



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Eklemeli imalat ile üretilen PLA parçaların yapıştırılmasında yapıştırma parametrelerinin mekanik dayanımına etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of bonding parameters on the mechanical strength of the adhesive bonding PLA parts produced by additive manufacturing

Yazar(lar) (Author(s)): Nezihan POLAT ÇOBAN¹, Nergizhan ANAÇ², Faruk MERT³

ORCID¹: 0000-0003-3794-4112

ORCID²: 0000-0001-6738-9741

ORCID³: 0000-0001-7298-6225

To cite to this article: Polat Çoban N., Anaç N. ve Mert F., “ Eklemeli imalat ile üretilen PLA parçaların yapıştırılmasında yapıştırma parametrelerinin mekanik dayanımına etkisinin incelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 26(3): 1145-1154, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Polat Çoban N., Anaç N. ve Mert F., “ Eklemeli imalat ile üretilen PLA parçaların yapıştırılmasında yapıştırma parametrelerinin mekanik dayanımına etkisinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 26(3): 1145-1154, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1110932

Eklemeli İmalat ile Üretilen PLA Parçaların Yapıştırılmasında Yapıştırma Parametrelerinin Mekanik Dayanımına Etkisinin İncelenmesi

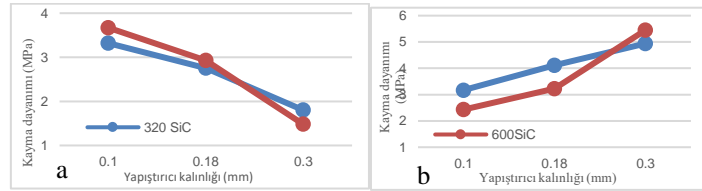
Investigation of The Effect of Bonding Parameters on The Mechanical Strength of the Adhesive Bonding PLA Parts Produced by Additive Manufacturing

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ PLA malzemelerin yapıştırma işlemi / Adhesive bonding of samples produced from PLA XXXXX
- ❖ Yapıştırıcı tipi etkisinin incelenmesi /Investigation effect of adhesive type
- ❖ Yapıştırıcı kalınlığı incelenmesi /Investigation of adhesive thickness

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Eklemeli imalat teknolojisiyle üretilen PLA modellerin yapıştırılmasında işlem parametrelerinin bağlantı mukavemetine etkisi araştırılmıştır. The effect of process parameters' on the joint strenght of adhesively bonded PLA parts produced with the additive manufacturing method has been investigated.



Şekil.. Bağlantıların ortalama kayma dayanımları(a)Teroson PU 9225, (b) Loctite EA 9492 /Figure. Joints average shear strength (a)Teroson PU 9225, (b) Loctite EA 9492

Amaç (Aim)

Bu çalışmada eklemeli imalat teknolojisiyle üretilen PLA modellerin yapıştırılmasında bağlantı mukavemetini etkileyen parametrelerin incelenmesi amaçlanmıştır. The investigation of the parameters which affect the joint strenght in the bonding PLA materials produced with the additive manufacturing method is intended.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

FDM yöntemi ve yapıştırma işlemi./ FDM method and adhesive bonding process.

Özgünlük (Originality)

PLA malzemelerin yapıştırılmasında iki farklı yapıştırıcı, iki farklı yüzey hazırlığı ile üç farklı yapıştırıcı kalınlıkları kullanarak oluşturulan bağlantıların mukavemetleri incelenmiştir. The strenght of adhesively bonded PLA parts which was formed with two different adhesive types and surface treatments and three different adhesive thicknesses is examined.

Bulgular (Findings)

PLA'nın yapıştırılmasında işlem parametrelerinin (yapıştırıcı tipi, yapıştırıcı kalınlığı, yüzey işlemleri gibi) değişiminin bağlantı mukavemetini etkilediği gözlemlenmiştir. It has been observed that the change in the process parameters (such as adhesive type, adhesive thickness, surface treatment) has affected the joining strenght in the process of bonding PLA.

Sonuç (Conclusion)

Teroson PU 9225 bağlantılarında kalınlık arttıkça mukavemetin azaldığı, Loctite EA 9492 bağlantılarında arttığı görülmüştür. It has been observed that the strenght decreases when the thickness increases in Teroson PU 9225 joints whereas it is just the opposite in Loctite EA 9492 joints.

Etik Standartların Beyanı(Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Eklemeli İmalat ile Üretilen PLA Parçaların Yapıştırılmasında Yapıştırma Parametrelerinin Mekanik Dayanımına Etkisinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Nezihan POLAT ÇOBAN¹, Nergizhan ANAÇ², Faruk MERT³

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Türkiye

³Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 29.04.2022 ; Kabul/Accepted : 15.06.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 01.08.2022)

ÖZ

Geçmişten günümüze plastik malzemeler şekillendirme kabiliyetleri sayesinde endüstrinin her alanında yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle son 10 yılda eklemeli imalat sektöründe masa tipi 3B yazıcıların yaygınlaşmasıyla termoplastikler en çok kullanılan plastik malzeme çeşidi olmuştur. Bununla beraber bu yöntemle üretilen parçaların montajı da bir o kadar önem kazanmıştır. Plastik malzemeler düşük yüzey enerjisine sahip oldukları için yapışkanlı birleştirme işleminin gerçekleştirilmesinde zorluklar vardır. Bu hususta en önemli işlem parametreleri yapıştırıcı tipi, parça yüzey temizliği ve yapıştırma kalınlığıdır. Bu çalışmada; eklemeli imalat yöntemi ile PLA levhalar üretilmiş ve iki farklı yapıştırıcı (Loctite 9492 ve Teroson 9225) ile birleştirilmiştir. Yüzey hazırlığı için 320 ve 600 SiC zımpara kullanılarak mekanik zımparalama yapılmıştır. Üç farklı yapıştırıcı kalınlığı (0,3, 0,18 ve 0,1mm) ile PLA-PLA malzeme çiftinden yapıştırma bağlantıları oluşturulmuştur. Bağlantılar çekme testine tabi tutularak mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, 3B baskıda farklı doluluk oranlarında (%100, %80, %60, %40 ve %20) yapılan baskı sonucunda, doluluk oranının yükseklemeyle birlikte parça mukavemeti artış göstermiştir. Sonuçlar yapıştırma bağlantı mukavemetinin yapıştırıcı çeşidine bağlı olarak yapıştırma kalınlığının değişiminden ters korelasyonlu olarak etkilendiğini ortaya koymuştur. Yapıştırıcı kalınlığının artması Loctite EA 9492 bağlantılarının mukavemetini arttırırken, Teroson PU 9225 bağlantılarında ise tam tersi etki yaratmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, PLA, yapıştırma bağlantısı, mekanik dayanım.

