

Manufacturing Technologies and Applications

MATECA



Effects of Aging on Charpy Notch Impact Test Results of Specimens Produced by SLA Method

Gizem Akdemir^{1,*} , Gültekin Uzun² 

¹Department of Manufacturing Engineering, Institute of Science, Gazi University, Ankara, Türkiye

²Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Türkiye

ABSTRACT

Additive manufacturing is a computer-controlled manufacturing process that creates three-dimensional objects by depositing material in layers. Stereolithography (SLA), the oldest form of additive manufacturing, has attracted considerable interest in the industry due to the high dimensional accuracy and smooth surface quality of the printed parts. In this study, 3D polymer parts were printed using the SLA machine and aged at different temperatures (48, 60 and 72 °C) and for different times (6, 9 and 12 hours) to investigate the effect of ageing on impact strength. As a result of the Charpy notch impact test, it was observed that the ageing process generally reduced the impact strength of the material and deformation was observed in the samples held above the glass transition temperature. When the change in size was examined over time, a decrease was observed up to 12 hours, while after 12 hours there was a sudden increase at all temperatures. In the measurements made as a result of the ageing process, it was observed that the results of the thickness and width measurements of the sample were in agreement with the results of the ageing process. Thanks to this study, knowledge about the usability, storage, durability and mechanical properties of the polymer material has been obtained and contributed to the literature in this sense.

Keywords: Stereolithography (SLA), Ageing, Charpy Notch Impact Test, Mechanical Properties, Additive manufacturing

SLA Yöntemi ile Üretilen Numunelerde Yaşlandırma İşleminin Charpy Çentik Darbe Test Sonuçlarına Etkileri

ÖZET

Eklemeli imalat katmanlar halinde malzeme biriktirerek üç boyutlu nesneler oluşturan bilgisayar kontrollü bir üretim yöntemidir. Eklemeli imalatın en eski biçimi olan Stereolitografi (SLA) yöntemi yüksek boyutsal doğruluğu ve basılan parçaların pürüzsüz yüzey kalitesi nedeniyle endüstride oldukça ilgi görmektedir. Bu çalışmada, SLA cihazı kullanılarak 3B polimer parçalar basılmış, yaşlandırma işleminin darbe mukavemeti üzerine etkisini incelemek için farklı sıcaklıklarda (48,60 ve 72 °C) ve farklı sürelerde (6,9 ve 12 saat) yaşlandırma işlemine maruz bırakılmıştır. Yapılan Charpy çentik darbe testi sonucunda yaşlandırma işleminin malzemenin darbe mukavemetini genel olarak azalttığı, camı geçiş sıcaklığı üzerinde bekletilen numunelerde deformasyon olduğu gözlemlenmiştir. Süre açısından boyut değişimi incelendiğinde 12 saate kadar bir azalma gözlemlenirken 12. Saatte tüm sıcaklıklarda ani bir artış meydana gelmiştir. Yaşlandırma işlemi sonucunda yapılan ölçümlerde numunenin kalınlık ve genişlik ölçüleri sonuçlarının yaşlandırma işlemi sonucuna uygun olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışma sayesinde polimer malzemenin kullanılabilirliği, saklanması, raf ömrü ve mekanik özellikleriyle ilgili bulgular elde edilmiş ve literatüre bu anlamda katkı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Stereolitografi (SLA), Yaşlandırma, Charpy Çentik Darbe Testi, Mekanik Özellikler, Eklemeli imalat

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, geometrik olarak karmaşık, kademeli malzeme bileşimlerine sahip ve özelleştirilebilen parçaların üretilmesine imkân tanıyan bir imalat yöntemidir. Eklemeli imalatın ardındaki ilke, geleneksel imalat süreçlerindeki çıkarmalı imalat yöntemlerinin aksine, üç boyutlu model verilerinden nesneler elde etmek amacıyla malzemelerin üst üste katmanlar halinde birleştirilmesi işlemine dayanmaktadır. Eklemeli imalat; otomotiv, mimarlık, tıp, savunma, doku mühendisliği vb. gibi gelişmekte olan birçok alanda kullanılmaktadır [1,2].

