyanat (polimerik difenilmetan diizosiyanat) Dow Chemicals firmasından temin edilmiştir. 25 °C'de poliölün yoğunluğu 1,02 g/mL, viskozitesi 1190 MPa.s, izosiyanatın yoğunluğu, viskozitesi sırasıyla 1,23 g/mL, 130-210 MPa.s ve NCO içeriği %30-32 oranındadır. YEPÜ köpük malzeme, ısı iletim katsayısı ve ses yutumu katsayısı isteklerini sağlayan ve seri üretimde kullanılan bir ticari üründür. Bu çalışmada, silika aerojel, bentonit ve vermikülit katkı malzemesi olarak kullanılmış ve katkı malzemeleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Silika aerojel (a), Bentonit (b), Vermikülit (c)

Birinci katkı malzemesi olarak kullanılan ve OSIL SUPER S220 ticari ismiyle bilinen silika aerojel, Ömer Lütfü Özgül Kimyevi Maddeler İthalat-İhracat ve Tic. A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Silika aerojelin tedarikçi firmadan temin edilen teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. OSIL SUPER S220 teknik özellikleri

Özellik	Test metodu	Değer	Birim
Görünüm	-	Beyaz, ince kokusuz toz	-
Spesifik yüzey alanı	BET	220±30	m ² /g
Gözenek boyutu	BJH	3-5	nm
SiO ₂ içeriği	ISO 3262/19	98,64	%
Na ₂ SO ₄ , çözünmüş tuz içeriği	ISO 787/13	1,36	%
Yoğunluk	ISO 787/11	92	g/l
Kurutmada kütle kaybı	ISO 787-2	4,38	%
pH değeri 50 g/l	ISO 787-9	6,87	-
Su absorplama kapasitesi	W ₁ -QCP-03	262	%
Partikül boyutu (Dv50)	ISO 13320-1	13,11	µm

Çizelge 2. Bentonit kimyasal analizi

Katkı	%
A.Z. (LoI)	9,00 ± 3,00
SiO ₂	72,00 ± 3,00
Al ₂ O ₃	13,50 ± 1,00
Fe ₂ O ₃	0,65 ± 0,10
TiO ₂	0,06 ± 0,02
CaO	1,20 ± 0,10
MgO	2,80 ± 0,20
Na ₂ O	0,50 ± 0,30
K ₂ O	1,00 ± 0,30

İkinci katkı maddesi olarak kullanılan öğütülmüş Ca-bentonit, Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A. Ş. firmasından temin edilmiştir. <74 µ tanecik boyutuna sahip olup, tedarikçi firmadan temin edilen kimyasal analizi Çizelge 2'de verilmiştir. Üçüncü katkı maddesi olarak kullanılan vermikülit, Serakülit Tarım Mineralleri San. ve Tic. A. Ş. firmasından temin edilmiştir. Tanecik boyutu 300-700 µ olup, tedarikçi firmadan temin edilen kimyasal analizi Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Vermikülit kimyasal analizi

Katkı	%
SiO ₂	39,4
Al ₂ O ₃	17,4
MgO	17,0
Fe ₂ O ₃	13,5
K ₂ O	7,4
CaO	1,7
MnO	0,1
Na ₂ O	0,3
TiO ₂	3,0
Ba	4916,0
Sr	86,0
Zn	125,0
Zr	24,0

2.2. Yöntem

Yarı esnek poliüretan köpük malzeme üretimi için hammadde tedarikçi firmanın önerisi ile polioli/izosiyanat oranı 1/0,68 oranında uygulanmıştır. Silika aerogel, bentonit ve vermikülit katkı malzemeleri, hafiflikten ödün vermemek ve seri üretim koşullarına entegrasyon kolaylığı sağlamak adına polioli içerisine poliole göre kütlece %1 oranında eklenmiştir. İlk aşamada 330 gram polioli 3750 cc karton kova içerisine konmuş ve mekanik karıştırıcı ile 500 rpm'de bir süre karıştırılmıştır. Ardından üzerine katkı malzemesi eklenmiş 2 dakika süreyle 1200 rpm'de karıştırılmıştır. Son aşamada, hazırlanan polioli karışım içerisine izosiyanat (polimerik MDI) ilave edilmiştir. Yaklaşık 13 saniyede köpürmeye başlayan köpük, iç ölçüleri 30 x 40 x 4 cm olan alüminyum kalıp içerisine oda sıcaklığında dökülmüş ve kalıp üzeri kapatılarak 5 dakika süreyle kürlenmeye bırakılmıştır. Kalıptan çıkartılan katkı yarı esnek poliüretan köpük numuneleri 24 saat boyunca bekletilerek kürlenme prosesinin tamamlanması sağlanmıştır.

