

Farklı Pirolitik Biyo-yağların Destilasyon Kalıntıları Kullanılarak Elde Edilen Biyo-asfalt Bağlayıcıların Viskoziteleri ve FTIR Analizleri

Neslihan ATASAĞUN ^{1*} 

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 12.11.2024
Kabul Tarihi: 30.01.2025
Yayın Tarihi: 31.12.2025

Anahtar Kelimeler:

Biyo-asfalt bağlayıcı,
Biyo-bitüm,
Pirolitik biyo-yağ,
Viskozite,
Destilasyon kalıntısı.

ÖZET

Bu çalışmada, meşe talaşı, çay atıkları ve çam kozalağı biyokütlelerinden üretilen üç farklı pirolitik biyo-yağın destilasyon kalıntıları kullanılarak biyo-asfalt bağlayıcılar elde edilmiştir. İlk olarak, üç farklı biyokütleden piroliz yöntemiyle, oksijensiz ortamda azot gazı kullanılarak üç farklı biyo-yağ üretilmiştir. Üretilen pirolitik biyo-yağlar, destilasyon deneyine tabi tutularak hafif ürünler ayrıştırılmıştır. Üç farklı pirolitik biyo-yağdan elde edilen destilasyon kalıntıları, ayrı ayrı %10 oranında 50/70 saf bitüme eklenerek, 135±1°C sıcaklıkta, 1200 rpm hızla 30 dakika karıştırılmış ve üç farklı biyo-asfalt bağlayıcı elde edilmiştir. Bağlayıcıların kıvamları, sıcaklık hassasiyetleri ve viskozite değerleri, penetrasyon, yumuşama noktası, PI (penetrasyon indeksi) ve dönel viskozimetre (RV) deneyleri kullanılarak belirlenmiştir. Buna ek olarak, tüm bağlayıcıların FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi) Spektroskopisi analiz sonuçlarından elde edilen fonksiyonel grupları belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, saf bitüm ile karşılaştırıldığında, biyo-asfalt bağlayıcılarda 1739,21 cm⁻¹ ve 1216,56 cm⁻¹ civarındaki pik şiddetlerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Meşe talaşı, çam kozalağı ve çay atıkları biyo-yağı destilasyon kalıntısı katkılı biyo-asfalt bağlayıcıların yumuşama noktalarının, 50/70 saf bitümün yumuşama noktası değerinden, sırasıyla yaklaşık %8, %10 ve %12 oranlarında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak, bu çalışmada, %10 çay atıkları pirolitik biyo-yağı destilasyon kalıntısı katkılı biyo-asfalt bağlayıcının en yumuşak kıvamlı bağlayıcı olduğu ve en düşük viskozite değerine sahip bağlayıcı olduğu belirlenmiştir.

Viscosities and FTIR Analysis of Bio-asphalt Binders Obtained by Using Distillation Residues of Different Pyrolytic Bio-oils

Article Info

Received: 12.11.2024
Accepted: 30.01.2025
Published: 31.12.2025

Keywords:

Bio-asphalt binder,
Bio-bitumen,
Pyrolytic bio-oil,
Viscosity,
Distillation residue.

ABSTRACT

In this study, bio-asphalt binders were obtained by using the distillation residues of three different pyrolytic bio-oils produced from oak sawdust, tea wastes and pine cone biomasses. Firstly, three different bio-oils were produced from three different biomasses with pyrolysis method by using nitrogen gas in an oxygen-free environment. Light products were separated by subjecting the produced pyrolytic bio-oils to the distillation test. Distillation residues obtained from three different pyrolytic bio-oils were added separately to 50/70 pure bitumen at the rate of 10%, mixed at 135±1°C temperature, at 1200 rpm for 30 min and three different bio-asphalt binders were obtained. The consistencies, temperature sensitivities and viscosity values of the binders were determined by using penetration, softening point, PI (penetration index) and rotational viscometer (RV) tests. In addition, the functional groups of all binders obtained from the FTIR (Fourier Transform Infrared) Spectroscopy analysis results were determined. According to the analysis results, comparing with pure bitumen, it was determined that the intensities of the peaks around the 1739,21 cm⁻¹ and 1216,56 cm⁻¹ were higher in bio-asphalt binders. It was found that, the softening points of the bio-asphalt binders doped with bio-oil distillation residues from oak sawdust, pine cone and tea wastes were approximately 8%, 10% and 12% lower than the softening point of 50/70 pure bitumen, respectively. Additionally, in this study, it was found that the bio-asphalt binder doped with 10% tea waste pyrolytic bio-oil distillation residue was the softest consistency binder and had the lowest viscosity value.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Atasağun, N. (2025). Viscosities and FTIR analysis of bio-asphalt binders obtained by using distillation residues of different pyrolytic bio-oils. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(3), 349-360. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2025.97>

*Sorumlu Yazar: Neslihan Atasağun, atasagun@ktun.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ham petrolün damıtılmasıyla elde edilebilen bitüm, viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir. Esnek yol üst yapısında bağlayıcı olarak kullanılan bitümlü bağlayıcıların özellikleri, kaplama performansını önemli oranda etkileyebilmektedir [1-6]. Esnek kaplamalarda oluşan bazı deformasyonlar biyo-asfalt bağlayıcılar kullanılarak azaltılabilmektedir [3-7].

Biyo-asfalt bağlayıcılar, farklı biyokütlerden elde edilen farklı yapısal özelliklere sahip biyo-yaglar kullanılarak elde edilebilmektedir [2-8]. Biyokütlerden elde edilen ürünlerin yol yapım malzemelerinde kullanılmasıyla, hem bitümlü bağlayıcıların bazı özellikleri ve kaplama performansı geliştirilebilmekte hem de atıkların değerlendirilmesiyle çevreye ve ekonomiye katkı sağlanabilmektedir [3-7].

Biyo-yag elde edilmesinde kullanılan biyokütle, yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir [9-11]. Son yıllarda, çevreye ve ekonomiye olumlu etkileri sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi giderek artmakta ve çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [9,12,13,14].