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte eklemeli imalat uygulamaları çeşitli endüstrilerde hızla büyümüş ve farklı çalışmalara konu olmuştur. Sağlık alanında yapılan çalışmalar sayesinde, damarın tamamen eski haline dönmesinden 6–12 ay sonra biyolojik olarak parçalanabilen polimer stentler geliştirilmiş, biyolojik ve

*Corresponding author, e-mail: giizemakdemir@gmail.com

nanoelektronik işlevlerin birleştirilmesiyle biyoteknolojik kulak elde edilmiştir [3,4]. Dr. Peckitt'in yaptığı kişiye özel implant tasarımı yardımıyla üst çene kemiğinden kesit parça alınması ve yeniden yapılandırılması işleminde standart yöntemle göre yaklaşık 11 saat süre kazanılmıştır [5,6]. Savunma ve otomotiv endüstrisinde eklemeli imalatın kullanımıyla parçaların ağırlıkları ve operasyon süresi azaltılmış, üretim maliyetleri düşürülmüştür [7]. Akademik çalışmalarda prototip model üretimini kolaylaştırması, tasarım odaklı yaklaşım sağlamasıyla eğitim ve öğretim alanında da faydalanılmaktadır [8].

Eklemeli imalat yedi alt grupta sınıflandırılmıştır. Bunların arasında yüksek doğrulukta parçalar üretmek için kullanılan ve eklemeli imalatın en eski biçimi olan Stereolitografi (SLA) yöntemiyle, sıvı reçine bir fotopolimerizasyon reaksiyonu ile katılaştırarak üç boyutlu (3B) nesneler üretilir [9]. Bu yöntem yüksek boyutsal doğruluğu ve basılan parçaların pürüzsüz yüzey kalitesi sayesinde endüstride oldukça ilgi görmektedir [10]. Fakat bu avantajlarına rağmen SLA ile üretilen polimer malzemelerin yapısı beklenen mekanik performansı karşılamadığı için ileri proses işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Üretilen parçalara uygulanan polimerizasyon süresi; yapıların mekanik özelliklerini, yüzey kalitesini, boyut hassasiyetini vb. malzeme özelliklerini etkilemektedir [11].

Polimerler yüksek sıcaklığa uzun süre maruz kaldıklarında yapılarında fiziksel ve kimyasal değişiklikler meydana gelmektedir [12]. Polimerlerde yaşlanmanın en büyük sebebi ısı ve sıcaklık ile zincir yapısının bozunmasıdır. Bu nedenle maruz kalınan uygunsuz koşul altında malzemenin mekanik ve kimyasal dayanımını ölçmek için yaşlandırma testleri yapılır. Yaşlandırma testleri; ürünün kullanılabilirliğini, saklanması, raf ömrünü ve geri dönüşümünü anlamak ve değerlendirmek için önemlidir.

Literatürde yaşlandırmanın malzemenin mekanik özelliklerine etkisiyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. SLA ile üretilen numuneleri, Mansour vd. [13] kontrollü (karanlık kap, %50 bağıl nem ve 20°C sıcaklık) ve kontrolsüz (rafta bekletilmiş) ortamda gözlemlerken; Tröger vd. [14] üç farklı reçineye önce farklı sürelerde kütleme işlemi yapmış daha sonra termal hava akışlı fırında yaşlandırma işlemine maruz bırakmıştır. Puebla vd. [15] ise numuneleri farklı yönlerde (düz, bir kenar üzerinde, dik), farklı yaşlandırma sürelerinde (4,30 ve 120 gün), farklı ön koşullandırma (ortam, kurutucu ve Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) ön koşullandırması) şartlarında bekleterek testlerini gerçekleştirmişlerdir. Bir diğer çalışmada [16] farklı sıcaklık ve sürelerde kütleme işlemi yapılan numuneler, ısıtma ve soğutma rampası kullanılarak yaşlandırmaya maruz bırakılırken, Wu vd. [17] çalışmasında epoksi ve vinil ester reçineleri kullanılarak termal, ultraviyole (UV) ve doğal yaşlanma koşullarında sararma mekanizmaları ve bunları etkileyen faktörler incelenmiştir.

