



## **Polimer Kompozit Üretiminde Kullanılabilecek İki Eksenli Toz Karıştırıcı İmalatı ve Test Edilmesi**

### **Manufacture and Testing of Two-Axis Powder Mixer That can be Used in Polymer Composite Production**

**Özkan Öz <sup>\*</sup> , Fatih Huzeyfe Öztürk **

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [ooz@karabuk.edu.tr](mailto:ooz@karabuk.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 21.03.2021

Kabul Tarihi / Accepted: 28.12.2021

Atıf şekli/How to cite: Öz, O., ÖZTÜRK, F.H. (2022). Polimer Kompozit Üretiminde Kullanılabilecek İki Eksenli Toz Karıştırıcı İmalatı ve Test Edilmesi. DEUFMD, 24(71), 403-414.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247107

#### **Öz**

Endüstriyel uygulamalarda, karıştırma işlemi ile homojen yapıya sahip ve aynı kalitede ürünlerin elde edilmesi amaçlanır. Karışımın homojenliği, karıştırıcının çeşidi ve karıştırma parametrelerine bağlı olarak farklılık gösterir. Bu çalışmada, polimer kompozit üretiminde kullanılabilecek, iki eksenli küp toz karıştırıcı imal ve test edilmiştir. Karıştırma işleminde, toz PLA (Polilaktik asit) ve ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında karbon elyaf tozu kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar kullanılarak, enjeksiyon kalıplama ile çekme test numuneleri üretilmiştir. Numunelerin yük altındaki davranışları ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri yorumlanarak karışımların homojenliği belirlenmiştir. Ayrıca, karıştırmada etkinliği bilinen Turbula da karıştırma işlemleri, çekme testleri ve SEM analizleri tekrar edilmiştir. Küp karıştırıcı ve Turbula için elde edilen çekme test sonuçları ve SEM görüntüleri karşılaştırılmış ve küp karıştırıcının etkinliği belirlenmiştir. SEM görüntüleri karşılaştırıldığında, özellikle %10 ve %15 karbon elyaf tozu oranlarında, küp karıştırıcı ile hazırlanan numunelerde fiber dağılımının, Turbula ile hazırlanan numunelere oranla daha üniform olduğu görülmüştür. Ayrıca, numunelerin yük-yer değiştirme davranışları incelendiğinde, mekanik özellikler açısından kararlı numune üretiminde, küp karıştırıcının Turbulaya göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Küp toz karıştırıcı, Turbula, PLA, karbon elyaf tozu, SEM, mekanik özellikler

#### **Abstract**

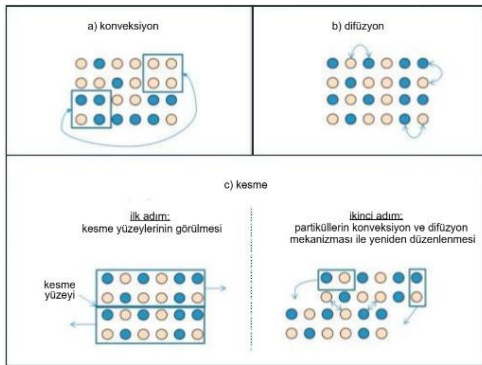
In industrial applications, the aim is to obtain products with a homogeneous structure and the same quality with the mixing process. Mixing homogeneity differs depending on the type of mixer and mixing parameters. In this study, a two-axis cube powder mixer that can be used in polymer composite production was manufactured and tested. In the mixing process, powder PLA (polylactic acid) and carbon fiber powder by 5%, 10% and 15% weight ratios were used. Tensile test specimens were produced through injection molding using the prepared mixtures. The homogeneity of the mixtures was determined by interpreting the behavior of the samples under load and Scanning Electron Microscope (SEM) images. In addition, mixing processes, tensile tests, and SEM analyses were repeated for Turbula, whose efficiency in mixing is known. The efficiency of the cube mixer was determined by comparing the tensile test results and SEM images obtained for both devices. When

the SEM images were compared, it was seen that the fiber distribution in samples prepared with a cube mixer, especially at 10% and 15% carbon fiber powder ratios, was more uniform than the samples prepared with Turbula. In addition, when the load-displacement behaviors of the samples were examined, it was concluded that the cube mixer was more successful than Turbula in the production of stable samples in terms of mechanical properties.

**Keywords:** Cube powder mixer, Turbula, PLA, carbon fiber powder, SEM, mechanical properties

## 1. Giriş

Toz malzemelerin karıştırılması seramik, metalurji, kimya, gıda, kozmetik, plastik ve eczacılık gibi çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda önemli işlem basamaklarından biridir [1-2]. Karıştırma işleminde, karıştırıcının mekanizması, karıştırılan malzemelerin özellikleri, karıştırma parametreleri ve prensibi, karışımdan elde edilen ürünlerin özellik ve kalitesine etki eden önemli değişkenlerdir [3]. Malzemenin karıştırılması konveksiyon, difüzyon ve kesme şeklinde üç temel prensipte incelenir (Şekil 1) [4]. Konveksiyon prensibinde, malzeme partikül grupları, mekanik olarak, spatula benzeri elemanlar kullanılarak, birbirine göre taşınır. Difüzyon prensibi ile karıştırma, partiküllerin rastgele hareketinden meydana gelmektedir. Difüzyon prensibinde, partiküller yerçekimi veya titreşim etkisi altında rastgele hareket eder ve kesme kuvvetlerinin oluşmadığı varsayılır. Kesme prensibi ile karıştırma konveksiyon ve difüzyonun kombinasyonu olarak kabul edilebilir. Kesme ile karıştırmada kütle içerisinde kayma düzlemleri oluşturulur. Bu prensibe göre çalışan cihazlar hareketli bıçaklara sahiptir [5-8].



**Şekil 1.** Konveksiyon, difüzyon ve kesme karıştırma mekanizmaları [3]

Karıştırma işlemi, toz karıştırma için tasarlanan karıştırıcılarda konveksiyon, difüzyon veya

kesme şeklinde olabilir ancak, üç yöntemde de temel amaç, farklı özelliklere sahip partiküllerin karışım içerisinde homojen dağılımının elde edilmesidir. Ancak, homojen yapı, karıştırma sırasında, karışım içerisinde meydana gelebilecek topaklanma ve ayrışma mekanizmaları ile önemli oranda bozulabilir ve üretim aşamalarında karıştırma işlemi bulunan ürünlerin birbirinden farklı özelliklere sahip olmasına sebep olabilir. Homojen yapıyı bozacak olumsuzlukların azaltılması için birçok parametrenin (Karıştırıcının yapısı, karıştırma zamanı, karıştırma hızı ve partiküllerin fiziksel özellikleri vb.) etkilerinin göz önüne alınması gerekir. Dolayısıyla, yapıyı bozacak birden fazla değişkenin olduğu karıştırma işlemi oldukça karmaşık bir işlem basamağıdır. Literatürde farklı karıştırıcılar kullanılarak partikül dağılımını anlamaya yönelik yapılan çalışmalar olmasına rağmen, konu ile ilgili deneysel çalışma sayısı oldukça yetersizdir.