Investigation of the Effect of Bonding Parameters on the Mechanical Strength of the Joint in the Adhesive Bonding of PLA Materials Produced by Additive Manufacturing

ABSTRACT

From the past to the present, plastic materials are used extensively in all areas of the industry, thanks to their shaping capabilities. Especially in the last 10 years, with the proliferation of desktop type 3D printers in the additive manufacturing sector, thermoplastics have become the most widely used plastic material. Therewith, the assembly of materials produced by this method has gained so much importance. Since plastic materials have low surface energy, there are difficulties in performing the adhesive bonding process, which is a popular joining method, and some issues (adhesive type, surface cleaning, etc.) should be carefully considered. In this study; PLA sheets were produced by means of additive manufacturing method and joined with two different adhesives (Loctite 9492 and Teroson 9225). For surface preparation, mechanical sanding was performed using 320 and 600 grit size SiC sandpaper. Adhesive bonding joints were created from PLA-PLA material with three different adhesive thicknesses (0.3, 0.18 and 0.1mm). Joints were subjected to tensile test and their mechanical properties were examined. The results showed that high fill ratio in 3D printing increases the strength of parts. In addition, the strength of the adhesively bonded surfaces is affected by the variation of the adhesive thickness and the adhesive type. Whilst an increase in the adhesive thickness increases the strength of Loctite EA 9492 joints; just an opposite effect in Teroson PU 9225 joints was observed.

Keywords: Additive manufacturing, PLA, adhesive bonding joint, mechanical strength.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemleri ile üretilemeyen karmaşık yapıdaki geometrilerin kalıba ya

da başka bir araca ihtiyaç duymadan, kullanılacak olan malzemelerin üst üste tabakalar şeklinde eklenmesiyle oluşturulduğu bir imalat yöntemidir. Yenilikçi imalat yöntemlerinden biri olan eklemeli imalat, karmaşık parçaların üretiminde kolaylık sağlarken aynı zamanda talaş kaldırma işlemi olmamasından dolayı temiz ve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : nergizhan.kavak@beun.edu.tr

pratik bir üretime olanak sağlar. Eklemeli imalatta parça sayısının azaltılmasıyla beraber, malzeme giderlerinden kazanç sağlanmaktadır. Ayrıca eklemeli imalatta, talaşlı imalatta olduğu gibi malzeme kaybı bulunmamaktadır, yalnızca üretilecek parça kadar malzeme kullanılır. Ayrıca hızlı tedarik avantajı sayesinde üretimde oluşabilecek zaman kayıplarının da önüne geçilmektedir. Üretim hızı, ağırlık ve bağlantı/bağlantı elemanlarının sayısının düşürülmesi gibi avantajları [1, 2] sayesinde ileri teknoloji sektörlerinde farklı endüstri alanları için parça üretiminde yaygın kullanılmaktadır. Bu avantajların yanı sıra baskı boyutunda ve malzeme çeşidindeki kısıtlamalarının bulunması uygulamanın sınırlarının bilinmesine şu an için engel teşkil etmede yöntem hakkında araştırmalar halen yoğun bir biçimde devam etmektedir. Eklemeli imalatta çeşitli malzeme gruplarında üretim yapılabilmesine rağmen en çok tercih edilen malzeme plastiklerdir ve eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan malzemelerin %92 sini oluşturmaktadır [3]. Geçmişten günümüze plastik malzemeler şekillendirme kabiliyetlerinin iyi olması sayesinde her alanda kullanılmaktadırlar. Plastik malzemeler kendinden birleştirme, bağlantı elemanları ile birleştirme, kaynak yöntemi ve yapıştırma gibi çeşitli yöntemler ile montajlanmaktadır. Yapıştırma yöntemi kolay ve ekonomik bir yöntem olmasının yanında, plastikler düşük yüzey enerjisine sahip oldukları için yapıştırıcıyla birleştirme işleminde bazı hususlara dikkat edilmelidir. Yapıştırma bağlantı mukavemeti ve dolayısıyla plastiklerin yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesi işleminin başarısı; yapıştırılan parçaların cinsine, boyutlarına, şekline, yapıştırıcının çeşidine, yapışma mesafesine, yüzey hazırlığına ve bağlantının çalışacağı koşullara ve yapıştırıcıların hammaddeleri ile kimyasallara karşı davranışlarına bağlıdır [4]. Ayrıca; plastik malzemelerde yapıştırma öncesi uygulanan yüzey işlemleri ile birlikte yüzeyde elde edilen enerji artışı, yapıştırma dayanımını ve kalitesini arttırmaktadır. Eklemeli imalat ile üretilen parçaların sayısının ve kullanım alanlarının artması bu parçaların birleştirilmesi konusunu ilgi çekici hale getirmiştir. Yapıştırma işleminin, diğer birleştirme yöntemlerine kıyasla bağlantılarda sağladığı hafiflik yani mukavemet/ağırlık oranının uygunluğu özellikle eklemeli imalatın geleceğinin savunma sanayi, otomobil ve havacılık sektöründe olduğu düşünüldüğünde önemi anlaşılmaktadır.

