

Termik Santral Atığı Olan Kömür Külünün SBR Matrisli Bileşiklere İlave Edilmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi

Şaban BÜLBÜL¹  Enes AYHAN²  Hakan GÖKMEŞE³ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Konya, Türkiye, sabanbulbul@hotmail.com (Sorumlu Yazar/ Corresponding Author)

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, Türkiye, enes.ayhan.4211@gmail.com

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Konya, Türkiye, hakan1440@gmail.com

Makale Bilgileri

ÖZ

Makale Geçmişi

Geliş: 20.06.2023

Kabul: 21.08.2023

Yayın: 31.12.2023

Anahtar Kelimeler:

SBR,
Kömür külü,
Mekanik özellikler.

Kömür küllerinin geri dönüşümü olmadığı için doğaya atılması ciddi zararlar ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda kömür külünün kimyasal bileşiminde insan ve hayvan sağlığına zararlı maddelerin olması özellikle doğal yağışlar sayesinde içme sularına karışması canlıların ve sulama yapılan tarım alanlarını ciddi şekilde tehlikeye sokmaktadır. Türkiye’de birçok termik santral bulunmaktadır. Buralardan elde edilen atıkların geri dönüştürülmesi ve ekonomiye kazandırılması büyük önem arz etmektedir. Endüstriyel atıkların polimer teknolojisi sektöründe dolgu olarak kullanılmasıyla ilgili sınırlı sayıda çalışmalar mevcuttur. Kömür külünün polimer matrisli bileşiklerde kullanılması ile ilgili hiçbir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmada SBR matrisine %0, %5, %10 ve %15 oranında karbon siyahına ek olarak kömür külü ilave edilmiş ve 4 farklı bileşik elde edilmiştir. Elde edilen bu bileşiklerin çapraz bağ yoğunluğu hesaplanmış ve çapraz bağ yoğunluğunun mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır. Bileşiklerdeki kömür külü dolgu oranı yükseldikçe, bileşiklerin çapraz bağ yoğunluğunun artmasına ve buna bağlı olarak, sertlik, yüzde uzama, kopma mukavemeti gibi mekanik özellikleri geliştirdiği ve özgül ağırlık gibi fiziksel özellikleri de arttırdığı görülmüştür.

Effect on Mechanical Properties of Addition of Coal Ash as Thermal Power Plant Waste to SBR Matrix Compounds

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 20.06.2023

Accepted: 21.08.2023

Published: 31.12.2023

Keywords:

SBR,
Coal ash,
Mechanical properties.

The disposal of coal ashes into the environment due to their non-recyclable nature poses significant harms. Moreover, the presence of harmful substances in the chemical composition of coal ash, coupled with the potential contamination of drinking water sources and irrigation areas through natural precipitation, poses serious threats to both living organisms and agricultural lands. There are many thermal power plants in Turkey. It is of great importance that the wastes obtained from these areas are recycled and brought into the economy. There are limited studies on the use of industrial wastes as filler in the polymer technology sector. There are no studies on the use of coal ash in polymer matrix compounds. In this study, 0%, 5%, 10% and 15% carbon black were added to the SBR matrix in addition to coal ash and 4 different compounds were obtained. The crosslink density of these obtained compounds was calculated and the effect of crosslink density on mechanical properties was investigated. It was observed that as the coal ash filling ratio in the compounds increased, the crosslink density of the compounds increased and accordingly, mechanical properties such as hardness, percent elongation, breaking strength and physical properties such as specific gravity increased.

Atıf/Citation: Bülbül, Ş.; Ayhan, E. & Gökmeşe, H. (2023). Termik santral atığı olan kömür külünün sbr matrisli bileşiklere ilave edilmesinin mekanik özelliklere etkisi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 135-146. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2023.14>



“This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (CC BY-NC 4.0)”

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda teknoloji gelişimi ile polimer endüstrisi Dünya ve Türkiye’de önemli sektörlerden biri haline gelmiştir. 2019 yılında yapılan araştırmalara göre Dünyanın toplam kauçuk ihracatının %1,64’ünü toplam kauçuk ithalatının ise %1,42’sini Türkiye oluşturmaktadır. Türkiye’de kauçuk imalatı olmadığından dolayı doğal ve sentetik kauçuklar yurtdışından getirilmektedir. Başta ayakkabı dış taban olmak üzere, konveyör bantlar, araç lastikleri, araç silecekleri, tıbbi ekipmanlar ve oyuncaklar vb. sektörler aracılığıyla ihracat Türkiye ekonomisine yılda 4 milyar doların üzerinde bir döviz girdisi sağlamaktadır [1,2]. 2013 yılında kauçuğun iç pazar tüketim miktarı 437 bin ton ve 2 milyar 979 milyon dolar olan kauçuk mamullerinin satışında elde edilen gelir 2017 yılda ortalama tüketimi %5,5 tona çıkarken bunlardan elde edilen gelirden %1,8 artma göstermiştir. Bununla birlikte 2017 ile 2016 yılları mukayese edilecek olursa ton bazında %12,8 fiyat bazında da ise %16,4 artış göstermiştir. Ekim 2019- 2020 ihracatını karşılaştırdığımızda 2019 yılında 109 milyon \$ ihracat gerçekleştirildiği, 2020 yılında gerçekleştirilen 124 milyon dolarlık ihracatın bir önceki yıla göre %88 oranında artış göstermiştir [3]. En çok kullanılan sentetik kauçukların başında SBR (Stiren Butadien Rubber) kauçuğu gelmektedir. Yoğunluğunun düşük olması, yüksek aşınma direncine sahip olması, yüksek esneklik sergilemesi ve yaşlanmaya karşı dayanıklı olması gibi üstün özelliklere sahip olması diğer sentetik kauçuklardan daha fazla tercih edilmesine sebep olmaktadır. Doğal kauçuğun özelliklerine en yakın sentetik kauçuk olması, ana zincir yapısının çift bağ içermesi nedeniyle, SBR kauçuklar yüksek mekanik özellikler sergilemez fakat termal özelliklerinin iyi olması ve neme karşı göstermiş oldukları dirençlerden dolayı raf ömürleri uzundur bunun için kullanıldıkları ürünlerde raf ömürlerini uzatırlar [4,5].