Eriyik biriktirme yöntemi (FDM) ile üretilen numuneler için de farklı çalışmalar yapılmıştır. Arjun vd. [18] numuneleri dört farklı sıcaklık (65, 95, 125 ve 155 °C) ve dört farklı süre (30, 60, 120 ve 240 dakika); Bhandari vd. [19] iki farklı sıcaklık (90 ve 110 °C) ve 4 farklı süre (0, 30, 240 ve 480 dakika); Valvez vd. [20] üç farklı sıcaklık (90, 110 ve 130 °C) ve üç farklı süre (30, 240 ve 480 dakika); Jayanth vd. [21] üç farklı sıcaklık (90, 100 ve 120 °C) ve üç farklı süre (60, 120 ve 240 dakika) sıcak hava fırınında bekletmiştir. Yine benzer çalışmada [22] üretilen numuneler belirlenen üç farklı sıcaklık (100 °C, 150 °C, 200 °C) ve üç farklı sürede (30 dakika, 60 dakika, 90 dakika) sıcak hava fırınında bekletilmiştir.

Günümüzde yaşlandırma yöntemlerine ait değişkenlerin etkileri ve farklı yaşlandırma yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi önemli araştırma konuları olmaya devam etmektedir. SLA ile üretilen numunelerde doğal ve yapay yaşlandırma parametreleri üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Mevcut araştırmalarda kullanılan sıcaklık ve süre parametrelerinde önemli farklılıklar görülmekte bu da genelleme yapılmasını zorlaştırmaktadır. Buna karşın, FDM ile üretilen numunelerde sıcaklık ve süre parametreleri daha tutarlıdır.

Bu çalışmada, Anycubic Photon Mono X SLA 3B yazıcı ile Anycubic UV Gri Reçine kullanılarak polimerlerde yapay yaşlandırma işleminin malzemenin mekanik özelliklere etkileri incelenmek istenmiştir. Bunun için çentik darbe test numuneleri üretilmiş ve bu numuneler literatürdeki çalışmalar ve kullanılan malzemenin camsı geçiş sıcaklığı göz önüne alınarak, karşılaştırılan üç farklı sıcaklık (48,60 ve 72 °C) ve üç farklı sürede (6,9 ve 12 saat) yapay yaşlandırma işlemine maruz bırakılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

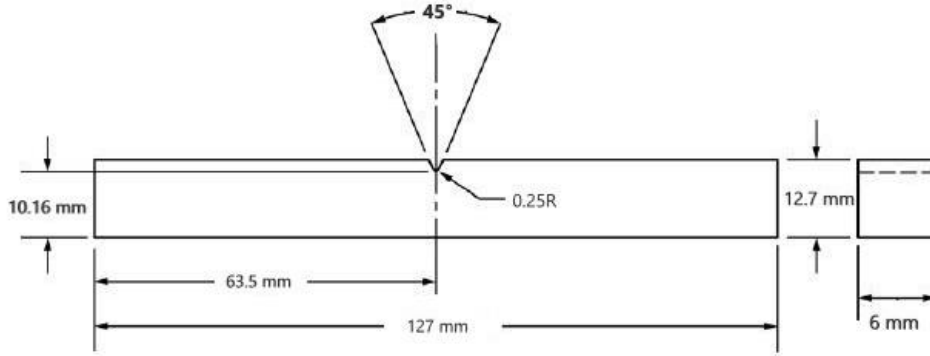
Çalışma kapsamında modellerin yazıcıda üretilmesi için Anycubic UV Gri Fotopolimer Reçine tercih edilmiştir. Bu malzemenin genel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Üretici firmadan alınan bilgilere göre malzemenin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 60 °C'dir.

Tablo 1. UV sıvı reçinenin teknik özellikleri.