Biyokütle, fosil kaynaklı olmayan bitkisel ve hayvansal kaynaklı atıkları kapsamaktadır [10,11,15,16]. Biyokütlenin çeşitli dönüşüm proseslerine tabi tutulmasıyla, değerli ürünler elde edilebilmektedir. Piroliz yöntemi, biyokütleden biyo-yag üretilmesinde kullanılan yöntemlerden biridir [11,15-17].

Piroliz yöntemi ile biyokütlenin oksijensiz ortamda, yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmasıyla, değerli sıvı, katı ve gaz ürünler elde edilebilmektedir [11,15-17]. Biyokütleden elde edilen biyo-yaglar, su, oksijenli bileşikler, çeşitli asitler ve kompleks bileşikler içeren karışımlar olması sebebiyle [6,11,16,17], bitüm ile karıştırılmadan önce destilasyon gibi ayırıştırma proseslerine tabi tutulmaları gerekebilmektedir [2,5-8].

Kaynama noktaları farklı olan bileşenlerden oluşan bir sıvı karışımındaki bileşenlerin buharlaştırma ve yoğunlaştırma yöntemiyle ayırıştırılması olarak tanımlanan destilasyon [16,18-20] sonucunda, biyo-yag karışımı içerisindeki hafif ürünler ayırıştırılarak destilasyon kalıntıları elde edilebilmektedir [16,19,20]. Biyo-yag destilasyon kalıntıları bitüm içerisine farklı oranlarda eklenerek biyo-asfalt bağlayıcılar elde edilebilmektedir [2,5-8].

Biyo-asfalt bağlayıcıların, genellikle, düşük sıcaklık performansının saf bitümden daha iyi olduğu belirlenirken, yüksek sıcaklık performansının ise daha düşük olduğu belirlenmiştir [3-7]. 50/70 bitüm içerisinde %5, %10 ve %15 oranlarında biyo-yag kullanılarak elde edilen biyo-asfalt bağlayıcıların özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada [3], biyo-asfalt bağlayıcının bazı özellikleri FTIR analizi ile incelenmiştir. Elde edilen biyo-asfalt bağlayıcıların kıvamının saf bitümden daha yumuşak olduğu, penetrasyon değerlerinin saf bitümden daha yüksek olduğu, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Saf bitümle karşılaştırıldığında, biyo-asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklık performanslarının ve yorulma dirençlerinin saf bitümden daha iyi olduğu belirlenirken, karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi deformasyon direncinin ise saf bitümden daha düşük olduğu belirlenmiştir [3]. İki farklı bitüm içerisine %2, %4, %6, %8, %10 ve %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında biyo-yag eklenerek elde edilen biyo-bitümlerin özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada [2], elde edilen biyo-asfalt bağlayıcıların saf bitümden daha yumuşak kıvama sahip oldukları belirlenmiştir. Saf bitümle karşılaştırıldığında, biyo-asfalt bağlayıcıların daha düşük viskozite ve yumuşama noktası değerlerine sahip oldukları görülürken, penetrasyon değerlerinin ise saf bitümden daha yüksek olduğu belirlenmiştir [2]. Soya fasulyesi yağı, saman biyo-yagı, atık yağ, hint yağı ve bitkisel yağın destilasyon kalıntılarında elde edilen beş farklı biyo-yag, saf bitüm içerisine %2, %4, %6 ve %8 oranlarında 135°C'de 30dk karıştırılarak biyo-asfalt bağlayıcılar elde edilmiştir [4]. Deney sonuçlarına göre, genel olarak biyo-

asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklık performanslarının daha iyi olduğu, yüksek sıcaklık performanslarının ise saf bitümden daha düşük olduğu belirlenmiştir [4]. Bir diğer çalışmada [21], gül posası atıkları 450°C sıcaklıkta piroliz edilmiştir. Performans sınıfı PG 64-22 olan bitüm ile gül posası pirolitik biyo-yagının %2 ve %4 oranlarında 160°C’ de 30 dk karıştırılmasıyla elde edilen biyo-asfalt bağlayıcıların saf bitüm ile aynı performans sınıfına sahip oldukları belirlenirken, tekerlek izi dayanımlarının saf bitümden daha az olduğu ve daha düşük karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarına sahip oldukları belirlenmiştir. 2021 yılında yapılan bir çalışmada [7], lignoselülozik biyokütleden hidrotermal sıvılaştırma yöntemiyle elde edilen biyo-yag bitüm içerisinde %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanılmış ve bitüm ile 135°C’de 1000 rpm hızla 30 dk süre karıştırılarak biyo-asfalt bağlayıcılar elde edilmiştir. Biyo-asfalt bağlayıcılar içerisindeki biyo-yag oranı arttıkça, viskozitenin ve kompleks modülünün azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen biyo-asfalt bağlayıcıların saf bitümden daha yumuşak kıvama ve daha düşük camsı geçiş sıcaklığına sahip olduğu belirlenirken, düşük sıcaklık performanslarının saf bitümden daha iyi olduğu sonucu elde edilmiştir [7].

Bu çalışmada ise, meşe talaşı, çay atığı ve çam kozalağı biyokütleleri olmak üzere üç farklı biyokütleden, piroliz yöntemi ile, üç farklı biyo-yag üretilmiştir. Üretilen pirolitik biyo-yaglar destilasyon deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen destilasyon kalıntıları %10 oranında ayrı ayrı saf bitüm içerisinde kullanılarak biyo-asfalt bağlayıcılar elde edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, çeşitli yöntemlerle biyokütlelerden elde edilen biyo-yagların farklı oranlarda ve %10 oranında bitüm içerisine eklenerek biyo-asfalt bağlayıcıların elde edildiği görülmektedir [2-8]. Biyo-asfalt bağlayıcılar içerisindeki biyo-yag oranı arttıkça, genellikle daha düşük viskoziteli ve daha yumuşak kıvama sahip bağlayıcıların elde edildiği tespit edilmiştir [2-8]. Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında, biyo-asfalt bağlayıcıların elde edilmesinde kullanılan biyo-yagların etkilerinin belirlenmesinde, %10 oranı nispeten daha belirleyici ve uygun bir oran olarak değerlendirilebilmektedir [2,3,6-8]. Farklı biyo-yag destilasyon kalıntılarının tek bir oranda, ayrı ayrı bitüm içerisine eklenerek karşılaştırılmasıyla, hangi biyo-yag destilasyon kalıntısının, ne oranda etkili olduğu belirlenebilir. Bu sebeple, bu çalışmada farklı biyo-yag destilasyon kalıntıları 50/70 saf bitüm içerisine %10 oranında eklenmiştir.