Kauçuk matrisli bileşiklerde kullanılan dolguların başında karbon siyahı ve silika grupları gelmektedir. Mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri geliştirmek için birçok organik ve inorganik malzeme, kauçuklu bileşiklerde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır [6,7]. Silika dolgu bileşiklerin oluşturduğu güçlü hidrojen bağına yol açan önemli sayıda yan bağ gruplarının varlığı, silikayı elastomer endüstrisinde kullanılmasının önünü açmıştır [8]. Karbon Siyahı ile silika mukayese edildiğinde, kauçuğa silika eklenmesi, silika karışımlarına bağlantı maddeleri dahil edilerek azaltılabilen zayıf dağılıma neden olabilir [9]. Silika-kauçuk bileşiklerinin mekanik mukavemetini arttırmada kullanılan en yaygın bağlantı maddesi silandır. Bis [γ -trietoksisililpropil] disülfürün (TESPD) silikanın kauçuk matrisinde dağılımını iyileştirdiği bilinmektedir. Silan bileşiklerinin kauçuk bileşenlerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri olumlu yönde etkilediğini bildiren bir çok çalışma mevcuttur [10–12]. Fakat silan bağlama ajanlarının maliyetlerinin yüksek olması ve üreticileri dışa bağımlılığını arttırdığı için karbon siyahının daha çok kullanılmasına sebep olmuştur. Karbon siyahı, kauçuk bileşiklerinin özelliklerini (fiziksel, kimyasal ve mekanik) geliştirmek arttırmak için çeşitli literatür çalışmalarda dolgu malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir [13–17]. Fakat petrol fiyatlarındaki istikrarsızlıktan doğan karbon siyahındaki fiyat değişimi polimer endüstrisinde ham madde sıkıntısına yol açtığı için yeni dolgu arayışına girilmiştir. Günümüzde rekabet ortamının artması ve her alanda rekabet etmek için üreticilerin üstünlüğü ele geçirmek istemleri başlıca amaç haline gelmiştir [18].

Tüm bunların yanında son yıllarda, fosil yakıt rezervleri azalırken, enerji talebinin hızla artmasından dolayı; alternatif dolgu malzemeleri kullanılmaya başlanılmıştır [19]. Bu nedenle kauçuk endüstrisinde birçok organik ve inorganik malzemenin dolgu malzemesi olarak kullanılmasının önemli olduğunu vurgulayan çalışmalar vardır [20]. Birçok bilim insanı yaptığı çalışmalarda, tarımsal ve endüstriyel atıklarının geri dönüşümünün önemli olduğunu rapor etmişlerdir [21–25].

Bu çalışmanın amacı, çevre kirliliğine yol açan termik santrallerin atığı olan kömür küllerinin polimer endüstrisinde dolgu olarak kullanılabilirliğin araştırılması ve çapraz bağ yoğunluğunun mekanik özellikler üzerine etkisinin belirlenmesidir. Ayrıca tarımsal, çevresel ve endüstriyel atıkların polimer sektöründe kullanılabileceğini göstermek ve buna benzer çalışmalara ışık tutabilmektir.

MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Deneyisel çalışmalarda LBS Bileşim ve Belge Teknolojileri LTD.ŞTİ. ticari işletmesinden tedarik edilen dolgu maddeleri, katkı malzemeleri, SBR 1502 Stiren Bütadien Kauçukları ve kimyasalları kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan ve deney numunelerinin üretilmesinde ihtiyaç duyulan kömür külü bileşeni ise, Manisa bölgesinde hizmet veren Elektrik Üretim A.Ş. firmasına ait olan Soma Termik Santralinden tedarik edilmiştir. Deneyisel çalışmalarda deney numunelerin üretilmesi amacıyla kullanılan kauçuk ve dolgu malzemelerin teknik özellikleri ve ticari isimleri Tablo 1’de gösterilmiştir [26].

Tablo 1. Katkı ve Dolgu Bileşenlerinin Ticari İsimleri ve Teknik Özellikleri

Bileşen Maddeler	Ticari İsimleri	Yoğunluk (g/cm ³)	Tane Boyutu (µm)
Styrene Butadien Rubber	SBR 1502	0.94	-
Karbon Siyahı	HAF N330	1.8	0.028
Mikronize Kalsit	KARLİS	2.71	20
Kömür Külü	-	2.4	20

Deney numunelerinin üretimi kapsamında aynı bileşik içeriği sabit tutularak, %0, %5, %10, %15 oranlarında termik santral atığı kömür külü (TKK) takviye edilmiş ve 4 farklı içerikte bileşik oluşturulmuştur. Deney numunelerinin üretimine yönelik olarak, SBR kauçuğu Laboratuvar tipi çift silindri karıştırma cihazında öncelikli olarak ön karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Kömür külü, karbon siyahı ve kalsit tartım işlemleri sonrası kauçuk hamuruna ilave edilmiş ve 5 dakika karıştırma süreci uygulanmıştır. Karıştırma işlemini takiben koruyucu ve hızlandırıcı katkı malzemeleri ile takviyelendirilerek homojen bir yapı sağlanması için karıştırma işlemi 3 dakika daha devam etmiştir. Hemen akabinde yumuşatıcı olarak yağ içeriği ve diğer katkı malzemeleri ilave edilmiş ve 4 dakika karıştırılmıştır. Kükürt ve aktif çinko çapraz bağ yapıcılar olarak karışıma ilave edilmiş uygulanan son 3 dakika karıştırma ile işlem sonlandırılmıştır. Bu sürecin ardından homojen hale gelen kauçuk hamuru 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Deney numunelerinin şekillendirilmesi amacıyla kauçuk hamuru, 160x160x6 milimetrelik kalıp içerisine aktarılarak 160 bar basınçta 5 dakika ve 165°C de sıcaklıkta preslenerek vulkanizasyon süreci tamamlanmıştır. Numunelerin üretimi sırasında kullanılan dolgu ve katkı maddelerinin ağırlıkça yüzdeleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Takviye ve Katkı Bileşenleri Miktarı (%)

Takviye ve Katkı Malzemeleri	TKK0	TKK5	TKK10	TKK15
SBR	100	100	100	100
Karbon Karası	30	30	30	30
Kalsit	20	20	20	20
Parafinik Özlü Yağ	10	10	10	10
ZnO ₂	2	2	2	2
S	2.5	2.5	2.5	2.5
MBT	5.5	5.5	5.5	5.5
CZ	1	1	1	1
Stearik Asit	2	2	2	2
DPG	1	1	1	1
Termik Santral Kömür Külü	-	5	10	15

Elde edilen deney numunelerinin yoğunluk değerlerinin ölçülmesinde, Micromeritics marka AccuPyc II 1340 model gaz piknometre cihazı kullanılmıştır. Deney numunelerinin çapraz bağ yoğunluk değerleri belirtilen formüller (Eşitlik 1, 2, 3 ve 4) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_e = \frac{-[\ln(1 - V_2) + V_2 + \chi V_2^2]}{V_s[V_2^{1/3} - \frac{V_2}{2}]} \quad (1)$$