Literatürde eklemeli imalat ürünleri (3B yazıcı ve metal yazıcı teknolojisi) ve birleştirme yöntemleri hakkında çeşitli çalışmalar [5-13] bulunmaktadır. Selim Bacak vd. [14], eriyik yığma ile modelleme (FDM) işlem parametrelerinin polilaktik asit (PLA) malzemenin çekme dayanımına etkisini incelemişlerdir. Parametreler için 2 farklı doluluk oranı (%20 ve %100), 3 farklı baskı hızı (100, 150 ve 200 mm/s), 3 farklı nozul sıcaklığı (180, 205 ve 220°C) ve 3 farklı desen çeşidi (Cubic, Grid, Triangle) kullanılmıştır. Deney sonuçları, en yüksek çekme dayanımının %100 doluluk oranında elde edildiğini göstermiştir. %20 doluluk oranındaki

numunelerde yüksek çekme gerilmesi değeri 220°C nozul sıcaklığında, 100 mm/s baskı hızında yapılan Grid desen çeşidinde 43.12 MPa olarak ölçülmüştür. %100 doluluk oranında ise en iyi sonuç 220°C’ de, 100 mm/s baskı hızında üretilen numunelerde 59.21 MPa olarak bulunmuştur.

Hatice Evlen vd. [15], üç farklı polimer malzeme (ABS, PLA ve Power ABS), üç farklı doluluk oranı (%10, %30 ve %50) ve iki farklı çalışma ortamı (etrafı açık ve etrafı kapalı sistem) kullanılarak ortam koşullarının ürünün mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, doluluk oranı arttıkça sertlik değerinde, çekme gerilmesi ve uzama miktarında artış gözlenmiştir. Kapalı sistemde yazılan numunelerin artış ortamında yazılan numunelere nazaran sertlik değerinin daha düşük olduğu, çekme dayanımlarının ve % uzamalarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Franziska Bürenhaus vd. [16], eriyik yığma modelleme ile üretilen parçaların yüzey karakterinin, yapıştırıcı tipinin ve yapışma alanının tasarımının yapışma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bunun için; yapıştırma bölgesinin tasarımı ile ilgili olarak altı farklı tasarım (parmak, eğik bağlantı, alın, dil oluk, t-soyulma ve bindirme bağlantısı) ve altı farklı yapıştırıcı (akrilat reçine, poliüretan yapıştırıcı ve çeşitli epoksi reçineler) kullanmışlardır. Yüzey karakteri için farklı ön işlemlerin (mekanik pürüzlendirme, plazma) ve farklı yüzey yapılarının etkisi test edilmiştir. Deney tüm yapıştırıcılarla parçalar arasında etkili yapışma sağlanmış, özellikle iki bileşenli epoksi reçine kullanımında ek bir ön işlem veya geometrik tasarım ayarlamasına ihtiyaç bulunmadığı da anlaşılmıştır. Çalışmada, her iki yüzey işleminin de bağlantı mukavemetinde olumlu etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

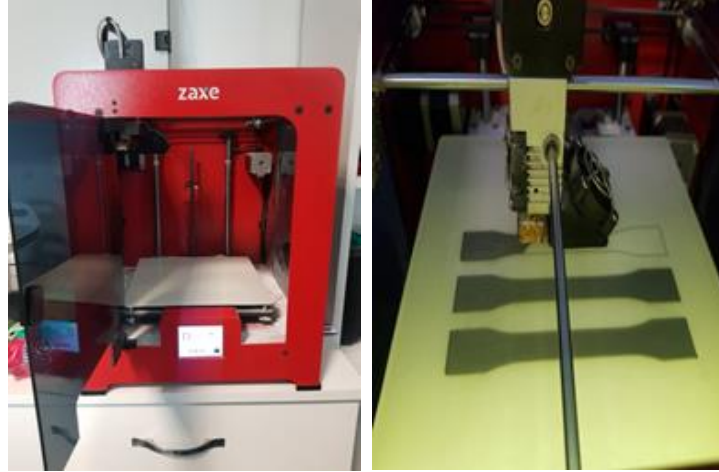
Karabıyık ve Apak [17], PLA malzemesini üç farklı dolgu deseni ‘çizgi, ızgara, eş merkezli’, üç farklı doluluk oranı ‘%20, %60, %100’ ve üç farklı üretim hızları (baskı hızı) ‘20 mm/sn, 40 mm/sn, 60 mm/sn’ değişken ile üreterek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre; doluluk oranındaki artış ile birlikte numunelerin çekme mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Dolgu desenleri aynı olup, doluluk oranı arttıkça ve üretim hızı azaldıkça sertlik değerinin arttığı görülmüştür. Buna rağmen, dolgu deseni farklılığının sertlik, uzama ve çekme mukavemeti açısından anlamlı bir değişime neden olmadığı anlaşılmıştır.

Frascoia vd. [18], iki farklı polilaktik asit (PLA) termoplastik filament ve Teroson PU9225 yapıştırıcı kullanarak kaynaklı, yapıştırma ve kaynaklı-yapıştırma bağlantıları olarak üç farklı birleştirme şekli için deneysel çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda hibrit kaynaklı yapıştırımlı birleştirme değerlendirilmiş ve yapıştırımlı birleştirme için birleştirme performansını iyileştirmek için özel yüzey işlemlerinin kullanılmasının gerekli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca termoplastik malzemelerin düşük yüzey enerjisi yapışma işleminin başarısını etkilediği

vurgulanmış ve buna bağlı olarak, hibrit yöntemlerin başarısı da etkilediği belirtilmiştir.