Saf bitüm ve biyo-asfalt bağlayıcıların, FTIR fonksiyonel grupları, penetrasyon, yumuşama noktası, penetrasyon indeksi (PI) değerleri, kıvamları ve viskozite değerleri belirlenmiştir. Literatürde, hidrotermal sıvılaştırma ve çeşitli piroliz yöntemleri gibi metotları içeren farklı yöntemlerle üretilen biyo-yaglar kullanılarak biyo-asfalt bağlayıcıların elde edildiği çalışmalar [2-8] mevcut olmakla birlikte, farklı biyo-asfalt bağlayıcıların elde edilmesi ve özelliklerinin geliştirilmesi üzerine daha fazla çalışmanın yapılması önerilmektedir [5,6,7]. Bu çalışmada, farklı biyokütlelerden, belirlenen piroliz ve destilasyon şartlarında üretilen biyo-yag destilasyon kalıntıları kullanılarak farklı biyo-asfalt bağlayıcılar elde edilmiş ve bazı özellikleri saf bitüm ile karşılaştırılmıştır. Farklı piroliz ve farklı destilasyon şartlarında farklı özelliklere sahip ürünler elde edilebilmektedir [17-20]. Literatürde, bu çalışmada kullanılan biyokütlelerden, belirlenen yöntemle ve belirlenen şartlarda elde edilen biyo-asfalt bağlayıcıların kıvamları, viskozite değerleri ve FTIR spektrumlarının, saf bitüm ile karşılaştırıldığı başka bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu çalışma farklı biyo-asfalt bağlayıcıların elde edilmesi, bazı özelliklerinin belirlenerek karşılaştırılması ve literatüre katkı sağlayacak olması sebebiyle önem taşımaktadır. Biyo-asfalt bağlayıcıların elde edilmesinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütlenin kullanılması, ekonomik ve çevresel katkıları sebebiyle çalışmanın önemini daha da arttırmaktadır.

YÖNTEM (METHOD)

Bu çalışmada, üç farklı bitkisel biyokütleden, piroliz yöntemi ile üç farklı pirolitik biyo-yag üretilmiştir. Üretilen biyo-yaglar destilasyon deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen destilasyon

kalıntıları saf bitüm içerisinde kullanılarak biyo-asfalt bağlayıcılar elde edilmiştir. Saf bitüm ve biyo-asfalt bağlayıcıların, FTIR fonksiyonel grupları, penetrasyon, yumuşama noktası, penetrasyon indeksi (PI) değerleri, kıvamları ve viskozite değerleri belirlenerek karşılaştırılmıştır.

Biyokütle (Biomass)

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütle, fosil kaynaklı olmayan çeşitli bitkisel ve hayvansal kaynaklı atıklardan elde edilebilmektedir [10,11,15,16]. Bu çalışmada, meşe talaşı, çay atığı ve çam kozalağı biyokütelleri olmak üzere üç farklı bitkisel biyokütle kullanılmıştır. Çay atıkları olarak, demleme sonrası elde edilen kurutulmuş çay posası kullanılmıştır. Meşe talaşı biyokütlesi, Konya sanayi bölgesinden temin edilmiştir.

Piroliz Yöntemi (Pyrolysis Method)

Biyokütleden biyo-yag elde edilmesinde en çok kullanılan termokimyasal dönüşüm proseslerinden biri olan piroliz yöntemi, biyokütlenin oksijensiz ortamda, yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılarak termal bozundurulması esasına dayanmaktadır [11,15,17]. Biyokütlenin yapısal özellikleri, piroliz sıcaklığı ve ısıtma hızı parametreleri, biyokütlenin pirolizi sonucunda elde edilen katı, sıvı ve gaz ürün özellikleri ve ürün verimini etkileyen önemli parametrelerdendir [11,15,17].

Destilasyon (Distillation)

Destilasyon, farklı kaynama noktalarına sahip olan bileşenlerden oluşan sıvı karışımındaki bileşenlerin buharlaştırma ve yoğunlaştırma ile ayrıştırılmasıdır [16,18-20]. Sıvı karışımındaki her bileşenin kaynama sıcaklığına kadar ısıtılması ve yoğunlaştırılması sonucu, hafif ürünler sıvı karışımından destilasyon yöntemi ile ayrılarak daha ağır ürünler elde edilebilmektedir [16,18-20]. Çeşitli destilasyon türleri ile değerli ürünler elde edilebilmektedir [16,18-20].

Biyo-asfalt Bağlayıcılar (Bio-asphalt Binders)

Biyo-asfalt bağlayıcı içerisinde çeşitli biyo-yaglar kullanılabilmektedir [2-8]. Farklı biyokütellerden farklı yöntemlerle elde edilen biyo-yagların, farklı oranlarda ve belirlenen şartlarda bitüm içerisinde kullanılmasıyla biyo-asfalt bağlayıcılar elde edilebilmektedir [2-8].

FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi) Spektroskopisi

(FTIR (Fourier Transform Infrared) Spectroscopy)

Yapıdaki fonksiyonel grupların belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri FTIR analizidir. Kızılötesi ışınların absorblanmasıyla, moleküllerin titreşim hareketleri sonucu elde edilen spektrumlar ile yapıdaki fonksiyonel gruplar tespit edilebilmektedir [2-4,8,22].

Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deneyleri (Penetration and Softening Point Tests)

ASTM-D5 [23] ve ASTM-D36 [24] standartlarına uygun olarak yapılan penetrasyon deneyi [23] ve yumuşama noktası [24] deneyleri sonucunda, bitümlü bağlayıcıların kıvamları belirlenebilmektedir.

Penetrasyon İndeksi (PI) (Penetration Index)

Penetrasyon indeksi (PI) değerleri, bitümlü bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bağlayıcıların yumuşama noktası değerinin SP ile, penetrasyon değerinin ise (Pen) ile simgelendiği denklem (1) ile, PI değerleri hesaplanarak belirlenebilmektedir [1].

$$PI = \frac{1952 - 500 \log(Pen) - 20SP}{50 \log(Pen) - SP - 120} \quad (1)$$

Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi (Rotational Viscometer)

Bitümlü bağlayıcıların viskoziteleri ASTM-D4402 [25] standardına uygun olarak yapılan dönel

viskozimetre deneyi ile belirlenebilmektedir [25,26].

BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Biyokütlelerden Pirolitik Biyo-Yağ Üretimi

(Pyrolytic Bio-oil Production from Biomasses)

Bu çalışmada, meşe talaşı, çay atığı ve çam kozalağı biyokütleleri oksijensiz ortamda, azot gazı ile piroliz deneyine tabi tutularak üç farklı pirolitik biyo-yag üretilmiştir. Piroliz deneylerinde, reaktördeki biyokütle oda sıcaklığından, istenilen piroliz sıcaklığına kadar oksijensiz ortamda ısıtılmıştır. Yaklaşık 130 dakika sürede tamamlanan piroliz deneyleri sonucunda, reaktör oda sıcaklığına kadar soğuduktan sonra ürünler alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan biyokütlelerden piroliz deneyleri sonucunda elde edilen ürün miktarları Tablo 1’de görülmektedir.

Tablo 1

Biyokütlelerden elde edilen pirolitik ürün miktarları.

Biyokütle	Piroliz Sıcaklığı (°C)	Katı Ürün (%)	Sıvı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
Meşe Talaşı	505-515	27,25	23,57	49,18
Çay Atığı	500-520	25,34	35,98	38,68
Çam Kozalağı	535	25,30	35,50	39,20

Biyo-yag Destilasyonu (Bio-oil Distillation)

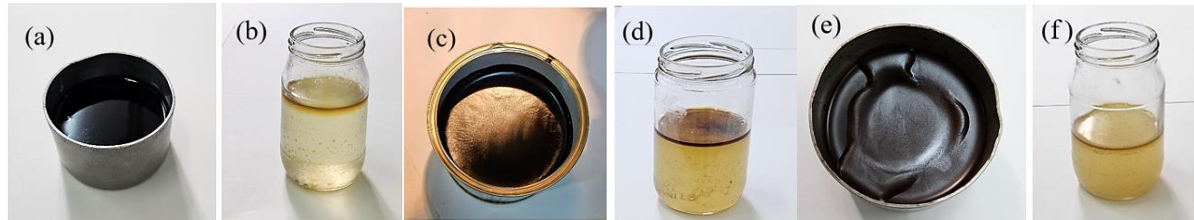
Biyokütleden elde edilen biyo-yaglar, su, oksijenli bileşikler, çeşitli asitler ve kompleks bileşikler içeren karışımlar olması sebebiyle [11,16,17,19,20], bitüm ile karıştırılmadan önce destilasyon gibi ayrıştırma proseslerine tabi tutulmaları gerekebilmektedir [2,5-8]. Destilasyon prosesi ile, pirolitik yağ karışımı içerisindeki hafif ürünler ayrıştırılarak farklı şartlarda farklı destilasyon kalıntıları elde edilebilmektedir [16,18-20].

Bu çalışmada, üç farklı biyokütleden piroliz deneyleri sonucunda üretilen üç farklı biyo-yag destilasyon deneyine tabi tutulmuştur. Biyo-yagların destilasyonu sonucunda hafif ürünler ayrıştırılarak destilasyon kalıntıları elde edilmiştir. Biyo-yaglardan elde edilen destilasyon kalıntıları ve destilasyon sonrası hafif sıvı ürünler Şekil 1’de görülmektedir. Meşe talaşı, çay atığı ve çam kozalağı biyokütlelerinin pirolitik biyo-yaglarından, destilasyon deneyi sonucunda elde edilen hafif sıvı ürün miktarları ise Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2

Piroliz sıvı ürünlerinden elde edilen destilasyon sonrası hafif sıvı ürün miktarları.

	Meşe Talaşı Biyo-yagı	Çay Atığı Biyo-yagı	Çam Kozalağı Biyo-yagı
Destilasyon Sonrası Hafif Sıvı Ürün (%)	71,5	72,0	71,8

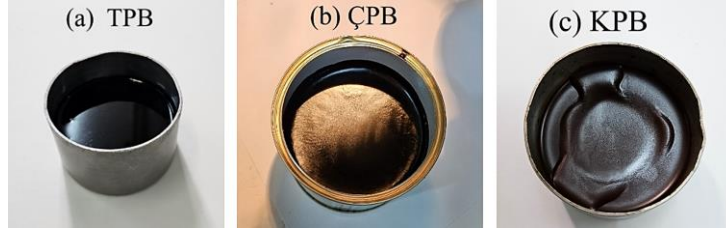


Şekil 1

(a)Talaş pirolitik biyo-yagı destilasyon kalıntısı (TPB) (b)Talaş pirolitik biyo-yagı destilasyon sonrası hafif sıvı ürünler (c)Çay atığı pirolitik biyo-yagı destilasyon kalıntısı (ÇPB) (d)Çay atığı pirolitik biyo-yagı destilasyon sonrası hafif sıvı ürünler (e)Kozalak pirolitik biyo-yagı destilasyon kalıntısı (KPB) (f)Kozalak biyo-yagı destilasyon sonrası hafif sıvı ürünler

Biy-Asfalt Bağlayıcıların Hazırlanması (Preparation of Bio-asphalt Binders)

Bu çalışmada, talaş biyokütlesi pirolitik biyo-yagı destilasyon kalıntısı (TPB), çay atığı pirolitik biyo-yagı destilasyon kalıntısı (ÇPB) ve kozalak biyokütlesi pirolitik biyo-yagı destilasyon kalıntısı (KPB), 50/70 saf bitüm içerisinde ayrı ayrı %10 oranında yavaş yavaş eklendikten sonra, 1200 rpm hızla, $135 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, 30 dk süre karıştırılmış ve üç farklı biyo-asfalt bağlayıcı elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan TPB, ÇPB ve KPB Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2

(a) TPB (b) ÇPB (c) KPB.

Bu çalışmada, %10 oranında üç farklı pirolitik biyo-yag destilasyon kalıntısı katkılı biyo-asfalt bağlayıcılar şu şekilde tanımlanmıştır.