V_s: Çözücünün molar hacmi, V_e: Çapraz bağ yoğunluğu, V₂: Şişmiş örneğin hacim fonksiyonu, χ: Polimer çözücü etkileşim parametresi

$$Q = \frac{W_s}{W_{ds}} - 1 \quad (2)$$

W_s : Şişme sonrası ilk tartım, W_{ds} : Kurutma sonrası tartım, Q : Şişme derecesi

$$W_2 = \frac{1}{1 + Q} - 1 \quad (3)$$

$$W_1 = 1 - W_2$$

W_1 : Şişmiş örneğin ağırlık fraksiyonu, W_2 : Çözücünün ağırlık fraksiyonu

$$V_2 = \frac{w_2/d_2}{w_2/d_2 + (w_1)/d_1} \quad (4)$$

d_1 : Çözücünün yoğunluğu, d_2 : Polimerin yoğunluğu

Uygulanan vulkanizasyon sürecinden 48 saat sonra $23 \pm 20^\circ\text{C}$ 'de deney numunelerinin mekanik özellik noktasında sertlik ölçümleri ISO 868 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir [27]. Sertlik ölçümleri Tronic marka AFFRI 3001 model durometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçüm sonuçları Shore A cinsinden elde edilmiştir. Sertlik ölçüm çalışmaları oda sıcaklığı şartlarında ve her numuneden 5 farklı ölçüm alınarak yapılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Deney numunelerinin kopma dayanım ve uzama testleri ISO 37 standardı doğrultusunda Shimadzu marka-AGS-X Floor model gerinim ölçer (tensometre) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama için çekme hızları 10 mm/sn de ve tek eksenli olarak yerine getirilmiştir. Elde edilen numunelerin yırtılma testi ise ISO 34-1'e göre yapılmıştır. Bu test sırasında çekme hızları 8 ± 0.8 mm/s olarak uygulanmıştır. Uygulanan yırtılma test deneyleri numune üretimlerini takiben 48 saat sonra, 23 ± 2 °C sıcaklıkta ve %50 bağıl nem oranı altında gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin mikroyapısal karakterizasyonu için numune yüzeylerinde 5 mm kalınlığında altın kaplama uygulanarak, SEM (taramalı elektron mikroskobu) ile incelemeler yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

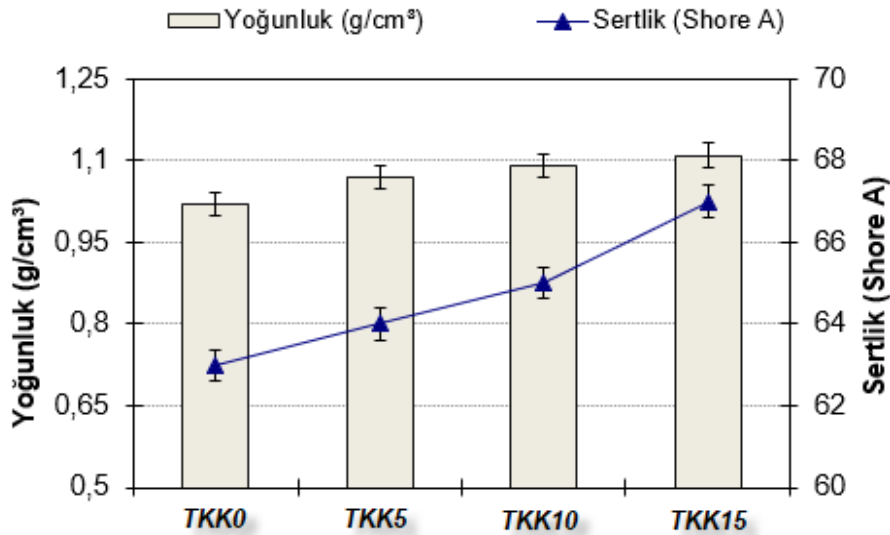
DeneySEL çalışmalar neticesinde elde edilen kömür külü takviyeli bileşiklerin, çapraz bağ yoğunlukları Eşitlik 1-4 formülleri kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen bileşiklerin çapraz bağlanma denklem verileri ise Tablo 3'te gösterilmiştir. Ortaya çıkan çapraz bağ yoğunluk değerleri değerlendirildiğinde, kömür külü miktarı SBR matrisli bileşiklerin içerisinde artırıldığında, çapraz bağ yoğunluğunun da bu artış miktarına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Bu durumda en yüksek çapraz bağ yoğunluk değeri 67.6782×10^6 mol/cm³ olarak TKK15 bileşiğinde tespit edilmiştir. TKK15 bileşiğinde yer alan çapraz bağ yoğunluğunun orijinal bileşik içeriğine kıyasla %62 oranında artış görülebilmektedir. TKK5 ve TKK10 bileşiklerindeki yer alan çapraz bağ yoğunlukları ise sırayla 49.2355×10^6 mol/cm³ ve 57.7752×10^6 mol/cm³ hesaplanmıştır. Kömür külü katkısı ile hazırlanan bileşiklerin çapraz bağ yoğunluk değerleri karşılaştırıldığında ise, TKK15 bileşiğinin TKK5 ve TKK10 bileşiklerine sırayla %37 ve %10 oranlarında artış gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Tablo 3. Üretilen Bileşiklerin Çapraz Bağ Denklem Verileri

Bileşikler	TKK0	TKK5	TKK10	TKK15
Aseton işlemlili tartım (w_i , g)	1.4523	1.804	1.4633	1.542

Kloroform işlemlili tartım (w_s , g)	6.7608	6.5223	6.151	6.1977
Kurutma sonucu tartma (w_{ds} , g)	1.2191	1.2458	1.2419	1.3219
Şişmenin derecesi (Q, %)	4.5459	4.2358	3.9532	3.6885
Bileşik ağırlığın fraksiyonu (w_2)	0.1804	0.191	0.2019	0.2132
Çözücü ağırlık fraksiyonu (w_1)	0.8195	0.8089	0.798	0.7867
Bileşik yoğunluğu (d_2 , g/cm ³)	0.94	0.94	0.94	0.94
Çözücü yoğunluk (d_1 , g/cm ³)	0.867	0.867	0.867	0.867
Bileşik hacminin fraksiyonu (V_2)	0.1687	0.1788	0.1892	0.2
Çözücü molar hacmi (V_s , cm ³ /mol)	106.2757	106.2757	106.2757	106.2757
Çapraz bağ yoğunluğu (V_e , mol/cm ³)	41.8984×10^6	49.2355×10^6	57.7752×10^6	67.6782×10^6