Ando vd. [19] eriyik yığıma modelleme (FDM) teknolojisi ile üretilen aynı bileşenlerde iki farklı renkli PLA'dan yapılan parçaların çekme testleri yapılarak mekanik özellikleri, özellikle ara yüzey yapışma kabiliyetleri incelenmiştir. Çalışma sonunda yatay

yazıcı (Şekil 1.a) ve PLA numunelerinin basım esnasındaki görüntüleri Şekil 1.b'de verilmiştir. ASTM .D638-10 Tip I numune standardına [20] uygun, toplam uzunluğu 165 mm olan parçalar 3B tasarım yazılımlarında modellenmiştir (Şekil 2). Kullanılan filamentin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir



Şekil 1. 3B yazıcı (a) ve üretilen PLA numuneleri (b) (3D printer (a) and PLA samples(b))

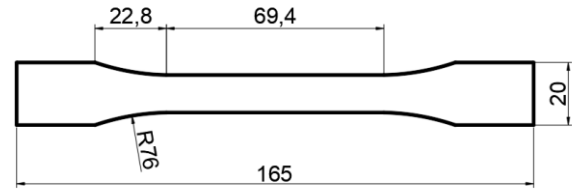
yapıştırma kabiliyetlerinin, dikey yapıştırmaya göre üstün olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde eklemeli imalat ile üretilen parçaların yapıştırma tekniği ile birleştirilmesinde yüzey özellikleri ve yapıştırma kalınlığı arasındaki ilişkinin açıklanmasında halen eksiklerin olduğu görülmüştür. Bu çalışmada; 3B baskı tekniğiyle üretilen PLA malzemelerin yapıştırılmasında işlem parametrelerinin (yapıştırıcı tipi, yapıştırma kalınlığı, yüzey işlemleri gibi) değişiminin bağlantı mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Bunun için, önce FDM 3B yazıcı ile farklı iç doluluk oranlarında (%20,%40, %60, %80 ve %100) PLA malzemeler üretilmiştir. Uygun doluluk oranında üretilen parçalardan farklı parametrelerin kombinasyonunda yapıştırma bağlantıları oluşturulmuştur. Parçalar yapıştırıcıyla birleştirildikten sonra çekme testi yapılmış ve elde edilen sonuçlardan kayma gerilmeleri hesaplanmıştır. Test sonuçlarıyla birlikte parçaların dayanımına etki eden unsurlar değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı eklemeli imalat ile üretilen PLA parçaların yapıştırma bağlantılarını gerçekleştirerek yapıştırma parametrelerinin bağlantının mekanik dayanımına etkisini incelemektir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Malzemeler, 3D Yazıcı ve Numune Hazırlama (Materials, 3D Printer and Sample Preparation)

Çalışmada Zaxe X1 marka 3B yazıcı ve Zaxe marka 1,75 mm çapında PLA filament malzemesi kullanılarak çekme test numuneleri üretilmiştir. Çalışmalarda kullanılan



Şekil 2. Çekme testi için numune boyutları (kalınlık 4 mm) (Sample dimensions for tensile testing (thickness 4 mm))

Çizelge 1. PLA Malzemenin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Physical and Mechanical Properties of PLA Material) [21]

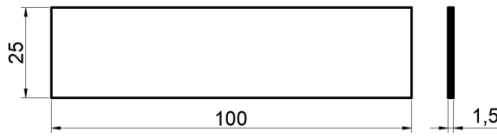
Mekanik Özellikler	PLA
Çekme Dayanımı (MPa)	53.60
Çekme Modülü (GPa)	3.5
Çekme Uzaması (%)	6
Yoğunluk (g/cm ³)	1.24
Erime Noktası (°C)	155-170
Baskı Sıcaklığı (°C)	190-240

2.2. 3B Baskı Parametreleri (3D Process Parameters)

PLA parça basımında yazıcının tavsiye edilen otomatik sıcaklıkları tercih edilmiştir. Bu doğrultuda, extrüder sıcaklığı 210 °C, tabla sıcaklığı 60 °C ve yazdırma hızı 60

mm/s olarak belirlenmiştir. Parça katman kalınlığı 0,1 mm ve doluluk oranları %100, %80, %60, %40 ve %20'dir. Basılan numuneler, nemden etkilenmemesi için vakumlu hava geçirmeyen saklama ambalajlarına konulmuştur. Üretilen çekme numunelerinin çekme testleri, 10 tonluk Besmak BTM 100 E marka çekme cihazında çekme hızı 1 mm/dk olarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler üç tekrarlı olarak yapılmıştır.

Yapıştırma bağlantısı oluşturacak numunelerin basımından önce doluluk oranlarına karar vermek için,



a

kullanılan parçaların boyutları Şekil 3'te verilmiştir. Deneysel numuneleri, malzeme cinsi- zımpara numarası-yapıştırıcı adı-yapıştırıcı kalınlığı şeklinde bir kodlama (PLA-320-T-0.3 gibi) ile işaretlenmiştir. Deneysel numuneleri isimlendirilmesi çizelge 2.'de verilmiştir. Yapıştırma mesafesi her bir parçada kumpasla ölçülerek, 12,5 mm olarak işaretlenmiştir. Yapıştırma işlemine başlamadan önce, yüzey hazırlama işlemleri yapılmıştır.

Yüzeyin yapıştırıcıya tutunma kabiliyetini arttırmak için mekanik aşındırma işlemi olan zımparalama tercih edilmiştir. Bunun için, 320 SiC ve 600 SiC zımparalar



b

Şekil 3. Yapıştırılacak parçaların (a) boyutları (mm), (b) basılmış hali ((a) dimensions of the parts to be bonded (mm), (b) printed version)

Çizelge 2. Deneysel numuneleri isimlendirme (Test specimens name)

Numara	Kod	Malzeme	Zımpara Numarası	Yapıştırıcı	Yapıştırıcı Kalınlığı
1	PLA-320-T-0.1	PLA	320	Teroson	0.1
2	PLA-320-T-0.18	PLA	320	Teroson	0.18
3	PLA-320-T-0.3	PLA	320	Teroson	0.3
4	PLA-600-T-0.1	PLA	600	Teroson	0.1
5	PLA-600-T-0.18	PLA	600	Teroson	0.18
6	PLA-600-T-0.3	PLA	600	Teroson	0.3
7	PLA-320-L-0.1	PLA	320	Loctite	0.1
8	PLA-320-L-0.18	PLA	320	Loctite	0.18
9	PLA-320-L-0.3	PLA	320	Loctite	0.3
10	PLA-600-L-0.1	PLA	600	Loctite	0.1
11	PLA-600-L-0.18	PLA	600	Loctite	0.18
12	PLA-600-L-0.3	PLA	600	Loctite	0.3