Marigo vd. ayrık elemanlar metodunu kullanarak, karıştırıcılarda akışın ve karışımın modellenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, yatay dönen tambur, çemberli karıştırıcı ve Turbula olmak üzere üç farklı karıştırıcı için analizleri tekrarlamışlardır. Ayrık elemanlar metodu kullanılarak, partikül akış davranışını tahmin etmenin veya geleneksel tekniklerle ölçmenin zor olduğu karmaşık sistemlerin modellenebileceğini göstermişlerdir [1].

Marigo vd. Turbula mikserde üç boyutlu partikül hareketini ayrık elemanlar metodunu kullanarak incelemişlerdir. Oluşturdukları modelde karıştırma hızını değişken olarak almışlardır. Karışımın davranışının mikser hızının monoton olmayan fonksiyonu şeklinde değiştiğini belirtmişlerdir [9].

Mayer-Laigle vd. Turbula mikser kullanımının, %85 laktoz ve %15 kuskustan oluşan karışımın kalitesine olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma, karıştırma

hızından bağımsız olarak, Turbula ile yüksek kalitede karışımların hızlı bir şekilde elde edilebildiğini göstermiştir [3].

Xiao vd. ribbon mikser de partikül besleme sırasının, endüstriyel karıştırmanın derecesi üzerine etkisini araştırmışlardır. Partikül besleme ve karıştırma prosesinin modellenmesinde ayrık elemanlar metodunu kullanmışlardır. Sayısal sonuçlar, büyük partiküllerin küçük partiküllerden sonra beslenmesi durumunda karışımın iyileştirilebileceğini göstermiştir [10].

Cho vd. çalışmalarında, ürettikleri iki eksenli, çift konili karıştırıcı ile tek eksenli karıştırıcının karıştırma sürelerini karşılaştırmışlardır. Tek eksenli karıştırmaya göre iki eksenli karıştırmanın, karışımın hazırlanma süresini %70-90 arasında azalttığını belirtmişlerdir [11].

Brone ve Muzzio çalışmalarında, çift konili karıştırıcıda eksenel partikül akışını artırmak amacıyla yön değiştirici sabit levha kullanılmışlardır. Kullanılan levhanın karıştırma prosesine etkisini görselleştirmek ve tüm deney boyunca, karışımın yüzeyindeki homojenlik durumunu belirlemek için şeffaf bir karıştırma kabı kullanarak görsel değerlendirme yapmışlardır. Yön değiştirici sabit levha kullanımının, karıştırıcının merkezi boyunca konvektif bir eksenel akış oluşturarak karıştırmayı geliştirmede etkili olduğunu belirtmişlerdir [12].

Bellon vd. pnömomatik pilot tesis mikserinin ilaç endüstrisinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. İlaç katkısı olarak laktoz mono hidrat ve işaretleyici olarak salisilik asitten oluşan kohezif tozlar kullanmışlardır. Dolun oranı ve işaretleyici miktarının karıştırma zamanı ve homojenliğe etkisini belirlemişlerdir. 30 gr. ağırlığına sahip numuneler için doldurma oranının karıştırma performansına etkisinin düşük olduğunu belirtmişlerdir [2].

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmaların bir kısmının mevcut karıştırıcılar için sayısal analiz yöntemi ile parçacık dağılımının belirlenmesi, bir kısmının da alternatif karıştırıcı tasarımı veya mevcut karıştırıcı özelliklerini iyileştirmek üzerine olduğu görülmektedir. Alternatif karıştırıcı tasarımı veya mevcut karıştırıcı özelliklerini iyileştirmek üzerine olan çalışmalarda, değişken

sayısı sınırlandırılarak cihazın etkinliği tespit edilmeye çalışılmaktadır.

Bu çalışmada, polimer kompozit malzemelerin ön hazırlık işlemi olan karıştırma aşamasında kullanılacak, difüzyon prensibi ile çalışan, iki eksenli küp karıştırıcı imal ve test edilmiştir. Karıştırma işleminde toz PLA ve ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında karbon elyaf tozu (KET) kullanılmıştır. Küp karıştırıcı ile hazırlanan karışımlar kullanılarak, plastik enjeksiyon kalıplama ile çekme test numuneleri üretilmiştir. Çekme test sonuçları ve SEM analizleri ile karışımlarda homojenliğin hangi oranda sağlandığı belirlenmiştir. Çekme testlerinde numunelerin yük-yer değiştirme eğrileri karşılaştırılmıştır. SEM analizlerinde çekme testi uygulanan numunelerin hasar yüzeylerindeki fiber dağılımı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapılan çalışmada küp karıştırıcının etkinliğinin de belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Ar-Ge çalışmalarında tercih edilen ve difüzyon prensibi ile çalışan Turbula karıştırıcı için karıştırma işlemleri, çekme testleri ve SEM analizleri tekrarlanmıştır. Cihazların karşılaştırmasında, karıştırma devri ve süreleri sabit tutulmuştur. Her iki cihaz için elde edilen çekme test sonuçları ve SEM görüntüleri karşılaştırılarak, küp karıştırıcının etkinliği belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Küp ve Turbula karıştırıcı

Karıştırma işlemi, Turbula karıştırıcı ve küp karıştırıcı kullanılarak yapılmıştır. Turbula karıştırıcı (Şekil 2), farklı ağırlık ve boyutlara sahip toz halindeki malzemelerin homojen şekilde karıştırılması için kullanılmaktadır. Cihazda, farklı boyutlarda silindirik kaplar kullanılarak karıştırma işlemi yapılabilmektedir.