Elde edilen bileşiklerin çapraz bağ yoğunluk değerlerinde artışın temel sebebi, içeriğinde yer alan kömür külünden olduğu belirtilebilir. Çünkü kömür külü kimyasal kompozisyonunda, %33.15 Al₂O₃, %48.73 SiO₂, %4.83 Fe₂O₃ ve %1 değerinde MgO yer almaktadır. SiO₂, Al₂O₃, ve MgO seramik parçacıklarının kauçuk matrisli bileşiklere katkılanırılması sonucunda çapraz bağ yoğunluğunu artırması bilinen sonuçlar arasında yer almaktadır [28–30]. Yapılan literatür taramalarında kömür külü kimyasal kompozisyonunda yer alan elementlerin kullanıldığı bilimsel çalışmalar bulunmaktadır [31]. Deney numunelerinde hesaplanan çapraz bağ yoğunluğu artışı dikkate alındığında ise literatürde bulunan sonuçlar ile benzerlik ortaya çıkmaktadır [32]. Üretilen deney numunelerinin yoğunluk ve sertlik sonuçları Şekil 1’de gösterilmiştir.



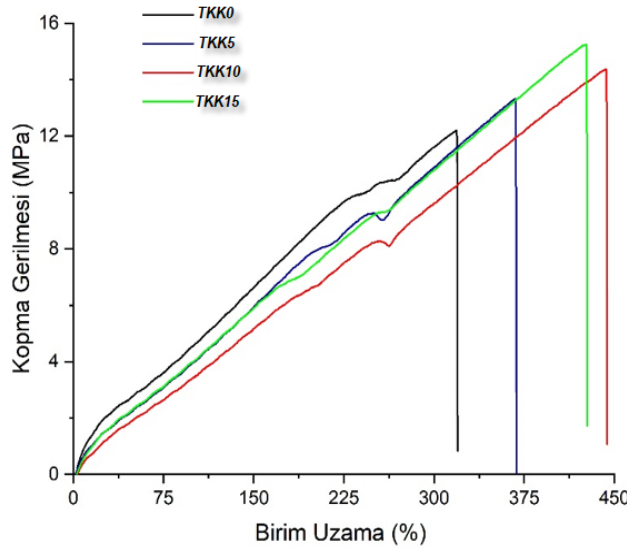
Şekil 1. Yoğunluk ve Sertlik Sonuçları

Deney numunelerinin yoğunluk değerleri incelendiğinde, ilave edilen kömür külü oranı artıka yoğunluk değerlerinin de artış gösterdiği belirlenmiştir. 1.02 g/cm³ değeri ile en düşük yoğunluk sonucu TKK0 bileşiginde elde edilmiştir. En yüksek yoğunluk değeri ise 1.11 g/cm³ olarak TKK15 bileşiginde tespit edilmiştir. TKK5 ve TKK10 bileşiklerinin yoğunluk ölçüm sonuçları ise sırayla 1.07 g/cm³ ve 1.09 g/cm³ elde edilmiştir. TKK15 bileşigindeki yoğunluk değerinin TKK0 bileşiği ile kıyaslandığında %9 miktarınca artış oluşturduğu belirlenmiştir. Üretilen bileşiklerdeki yoğunluk artışının nedeni, çalışmada tercih edilen karbon siyahı (1.8 g/cm³) takviyesinin kömür külünden (2.4 g/cm³) daha düşük bir yoğunluk değerinde olmasının sonucu ile belirtilebilir. Yoğunluk değeri yüksek miktarda olan takviye malzemelerinin miktarları artırıldığında, özellikle bu bileşiklerde yoğunluk sonuçlarının da genel bileşiğe oranla artış sergilediği belirtilmiştir [19].

Şekil 1’ de verilen sertlik sonuçları incelendiğinde, en yüksek sertlik değeri 67 Shore A olarak TKK15 bileşiginde elde edilmiştir. En düşük sertlik sonucu ise kömür külü ilavesi bulundurmeyen TKK0 bileşiginde ölçülmüştür (63 Shore A). Bileşiklere takviye edilen kömür külü oranı arttıkça sertlik sonuçlarının da artış gösterdiği belirlenmiştir. TKK15 bileşigindeki sertlik değerinin TKK0 bileşigine nazaran %6 artış gösterdiği

tespit edilmiştir. Elde edilen sertlik sonucunun başlıca sebebi, kömür külü katkısı ile üretilen bileşiklerin çapraz bağ yoğunluk değerindeki artışın bir sonucu olarak düşünülmektedir. Doaa E. El- Nashar ve ark. Tarafından yapılan bir çalışmada çapraz bağ yoğunluğunun artış göstermesinin sonucu olarak bileşiklerin sertlik değeri sonuçlarında artış yaşandığını ifade etmişlerdir. Sertlik sonucundaki yükselişin bir diğer nedeni ise, bileşiklere takviye edilen kömür külünün kompozisyonunda yer alan oksitli seramik parçacıklardır (Fe_2O_3 ve Al_2O_3). Kauçuk içerikli bileşiklere takviye olan karbon siyahı kullanılan seramik parçacıkların yanı sıra daha yumuşaktır. Böylece kullanılan sert takviyelerin yumuşak takviyelere kıyasla kauçuk içerikli bileşiklerde sertlik sonucunu artırması yönünde etkili olduğu bilinmektedir [33].

Üretimi gerçekleştirilen deney numunelerinin kopma dayanım ve birim uzama sonuçları Şekil 2’ de verilmiştir. Elde edilen dayanım değerleri sonuçları değerlendirildiğinde, bileşiklere takviye olarak kullanılan kömür külü takviye miktarı artış gösterdiğinde bileşiklerin yüzde birim uzaman ve kopma dayanım değerlerinde artış sergilendiği görülmektedir. TTK0 bileşiğinin kopma dayanım değeri 12.19 MPa iken TTK5 bileşiğinin kopma dayanımı ise 13.29 MPa ölçülmüştür. Bileşikler içerisindeki kömür külü oranı arttıkça TTK10 ve TTK15 bileşiklerinin sırasıyla kopma dayanımları 14.35 MPa ve 15.21 MPa olarak artış göstermiştir. TTK15 bileşiği kopma dayanımının TTK0 bileşiğine göre neredeyse 3 MPa daha etkin mukavemet gösterdiği deneysel çalışmalar neticesinde ortaya çıkarılmıştır. Kömür külü takviyesi içeriğinde yer alan SiO_2 ve MgO fazlarının çapraz bağı yoğunluğunu artırmasının neticesi olarak üretilen bileşiklerin mukavemetleri de artmaktadır. Bu nedenle kopma gerilme değerlerinde bir yükselme meydana gelmiştir.