2.3. Karakterizasyon Yöntemleri

Çalışma kapsamında üretilen katkı yarı esnek poliüretan köpük malzemelerin karakterizasyonu, ağırlık ölçümü, yoğunluk hesaplama, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, ısı iletkenlik testi ve ses yutum katsayısı ölçümü yapılarak belirlenmiştir.

2.3.1. Ağırlık ölçümü ve yoğunluk hesaplama

Çalışma kapsamında elde edilen katkı yarı esnek poliüretan numuneler ile aynı yöntem kullanılarak üretilen yarı esnek poliüretan köpük malzemenin ağırlıkları ölçülerek, yoğunlukları hesaplanmıştır.

2.3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

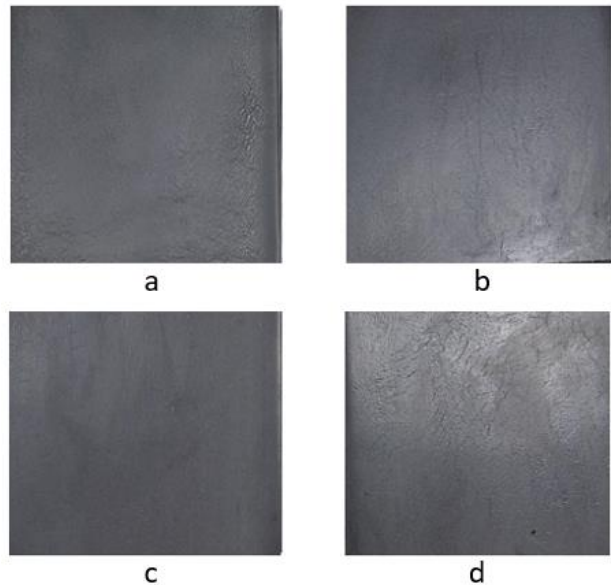
Çalışma kapsamında elde edilen katkı yarı esnek poliüretan köpüklerin morfolojik özellikleri, Şekil 2'de verilen taramalı elektron mikroskobu (Zeiss GeminiSEM 300) cihazı kullanılarak incelenmiştir. İnceleme sırasında

ark meydana gelmemesi için numunelerin yüzeyi altın ile kaplanmıştır.

**Şekil 2.** Taramalı elektron mikroskobu

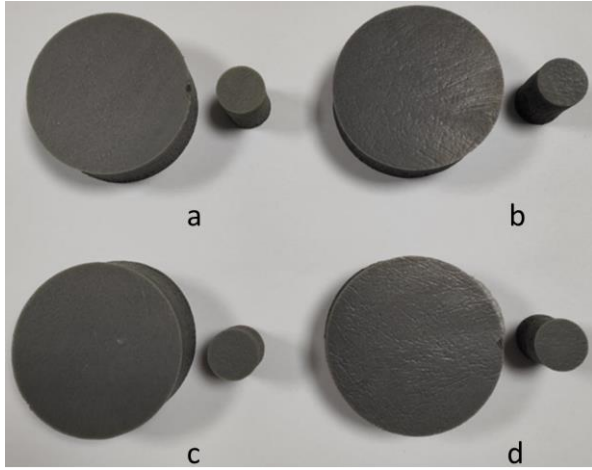
2.3.3. Isıl iletkenlik katsayısı ölçümü

Çalışma kapsamında elde edilen yarı esnek poliüretan köpük ve katkı yarı esnek poliüretan köpük numunelerinin ısı iletkenlik testleri, TA Instruments markalı, Lasercomp Fox 314 modeli cihazda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te gösterildiği üzere, test numuneleri 30 x 30 x 4 cm ebatlarında hazırlanmış olup, TS ISO 8301 standardına uygun olarak ısı iletkenlik testleri gerçekleştirilmiştir. Test sırasında, alt plaka sıcaklığı 10 °C, üst plaka sıcaklığı 30 °C olarak ayarlanmış olup, 10 farklı noktadan yapılan ölçümlerin ortalama değeri belirlenmiştir.