Şekil 2. Turbula@ T2F karıştırıcı

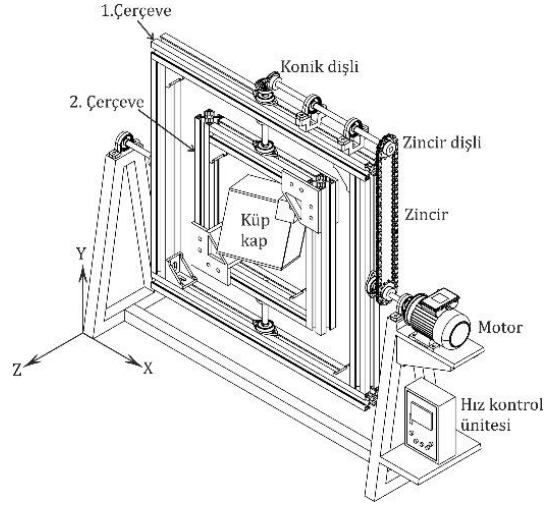
Turbula'nın verimliliği, Schatz geometrik teorisine göre, döndürme, öteleme ve ters çevirme ile sağlanmaktadır [13]. Karıştırma kabı, ürünü sürekli değişen, ritmik olarak atım hareketine maruz bırakan hareketlere tabi tutmaktadır. Bu çalışmada, turbula ile yapılan karıştırma işlemlerinde, 1 lt karıştırma hacmine sahip silindirik kap kullanılmıştır. Şekil 3'de Turbula kabının hareket mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 3. Turbula hareket mekanizması [3]

Küp karıştırıcıda karıştırma işlemi, pleksiglas malzemeden imal edilmiş, 1 lt karıştırma hacmine sahip, küp kap ile yapılmaktadır. Küp kabın ve turbula da kullanılan silindirik kabın karıştırma hacimleri birbirine eşittir. Kabın dönme hareketini sağlamak amacıyla, 0.37 kW, 1500 d/d, trifaze redüktörlü elektrik motoru ve motor devir hızını ayarlamak için hız kontrol ünitesi kullanılmıştır. Küp karıştırıcı iç içe iki çerçeveye oluşmaktadır. Karıştırma kabı 2. çerçeveye 45° açı oluşturacak şekilde bağlanmıştır. Açılı bağlantı, karışımın küp içerisinde, konik karıştırıcılara benzer olarak, köşelere yığılmasını sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. 1. Çerçeve ve kap, elektrik motorundan aldığı hareketle x-ekseni etrafında dönmektedir. Zincir dişliye bağlı olan konik dişli, motordan gelen dönme hareketini 2. çerçeveye iletmektedir. Bu sayede, 2. çerçeve ve kaba y-ekseni etrafında dönme hareketi sağlanmıştır. Kap içerisinde bulunan karışım, oluşan eş zamanlı dönme hareketleri ile iki eksenli olarak karıştırılabilmektedir. Şekil 5'de sistemin hareketi x ve y eksenleri etrafında aşamalı olarak gösterilmiştir.

Şekil 4'te imalatı yapılan küp karıştırıcı gösterilmektedir.



Şekil 4. İki eksenli küp karıştırıcı



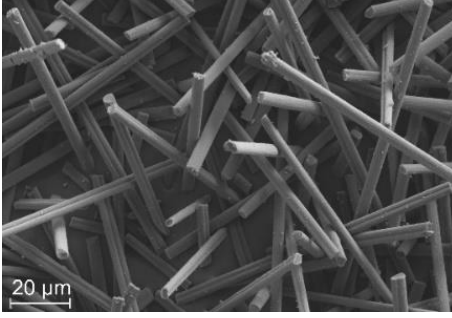
Şekil 5. Küp karıştırıcı hareket mekanizması

## 2.2. Numunelerin hazırlanması

Karıştırma işleminde, toz PLA matris malzemesi ve KET takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Takviye elemanlarına herhangi bir yüzey işlemi uygulanmamış ve PLA ile takviye elemanı arasında yüzey etkileşimini arttırmak amacıyla uyumlaştırıcı kullanılmamıştır. Toz PLA'ya karışımında kullanılmadan önce ETÜV ortamında 80°C sıcaklıkta 12 saat bekletilerek nem giderme işlemi uygulanmıştır. KET ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında karışım içerisinde kullanılmıştır. Tablo 1'de PLA ve KET özellikleri gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 6'da KET SEM görüntüsü verilmiştir.

Tablo 1. PLA ve KET özellikleri [14,15]

| Özellik                       | KET      | PLA     |
|-------------------------------|----------|---------|
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.6-1.76 | 1.24    |
| Uzama (%)                     | 1,5      | 5       |
| Safılık (%)                   | 95       | 99      |
| Partikül boyutu(µm)           | 100-400  | 366-488 |



Şekil 6. KET SEM görüntüsü

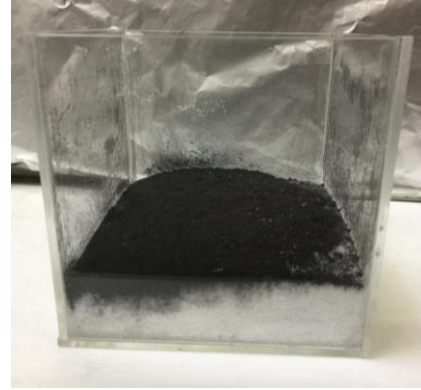
Karışımların oranları Tablo 2’de gösterilmiştir. Tabloda kullanılan “T” ve “K” kısaltmaları sırasıyla, Turbula ve küp karıştırıcıyı ifade etmektedir. Kısaltmalardan sonra kullanılan yüzde değerleri, karışım içerisindeki ağırlıkça KET yüzdesini belirtmektedir.

Her iki cihaz için karıştırma süresi 30 dakika olarak belirlenmiştir. Turbula ve küp karıştırıcı olabilecek en yakın devirlerde sırasıyla, 49 RPM ve 44 RPM’de çalıştırılmıştır. Şekil 7’de küp karıştırıcı da karıştırma işlemi öncesi, kap içerisinde bulunan toz PLA ve KET görüntüsü verilmiştir. Şekil 7’de görüldüğü gibi kabın zeminine PLA döküldükten sonra, belirlenen oranlarda KET, PLA üzerine ilave edilmiştir.

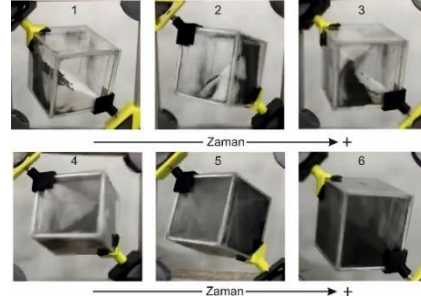
Küp karıştırıcıda zamana bağlı hareket ile kap içerisindeki karışımın aşamalı olarak değişimi Şekil 8’de gösterilmiştir.