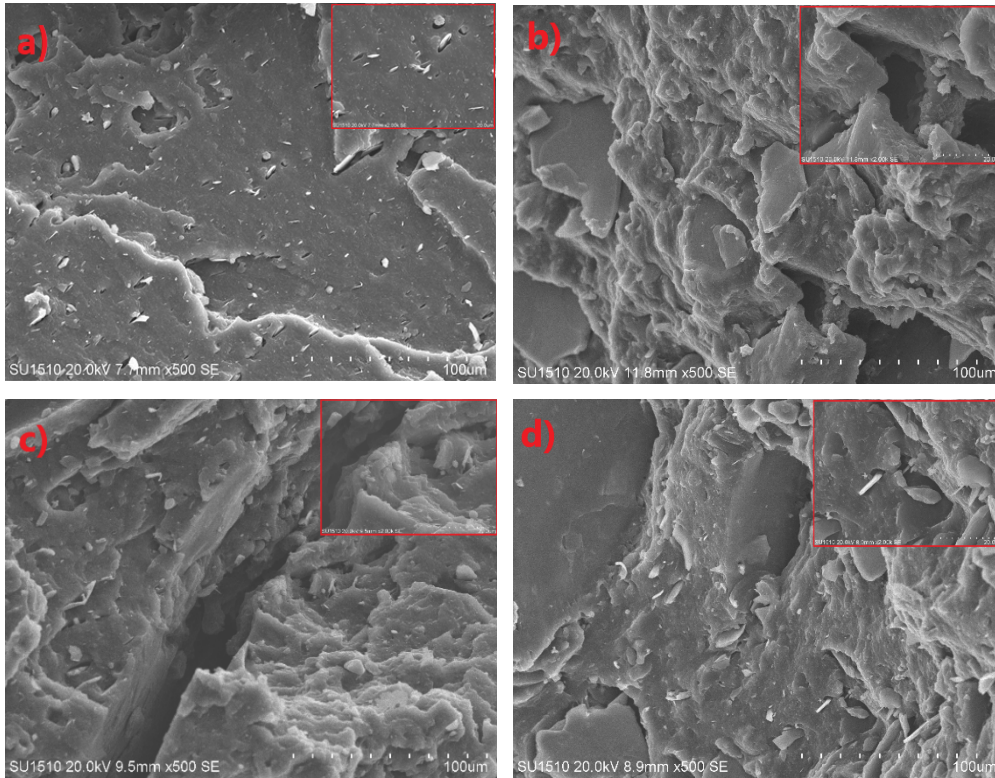


Şekil 2. Kopma ve Birim Uzama Test Sonuçları

Birim uzama sonuçları neticesinde ise (Şekil 2), TTK0, TTK5, TTK10 ve TTK15 bileşiklerindeki yüzde birim uzama sonuçları sıra ile %319, %368, %443 ve %427 olarak belirlenmiştir. TTK10 bileşiğindeki birim uzama sonucunun orijinal bileşiğe kıyasla %34 daha faz artış gösterdiği belirlenmiştir. Çapraz bağ yoğunluk değerinin yükselmesiyle birlikte aynı zamanda kopma dayanımları artış gösteren bileşiklerin de birim uzama sonuçlarında yükselmeye neden olmuştur. Fakat TTK15 bileşiğinin birim uzama sonucu ise TTK10 bileşiğinin yüzde birim uzama sonucundan daha düşük miktarda elde edilmiştir. Bu durumun sonucu çapraz bağ yoğunluk değerinin artmasıyla birlikte kauçuk temel zincir hareketliliğinin engellenmesi olarak ifade edilebilir [34,35]. Çekme testi esnasında çapraz bağ yoğunluğu fazla bileşiklerdeki bağ yapıları, çekme yönü boyunca hareketsiz kalacağından ötürü dayanım artış gösterirken süneklik değeri azalabilmektedir [36]. Bileşiklerde kullanılan takviye içerik yoğunluğu arttıkça, takviye partiküllerinin kümelenme/topaklanma eğilimi olabilmektedir. Bu durumun sonucu olarak zincirlerin arasındaki fiziksel temaslar (van der Waals) sebebiyle birim uzama sonucu da azalabilmektedir. Ortaya çıkan sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, çapraz bağ yoğunluk sonucunun artması ile elde edilen yoğunluk, sertlik, kopma dayanımı ve birim uzama değerlerinde artışlar yaşanabilmektedir. Bunun sebebi bileşik içerisinde yer alan matris yapıdaki çapraz ve ana bağların, çekme

işlemi sırasında çekme doğrultusunun tersi yönünde hareket etmek istemeleridir. Bu durumun sonucu ise üretilen deney numunelerinde mukavemet artışı şeklinde yorumlanabilir. Yapılan çalışmalardan da görüleceği üzere, bileşik çapraz bağ yoğunluk değerlerindeki artışlara bağlı olarak numunedeki birim uzama ve sertlik sonuçlarının da artış göstereceği belirtilmiştir [37].

Şekil 3'te TKK0 bileşiğine %0, %5, %10 ve %15 oranında takviye edilen kömür külü takviyesi ile üretilen deney numunelerinin SEM mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 3'te verilen SEM mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, bileşiğin içerisinde takviye edilen kömür külünün artması ile kauçuk matris içerisinde homojen dağılım sergilediği belirtilebilir. Kömür külü takviyesi ile yapının içinde bağların bir araya toplanarak takviye kauçuk temasını ciddi miktarda artırdığı ve ciddi derecede güçlü bir ağ sistemi oluşturduğu belirlenmiştir.