**Şekil 3.** Isıl iletkenlik test numuneleri (a. YEPÜ, b. Aerogel katkı YEPÜ, c. Bentonit katkı YEPÜ, d. Vermikülit katkı YEPÜ)

2.3.4. Ses yutum katsayısı ölçümü

Ses yutum katsayısı ölçümleri, 30 mm ve 100 mm çapa sahip numunelere, Formfleks Ar-Ge laboratuvarında bulunan empedans tüpü ile TS EN ISO 10534-2 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 30 mm ve 100 mm empedans tüpü numuneleri (a. YEPÜ, b. Aerojel katkılı YEPÜ, c. Bentonit katkılı YEPÜ, d. Vermikülit katkılı YEPÜ)

3. Bulgular

3.1. Ağırlık ölçümü ve yoğunluk hesaplama

Aynı proses adımları kullanılarak üretilen aerojel katkılı YEPÜ, bentonit katkılı YEPÜ ve vermikülit katkılı YEPÜ'nün ağırlıkları ölçülerek yoğunlukları hesaplanmış, YEPÜ ile kıyaslanmıştır. Çizelge 4'te verilen sonuçlar incelendiğinde, %1 oranında katkılandırmanın YEPÜ köpüklerin ağırlıklarında ve yoğunluklarında önemli bir artış sağlamadığını göstermektedir. Binek araçlarda, araç

ağırlığının azaltılmasına paralel olarak yakıt/ enerji tüketiminin azaltılması da sağlanabilmektedir. Bu sayede, fosil yakıt ile çalışan motorlarda daha düşük egzoz emisyonu sağlanırken, elektrikli araçlarda menzil artışı sağlanmaktadır (Ünlü, 2022). Dolayısıyla günümüzde, özellikle elektrikli veya hibrit tahrikli araçların yaygınlaştırılmasına yönelik global yaklaşımlar; araç gövde ağırlıklarının azaltılmasını gerektirmektedir. Poliüretan köpüklerin, ısı ve ses yalıtımının yanı sıra hafif ve esnek yapıya sahip olması otomotiv sektöründe kullanılmasının en önemli özelliklerden biri olduğu düşünüldüğünde, YEPÜ'nün herhangi bir özelliğinin geliştirilmesinde, katkı malzemesi kullanılmasının nihai üründe ağırlık ve yoğunluk artışı yaşanmasına sebebiyet vermemesi istenmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen katkılı YEPÜ'ların ölçülen ve hesaplanan ağırlık ve yoğunlukları kabul edilebilir aralıktadır. Buna ek olarak aerojel ve vermikülitin sahip olduğu gözenekli yapıları nedeniyle köpüğün daha fazla hava içermesine ve dolayısıyla katkısız yarı esnek poliüretan köpüğe kıyasla daha hafif olmasına neden olduğu, su tutma özelliğine sahip bir kil minerali olan bentonitin ise köpüğün daha yoğun ve daha az gözenekli bir yapı oluşturmaya yol açarak ağırlığını arttırdığı düşünülmektedir. Çizelge 4'te verilen sonuçlarda bu öngörüğü kanıtlar niteliktedir.

Çizelge 4. Yarı esnek poliüretan köpüklerin ağırlık ve yoğunlukları

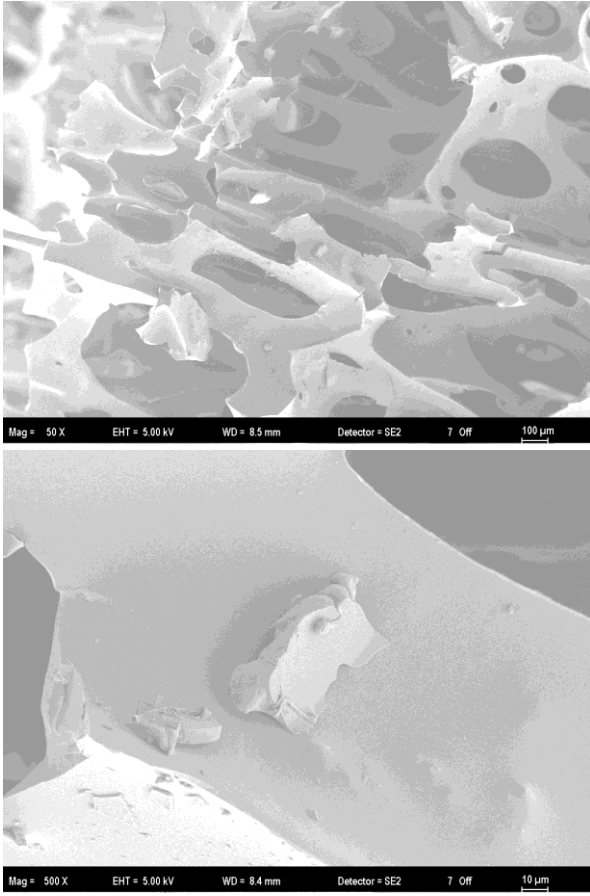
Numune	Yarı esnek poliüretan köpük (YEPÜ)	Aerojel katkılı YEPÜ	Bentonit katkılı YEPÜ	Vermikülit katkılı YEPÜ
Ağırlık (g)	278,6	277,1	297,7	277,1
Yoğunluk (g/cm ³)	0,0773	0,0769	0,0776	0,0769