10TPB: Saf Bitüm + %10 TPB

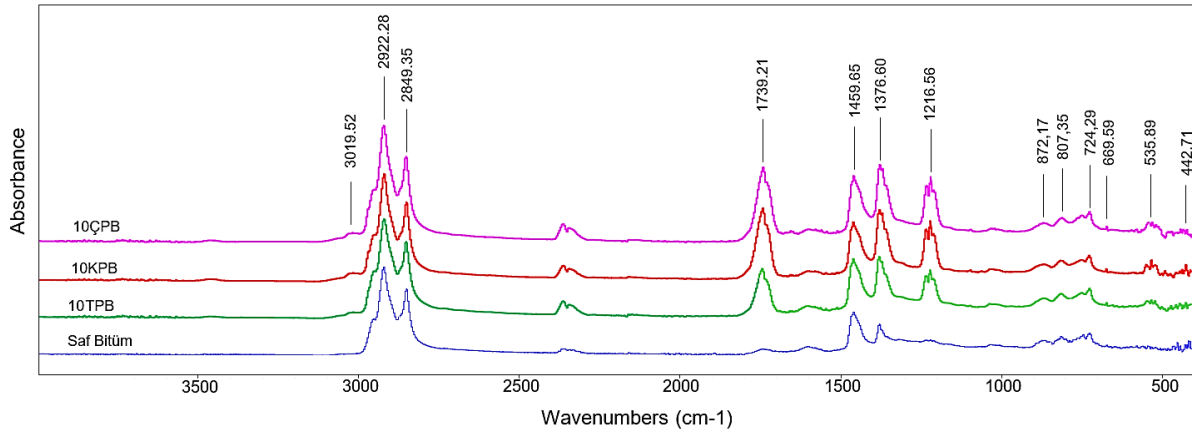
10ÇPB: Saf Bitüm + %10 ÇPB

10KPB: Saf Bitüm + %10 KPB

Biy-Asfalt Bağlayıcıların FTIR Analiz Sonuçları

(FTIR Analysis Results of Bio-asphalt Binders)

Bu çalışmada, bağlayıcıların yapısındaki fonksiyonel grupların belirlenmesi amacıyla, 4000 cm^{-1} - 400 cm^{-1} aralığında elde edilen FTIR spektrumları Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 3

Bağlayıcıların FTIR analiz sonuçları

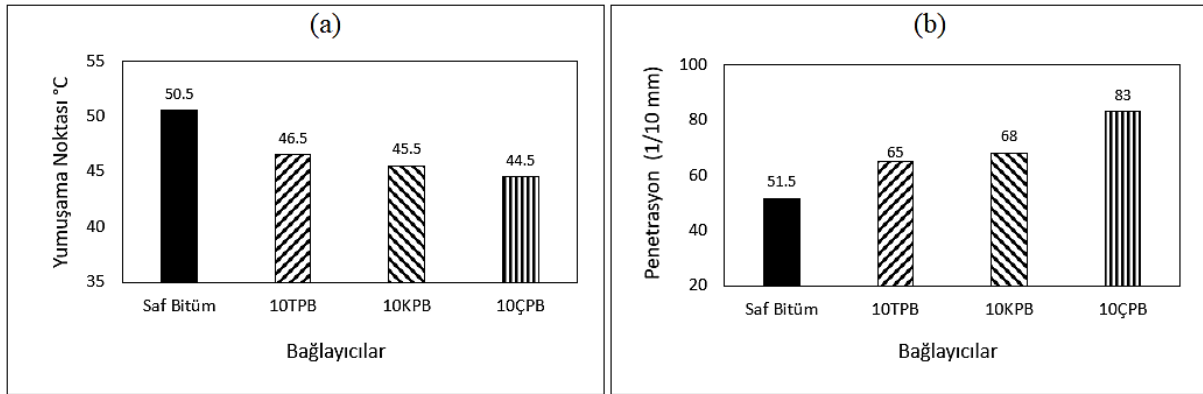
Sonuçlara göre, $2922,28\text{ cm}^{-1}$ ve $2849,35\text{ cm}^{-1}$ C-H gerilme titreşimleri, $1739,21\text{ cm}^{-1}$ C=O gerilmesi, $1459,65\text{ cm}^{-1}$ ve $1376,60\text{ cm}^{-1}$ civarındaki pikler C-H eğilme titreşimleri, $1216,56\text{ cm}^{-1}$ C-O gerilmesi, $872,17\text{ cm}^{-1}$ ve $724,29\text{ cm}^{-1}$ civarındaki pikler ise aromatik C-H eğilme titreşimlerine atfedilebilir [2-5,7,8]. Şekil 3’deki FTIR spektrumlarına göre, saf bitüm ile karşılaştırıldığında, biyo-asfalt bağlayıcılarda $1739,21\text{ cm}^{-1}$ ve $1216,56\text{ cm}^{-1}$ civarındaki pik şiddetlerinin daha fazla olduğu görülmektedir.

Bağlayıcıların Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Değerleri

(Penetration and Softening Point Values of Binders)

Bitümlü bağlayıcıların kıvamları ASTM-D5 [23] ve ASTM-D36 [24] standartlarına uygun olarak yapılan penetrasyon deneyi [23] ve yumuşama noktası [24] deneyleri ile belirlenmiştir. Bu çalışmada, farklı biyokütlelerden üretilen farklı biyo-yag destilasyon kalıntıları kullanılarak hazırlanan biyo-asfalt bağlayıcıların ve saf bitümün yumuşama noktası değerleri Şekil 4(a) ve penetrasyon değerleri ise Şekil 4(b)'deki gibi belirlenmiştir.

Elde edilen farklı biyo-asfalt bağlayıcıların kıvamının saf bitümden daha yumuşak olduğu, penetrasyon değerlerinin saf bitümün penetrasyonundan daha yüksek, yumuşama noktalarının ise saf bitümün yumuşama noktasından daha düşük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4

(a) Bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri (b) Bağlayıcıların penetrasyon değerleri.