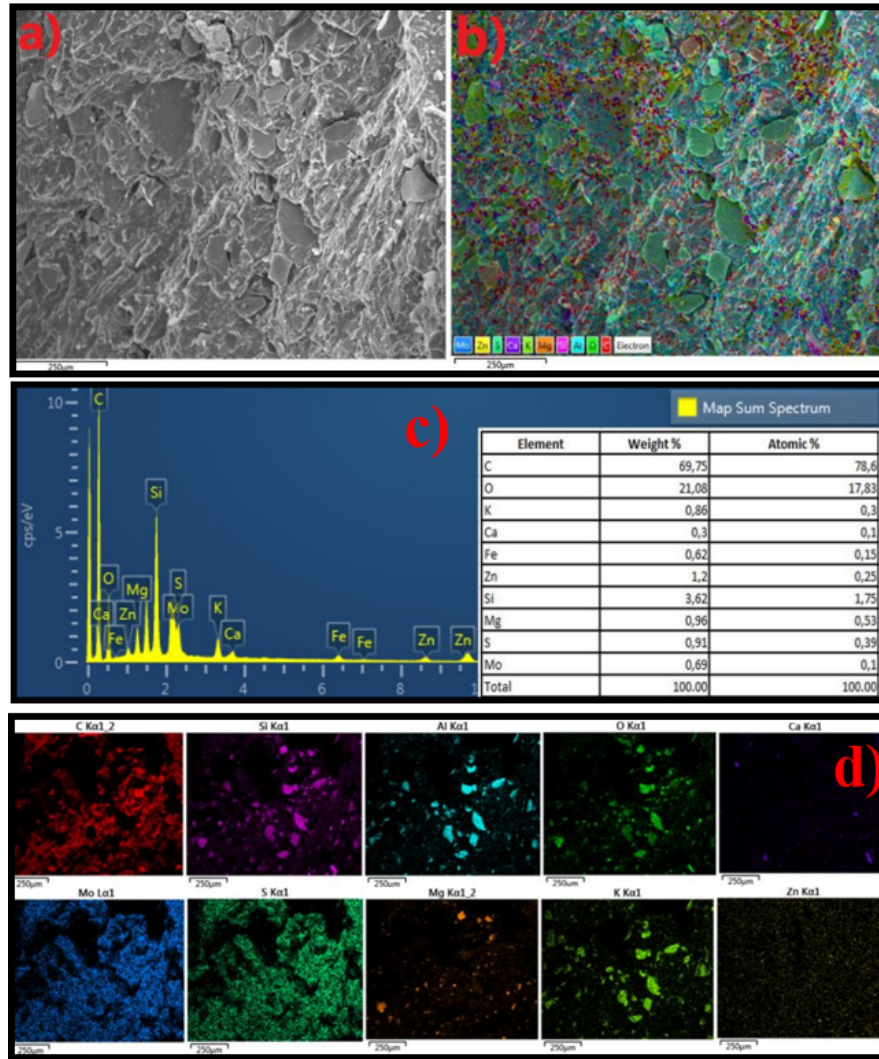
Şekil 3. a) TKK0, b) TKK5, c) TKK10, d) TKK15 Takviyeli Bileşiklerin Kopma Yüzey SEM Görüntüleri

Şekil 3a SEM mikro yapısı incelendiğinde kopma bölgesi kauçuk matrisinden meydana gelirken diğer SEM mikro yapılarında (Şekil 3.6 b, c ve d) takviyelerin yoğun bulunduğu bölgelerden meydana geldiği belirtilebilir. Aynı zamanda SEM mikroyapıları ile numune yüzeylerinde derin boşluklar ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu sonucun nedeni homojen bir biçimde dağılım sergileyen takviyenin malzemeden koparak ayrılmasıdır. SEM mikro yapıları ve test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, bileşiklerde kullanılan takviye kömür külü, matrisin mekanik özellikleri ve kauçuk takviye teması/etkileşimini artırmıştır.

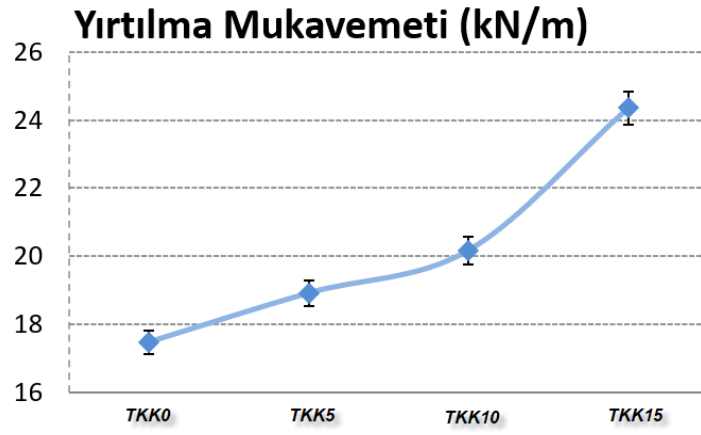
TKK dolgu katkısı ile hazırlanan bileşiklerin mikro yapısı açısından yer alan element dağılımlarının daha iyi ortaya çıkarılabilmesi için, katkı miktarının en yüksek olduğu TKK15 bileşiğine ait kopma numunesi yüzeyi değerlendirilmiştir (Şekil 4a ve b). Aynı zamanda Şekil 4c'de gösterilen TKK15 bileşiği kapsamında C, O, Si, Zn, Mg, S, K, Mo, Fe ve Ca kimyasallarına ait EDS genel analiz sonucu paylaşılmıştır. Şekil 4d'de ise TKK15 bileşiğine ait kopma yüzeyi, elementel haritalama yöntemi neticesinde C, O, Si, Zn, Mg, S, K, Mo, Al ve Ca elementlerinin dağılımlarına yer verilmiştir. TKK15 bileşiğinin kopma yüzey morfolojisi değerlendirildiğinde, vulkanizasyon işlemi sırasında bileşik içerisine katkılanılan TKK kimyasalında yer alan inorganik kimyasallar ve katkı içerikleri yoluyla bileşik içerisine C, Si, S, Na, Zn, Mg, K, O, Mn ve Ca elementlerinin

girdiği görülebilmektedir. K, Si, Al ve O kimyasallarının bileşik içeriğinde heterojen, diğer kimyasalların ise homojen olarak dağılım gösterdiği söylenilebilir. Homojen olarak dağılan gösteren bu kimyasallar dolgu kauçuk etkileşimini artırarak matrisi çok daha iyi çevrelediği belirtilebilir.

Seçilen takviye ve katkı malzemelerinin spesifik özellikleri ve miktarları açısından yırtılma dayanım sonuçları değişiklik sergilemektedir. Şekil 5'te kömür külü takviyeli bileşiklerde yırtılma testi dayanım sonuçları gösterilmiştir. Deney numunelerinin yırtılma testi dayanım sonuçları incelendiğinde, en fazla yırtılma dayanım sonucuna sahip bileşiğin TKK15 (24.36 kN/m) olduğu tespit edilmiştir. Bileşiklere ilave edilen kömür külü takviyesi artış gösterdiğinde, yırtılma dayanımlarının da oransal şekilde artış gösterdiği belirlenmiştir. Oluşan bu durum bileşik içerisinde ortaya çıkan çapraz bağ yoğunluklarının artmasından kaynaklı olarak belirtilebilir. Aynı zamanda takviye derecesi ve spesifik özelliklere dayanılarak, yırtılma kuvvetlerinin de değişiklik gösterebileceği ifade edilmiştir [38,39].