çekme testi yapılan PLA malzemesinin doluluk oranlarındaki değişimin parça mukavemetine etkisi incelenmiştir. ASTM D3163 standardına [22] uygun üretilen tekli bindirme yapıştırma bağlantılarında

kullanılmıştır. Yapıştırma bölgesinde zımparalama yönü, parça eksenine dik ve yatay olacak şekilde yapılmıştır. Böylece tüm yüzey etkili bir pürüzlendirmeye maruz kalmıştır. Zımparalanan yüzeylerden Şekil 4.'te verilen

Mahr Marsurf PS 10 taşınabilir yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı ile yüzey pürüzlülük değerleri alınmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Ra, TS EN ISO 21920-2 standardına göre [23], yüzeylerden alınan üç ölçüm değerinin aritmetik ortalamasının alınmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 4. Deneysel numunesi ve yüzey pürüzlülük cihazı (Test sample and surface roughness device)

Zımparalamadan sonra yapıştırılacak yüzeylerin zımpara tozlarından arındırılması için Loctite SF 7061 cleaner ile temizlenme işlemi gerçekleştirilmiş, daha sonra yapıştırma işlemi yapılmıştır. Yapıştırıcı olarak Teroson PU 9225 SF ve Loctite EA 9492 kullanılmıştır. Yapıştırıcı seçimleri, plastik malzemeleri yapıştırmaya uygunlukları dikkate alınarak yapılmıştır [24,25]. Yapıştırıcıların özellikleri Çizelge 3. ve Çizelge 4.'te verilmiştir. Deneysel yapıştırıcı kalınlıkları için 0,3 0,18 ve 0,1 mm olarak üç farklı değer kullanılmıştır. Birleştirilmesi yapılan deney numunelerinin çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonrası numunelerin ayrılma/kırılma yüzeyleri fotoğraflanmıştır. PLA

yapıştırma bağlantıları LEICA ACE 200 kaplama cihazı ile altın paladyum kaplanmış ve SEM görüntüleri Hitachi SU5000 alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopu ile alınmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Yapıştırma bağlantısı oluşturacak numunelerin doluluk oranına, çekme testi yapılan PLA malzemesinin (Şekil 5) doluluk oranlarındaki değişimin parça mukavemetine etkisi incelenerek karar verilmiştir. %100 tam doluluk oranı, hem yüksek mukavemete sahip olması hem de geleneksel yöntemle üretilen parça doluluk oranının eşdeğeri kabul edilmesinden dolayı tercih edilmiştir. Çizelge 5'de görüldüğü üzere PLA da en yüksek çekme mukavemeti 9,25 MPa ile %100 doluluk oranındaki numunelerden elde edilmiştir. En düşük çekme mukavemeti, 5,11 MPa ile %20 dolulukta bulunmuştur. Ç 5'den de anlaşılacağı üzere numunelerin iç doluluk oranı arttıkça çekme mukavemeti değeri de artmaktadır.

Zımparalama işlemi yapılan parçalar etiketlenip yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. 320 SiC ile zımparalama yapılan işlemde Ra yüzey pürüzlülüğü 1,414 µm, 600 SiC ile zımparalama yapılan işlemde Ra yüzey pürüzlülüğü 0,736 µm dir. Beklenildiği üzere 320 SiC ile zımparalamada oluşan pürüzlülük değeri, 600 SiC ile zımparalamaya kıyasla daha fazladır. Birleştirilmesi yapılan deney numunelerinin çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığı kayma dayanımı değişim grafikleri Şekil 6 ve Şekil 7.'de verilmiştir. Teroson PU 9225 ile 0.3 mm yapıştırma kalınlığında yapıştırılan numunelerde 320 SiC zımpara ile pürüzlendirilen bağlantıların dayanımı 600 SiC le yapılan bağlantılara kıyasla daha iyi çıkmıştır. Burada, yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla yapıştırıcının yüzeye tutunma kabiliyetinin arttığı ve buna bağlı olarak da

Çizelge 3. Teroson PU 9225 (Poliüretan polimer) özellikleri (Teroson PU 9225 (Polyurethane polymer) properties) [26]

Sabitlenme (fixture) zamanı (sn) (ISO4587:2003)	1800
Kürleme zamanı (saat) 22 ° C	5
Çekme modülü (MPa)	576.9 ± 16.1
Maks. çekme mukavemeti (MPa)	13.3 ± 0.3
Viskozite (Pa.s)	A bileşeni 800 B bileşeni 60

Çizelge 4. Loctite EA 9492 (İki bileşenli epoksi) mekanik özellikleri (Loctite EA 9492 (Two component epoxy) mechanical properties)[22, 27]

Young Modülü[GPa]	6.7
Poisson oranı	0.3
Yoğunluk [g/cem]	1.51
Çekme Mukavemeti [MPa]	31.0

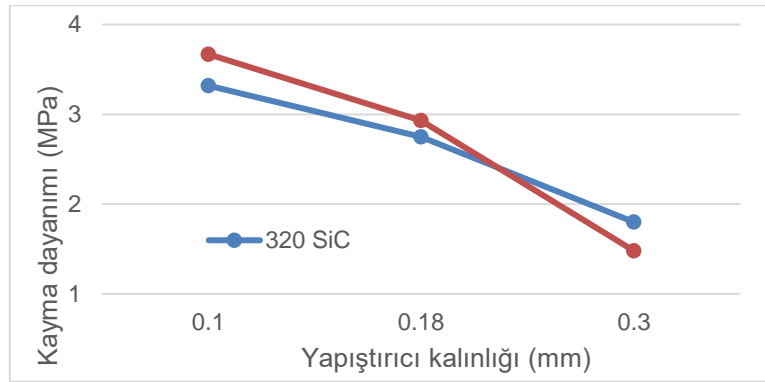
bağlantı mukavemetinin yükseldiği düşünülmektedir. 600 SiC zımparalama ile elde edilen yüzeyler 0.1 ve 0.18 mm yapıştırma kalınlıklarında 320 SiC'e göre daha iyi mukavemet sonuçları vermiştir. Düşük yapıştırma kalınlıklarında, yapıştırılan yüzeyin pürüzlülük değerinin yüksek olması Teroson PU 9225'le yapıştırılan numunelerde bağlantı mukavemetini düşürmektedir.