Deney sonuçlarına göre, saf bitüm içerisinde aynı oranda kullanılan farklı biyo-yag destilasyon kalıntılarının, farklı oranlarda etkili olduğu görülmüştür. Şekil 4 incelendiğinde, en yüksek penetrasyon değerine ve en düşük yumuşama noktası değerine 10ÇPB biyo-asfalt bağlayıcısının sahip olduğu görülmektedir. 10TPB, 10KPB ve 10ÇPB biyo-asfalt bağlayıcılarının yumuşama noktalarının, 50/70 saf bitümün yumuşama noktası değerinden, sırasıyla yaklaşık %8, %10 ve %12 oranlarında daha düşük olduğu ve penetrasyon değerlerinin ise yaklaşık %26,2, %32 ve %61,2 oranlarında daha yüksek olduğu Şekil 4'den görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan farklı biyo-yaglardan elde edilen farklı destilasyon kalıntılarının, farklı oranlarda etkili olduğu belirlenmiştir. Nitekim, Şekil 3'deki biyo-asfalt bağlayıcıların ve saf bitümün FTIR analiz sonuçlarından da görüleceği gibi, saf bitüm ile karşılaştırıldığında, biyo-asfalt bağlayıcılarda $1739,21 \text{ cm}^{-1}$ ve $1216,56 \text{ cm}^{-1}$ civarındaki pik şiddetlerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. $1739,21 \text{ cm}^{-1}$ civarındaki pikler C=O gerilmesi ve $1216,56 \text{ cm}^{-1}$ civarındaki pikler ise C-O gerilmesine atfedilmektedir [2,3,4].

Literatürde, çeşitli biyo-yaglar kullanılarak elde edilen bazı biyo-asfalt bağlayıcıların kıvamlarının da saf bitümden daha yumuşak olduğu belirlenmiştir [2-8]. Yapılan bir çalışmada [8], bitüm içerisinde %10 oranında biyo-yag kullanılarak hazırlanan biyo-asfalt bağlayıcının yumuşama noktasının, bitümün yumuşama noktasından yaklaşık %7,1 oranında daha düşük olduğu, penetrasyon değerinin ise yaklaşık %58,8 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir [8]. Bir diğer çalışmada [3], 50/70 bitüm içerisinde yaklaşık %10 oranında kullanılarak hazırlanan bağlayıcının yumuşama noktasının, saf bitümün yumuşama noktasından yaklaşık %12,5 oranında daha düşük olduğu, penetrasyon değerinin ise saf bitümün penetrasyon değerinin yaklaşık 2,22 katı olduğu belirlenmiştir. Farklı biyo-yaglar, farklı bitümler üzerinde farklı oranlarda etkili olabilmektedir [2-6,8].

Bağlayıcıların Sıcaklık Hassasiyetleri (Temperature Susceptibility of Binders)

Biyo-asfalt bağlayıcılar ve saf bitümün penetrasyon indeksi değerleri Tablo 3’de görüldüğü şekilde belirlenmiştir. Yumuşama noktası ve penetrasyon değerleri kullanılarak, denklem (1) ile belirlenen Tablo 3’deki penetrasyon indeksi değerleri incelendiğinde, biyo-asfalt bağlayıcıların PI değerlerinin saf bitümden daha az olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, elde edilen biyo-asfalt bağlayıcıların saf bitümden daha fazla sıcaklık hassasiyetine sahip oldukları tespit edilmiştir. Buna ek olarak, Tablo 3’deki PI değerleri incelendiğinde, 10KPB biyo-asfalt bağlayıcısının en fazla sıcaklık hassasiyetine sahip bağlayıcı olduğu görülmektedir. Yumuşama noktası ve penetrasyon değerlerine bağlı olan PI değerleri, farklı biyo-yag destilasyon kalıntılarının farklı oranlarda etkili olması sonucu elde edilebilir [2-6,8].

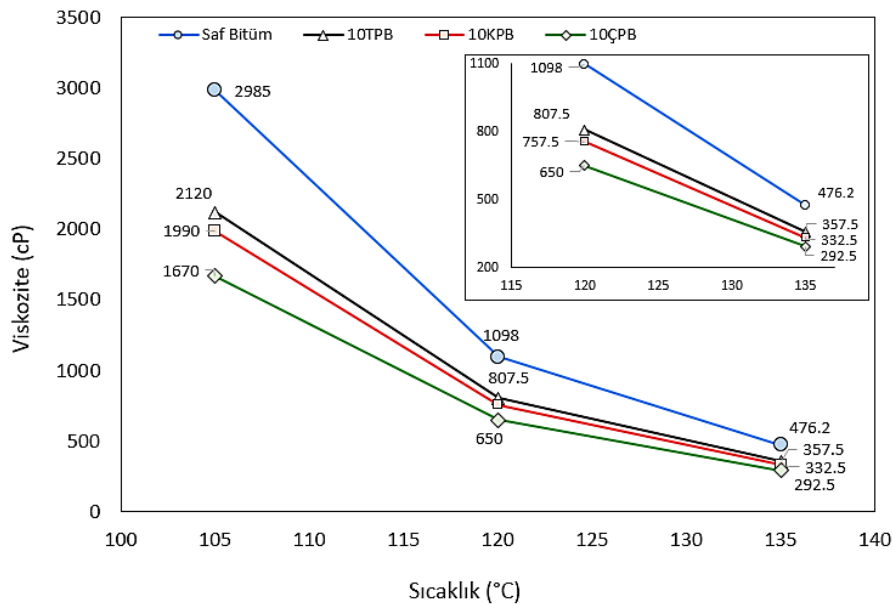
Tablo 3

Bağlayıcıların PI (Penetrasyon İndeksi) değerleri

Bağlayıcılar	Saf Bitüm	10TPB	10KPB	10ÇPB
PI (Penetrasyon İndeksi)	-1,01	-1,52	-1,70	-1,49