Şekil 4. TKK15 Takviyeli Bileşik EDS analizi ve elementel haritalama



Şekil 5. Yırtılma Test Sonuçları

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışmada ana matris bileşeni SBR kauçuğuna farklı oranlarda kömür külü takviyesi yapılarak mikroyapı, fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

SBR matrisli bileşiklerin içeriğinde yer alan takviye miktarı arttıkça çapraz bağ yoğunluğunun da bu duruma bağlantılı olarak artış sergilediği tespit edilmiştir. TKK0 bileşiğine kıyasla en yüksek kömür külü içeriği ile üretilen TKK15 numunesinde %61.5 oranında artış yaşanmıştır. Kömür külü içeriği artışına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde artış sergilenirken, kömür külü içermeyen numuneye nazaran %9 artış oranı ile en yüksek sertlik sonucu 1.11 g/cm³ olarak TKK15 bileşiğinde hesaplanmıştır. Deney numuneleri içerisinde en yüksek sertlik sonucu 67 Shore A olarak TKK15 bileşiğinde elde edilmiştir. En düşük sertlik sonucu ise 63 Shore A ve kömür külü takviyesinin bulunmadığı TKK0 bileşiğinde ölçülmüştür. Kopma dayanım sonucu açısından TKK15 bileşiği kopma dayanımının TKK0 bileşiğine kıyasla yaklaşık %24.8 oranında malzeme mukavemetini artırdığı belirlenmiştir. Ancak kopma dayanımının yanı sıra birim uzama değerinin ise kömür külünün maksimum %10' kadar daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Çapraz bağ yoğunluğu ile deney numunelerinin yırtılma dayanımının artışı üzerinde en önemli etkenlerden biri olduğu sonucu elde edilmiştir. Ortaya çıkan deneysel sonuçlar neticesinde çevreye ciddi anlamda zararı olan kömür külünün, SBR 1502 kauçuk matrisi içeren bileşiklerde tercih edilebilir ve iyi bir takviye malzemesi olabileceği belirlenmiştir.

Finansal destek (Funding)

Bu çalışma Doç. Dr. Şaban Bülbül' ün danışmanlığında Enes Ayhan'ın Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında 2022 yılında tamamladığı "Kauçuk Matris İçerisine Kömür Külü Takviyesinin Mekanik Özelliklere ve Çapraz Bağ Yoğunluğuna Etkisi" başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Y. Uzun, H. Ergün, E. Şeker, Hikayeler İçin Artırılmış Gerçeklik Yaklaşımı, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 4 (2022), 1-7.
- [2] M. Arroyo, M. Lopezmanchado, J. Valentin, J. Carretero, Morphology/behaviour relationship of nanocomposites based on natural rubber/epoxidized natural rubber blends, *Composites Science and Technology*. 67 (2007), 1330-1339. doi:10.1016/j.compscitech.2006.09.019.
- [3] Kauçuk Sektör İzleme Raporu 2017.pdf, (t.y.). <https://pagev.org/upload/files/Hammadde%20Yeni%20Tebli%C4%9F%20Bilg.%203/Kau%C3%A7uk%20Sekt%C3%B6r%20C4%B0zleme%20Raporu%202017.pdf> (erişim 19 Haziran 2023).
- [4] M. Morton, Rubber Technology, *Springer Science & Business Media*, 2012.
- [5] Elastomers and Rubber Compounding Materials - 1st Edition, (t.y.). <https://shop.elsevier.com/books/elastomers-and-rubber-compounding-materials/franta/978-0-444-42994-0> (erişim 19 Haziran 2023).
- [6] S.-J. Park, M.-K. Seo, C. Nah, Influence of surface characteristics of carbon blacks on cure and mechanical behaviors of rubber matrix compoundings, *Journal of Colloid and Interface Science*. 291 (2005), 229-235. doi:10.1016/j.jcis.2005.04.103.
- [7] S.-S. Choi, S.-H. Ha, Influence of the swelling temperature and acrylonitrile content of NBR on the water swelling behaviors of silica-filled NBR vulcanizates, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 15 (2009), 167-170. doi:10.1016/j.jiec.2008.09.016.
- [8] N. Suzuki, M. Ito, F. Yatsuyanagi, Effects of rubber/filler interactions on deformation behavior of silica filled SBR systems, *Polymer*. 46 (2005), 193-201. doi:10.1016/j.polymer.2004.10.066.
- [9] B.T. Poh, C.C. Ng, Effect of silane coupling agents on the mooney scorch time of silica-filled natural rubber compound, *European Polymer Journal*. 34 (1998), 975-979. doi:10.1016/S0014-3057(97)00211-5.
- [10] T. Jesionowski, A. Krysztafkiewicz, Influence of silane coupling agents on surface properties of precipitated silicas, *Applied Surface Science*. 172 (2001), 18-32. doi:10.1016/S0169-4332(00)00828-X.
- [11] P. Sae-oui, C. Sirisinha, U. Thepsuwan, K. Hatthapanit, Roles of silane coupling agents on properties of silica-filled polychloroprene, *European Polymer Journal*. 42 (2006), 479-486. doi:10.1016/j.eurpolymj.2005.09.003.
- [12] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M. Belgacem, A. Dufresne, Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading, *Composites Science and Technology*. 67 (2007), 1627-1639. doi:10.1016/j.compscitech.2006.07.003.
- [13] N. Seshaiha, N. Santhosh Kumar, M. Khadar Hussain Afrid, K. Sriram, K. Vinay, B. Sekhar Rahul, Investigation of cure behaviour and tensile properties of NR/SBR composite filled with carbon black and silica, *Materials Today: Proceedings*. 59 (2022), 387-391. doi:10.1016/j.matpr.2021.11.352.
- [14] C. Jiang, J. Bo, X. Xiao, S. Zhang, Z. Wang, G. Yan, Y. Wu, C. Wong, H. He, Converting waste lignin into nano-biochar as a renewable substitute of carbon black for reinforcing styrene-butadiene rubber, *Waste Management*. 102 (2020), 732-742. doi:10.1016/j.wasman.2019.11.019.
- [15] J. Tan, H. Cheng, L. Wei, C. Wei, Y. Xing, X. Gui, Using low-rank coal slime as an eco-friendly replacement for carbon black filler in styrene butadiene rubber, *Journal of Cleaner Production*. 234 (2019), 949-960. doi:10.1016/j.jclepro.2019.06.221.
- [16] D. Roucou, J. Diani, M. Brieu, D. Colombo, Experimental identification of fracture toughness of a carbon black-filled styrene butadiene rubber undergoing energy dissipation by Mullins softening, *Mechanics of Materials*. 151 (2020), 103645. doi:10.1016/j.mechmat.2020.103645.