Tablo 2. PLA ve KET karışım oranlar

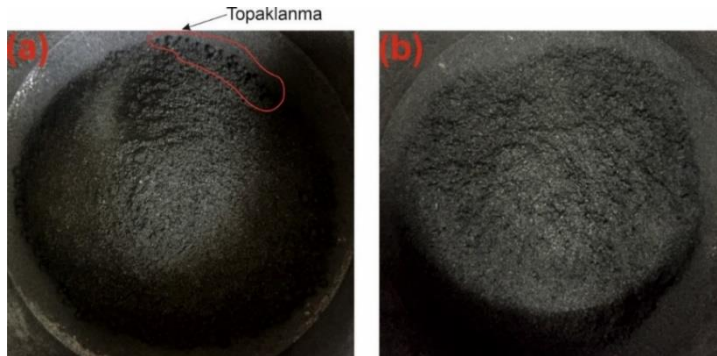
| Kısaltma | Cihaz           | Matris malzemesi (gr.) | Takviye elemanı (gr.) |
|----------|-----------------|------------------------|-----------------------|
| T-%5     | Turbula         | 95                     | 5                     |
| T-%10    | Turbula         | 90                     | 10                    |
| T-%15    | Turbula         | 85                     | 15                    |
| K-%5     | Küp karıştırıcı | 95                     | 5                     |
| K-%10    | Küp karıştırıcı | 90                     | 10                    |
| K-%15    | Küp karıştırıcı | 85                     | 15                    |



Şekil 7. Karıştırma öncesi küp karıştırıcı kabı içerisindeki PLA ve KET görüntüsü



Şekil 8. Küp karıştırıcı içerisindeki karışımın zamana bağlı değişimi



Şekil 9. Ağırlıkça %15 KET oranında karışımın görüntüsü, a) Turbula, b) Küp karıştırıcı

Şekil 9'da ağırlıkça en fazla oran olan %15 KET oranında, Turbula ve küp karıştırıcı ile hazırlanan karışımın enjeksiyon makinesinin besleme hunisi içerisindeki görüntüsü verilmiştir.

Hazırlanan karışımlar, karıştırıcılardan çıkarıldıktan hemen sonra, besleme hunisine dökülmüş ve görüntü alınmıştır. Her iki görüntü incelendiğinde, Turbula ile hazırlanan karışımda belirgin, göz ile görülebilen topaklanmalara rastlanmıştır (Şekil 9a). Daha düşük fiber oranlarında da Turbula ile hazırlanan karışımlarda topaklanmalara rastlanmış, küp karıştırıcı da ise belirgin topaklanmalar gözlemlenmemiştir.

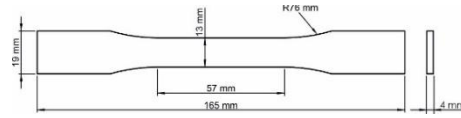
Hazırlanan karışımlar kullanılarak, farklı fiber oranlarında (ağırlıkça %5, %10 ve %15) üçer adet çekme test numunesi üretilmiştir. Numunelerin üretiminde enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılmıştır. Enjeksiyon makinesi kovan sıcaklığı, boğaz bölgesi için 185°C, orta ısıtma bölgesi ve çıkış bölgesi için 195°C seçilmiştir (Şekil 10). Enjeksiyon makinesi üzerinde ASTM D638 Tip 1 standart çekme test kalıbı bulunmaktadır. Şekil 11'de ASTM D638 Tip 1 standart çekme test numunesi ölçüleri gösterilmektedir.



Şekil13. Çekme testi sonrası hasara uğrayan numuneler

Şekil 14-16 Turbula ve küp karıştırıcı ile hazırlanan karışımlar kullanılarak üretilen kompozit numunelerin yük-yer değiştirme eğrilerini göstermektedir. Kullanılan her karışım oranı için toplam üç numuneye ait eğriler ve saf

Şekil 10. Plastik enjeksiyon makinesi



Şekil 11. Çekme test numunesi ölçüleri

Çekme testleri, 5 mm/dak hızda 50 kN'luk bilgisayar kontrollü Zwick Roell universal test cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 12).



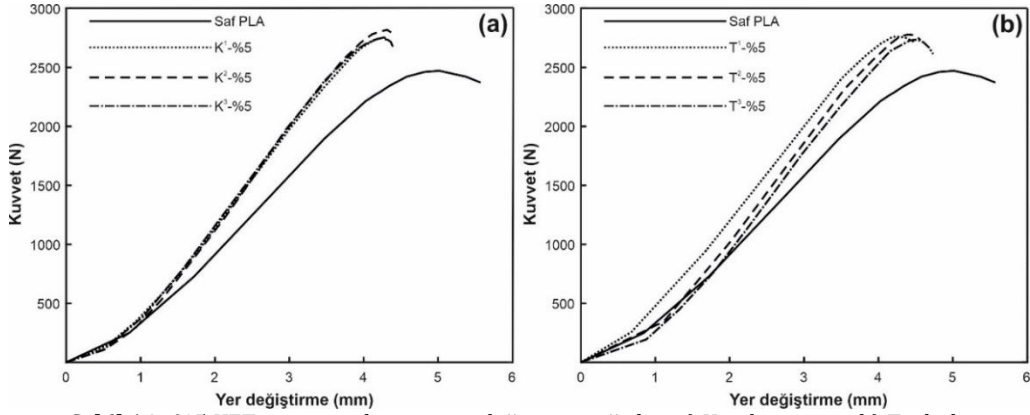
Şekil 12. Çekme cihazı ve numune bağlantısı

### 3. Bulgular

#### 3.1. Çekme test sonuçları

Şekil 13'de çekme testi sonrası hasara uğrayan numunelerin görüntüsü gösterilmektedir. Saf Pla'da kırılma ilk ölçüm bölgesi (gauge length) sınırında, geçiş bölgesine yakın, gevrek kırılma şeklinde meydana gelmiştir. Kompozit numunelerde, saf PLA'ya benzer şekilde, gevrek kırılma hasarı oluşmuş ve kırılmalar ilk ölçüm bölgesinde meydana gelmiştir.