3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

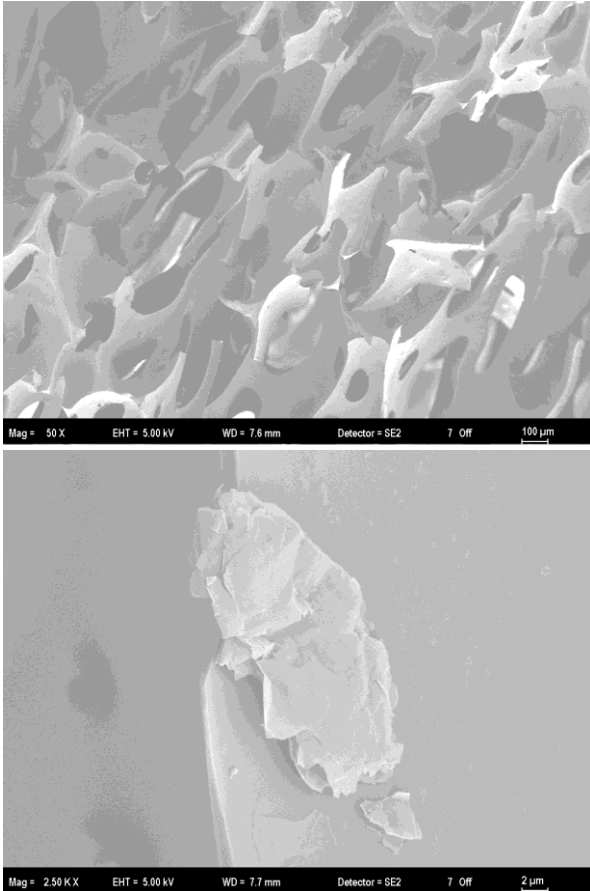
Polimer köpük malzemeler, açık hücre tipi ve kapalı hücre tipi olmak üzere iki farklı hücre yapısına sahiptir. Açık hücreli poliüretan köpüklerde, hücreler birbirine bağlı ağ oluşturan boşluklar şeklindedir (El Khodor, 2020). Açık hücreli köpükler, yapısı sebebiyle yüksek ses yutum kapasitesine sahiptir. Ayrıca nem/su tutma eğilimi ve gaz/buhar geçirgenliği diğer polimer esaslı köpük malzemelere oranla daha yüksektir (Yetgin ve Ünal, 2008). SEM görüntülerinde şekil ve büyüklükleri farklı gözeneklerin bulunduğu, bazı bölgelerde ise gözeneklerin çeperlerle tamamen kapalı ya da yarı kapalı olduğu görülmektedir.

Şekil 5'te %1 oranında aerojel katkılandırılmış poliüretan köpüğe ait SEM görüntüleri verilmiştir. Aerojel katkısı poliüretan hücre yapısında gözle görülür şekilde genişleme ve boşluklu yapıya sebep olmuştur. Bunun aerojelin yüksek gözenekliliğe ve düşük yoğunluğa sahip bir malzeme olmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Aerojelin gözenek yapısı, poliüretanı sahip olduğu açık

hücre yapısının korunmasını sağlar, bu da malzemenin ısı ve ses yalıtım özelliklerinin gelişmesini sağlar. SEM görüntülerinde aerojel partiküllerinin yapı içerisinde homojen dağılmadığı, bu nedenle de yüzey tutunmasının bazı bölgelerde zayıf kaldığı gözlemlenmektedir. Katkının poliüretan yüzeyiyle tam bir etkileşim içinde olmaması, malzemenin akustik ve termal performansında beklenenden daha az bir iyileşme göstermesine neden olabilir. Bentonit, suyla temas ettiğinde şişme kapasitesine sahip doğal bir kil mineralidir (Uraz, 2015). Şekil 6'da %1 oranında bentonit katkılandırılmış poliüretan köpüğe ait SEM görüntüleri verilmiştir. %1 bentonit katkısı, hücre boyutlarının küçülmesine ve hücre duvarlarının kalınlaşmasına sebep olmuştur. Bu da poliüretanın esneklik ve dayanıklılık özelliklerini geliştiren bir durumdur. Poliüretan yapısında, bentonit partiküllerinin homojen şekilde dağıldığı görülmektedir. Çevreye dağılmış çok sayıda küçük partikül, bentonitin matrise iyi bir şekilde entegre olduğunu gösterir. Tabakalı yapısı nedeniyle bentonit, poliüretan matrisi içinde iyi bir bağ oluşturmuş ve yüzeye sağlam bir şekilde tutunmuştur.