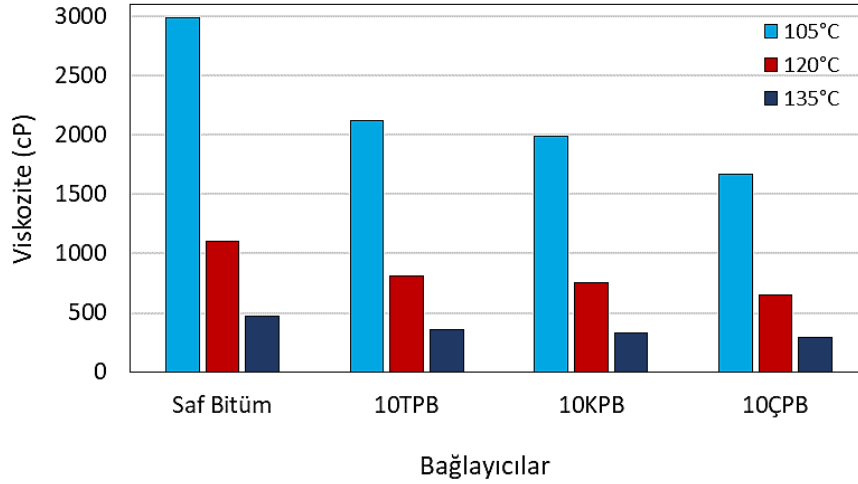
Bağlayıcıların Viskoziteleri (Viscosities of Binders)

Biyo-asfalt bağlayıcılar ve saf bitümün viskoziteleri ASTM-D4402 [25] standardına uygun olarak yapılan dönel viskozimetre deneyi ile belirlenmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6’daki viskozite deney sonuçlarına göre, biyo-asfalt bağlayıcıların viskozitelerinin saf bitümden daha düşük olduğu belirlenmiştir. 10ÇPB biyo-asfalt bağlayıcısının Şekil 5’de görüldüğü gibi tüm sıcaklıklarda en az viskozite değerine sahip bağlayıcı olduğu belirlenmiştir. 10TPB, 10KPB ve 10ÇPB biyo-asfalt bağlayıcıların viskozite değerlerinin, 135°C sıcaklıkta 50/70 saf bitümün viskozite değerinden, sırasıyla yaklaşık %24,9, %30,2 ve %38,6 oranlarında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Literatürde, farklı bazı biyokütllerden elde edilen biyo-asfalt bağlayıcıların viskozite değerlerinin de saf bitümün viskozitesinden daha düşük olduğu belirlenmiştir [2,3,5-7]. Farklı biyo-yaglar, farklı bitümler üzerinde farklı oranlarda etkili olabilmektedir [2-8].



Şekil 5

Bağlayıcıların viskozitelerinin sıcaklık ile değişimi



Şekil 6

Bağlayıcıların viskozite değerleri

SONUÇ ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, meşe talaşı, çay atığı ve çam kozalağı biyokütleleri olmak üzere üç farklı bitkisel biyokütleden, piroliz yöntemi ile üç farklı biyo-yag üretilmiştir. Üretilen pirolitik biyo-yaglar destilasyon deneyine tabi tutularak hafif ürünler ayrıştırılmış ve destilasyon kalıntıları elde edilmiştir. Belirlenen piroliz ve destilasyon şartlarında üretilen biyo-yag destilasyon kalıntıları, %10 oranında ayrı ayrı 50/70 bitüm içerisinde kullanılarak farklı biyo-asfalt bağlayıcılar elde edilmiştir. Saf bitüm ve biyo-asfalt bağlayıcıların, FTIR fonksiyonel grupları, penetrasyon, yumuşama noktası, penetrasyon indeksi değerleri, kıvamları ve viskoziteleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- FTIR analiz sonuçlarına göre, saf bitüm ile karşılaştırıldığında, biyo-asfalt bağlayıcılarda $1739,21\text{ cm}^{-1}$ ve $1216,56\text{ cm}^{-1}$ civarındaki pik şiddetlerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- 10TPB, 10KPB ve 10ÇPB biyo-asfalt bağlayıcılarının yumuşama noktalarının, 50/70 saf bitümün yumuşama noktası değerinden, sırasıyla yaklaşık %8, %10 ve %12 oranlarında daha düşük olduğu sonucu elde edilmiştir.
- 135°C sıcaklıkta 10TPB, 10KPB ve 10ÇPB biyo-asfalt bağlayıcıların viskozitelerinin, 50/70 saf bitümün viskozite değerinden, sırasıyla yaklaşık %24,9, %30,2 ve %38,6 oranlarında daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- 10ÇPB biyo-asfalt bağlayıcısının en yumuşak kıvamlı bağlayıcı olduğu ve en düşük viskozite değerine sahip bağlayıcı olduğu belirlenmiştir.
- Aynı oranda farklı destilasyon kalıntıları içeren farklı biyo-asfalt bağlayıcıların, farklı kıvam ve viskozite değerlerine sahip olduğu ve farklı biyo-yag destilasyon kalıntılarının farklı oranlarda etkiye sahip olabilecekleri söylenebilir.

Bu çalışmada elde edilen biyo-asfalt bağlayıcıların soğuk iklimli bölgelerde kullanılabileceği düşünülmektedir. İleride yapılacak olan çalışmalarda, farklı biyokütlelerden farklı üretim şartlarında elde edilen biyo-yag destilasyon kalıntıları kullanılarak elde edilen biyo-asfalt bağlayıcıların yaşlanma özellikleri ve düşük sıcaklıklardaki performanslarının araştırılması önerilmektedir.

Bu çalışma, farklı biyo-asfalt bağlayıcıların elde edilmesi, bazı özelliklerinin belirlenerek karşılaştırılması ve literatüre katkı sağlayacak olması sebebiyle önem taşımaktadır. Biyokütleden elde edilen ürünlerin yol yapım malzemelerinde kullanılmasıyla, hem bitümlü bağlayıcıların bazı özellikleri ve kaplama performansı geliştirilebilmekte, hem de atıkların değerlendirilmesiyle çevreye ve

ekonomiye katkı sağlanabilmektedir. Biyo-asfalt bağlayıcıların elde edilmesinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütlenin kullanılması çalışmanın önemini daha da arttırmaktadır.

Teşekkür (Acknowledgements)

Yazar, bu çalışmadaki FTIR analizleri için Hacettepe Üniversitesi İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne teşekkür eder.