Çizelge 5. PLA numunelerinin doluluk oranına göre ortalama çekme gerilme değerleri (Average tensile stress values of PLA samples according to fill rate)

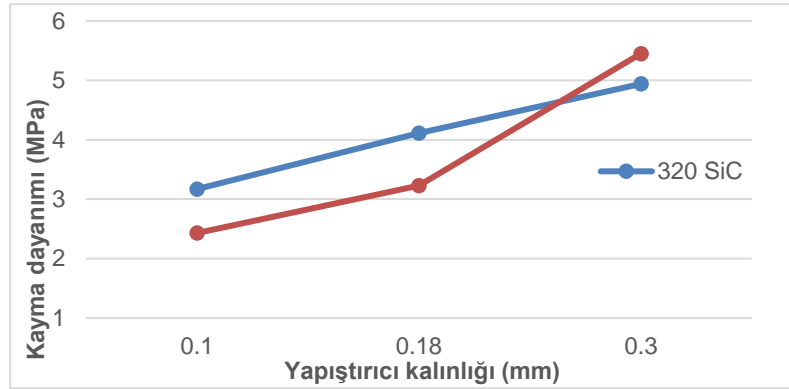
Doluluk oranı	Ort. Çekme Mukavemeti (MPa)
%20	5,11
%40	5,65
%60	6,07
%80	6,10
%100	9,25

Bununla birlikte, Teroson PU 9225'li bağlantılarda yapıştırma kalınlığının artmasıyla bağlantı dayanımının düştüğü görülmektedir. Yapıştırıcı kalınlığındaki artışın bağlantı dayanımını azaltması, bindirme bağlantı arayüzündeki yapıştırıcının içindeki çatlak veya gözenek oluşumundan kaynaklanabilir [28]. Bununla birlikte, değişik türde yapıştırıcılarla gerçekleştirilen bağlantıların dayanımları için yapıştırıcı kalınlığının değişimleri de farklı (artma-azalma) olabilmektedir [29].

Düşük yapıştırma kalınlıklarında, yapıştırılan yüzeyin pürüzlülük değerinin yüksek olması Loctite EA 9492'le yapıştırılan numunelerde bağlantı mukavemetini arttırmaktadır. Buna rağmen 600 SiC zımpara ile yüzeyi hazırlanarak Loctite EA 9492'le yapıştırılan numunelerde bağlantı dayanımı, 0.3 mm yapıştırma kalınlığında 320 SiC'le yapılan bağlantılara kıyasla daha



Şekil 6. Teroson PU 9225 yapıştırma çiftleri ortalama kayma dayanımı (MPa) (Teroson PU 9225 average shear strength of bonding pairs (MPa))



Şekil 7. Loctite EA 9492 yapıştırma çiftleri ortalama kayma dayanımı (MPa) (Loctite EA 9492 average shear strength of bonding pairs (MPa))



Şekil 5. %100 doluluk oranına sahip numunelerin çekme testi sonrası görünümü (The appearance of samples with 100% fill rate after the tensile test)

yüksek bulunmuştur. Teroson PU 9225'te aynı kalınlıktaki duruma benzer olarak yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla Loctite EA 9492 yapıştırıcının malzeme yüzeyine tutunma kabiliyetinin arttığı ve buna bağlı olarak da bağlantı mukavemetinin yükseldiği düşünülmektedir. Loctite EA 9492 ile yapılan bağlantılarda yapıştırma kalınlığının artmasıyla bağlantı dayanımının arttığı görülmektedir.

PLA malzemesi ile yapıştırma bağlantıları gerçekleştirilirken 0,3, 0,18 ve 0,1 mm olarak üç ayrı yapıştırma kalınlığı belirlenmiştir. Loctite EA 9492 ile yapıştırılan PLA-PLA çiftlerinde yapıştırıcı kalınlığı arttıkça bağlantı dayanımının arttığı gözlemlenirken Teroson PU 9225 ile yapıştırılan PLA-PLA bağlantılarda ise bu durumun tam tersi görülmüştür. Aynı yapıştırma kalınlıklarında parça yüzey pürüzlülüğünün bağlantı

malzemede ve yapıştırıcıda meydana gelen hasarlar) bulunmaktadır [30].

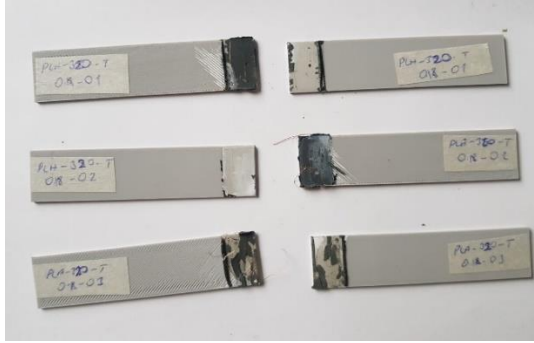
600 SiC zımparaya yüzey hazırlığı yapılmış Teroson PU 9225 ile 0.1 mm yapıştırma kalınlığındaki bağlantıların tümünde yapıştırılan malzemede kohezyon hasar tipi gözükmemektedir. Burada yapıştırıcıyla birleşmenin kuvvetli olmasından dolayı hasarın yapıştırılan yüzeyde meydana geldiği anlaşılmaktadır. 320 SiC, 0.1 mm