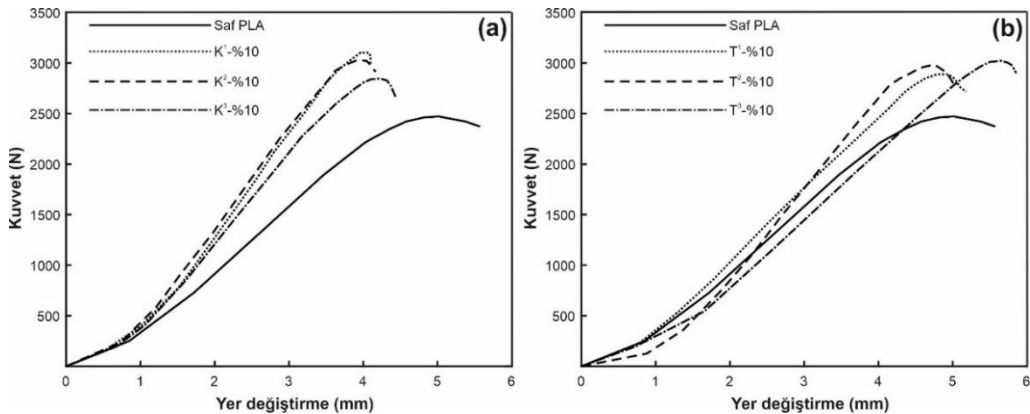
PLA'ya ait eğri aynı şekil içerisinde gösterilmiştir. Şekillerde kullanılan üst indisler numune numaralarını göstermektedir. Saf PLA için ortalama yük değerindeki eğri grafiklerde karşılaştırma amacı ile kullanılmıştır.



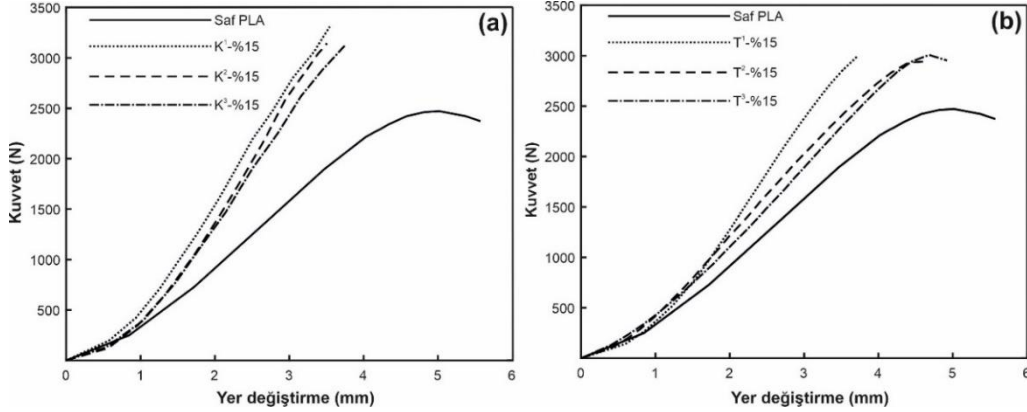
**Şekil 14.** %5 KET oranı için kuvvet-yer değiştirme eğrileri a) Küp karıştırıcı, b) Turbula

Şekil 14'de gösterilen ağırlıkça %5 KET içeren ve karıştırma işleminde küp karıştırıcının kullanıldığı kompozit numunelerin yük altındaki davranışları birbirine oldukça yakındır. Numunelerin tamamında, ulaşılan maksimum yük ve yer değiştirme değerleri yaklaşık olarak aynıdır. Bu oran için 2 nolu numunenin diğer numunelerden farkı, ulaşılan maksimum yük değerinde olmuştur, ancak, bu fark ihmal edilebilir düzeydedir. Aynı karışım oranı için karıştırma işleminde Turbulanın kullanıldığı kompozit numunelerin yük altındaki davranışları incelendiğinde, üç numunede ulaşılan maksimum yük değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Ancak, yer değiştirme değerleri arasında farklılıklar meydana gelmiştir. Her iki cihazla karışımı hazırlanan kompozit numunelerin yük değerleri, saf PLA ile hazırlanan numunenin yük değeri ile karşılaştırıldığında belirgin şekilde artış gözlemlenmiş ve birbirine oldukça yakın değerler elde edilmiştir.

Şekil 15'de KET oranının ağırlıkça %10 olduğu kompozit numuneler için yük yer değiştirme eğrileri gösterilmektedir. Karışımın hazırlanmasında küp karıştırıcının kullanıldığı kompozit numunelerin yük altındaki yer değiştirme ve yük değişimleri 1 ve 2 nolu numuneler için benzerdir. 3 nolu numune, 1 ve 2 nolu numuneler ile karşılaştırıldığında daha düşük maksimum yük değerine ulaşmış ve uzama değerinde artış meydana gelmiştir. Karıştırma işleminde Turbula karıştırıcının kullanıldığı kompozit numunelerin yük altındaki davranışları incelendiğinde, tüm numuneler için ulaşılan yük ve yer değiştirme değerlerinin birbirinden belirgin şekilde farklı olduğu görülmektedir. Her iki cihazla karışımı hazırlanan kompozit numunelerin yük değerleri, %5 karışım oranındaki numunelerin maksimum yük değerlerinden fazladır. Fiber oranının artması ile maksimum yük değerindeki artış devam etmiştir.



**Şekil 15.** %10 KET oranı için kuvvet-yer değiştirme eğrileri a) Küp karıştırıcı, b) Turbula



**Şekil 16.** %15 KET oranı için kuvvet-yer değiştirme eğrileri a) Küp karıştırıcı, b) Turbula

Şekil 16'da KET oranının ağırlıkça %15 olduğu kompozit numuneler için yük yer değiştirme eğrileri gösterilmektedir. Bu karışım oranında, karışımın hazırlanmasında Turbula'nın kullanıldığı kompozit numunelerin maksimum yük değerleri, küp karıştırıcı kullanılarak hazırlanan kompozit numunelerin maksimum yük değerlerinden düşük, yer değiştirme değerlerinden yüksektir. Bu oran için iki cihazda da yük ve yer değiştirme değerlerinde numuneler arası sapmalar görülmesine rağmen, Turbula da sapma miktarları küp karıştırıcıya oranla daha belirgindir.