Dalga Boyu	Yoğunluk	Viskozite	Yüzey Sertliği	Çekme Mukavemeti	Raf Ömrü
355-410 nm	1.05-1.25 g/cm ³	150-200 mPa.s	84 HS	36-45 MPa	1 yıl

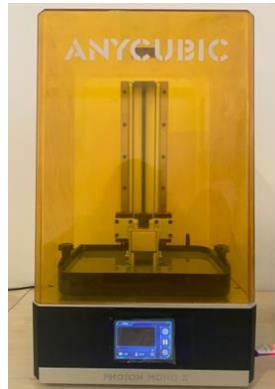
2.2. Metot

Mekanik özellikleri değerlendirmek için SLA yöntemi ile charpy çentik darbe test numuneleri ASTM D6110 [23] standardına göre üretilmiştir. Elde edilen mekanik özellik değerlerinin güvenilir olduğundan emin olmak amacıyla her set için üç aynı numune hazırlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan test numunesinin teknik çizimi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Charpy testi numune boyutları-mm.

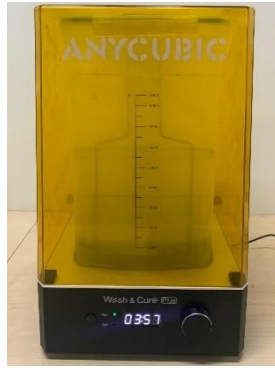
Solidworks bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı kullanılarak Şekil 1’de gösterilen standart boyutlarına göre test numunesi modellenmiştir. CAD programında tasarlanan yapılar Photon_WorkShop programı kullanılarak STL dosyası formatında dışarı aktarılmıştır. Numunelerin basımında Anycubic Photon Mono X SLA yazıcısı kullanılmıştır. Her bir numune düz yapı yönelimi (0 °C) ile platformdan 8 mm yukarıda destek kullanılarak basılmıştır. Cihaz parametreleri 0.05 mm katman kalınlığı, 2 s normal pozlama süresi, 40 s alt pozlama süresi olacak şekilde ayarlanmıştır. Kullanılan 3B yazıcı ve üretilen test numuneleri Şekil 2’de gösterilmektedir. Basımı tamamlanan test numunelerinin yüzeyindeki reaksiyona girmemiş reçinelerin giderilmesi için numuneler, Şekil 2c’de verilen yıkama cihazında %99.9 saflıkta izopropil alkol kullanılarak 4 dk boyunca yıkandıktan sonra 2d’de verilen kütleme cihazıyla UV ışını altında 5 dk boyunca kürlenmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2. a) Üretimde kullanılan SLA cihazı, b) Charpy test numunesi, c) Yıkama cihazı, d) Kırılma cihazı.

SLA cihazında üretilen numunelerin yaşlandırma işleminde Şekil 3'te yer alan Protherm Furnaces marka fırın kullanılmıştır.



Şekil 3. Protherm furnaces kamara fırını.

Tüm numuneler, her bir deney seti için, o setin sıcaklık değerinde ve test süresinde ısıtılma maruz bırakıldıktan sonra aynı ortam koşullarında mekanik testlere tabi tutulmuştur. Tablo 2'de deney setlerinde yer alan değerler gösterilmiştir. Her deney üç tekrarlı test şeklinde gerçekleştirilmiştir.

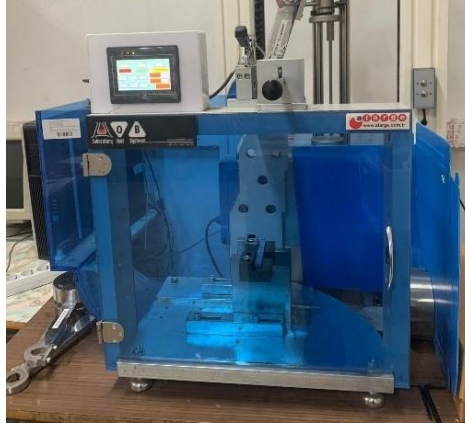
Tablo 2. Deneysel Tasarım.