PLA-320-T-0.1



PLA-600-T-0.1



PLA-320-T-0.18



PLA-600-T-0.18



PLA-320-T-0.3



PLA-600-T-0.3

Şekil 8. Yapıştırma bağlantısı yapılmış PLA numunelerinin kopma yüzey görünümü (Fracture surface view of adhesively bonded PLA samples)

dayanımına fazla bir etkisi olmamasına rağmen, yapıştırma kalınlıklarının değişmesiyle bağlantı mukavemetinde yüzey hazırlığının önemli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Yapıştırma bağlantılarına uygulanan çekme testlerinin sonuçlarının daha iyi anlaşılması için parçaların kopma yüzeyleri incelenmiştir. Teroson PU 9225 ile yapıştırılan PLA-PLA bağlantılarının kopma yüzeylerinin görünümleri Şekil 8' de verilmiştir. Yapıştırıcı ile birleştirilen parçaların çekme testi sonrasında genel olarak karşılaşılan iki tip hasar çeşidi (yapıştırılan

yapıştırma kalınlığındaki bağlantılarında ise yapıştırılan malzemede kohezyon, adhezyon ve karışık hasar tipleri görülmüştür. 320 SiC ve 600 SiC zımparaya yüzey hazırlığı yapılmış Teroson PU 9225 ile 0.18 ve 0.3 mm yapıştırma kalınlığındaki bağlantılarda adhezyon ve karışık hasar tipi bulunduğu gözükmemektedir. Burada bazı numunelerde tek bir kopma yüzeyinde yapıştırıcı kalıntıları kalmıştır (PLA-320-T-0.18). Bu bölgelerde yüzey ile yapıştırıcı arasında istenilen nüfuziyet oluşmamıştır. Bazı numunelerde ise her iki yüzeyde yapıştırıcı kalıntısı bulunmaktadır.

Loctite EA 9492 ile yapıştırılan PLA-PLA bağlantılarının kopma yüzeylerinin görünümü Şekil 9'da verilmiştir.

320 SiC ve 600 SiC zımparayla yüzey hazırlığı yapılmış tüm yapıştırma kalınlığındaki Loctite EA 9492 bağlantılarında yapıştırılan malzemede kohezyon hasar tipi olmuştur. Genel olarak Loctite EA 9492 yapıştırıcının yüzeye tutunma kabiliyetinin, Teroson PU 9225'e kıyasla daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Buna rağmen, 0.1 mm yapıştırma kalınlığında Teroson PU 9225'li bağlantı dayanımı, Loctite EA 9492'ye kıyasla yüksektir. Bu durumun,

yapıştırıcıların kimyasal yapıları arasındaki farktan kaynaklandığı ve bağlantı mukavemetinin etkilendiği düşünülmektedir.

Seçilen PLA yapıştırma bağlantılarının SEM görüntüleri taramalı elektron mikroskobu ile alınmıştır. SEM görüntüleri Şekil 10.'da verilmiştir. PLA-600-T-0.3 olarak numaralandırılmış numunede yapıştırıcının parçaya tutunma kabiliyeti en az, PLA-600-L-0.3 numaralandırılmış numunede ise en yüksek durumdadır. Teroson PU 9225 ile yapıştırılan yüzeyde tam bir yapışma oluşturmadığı, Loctite EA 9492 yapıştırıcının ise kuvvetli bağ oluşturduğu görülmektedir.



PLA-320-L-0.1



PLA-600-L-0.1



PLA-320-L-0.18



PLA-600-L-0.18

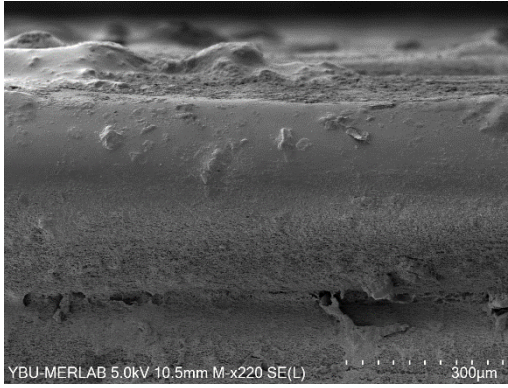


PLA-320-L-0.3

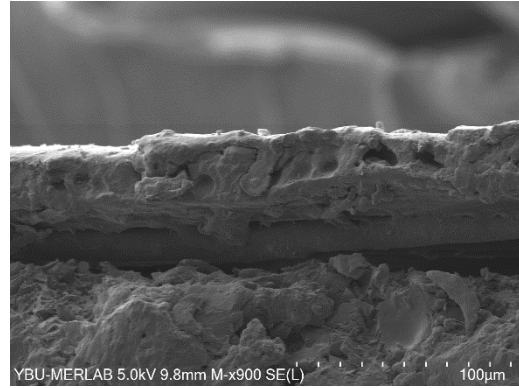


PLA-600-L-0.3

Şekil 9. Yapıştırma bağlantısı yapılmış PLA numunelerinin kopma yüzey görünümü (Fracture surface view of adhesively bonded PLA samples)



PLA-600-T-0.3



PLA-600-L-0.3

Şekil 10. PLA yapıştırma bağlantılarının kopma yüzeyinden alınan SEM görüntüleri (SEM images of the rupture surface of PLA adhesive bonding joints)

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada; 3B baskı tekniğiyle üretilen PLA malzemelerin yapıştırılmasında işlem parametrelerinin (yapıştırıcı tipi, yapıştırma kalınlığı, yüzey işlemleri gibi) değişiminin bağlantı mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Eklemeli imalat yöntemi ile basılmış olan PLA (polilaktik asit) parçaların iç dolgu oranlarına bağlı mukavemetleri ve yapıştırma bağlantı dayanımları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Dolgu oranının artmasıyla parça mukavemeti artmaktadır,
- Yüzey hazırlama parametresi olan zımparalama işleminin,yapıştırıcı türüne göre bağlantının yapışma mukavemetini etkilemektedir,
- Yapıştırma kalınlığının mukavemete etkisi incelendiğinde, Teroson PU 9225 yapıştırma çiftleri ile oluşturulan bağlantının kalınlık arttıkça mukavemet azalırken, Loctite EA 9492 ile olan bağlantılarda artmaktadır,
- Yapıştırıcı türüne göre, PLA bazlı numunelerin yapıştırma bağlantılarında Loctite EA 9492 yapıştırıcının Teroson PU 9225 yapıştırıcıya göre daha iyi bağ oluşturduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 2021-77654622-05 proje numarası ile “Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi tarafından desteklenmiştir”