- [17] M. Uyaner, A. Yar, Nano Elyaf Takviyeli Nanokompozit Üretimi ve Karakterizasyonu, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 1 (2019), 10-19.
- [18] S.Ş. Kaya, K. Alaykiran, Hata Türü ve Etkileri Analizi ve Döküm Sektöründe Bir Uygulama, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 1 (2019), 76-89.
- [19] S. Bulbul, M. Ergun, Effect of mica powder-filled styrene-butadiene rubber compounds on crosslink density and mechanical properties, *Thermal Science*. 26 (2022), 3019-3028. doi:10.2298/TSCI2204019B.
- [20] Ş. Bülbül, S.S. Büyük, The crosslinking and mechanical properties of SBR compounds with the addition of carburized pine nut cone ash, *Journal of Elastomers & Plastics*. 54 (2022), 906-921. doi:10.1177/00952443221102585.
- [21] S. Bülbül, Improving the crosslink density and the mechanical properties after vulcanization for an iron oxide layer (scale) and SBR/rubber masterbatch, *Materiali in tehnologije*. 54 (2020), 71-78. doi:10.17222/mit.2019.129.
- [22] Ş. Bülbül, N. Akçakale, M. Yaşar, H. Gökmeşe, The effect of wood ash on the mechanical properties of rubber compounds, *materiali in tehnologije*. 53 (2019), 333-339. doi:10.17222/mit.2018.126.
- [23] Ş. Bülbül, N.Akçakale, The Production and mechanical Properties of carburized Corn Cob Ash added Rubber Compounds, *KGK Kautschuk Gummi Kunststoff*. 72 (2019), 30-35.
- [24] S. Bulbul, N. Akcakale, H. Gokmese, O. Gok, M. Yasar, The effect on hardness and density of filling materials in NR/SBR rubber compounds, *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 1 (2017), 1-4.
- [25] N. Akçakale, Ş. Bülbül, The Effect of Mica Powder and Wollastonite Fillings on the Mechanical Properties of NR/SBR Type Elastomer Compounds, *Journal of Rubber Research*. 20 (2017), 157-167. doi:10.1007/BF03449149.
- [26] M. Hernández Santana, M. Huete, P. Lameda, J. Araujo, R. Verdejo, M.A. López-Manchado, Design of a new generation of sustainable SBR compounds with good trade-off between mechanical properties and self-healing ability, *European Polymer Journal*. 106 (2018), 273-283. doi:10.1016/j.eurpolymj.2018.07.040.
- [27] S.-S. Choi, J.-C. Kim, Lifetime prediction and thermal aging behaviors of SBR and NBR composites using crosslink density changes, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 18 (2012), 1166-1170. doi:10.1016/j.jiec.2012.01.011.
- [28] J. Machotová, A. Kalendová, M. Voleská, D. Steinerová, M. Pejchalová, P. Knotek, L. Zárbybnická, Waterborne hygienic coatings based on self-crosslinking acrylic latex with embedded inorganic nanoparticles: a comparison of nanostructured ZnO and MgO as antibacterial additives, *Progress in Organic Coatings*. 147 (2020), 105704. doi:10.1016/j.porgcoat.2020.105704.
- [29] R. Mounir, M. Mohamed, M. El-Zaya, Thermal and Physico-Mechanical Properties of Irradiated Aluminum Oxide Filled Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber Composites, *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*. 0 (2021), 1-7. doi:10.21608/ajnsa.2021.62040.1444.
- [30] J.-Y. Lee, N. Park, S. Lim, B. Ahn, W. Kim, H. Moon, H. Paik, W. Kim, Influence of the silanes on the crosslink density and crosslink structure of silica-filled solution styrene butadiene rubber compounds, *Composite Interfaces*. 24 (2017), 711-727. doi:10.1080/09276440.2017.1267524.
- [31] L.C. Sim, S.R. Ramanan, H. Ismail, K.N. Seetharamu, T.J. Goh, Thermal characterization of Al₂O₃ and ZnO reinforced silicone rubber as thermal pads for heat dissipation purposes, *Thermochimica Acta*. 430 (2005), 155-165. doi:10.1016/j.tca.2004.12.024.
- [32] W. Jansomboon, P. Prapainainar, S. Loykulnant, P. Kongkachuichay, P. Dittanet, P. Kumnorkaew, Z. Li, I. Kinloch, R.J. Young, Raman spectroscopic study of reinforcement mechanisms of electron beam

- radiation crosslinking of natural rubber composites filled with graphene and silica/graphene mixture prepared by latex mixing, *Composites Part C: Open Access*. 3 (2020), 100049. doi:10.1016/j.jcomc.2020.100049.
- [33] S. Debnath, S.K. De, D. Khastgir, Effect of silane coupling agent on vulcanization, network structure, polymer-filler interaction, physical properties and failure mode of mica-filled styrene-butadiene rubber, *Journal of Materials Science*. 22 (1987), 4453-4459. doi:10.1007/BF01132046.
- [34] R.S.A. Afia, E. Mustafa, Z.Á. Tamus, Condition Monitoring of Photovoltaic Cables Based Cross-Linked Polyolefin Insulation Under Combined Accelerated Aging Stresses: Electrical and Mechanical Assessment, *Energy Reports*. 8 (2022), 1038-1049. doi:10.1016/j.egy.2021.11.122.
- [35] D. Min, C. Yan, Y. Huang, S. Li, Y. Ohki, Dielectric and Carrier Transport Properties of Silicone Rubber Degraded by Gamma Irradiation, *Polymers*. 9 (2017), 533. doi:10.3390/polym9100533.
- [36] M. Celina, K.T. Gillen, J. Wise, R.L. Clough, Anomalous aging phenomena in a crosslinked polyolefin cable insulation, *Radiation Physics and Chemistry*. 48 (1996), 613-626. doi:10.1016/0969-806X(96)00083-7.
- [37] H. Nabil, H. Ismail, C.T. Ratnam, Simultaneous Enhancement of Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Natural Rubber/Recycled Ethylene-Propylene-Diene Rubber Blends by Electron Beam Irradiation, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 19 (2014), 272-285. doi:10.1080/1023666X.2014.880023.
- [38] F. Findik, R. Yilmaz, T. Köksal, Investigation of mechanical and physical properties of several industrial rubbers, *Materials & Design*. 25 (2004), 269-276. doi:10.1016/j.matdes.2003.11.003.
- [39] C. Yeswin, D.B.S. Vamsi, B.N. Vijay, I. Naveen, P.S.P. Reddy, N. Rahulan, Physical properties of nano Al₂O₃ reinforced NBR/SBR blends, *Materials Today: Proceedings*. 52 (2022), 2273-2278. doi:10.1016/j.matpr.2021.08.241.