Deney No	Süre	Sıcaklık
D1	6 Saat	48 °C
D2		60 °C
D3		72 °C
D4	9 Saat	48 °C
D5		60 °C
D6		72 °C
D7	12 Saat	48 °C
D8		60 °C
D9		72 °C
Orj.	-	-

2.3. Charpy Çentik Darbe Testi

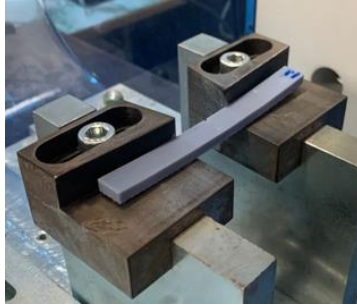
Charpy çentik darbe testleri, ASTM D6110 standardına göre Şekil 4'te verilen Alarge marka sarkaçlı darbe test cihazı ile yapılmıştır. Charpy darbe testi malzemenin kırılma sırasında emdiği enerji miktarını

belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Emilen enerji, çarpmadan önce ve sonra sarkacın yükseklik farkı ile orantılıdır. Kullanılan cihazda bu değer otomatik olarak hesaplanmaktadır.

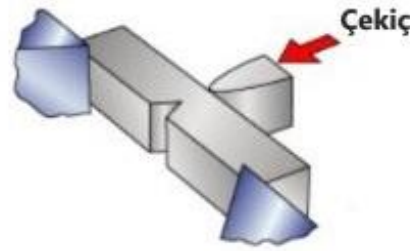


Şekil 4. A large darbe test cihazı.

Şekil 1b’de verilen ölçülere göre hazırlanan numuneler, Şekil 5’te gösterildiği gibi cihaza yerleştirilmiş ve 5 Joule çekiç kullanılarak test gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda yaşlandırma işleminin darbe dayanımına olan etkisi incelenmiştir.



(a)



(b)

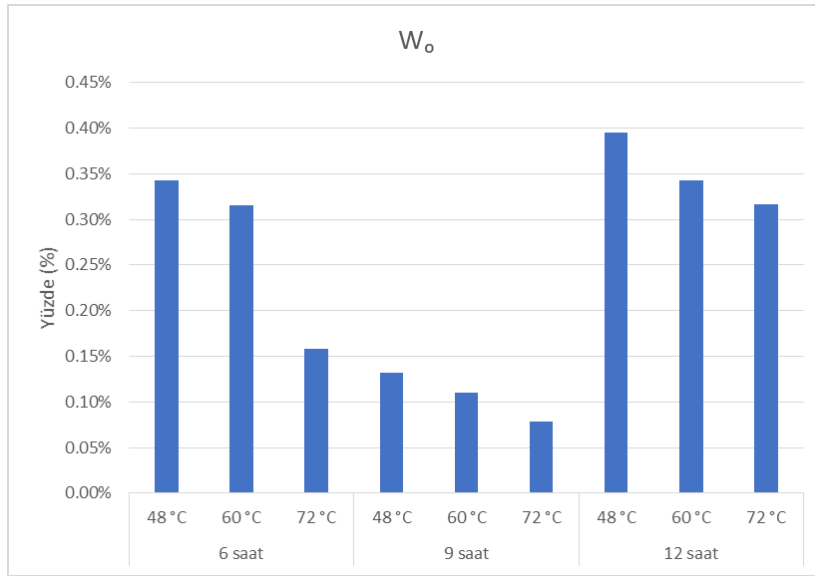
Şekil 5. a) Test numunesinin cihaza bağlanmış görseli, b) Test düzeneği.