Kompozit numunelerde takviye elemanı kullanımı ile maksimum yük değerlerindeki artış ve bu artışların yakın oranlarda olması, numunelerde ayrı ayrı homojen yapıya ulaşıldığı veya yaklaşıldığı anlamında genel bir değerlendirmeye imkan vermektedir. Bu yaklaşıma göre, en az iki numunede yük ve yer değiştirme değerlerinin oldukça yakın olduğu küp karıştırıcının, Turbulaya göre, matris içerisinde fiberleri bölgesel olarak eşit oranlarda dağıtarak, eşdeğer numune oluşturma açısından daha başarılı olduğu sonucuna varılabilir. Bununla birlikte, yük değerlerindeki artış ve yer değiştirme değerleri sadece homojen yapı ile açıklanamaz. Takviye elemanı ve matris arasında oluşan bağ ile gerilmenin matristen fibere aktarılması kompozit malzeme dayanım ve özelliklerini homojen dağılım kadar etkileyen önemli parametrelerdendir. Genel olarak, yük-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, fiber oranındaki artışa bağlı olarak yer değiştirme miktarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum fiberin matris malzemesinden daha rijit yapıya sahip olması ve matris ile etkileşim içinde

olduğu şeklinde açıklanabilir. Rijit fiber hasar oluşumundan önce deformasyonu önemli oranda azaltmaktadır[16].

Tablo 3'de Şekil 14-16'da yük-yer değiştirme eğrileri gösterilen numunelerin maksimum ve ortalama yük değerleri verilmiştir. Ortalama yük değerlerinin hesaplanmasında aynı karıştırıcı da aynı fiber oranına sahip numunelerin (3 numune) maksimum yük değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Saf PLA ortalama yük değeri 2462 N'dur.

Tablo 3'de kompozit numunelerde maksimum ve ortalama yük değerlerinin artan fiber içeriği ile arttığı ve saf PLA ortalama yük değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Küp ve Turbula için en büyük fark, ağırlıkça %15 KET oranına sahip numunelerin hasar yüklerinde meydana gelmiştir. %5 ve %10 KET oranı için her iki cihazla hazırlanan numune yük değerleri arasındaki fark oldukça düşük olmasına rağmen, %15 KET oranı için bu farkta artış meydana gelmiştir. Küp karıştırıcı ile karıştırılan numunelerde Şekil 14-16'da görülen yer değiştirme değerlerindeki oldukça düşük sapma miktarları ve özellikle yüksek fiber oranlarında hasar yükü artışının Turbulaya göre yüksek olması, küp karıştırıcının etkinliğinin gösterilmesi açısından önem taşımaktadır. Küp karıştırıcıdan farklı olarak, Turbula için yüksek fiber oranlarında, fiber dağılımındaki homojenliğin mekanik özellikler açısından kararlı numune üretmek için yeterli olmadığını göstermektedir [17].

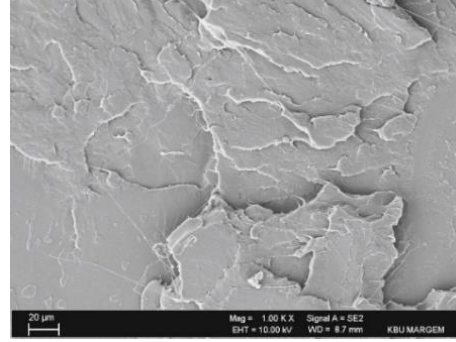
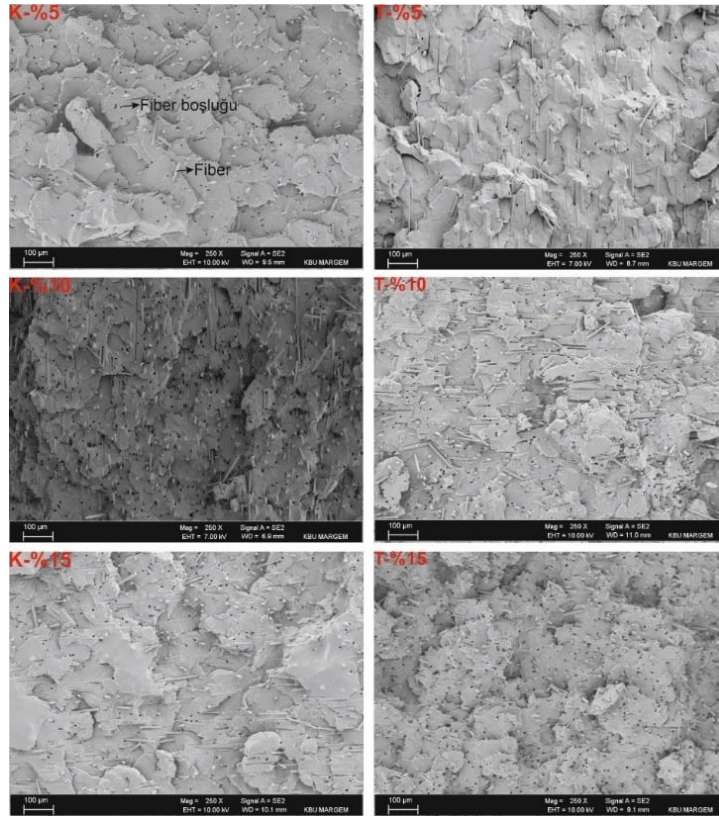


**Tablo 3.** Turbula ve küp karıştırıcı ile karıştırılan numunelerin maksimum ve ort. yük değerleri

| Karışım | 1.Numune (N) | 2.Numune (N) | 3.Numune (N) | Ort. Yük Değeri (N) |
|---------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| T-%5    | 2777         | 2789         | 2740         | 2768.67             |
| T-%10   | 2917         | 2990         | 3034         | 2980.33             |
| T-%15   | 3039         | 2957         | 3010         | 3002.00             |
| K-%5    | 2750         | 2826         | 2762         | 2779.33             |
| K-%10   | 3106         | 3045         | 2847         | 2999.33             |
| K-%15   | 3363         | 3149         | 3112         | 3208.00             |