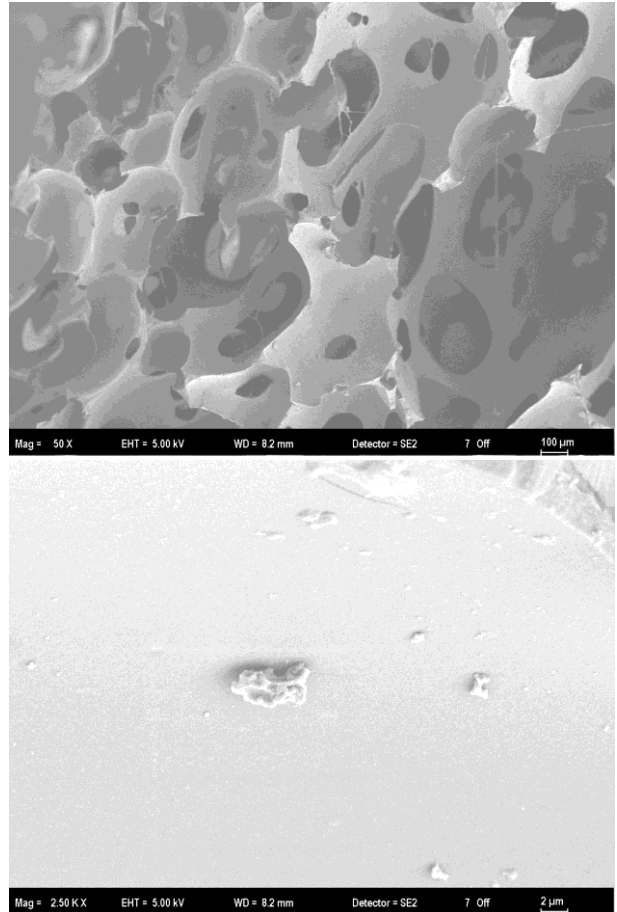


Şekil 5. %1 oranında aerogel katkılanmış poliüretan köpüğe ait SEM görüntüleri



Şekil 6. %1 oranında bentonit katkılanmış poliüretan köpüğe ait SEM görüntüleri

Vermikülit genellikle mika mineralleri ve kloritin alterasyonu sonucu oluşan bir mineraldir (Toksoy, 1997). Vermikülit ısıya maruz kaldığında katmanlar arasında bulunan su buharlaşarak, malzemenin genişlemesini sağlar. Bu durum vermiculiti ısıya, kimyasallara ve yangına dayanıklı hale getirir. Ayrıca oldukça hafif, yalıtkan ve düşük yoğunluklu bir malzemedir (Valaskova and Martynkova, 2012). Şekil 7’de %1 oranında vermiculit katkılanmış poliüretan köpüğe ait SEM görüntüleri verilmiştir. %1 vermiculit katkılı poliüretanın açık hücre yapısı belirgin bir şekilde görülmektedir fakat aerogel katkılı poliüretana kıyasla büyük hücre boşluklarına sahip değildir. Vermikülitin tabakalı yapısı, poliüretanın hücre duvarlarının daha düzenli olmasını sağlayarak malzemenin termal dayanım özelliklerini artırır. Vermikülitin poliüretan matrisi içinde homojen bir dağılım gösterdiği, poliüretan yüzeyine tutunduğu ve dolayısıyla katkının malzeme ile iyi bir etkileşim içinde olduğu görülmektedir.



Şekil 7. %1 oranında vermiculit katkılanmış poliüretan köpüğe ait SEM görüntüleri

3.3. Isıl iletkenlik katsayısı ölçümleri

Açık hücreli, yarı esnek poliüretan köpük malzemeye ait her bir prototip numunenin ısı iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 5. Prototip numunelere ait ısı iletkenlik katsayısı (W/m.K) sonuçları

Ölçüm sayısı	Yarı esnek poliüretan köpük (YEPÜ)	Aerojel katkılı YEPÜ	Bentonit katkılı YEPÜ	Vermikülit katkılı YEPÜ
1	0,04312	0,03647	0,03716	0,03617
2	0,04317	0,03638	0,03680	0,03646
3	0,04310	0,03631	0,03637	0,03567
4	0,04326	0,03626	0,03631	0,03595
5	0,04334	0,03619	0,03660	0,03579
6	0,04308	0,03616	0,03608	0,03579
7	0,04311	0,03610	0,03626	0,0355
8	0,04344	0,03613	0,03615	0,03568
9	0,04367	0,03607	0,03590	0,03582
10	0,04372	0,03606	0,03642	0,03525
Ortalama değer	0,04330	0,03621	0,03641	0,03581
Standart sapma	0,00023	0,00013	0,00035	0,00032