3. DENEYSEL BULGULAR

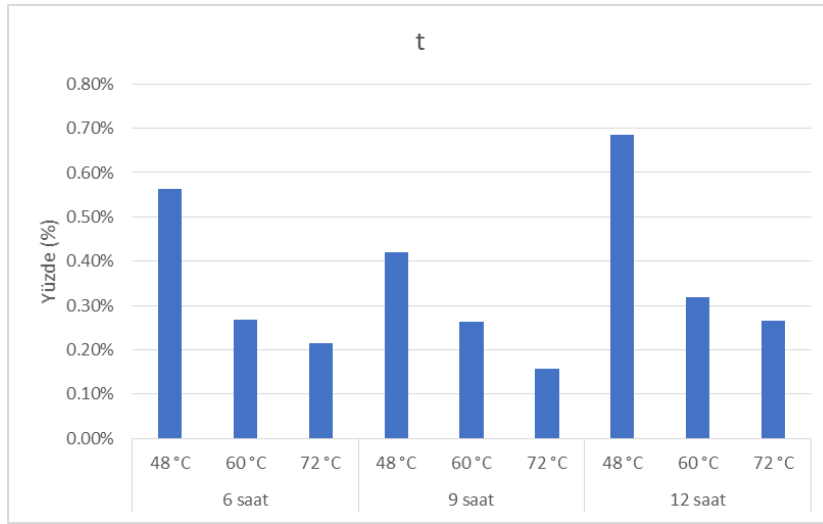
3.1. Yaşlandırma İşlemi Sonrası Numune Ölçülerinin Geometrik Toleransında Meydana Gelen Değişiklikler

Numuneler, termal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmadan önce ve sonra dijital kumpas ile ölçülmüş; 12.7 mm genişlik (W_o), 6 mm kalınlık (t) değerleri kaydedilmiştir. İşlem sonrası meydana gelen numune boyutlarındaki değişimin yüzdelik gösterimi Şekil 6’da yer almaktadır.

Buna göre yüzdesel değişimin en fazla olduğu değer ($\%69$) 12 saat $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de bekletilen numune olduğu; en düşük olduğu değerin ise ($\%16$) 9 saat $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de bekletilen test numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. Max ve min değerler arasında yaklaşık $\%53$ ’lük bir fark olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar, numune ölçülerinde sıcaklık artışıyla birlikte boyut değişiminde azalma olduğunu göstermiştir. Süre açısından boyut değişimi incelendiğinde ise 12 saate kadar bir azalma gözlenmiş ancak 12. saatte tüm sıcaklıklarda ani bir artış meydana gelmiştir. Bu değerler, ASTM D6110 standardının belirlediği tolerans aralıkları içerisinde yer almaktadır ($W_o = 12.7 \pm 0.15$ / $T=3-12.7\text{ mm}$).



(a)