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Nezihan POLAT ÇOBAN: Deneyleeri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Nergizhan ANAÇ: Deneyleeri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Faruk MERT: Deneyleeri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

SİMGELER VE KISALTMALAR (ICONS AND ABBREVIATIONS)

FDM	:Fused Deposition Modeling (Eriyik Yığarak Modelleme)
PLA	: Polilaktik asit
3B	: 3 Boyut
3D	: 3 Dimensional
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SiC	: Silisyum Karbür
PU	: Poliüretan polimer

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sürmen H.K., “Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler VeUygulamalar”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24: 2, (2019).
- [2] Özsolak O., “Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler”, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3: 9-14, (2019).
- [3] Kariz M., Kuzman M.K., Sernek M., “Adhesive bonding of 3D-printed ABS parts and wood”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31 (15): 1683–1690 (2017).
- [4] Arenas J.M., Aliá C., Blaya F., Sanz A., “Multi-criteria selection of structural adhesives to bond ABS parts obtained by rapid prototyping”,*International Journal of Adhesion & Adhesives*, 33: Pages 67-74, (2012).
- [5] Çelik K., Özkan A., “Eklemeli İmalat Yöntemleri İle Üretim ve Onarım Uygulamaları”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5: 107-121, (2017).

- [6] Kartal F., “Taguchi Metodolojisi İle Eriyik Yığıma Modelleme Süreci Parametrelerinin Optimizasyonu”, *International Journal Of 3d Printing Technologies and Digital Industry*, 1: 49-56, (2017).
- [7] Ramezani D.H., Barbe F., Delbreilh L., Ben A.M., Guillet A., Breteau T., “Polymer additive manufacturing of ABS structure: Influence of printing direction on mechanical properties”, *Journal of Manufacturing Processes*, 44: 288–298, (2019).
- [8] Rohde S., Cantrell J., Jerez A., Kroese C., Damiani D., Gurnani R., Disandro L., Anton J., Young A., Steinbach D., Ifju P., “Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts” *Experimental Mechanics*, 58:871–884, (2018).
- [9] Kovan V., Altan G., Topal E.S., “Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31 (5): 2197–2201, (2017).
- [10] Birosz M.T., Andó M., Jeganmohan S., “Finite Element Method modeling of Additive Manufactured Compressor Wheel”, *J. Inst. Eng. India Ser. D*, 102: 79-85, (2021).
- [11] Günay M., Gündüz S., Yılmaz H., Yaşar N., Kaçar R., “PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 23(1) : 73-79, (2020).
- [12] Ekşi O., “Plug Production for Thermoforming using Fused Deposition Modelling”, *Politeknik Dergisi*, 25(1) : 417-426, (2022).
- [13] Kam M., Saruhan H., İpekçi A., “FDM Yöntemi ile Üretilen Kovan Yatakların Titreşimi Sönümlenme Kabiliyetlerinin Deneysel Analizi”, *Politeknik Dergisi*, 25(1) : 137-143, (2022).
- [14] Bacak S., Varol Özkavak H., Tatlı M., “FDM yöntemi ile üretilen PLA numunelerin çekme özelliklerine işlemparametrelerinin etkisinin incelenmesi”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(1), 209 – 216, (2021)
- [15] Evlen H., Erel G., Yılmaz E., “Açık ve Kapalı Sistemlerde Doluluk Oranının Parça Mukavemetine Etkisinin İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(3): 651-662, (2018).
- [16] Bürenhaus F., Moritzer E., Hirsch A., “Adhesive bonding of FDM-manufactured parts made of ULTEM 9085 considering surface treatment, surface structure, and joint design”, *Weld World*, 63:1819–1832, (2019).
- [17] Karabıyık A., “Eklemeli imalat yöntemiyle PLA malzemeden üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 13(2), 62-68, (2021).
- [18] Frascio M., Moroni F., Marques E., Carbas R., Reis M., Monti M., Avalle M., L.F.M. da Silva, “Feasibility study on hybrid weld-bonded joints using additive manufacturing and conductive thermoplastic filament”, *Journal of Advanced Joining Processes* 3, 100046, (2021).
- [19] Andó M., Birosz M., Jeganmohan S., “Measurement Surface bonding of additive manufactured parts from multi-colored PLA materials”, *Measurement*, 169:108583, (2021).
- [20] ASTM D638-10, " Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics ", (15 May 2010).
- [21] ZAXE, PLA 3D Filament Technical Data Sheet, <https://www.zaxe.com/filaments/>, 10.03.2022
- [22] ASTM D3163-01 "Standard Test Method for Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joints in Shear by Tension Loading", (2014)
- [23] ISO 21920-2:2021 “Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters”, (2021)
- [24] Frascio M., Mandolino C., Moroni F., Jilich M., Lagazzo A., Pizzorni M., Bergonzi L., Morano C., Alfano M., Avalle M., “Appraisal of surface preparation in adhesive bonding of additive manufactured substrates”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 106: 102802, (2021).
- [25] Kortaj, Mlyniec A., Uhl T., “Experimental and numerical study on the effect of humidity-temperature cycling on structural multi-material adhesive joints”, *Composites Part B*, 79: 621-630, (2015).
- [26] Technical Data Sheet TEROSON PU 9225, 18.04.2022 tarihinde Teroson sitesi: <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/243%20NEWEN?pid=TEROSON%20PU%209225&format=MTR&subformat=TERO&language=EN&plant=WERCS>.
- [27] Technical Data Sheet LOCTITE® EA 9492 Bilinen adı ile Hysol 9492, 18.04.2022 tarihinde Loctite sitesi: <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/?pid=EA%209492&format=MTR&subformat=HYS&language=TR&plant=WERCS>.
- [28] Adams, R. D., Peppiatt, N. A. 1974. “Stress Analysis of Adhesive-Bonded Lap Joints,” *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 9, no. 3, p. 185-196.
- [29] Cognard, P. 2006. *Adhesives and Sealants: General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques*, Elsevier, Amsterdam.
- [30] TS EN ISO 10365 “Yapıştırıcılar- Başlıca kusurların gösterilmesi”, (18.04.2022)