Yarı esnek poliüretan köpük numunenin en yüksek termal iletkenlik değerine sahip olması beklenen bir sonuçtur. Açık hücre yapısı, gazların ve ısının daha kolay hareket etmesine neden olarak malzemenin yalıtım kapasitesini düşürür. Aerojelin yapısında bulunan gözenekler, ısı transferine karşı yüksek direnç gösterir. Aerojelin gözenekli yapısı, poliüretanın sahip olduğu açık hücreli yapıyı destekleyerek, hücreler arasındaki hava akışını sınırlar. Bu sayede aerojel katkılı YEPÜ, YEPÜ'ya göre ısı iletim katsayısında %16,37'lik azalma sağladığı görülmüştür. Bentonit, su tutma kapasitesine sahip bir kil mineralidir. Poliüretan sistem içerisinde şişirici ajan olarak bulunan suyu tutarak, köpüğün daha rijit kalmasını sağlar. Bu sayede bentonit katkılı YEPÜ, YEPÜ'ya göre ısı iletkenlik katsayısının %15,91 azalmasına yol açar. Vermikülit, katmanlı yapıya sahip bir mineral olup, ısıya maruz kaldığında katmanlar arasındaki suyun buharlaşmasıyla genişler ve hacmi artar. Bu genişleme, ısı transferini zorlaştıran bir bariyer oluşturarak ısı iletimini azaltır. Vermikülit yüksek sıcaklıklara ve yangına dayanıklı bir mineral olup, bu özellik sayesinde malzeme içerisinde ısı iletimini sınırlayıcı bir etki gösterir. Vermikülit katkılı YEPÜ, YEPÜ'ya göre %17,30 daha düşük ısı iletim katsayısına sahiptir. Sonuç olarak, üç katkı maddesinin de ısı iletkenlik katsayılarının birbirine yakın sonuç verdiği görülmektedir. Bu durumun olası nedenleri aşağıda verilmektedir.

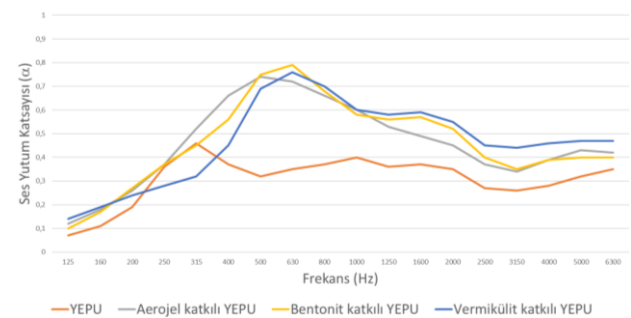
- Katkı maddelerinin her birinin poliüretan sistemi içerisinde poliole %1 oranında eklenmiş olması, malzemenin genel yapısını ve özelliklerini sınırlı bir şekilde göstermesine neden olabilir.
- Katkı maddeleri hücre yapısında bazı değişikliklere sebep olsa da poliüretan köpüğün açık hücre yapısı, katkı maddelerinin etkilerini belirli bir noktaya kadar göstermesine neden olabilir.

Aerojel, bentonit ve vermikülit düşük ısı iletkenlik ve hafiflik gibi benzer özelliklere sahip katkı maddeleri

olmasından dolayı, yapı içerisinde benzer ısı iletkenlik sonuçları gösterebilir.

3.4. Ses yutum katsayısı ölçümü

Binek araçlarda yolcu kabini içerisinde akustik konforu sağlamak otomotiv üreticilerine rekabet avantajı sunmaktadır. Bu amaçla üreticiler araç yolcu kabini içerisindeki gürültü seviyesini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Bir araç içerisinde gürültü üç temel kaynaktan yayılır. Bunlar motor gürültüsü, yol gürültüsü ve rüzgar gürültüsüdür. Motor gürültüsü, güç aktarma elemanlarının çalışması esnasında ortaya çıkan gürültü ve titreşimlerinden kaynaklanmakta olup, frekans aralığı 50-500Hz'dir. Düşük devirlerde düşük frekanslarda ses çıkarırken, motor devri arttıkça frekans da yükselir. Yol gürültüsü, yol yüzeyi ve lastik arasındaki etkileşimden kaynaklanmakta ve frekans aralığı 500-1300Hz'dir. Yol gürültüsü genellikle 40 km/saat üzerindeki araç hızlarında fark edilmeye başlar, ancak genel iç gürültüye maksimum katkısı 50 ila 80 km/saat arasındadır ve daha sonra aerodinamik gürültünün baskın olduğu yüksek hızlarda azalır. Rüzgar gürültüsü ise, aracın 100 km/saat üzerindeki hızlarda sabit bir ortam içerisinde hareket ederken çıkan aerodinamik gürültüdür. 1000-5000Hz frekans aralığındadır (Ayvaz, 2019).