### 3.2. SEM analiz sonuçları

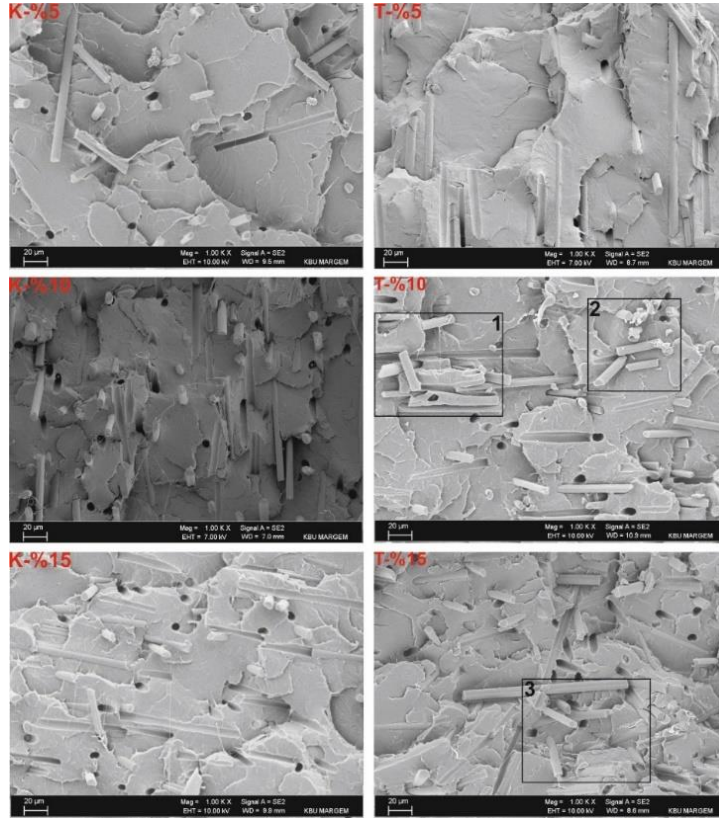
Çekme testi sonrası numunelerin hasar yüzeyleri, yüksek çözünürlüklü SEM ile incelenmiştir. Kırılan yüzeyler SEM analizinden önce altın ile kaplanmıştır. SEM analizlerinde amaç, hasar yüzeylerinde karıştırma işlemine bağlı oluşabilecek topaklanmaları görüntülemek ve fiber dağılımını incelemektir. Şekil 17'de takviye elemanı kullanılmayan, saf PLA numune hasar yüzeyi için SEM görüntüsü gösterilmektedir. Hasar yüzeyindeki bölgesel ince soyulma katmanlarının oluştuğu düzgün yüzeyler PLA'nın gevrek kırılma karakteristiğini göstermektedir [18].

**Şekil 17.** PLA hasar yüzeyi SEM görüntüsü**Şekil 18.** Numune hasar yüzeyleri SEM görüntüleri (250x büyütme)

Şekil 18 kompozit numunelerde, PLA matris içerisinde, KET dağılımını göstermektedir. Takviye elemanlarının matris içinde dağılımı kompozit malzeme mekanik özelliklerini önemli oranda etkiler [16]. SEM görüntülerinde, her oran için en yüksek yük değerine sahip numunelerin hasar yüzeyleri kullanılmıştır. Genel olarak, her iki cihazla karışımı hazırlanan numunelerin 250x büyütmeye sahip SEM görüntülerinde görsel olarak fiber topaklanmalarına rastlanmamıştır. Turbula ile hazırlanan karışımlarda besleme hunisi içerisinde görülen küresel ve büyük çaplı topaklanmaların (Bknz. Şekil 9a) vida kovanı içerisinde kesme etkisi ile dağıldığı düşünülmektedir. Küp karıştırıcı ve Turbula ile hazırlanan numunelerde fiberlerin matris

içerisinde dağılımı incelendiğinde, en yüksek fiber oranı dahil fiber ve fiber ayrılmalarına bağlı oluşan boşlukların benzer dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Fiber yönelmeleri dikkate alındığında, enjeksiyon kalıplama sürecinde yönelmeler rastgele oluşmuş, fiberler numune içerisinde yük yönünde veya farklı yönlerde dağılım göstermiştir.

Şekil 18 hasar yüzeylerindeki fiber dağılımı hakkında bilgi vermesine rağmen, matris içerisindeki olası fiber yoğunluklu bölgelerin belirlenmesi, yüksek büyütme oranlarında daha sınırlı bir alanın incelenmesini gerektirmektedir. Ayrıca, fiber matris etkileşiminin yorumlanabilmesi için 250 x büyütme oranı yeterli olmamaktadır.



Şekil 19. Numune hasar yüzeyleri detay SEM görüntüleri (1kx büyütme)

Şekil 19 1k büyütme oranına sahip numunelerin kesit görüntülerini göstermektedir. Şekil 19'da 1, 2 ve 3 numaralı bölgeler Turbula ile hazırlanan numune kesitlerindeki fiber yoğunluklu alanları göstermektedir. Görüntüler karşılaştırıldığında, küp karıştırıcı ile hazırlanan numunelerde fiber

dağılımının Turbulaya oranla daha üniform olduğu görülmektedir. Çalışmanın önceki kısmında yapılan açıklamalarda, dayanımdaki artışın sadece homojen dağılıma bağlı olarak değişmediği, fiber matris etkileşiminin de dayanımdaki artışta etkili olduğu belirtilmiştir.

Hasar yüzeyleri yakından gözlemlendiğinde boşluklar ile yük doğrultusunda, matris içerisine gömülü fiberler görülmektedir. Boşluk çapları ile fiber çapları birbirine oldukça yakındır ve boşluklar matris ile zayıf bağ kuran fiberlerin ayrılması sonucu meydana gelmiştir. Fiber yüzeyleri incelendiğinde PLA matris ile kaplanmadığı, fiber boşlukları meydana geldiği görülmüştür, bu durum fiber ile matris arası arayüzey etkileşiminin zayıf olduğu anlamına gelmektedir. Ancak, matrise gömülü durumdaki fiberler ve saf PLA'ya göre maksimum yük değerlerindeki artışlar göz önüne alındığında (Bknz. Şekil 14-16 ve Tablo 3), liflerin matrisle belirli oranda etkileşime sahip olduğu ve matris ile lifler arasında gerilme aktarımının meydana geldiğini göstermektedir [19].