Yazar Katkıları (Authors Credit)

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) N.A. (%100)

Veri Toplama (CRediT 2) N.A. (%100)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) N.A. (%100)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) N.A. (%100)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) N.A. (%100)

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarın bu çalışma için beyan ettiği herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The author has no conflicts of interest to disclose for this study.)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 7 Erişilebilir ve Temiz Enerji

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 11 Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 12 Sorumlu Üretim ve Tüketim

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] R.N. Hunter, A. Self, J. Read, The Shell Bitumen Handbook, 6th ed., *Shell International Petroleum Company Ltd.*, London, UK, 2015. ISBN: 978-0-7277-5837-8.
- [2] J. Pais, C.R. Santos, M. Cabette, L. Hilliou, J. Ribeiro, H. Wang, M.R.M. Hasan, Feasibility of using bio-oil from biodiesel production for bio-bitumen creation, *Road Materials and Pavement Design*. 24 (S1) (2023), 209-228. doi: 10.1080/14680629.2023.2180305
- [3] L.P. Ingrassia, X. Lu, G. Ferrotti, F. Canestrari, Chemical, morphological and rheological characterization of bitumen partially replaced with wood bio-oil: towards more sustainable materials in road pavements, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 7 (2) (2020), 192-204. doi: 10.1016/j.jtte.2019.04.003
- [4] S. Lv, J. Liu, X. Peng, M. Jiang, Laboratory experiments of various bio-asphalt on rheological and microscopic properties, *Journal of Cleaner Production*. 320 (2021), 128770. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128770
- [5] X. Cao, Y. Quan, M. Deng, B. Tang, and L. Kong, Progress and perspective of bio-asphalt preparation, structural characterization, and rheological properties, *Energy Fuels*. 38 (2024), 1657-1675. doi:10.1021/acs.energyfuels.3c04021
- [6] N. Su, F. Xiao, J. Wang, L. Cong, S. Amirkhanian, Productions and applications of bio-asphalts-Review, *Construction and Building Materials*. 183 (2018), 578-591. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118
- [7] Y. Ding, B. Shan, X. Cao, Y. Liu, M. Huang, B. Tang, Development of bio oil and bio asphalt by hydrothermal liquefaction using lignocellulose, *Journal of Cleaner Production*. 288 (2021), 125586. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125586
- [8] M. Deng, X. Cao, Z. Li, X. Li, X. Yang, B. Tang, Investigating properties and intermolecular interactions of sludge bio-oil modified asphalt, *Journal of Molecular Liquids*. 360 (2022), 119415. doi: 10.1016/j.molliq.2022.119415
- [9] S. Algarni, V. Tirth, T. Alqahtani, S. Alshehry, P. Kshirsagar, Contribution of renewable energy sources to the environmental impacts and economic benefits for sustainable development, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 56 (2023), 103098. doi: 10.1016/j.seta.2023.103098
- [10] S.V. Vassilev, D. Baxter, L.K. Andersen, C.G. Vassilev, An overview of the chemical composition of biomass, *Fuel*. 89 (2010), 913-933. doi:10.1016/j.fuel.2009.10.022
- [11] A.V. Bridgwater, Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass, *Chemical Engineering Journal*. 91 (2003), 87-102. doi: 10.1016/S1385-8947(02)00142-0
- [12] B. Akgayev, S. Akbayrak, M. Yılmaz, M.S. B ker, V.  ns r, Assessing the feasibility of photovoltaic systems in T rkiye: Technical and economic analysis of on-grid, off-grid, and utility-scale PV installations, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 6(1) (2024), 69-92. doi: 10.47112/neufmbd.2024.33
- [13] E. Han er G lery z, D.N.  zen, Exergo-economic analysis of an geothermal based organic rankine cycle, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 6(2) (2024), 312-335. doi: 10.47112/neufmbd.2024.50
- [14] R. B y kzeren, M.N. Kaya, A.A. Bacako lu, M. U ar, H.B. Altınta , A.  zt rk, A.Y. Bilici, Investigation of the tower height and turbulence intensity on horizontal axis wind turbines, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 6(3) (2024), 566-582. doi: 10.47112/neufmbd.2024.66
- [15] A. Demirba , The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis, *Fuel Processing Technology*. 88 (2007), 591-597. doi: 10.1016/j.fuproc.2007.01.010

- [16] K. Drugkar, W. Rathod, T. Sharma, A. Sharma, J. Joshi, V.K. Pareek, L. Ledwani, U. Diwekar, Advanced separation strategies for up-gradation of bio-oil into value-added chemicals: A comprehensive review, *Separation and Purification Technology*. 283 (2022), 120149. doi: 10.1016/j.seppur.2021.120149.
- [17] P. Adams, T. Bridgwater, A. Lea-Langton, A. Ross, I. Watson, Chapter 8-Biomass Conversion Technologies, P. Thornley and P. Adams (Ed.), *Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems*, Elsevier, 2018: ss. 107-139. doi:10.1016/B978-0-08-101036-5.00008-2
- [18] R.A. Kinsara, A. Demirbaş, Upgrading of crude oil via distillation processes, *Petroleum Science and Technology*. 34(14) (2016), 1300-1306. doi: 10.1080/10916466.2016.1200080
- [19] X. Guo, S. Wang, Z. Guo, Q. Liu, Z. Luo, K. Cen, Pyrolysis characteristics of bio-oil fractions separated by molecular distillation, *Applied Energy*. 87 (2010), 2892–2898. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.10.004
- [20] Y.H. Chan, S.K. Loh, B.L.F. Chin, C.L. Yiin, B.S. How, K.W. Cheah, M.K. Wong, A.C.M. Loy, Y.L. Gwee, S.L.Y. Lo, S. Yusup, S.S. Lam, Fractionation and extraction of bio-oil for production of greener fuel and value-added chemicals: Recent advances and future prospects, *Chemical Engineering Journal*. 397 (2020), 125406. doi: 10.1016/j.cej.2020.125406
- [21] S. Terzi, M. Saltan, K. Armağan, A.K. Kurtman, Ş. Karahançer, E. Erişkin, V.E. Uz, Bitumen expanding using bio-oil product of rose pulp's pyrolysis process, *Construction and Building Materials*. 249 (2020), 118721. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118721
- [22] B.C. Smith, *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, Second Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
- [23] ASTM-D5, Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, West Conshohocken, 2006.
- [24] ASTM-D36, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), West Conshohocken, 2006.
- [25] ASTM-D-4402, Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, 2002.
- [26] J.P. Zaniewski, M.E. Pumphrey, Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol, Technical Report, *West Virginia Division of Highways*, 2004, West Virginia.