**Şekil 8.** YEPÜ ve katkı malzemesi katkılı YEPÜ numunelerinin ses yutum katsayısı grafiği

YEPÜ ve katkı malzemesi katkılı YEPÜ numunelerine ait ses yutum katsayısı ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında;

160-500Hz aralığında aerojel katkı YEPU'nun ses yutum performansı diğer numunelere göre daha iyidir. 500-800Hz aralığında bentonit katkı YEPU daha iyi bir ses yutum katsayısı performansı göstermişken, 800-6300Hz aralığında vermikülit katkı YEPU'nun ses yutum performansı diğer numunelere kıyasla ön plana çıkmıştır. Şekil 8'de verilen ses yutum katsayısı-frekans grafiğinde de görüldüğü üzere, elde edilen katkı YEPU malzemelerin YEPU'ya göre daha iyi ses yutum performansı sergilediği literatür ile uyumludur. Bu durumda elde edilen malzemelerin özellikleri, mevcut YEPU'nun özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha iyi akustik performans özelliklerine sahip yeni malzemelerin geliştirilmesi için bir fırsat sunmaktadır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu deneysel çalışmada, yarı esnek poliüretan köpüklerin (YEPU) fiziksel özelliklerinden ve akustik performansından ödün vermeden ısı iletim katsayısının düşürülmesine yönelik silika aerojel, bentonit ve vermikülit katkı malzemeleri poliöl içerisinde poliole göre kütlece %1 oranında eklenmiştir. Elde edilen poliüretan numunelerin fiziksel özellikleri, termal ve akustik performansları incelenmiştir.

Fiziksel özellikleri incelendiğinde, %1 oranında katkı maddesi ilavesinin YEPU'nun ağırlık ve yoğunluğunda belirgin bir artışa yol açmadığı gözlenmiştir. Bu bulgu, katkı malzemeleriyle iyileştirilmiş poliüretan köpüklerin, otomotiv sektöründe araç ağırlığını arttırmadan ses ve ısı yalıtım performanslarını artırabilecek potansiyelde olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen poliüretan numunelerin ısı iletkenlik ölçümlerinde, seri üretimde kullanılan katkısız yarı esnek poliüretan köpüğe göre ısı iletkenlik değerinin aerojel katkısıyla %16,37, bentonit katkısıyla %15,91, vermikülit katkısıyla %17,30 oranında azaldığı görülmüştür. Katkı malzemeleri, düşük yoğunlukları ve gözenekli yapıları sayesinde ısı transferini sınırlamış, bu da poliüretan köpüğün yalıtım özelliklerini iyileştirmiştir.

Ses yutum katsayısı sonuçları incelendiğinde, katkı malzemesi ilavesinin yarı esnek poliüretan köpüğün (YEPU) akustik performansını olumlu yönde etkilediği, düşük frekanslarda (160-500Hz), aerojel katkı YEPU ile yüksek frekanslarda (800-6300Hz) ise vermikülit katkı YEPU ile en iyi performansın elde edildiği tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, katkı YEPU'ların seri üretimde kullanılan YEPU'ya kıyasla daha iyi akustik performans sergilediğini ortaya koymakta ve malzemenin ses yalıtım özelliklerinin geliştirilmesi için katkı maddelerinin potansiyel faydasını vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, aerojel, bentonit ve vermikülit katkılarının ticari ürünlerin seri üretiminde kullanılan yarı esnek poliüretan köpüklerin ısı ve ses yalıtım performanslarını geliştirme potansiyelini göstermekte, bu katkılarla üretilen malzemelerin otomotiv sektöründe akustik konfor ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Fikir sahibi, Araştırma, Metodoloji, Deney tasarımı, Deney, Yazma, Kaynaklar.

Yazar 2: Araştırma, Analiz ve yorumlama, Yazma-orijinal taslak, İnceleme ve düzenleme, Görselleştirme, Kaynaklar.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

- Akdoğan, E., 2011. Farklı katkı maddelerinin poliüretan malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 114.
- Akdoğan, E., Tarakçılar, A. R., Topçu, M., Yurtseven, R. 2015. Alüminyum hidroksit ve magnezyum hidroksit katkısının termoplastik poliüretan malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **21**(8 (Özel Sayı)), 376-380.
<https://doi.org/10.5505/pajes.2015.24572>
- Akkoyun, M. 2021. Demir (II, III) oksit katkı rijit poliüretan köpük nanokompozitlerin elektriksel ve termal iletkenlikleri. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **9**(1), 205 – 215.
<https://doi.org/10.36306/konjes.782105>
- Asadi Khanouki, M., Ohadi, A., 2018. Improved acoustic damping in polyurethane foams by the inclusion of silicon dioxide nanoparticles. *Advances in Polymer Technology*, **37**(8), 2799-2810.
<https://doi.org/10.1002/adv.21952>
- Aydoğan, B., Usta, N., 2019. Fire behavior assessment of rigid polyurethane foams containing nano clay and intumescent flame retardant based on cone calorimeter tests. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, **54**(1), 55-63.
- Ayvaz, A., 2019. Binek bir aracın gövde panellerinin yol gürültüsü performansına olan katkısının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 76.