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, polimer kompozit malzemelerin ön hazırlık işlemi olan karıştırma prosedüründe kullanılabilecek, difüzyon prensibi ile çalışan, iki eksenli küp karıştırıcı imal ve test edilmiştir. Ayrıca, küp karıştırıcı Ar-Ge çalışmalarında kullanılan Turbula ile karşılaştırılarak, etkinliği belirlenmiştir. Küp karıştırıcının test edilmesinde, karıştırıcı da hazırlanan karışımlar ile üretilen numunelerin, mekanik özellikler açısından kararlılığı ve matris içerisindeki fiber dağılımının homojenliği dikkate alınmıştır. Karıştırma işleminde, toz PLA ve ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında KET kullanılmıştır. Küp karıştırıcının etkinliğinin belirlenmesinde, küp karıştırıcıda kullanılan aynı malzeme ve fiber oranlarında Turbula da karışımlar hazırlanarak test numuneleri tekrar üretilmiştir. Her iki cihazda karışımı hazırlanan ve enjeksiyon kalıplama ile üretilen numuneler için çekme test sonuçları ve SEM görüntüleri karşılaştırılmıştır. SEM görüntüleri karşılaştırıldığında, özellikle %10 ve %15 karbon elyaf tozu oranlarında, küp karıştırıcı ile hazırlanan numunelerde fiber dağılımının, Turbula ile hazırlanan numunelere oranla daha üniform olduğu görülmüştür. Numunelerin yük altındaki davranışları karşılaştırıldığında, numuneler arası farklılıkların küp karıştırıcı ile hazırlanan numunelerde düşük, Turbula ile karıştırılan numunelerde yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, özellikle Turbula ile karıştırılan numunelerde yer değiştirme değerlerindeki sapmalar, fiber dağılımındaki homojenliğin mekanik özellikler açısından eşdeğer numune üretmek için yeterli olmadığını göstermiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, küp karıştırıcının polimer kompozit malzeme üretiminde Turbulaya önemli bir alternatif olabileceğini görülmüştür. Ayrıca, küp karıştırıcı ile ileride metal matrisli kompozit numune üretimi üzerine yapılacak çalışmalar, karıştırıcının farklı malzeme grupları içinde etkinliğinin belirlenmesi açısından önemlidir.

#### Teşekkür

Bu çalışma "TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı" programı kapsamında 1919B011903548 numaralı proje ile desteklenmiştir.

#### Kaynakça

- [1] Marigo, M., Cairns, D. L., Davies, M., Ingram, A., Stitt, E. H. 2012. A numerical comparison of mixing efficiencies of solids in a cylindrical vessel subject to a range of motions. *Powder technology*, Cilt. 217, s. 540-547, DOI: 10.1016/j.powtec.2011.11.016.
- [2] Bellon, C., Truffer, C., Steiner, A., Moreillon, A., Nicolay, L. 2013. Mixing effectiveness of a new pneumatic PTS-Batchmixer® with an in-line sampling device. *Advanced Powder Technology*, Cilt. 24(1), s. 43-50, DOI: 10.1016/j.apt.2012.01.008.
- [3] Mayer-Laigle, C., Gatamel, C., Berthiaux, H. 2015. Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula® mixer. *Chemical Engineering Research and Design*, Cilt. 95, s. 248-261, DOI: 10.1016/j.cherd.2014.11.003
- [4] Fan L.T. 2001. Bulk-solids mixing: overview. ss. 647-658. Levy A., Kalman, H., ed. 2001. *Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids*, Elsevier Science, 870s.
- [5] Williams, J. C., 1968. The mixing of dry powders. *Powder Technology*, Cilt. 2(1), s. 13-20, DOI: 10.1016/0032-5910(68)80028-2.
- [6] Lacey, P. M. C. 1954. Developments in the theory of particle mixing. *Journal of applied chemistry*, Cilt. 4(5), s. 257-268, DOI: 10.1002/jctb.5010040504.
- [7] Hogg, R. 2009. Mixing and segregation in powders: evaluation, mechanisms and processes. *KONA Powder and Particle Journal*, Cilt. 27, s. 3-17, DOI: 10.14356/kona.2009005.
- [8] Venables, H. J., Wells, J. I. 2001. Powder mixing. *Drug development and industrial pharmacy*, Cilt. 27(7), s. 599-612, DOI: 10.1081/DDC-100107316.
- [9] Marigo, M., Cairns, D. L., Davies, M., Ingram, A., Stitt, E. H. 2011. Developing mechanistic understanding of granular behaviour in complex moving geometry using the Discrete Element Method: Part B: Investigation of flow and mixing in the Turbula® mixer. *Powder technology*, Cilt. 212(1), s. 17-24, DOI: 10.1016/j.powtec.2011.04.009.
- [10] Xiao, X., Tan, Y., Zhang, H., Jiang, S., Wang, J., Deng, R., Wu, B. 2015. Numerical investigation on the effect of the particle feeding order on the degree of mixing using DEM. *Procedia engineering*, Cilt. 102, s. 1850-1856, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.323.

- [11] Cho, J., Zhu, Y., Lewkowicz, K., Lee, S., Bergman, T., Chaudhuri, B. 2012. Solving granular segregation problems using a biaxial rotary mixer. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Cilt. 57, s. 42-50, DOI: 10.1016/j.cep.2012.04.002.
- [12] Brone, D., & Muzzio, F. J. 2000. Enhanced mixing in double-cone blenders. *Powder Technology*, Cilt. 110(3), s. 179-189, DOI: 10.1016/S0032-5910(99)00204-1.
- [13] Marigo, M., Davies, M., Leadbeater, T., Cairns, D. L., Ingram, A., Stitt, E. H. 2013. Application of Positron Emission Particle Tracking (PEPT) to validate a Discrete Element Method (DEM) model of granular flow and mixing in the Turbula mixer. *International journal of pharmaceuticals*, Cilt. 446(1-2), s.46-58, DOI: 10.1016/j.ijpharm.2013.01.030.
- [14] Product Data Sheet Luminy® L175. 2017. <https://www.totalcorbion.com/media/eushodia/pds-luminy-l175-190507.pdf> (Erişim Tarihi: 17.03.2021).
- [15] Karbon Elyaf Tozu 100-400 micron. 2021. <https://www.kompozitshop.com/karbon-elyaf-tozu-100-400-micron-500gr> (Erişim Tarihi: 17.03.2021).
- [16] Wang, G., Zhang, D., Wan, G., Li, B., Zhao, G. 2019. Glass fiber reinforced PLA composite with enhanced mechanical properties, thermal behavior, and foaming ability. *Polymer*, Cilt. 181, s. 1-9, DOI: 10.1016/j.polymer.2019.121803.
- [17] Jonoobi, M., Harun, J., Mathew, A. P., Oksman, K. 2010. Mechanical properties of cellulose nanofiber (CNF) reinforced polylactic acid (PLA) prepared by twin screw extrusion. *Composites Science and Technology*, Cilt. 70(12), s. 1742-1747, DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.07.005.
- [18] Bai, T., Zhu, B., Liu, H., Wang, Y., Song, G., Liu, C., Shen, C. 2020. Biodegradable poly (lactic acid) nanocomposites reinforced and toughened by carbon nanotubes/clay hybrids. *International journal of biological macromolecules*, Cilt. 151, s. 628-634, DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.209.
- [19] Anwer, M. A., Naguib, H. E. 2016. Study on the morphological, dynamic mechanical and thermal properties of PLA carbon nanofibre composites. *Composites Part B: Engineering*, Cilt. 91, s. 631-639, DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.01.039.