- El Khodor, M., 2020. Termoplastik köpüklerin üretim parametrelerinin ses sönümleme performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Bursa, 91.
- Erdem, M., Akdoğan, E., Üreyen, M., Uysal, O., Kaya, M., Irmak, C. 2018. Yumurta kabuğu tozu katkılandırılmış sert poliüretan köpükler: Termal iletkenlik, basma mukavemeti ve yanma davranışlarının incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, **38(1)**, 83-93.
- Erdem, M., Ortac, K., Erdem, B., Türk, H., 2017. Reaktif organobentonit katkıların sert poliüretan köpüğün bazı performans özellikleri üzerine etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **32(4)**, 1209-1219. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.369543>
- Hajizadeh, R., Khavanin, A., Barmar, M., Jafari, A. J., Dehghan, S. F., 2019. Improving the sound absorption properties of flexible polyurethane (PU) foam using nanofibers and nanoparticles. *Sound Vib*, **53**, 207-222. <https://doi.org/10.32604/sv.2019.06523>
- Hakan Yetgin, S., & Ünal, H., 2008. Polimer esaslı köpük malzemeler. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, **(017)**, 117-128.
- König, J., Lopez-Gil, A., Cimavilla-Roman, P., Rodriguez-Perez, M.A., Petersen, R.R., Ostergaard, M.B., Iversen, N., Yue, Y., Spreitzer, M., 2020. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density. *Constr. Build. Mater.* **247**, 118574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118574>
- Nazeran, N., & Moghaddas, J., 2017. Synthesis and characterization of silica aerogel reinforced rigid polyurethane foam for thermal insulation application. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **461**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.01.037>
- Rezgar, H., Taher, A., Ali, D., Richard, E.L., 2019. Thermal conductivity of low density polyethylene foams Part I: Comprehensive study of theoretical models. *J. Therm. Sci.* **28**, 745-754. <https://doi.org/10.1007/s11630-019-1135-3>
- Soloveva, O. V., Solovev, S. A., Vankov, Y. V., & Shakurova, R. Z., 2022. Experimental studies of the effective thermal conductivity of polyurethane foams with different morphologies. *Processes*, **10(11)**, 2257. <https://doi.org/10.3390/pr10112257>
- Uraz, E., 2015. Çinkonun bentonit ile adsorpsiyon özelliklerinin incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 137.
- Usta, N., Aydoğan, B., 2018. Rijit poliüretan köpük malzemelere barit ilavesinin ısı iletkenlik ve ısı bozunma davranışına etkilerinin incelenmesi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, **7(1)** 50-59.
- Ünlü, S. 2022. Polimer matrisli elyaf takviyeli kompozit otomobil şasesi vakum infüzyon yöntemi ile imalatı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **12(1)**, 23-33. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.853049>
- Verdolotti, L., Lavorgna, M., Lamanna, R., Di Maio, E., Iannace, S., 2015. Polyurethane-silica hybrid foam by sol-gel approach: Chemical and functional properties. *Polymer*, **56**, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.10.017>
- Valášková, M., & Martynkova, G. S., 2012. Vermiculite: structural properties and examples of the use. *Clay minerals in nature-their characterization, modification and application*, 209-238. <http://dx.doi.org/10.5772/51237>
- Toksoy Köksal, F., 1997 *Vermikülit mineraloji jeolojik oluşum endüstriyel kullanım ve Türkiye'deki durumu*. 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu. İzmir, Türkiye.
- Yıldırım, B.K., 2015. Silisyum oksit nano tozları ve karbon nano-tüpler ile güçlendirilmiş poliüretan kompozisyonunun akustik özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 73.
- Yurtseven, R., Tarakçılar, A., Topçu, M., 2014. Dolgu maddesi olarak kullanılan farklı uçucu küllerin sert poliüretan köpük malzemelerin mekanik özellikleri ile ısı ve yanma davranışları üzerine etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **28(4)**, 841-853
- Zhu, J., 2020. Impact of size distribution of cell model on the effective thermal conductivity of saturated porous media. *International Journal of Thermophysics*, **41(3)**, 34. <https://doi.org/article/10.1007/s10765-020-2611-4>