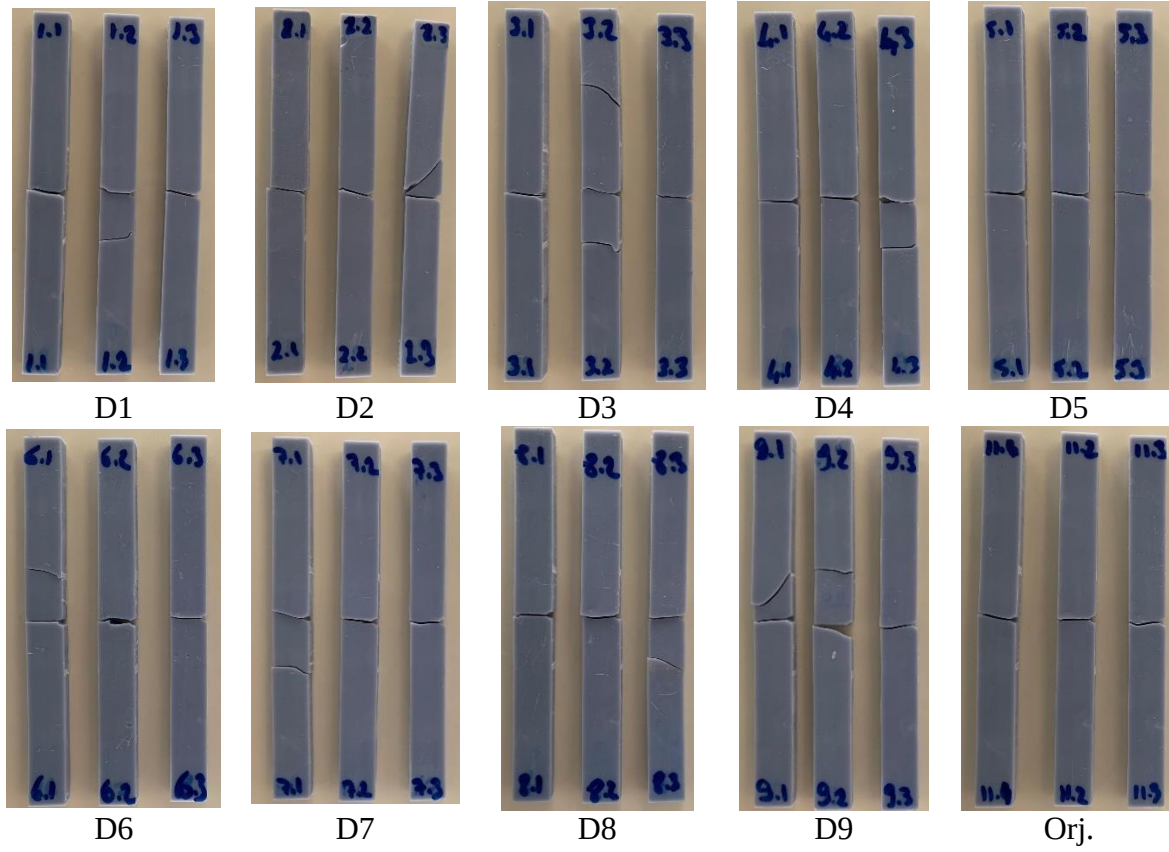


(b)

Şekil 6. Numune boyutlarındaki değişimin yüzdelik gösterimi a) Genişlik (W₀), b) kalınlık (t).

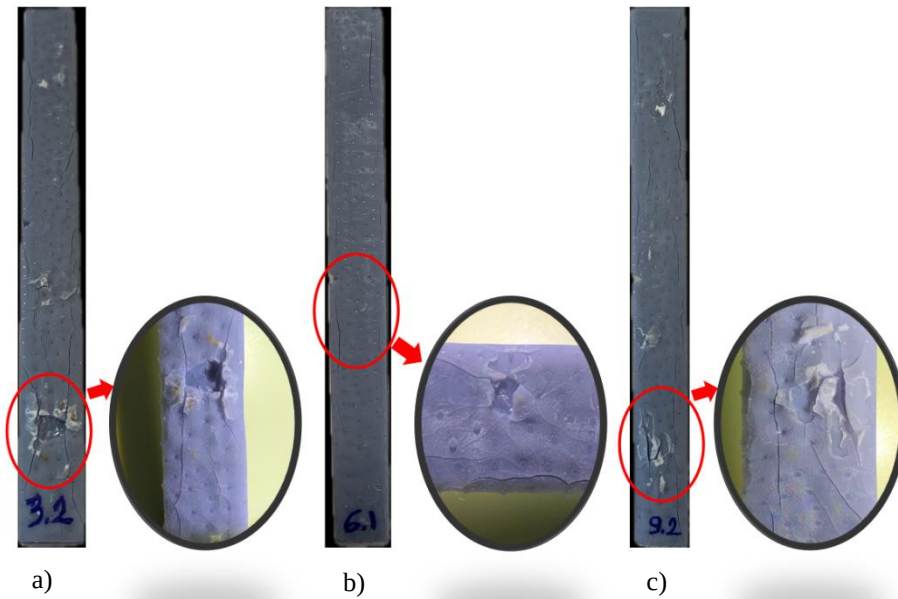
3.2. Charpy Çentik Darbe Testi Sonuçları

Bu çalışmada aynı üretim parametrelerine sahip numunelerin, aniden uygulanan bir strese nasıl tepki vereceğini belirlemek için tasarlanmıştır. Farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma işlemine maruz bırakılan numunelerin kırılma sırasında emdiği enerji miktarında gerçekleşen değişim incelenmiştir. Charpy test numuneleri SLA cihazında üretilirken çentikli olduğu için destekli olarak üretilmiştir. Şekil 7’de kırılan numunelerin tamamı yer almaktadır. Buna göre malzemelerin çoğu çentiğin bulunduğu orta noktadan kırılmıştır.



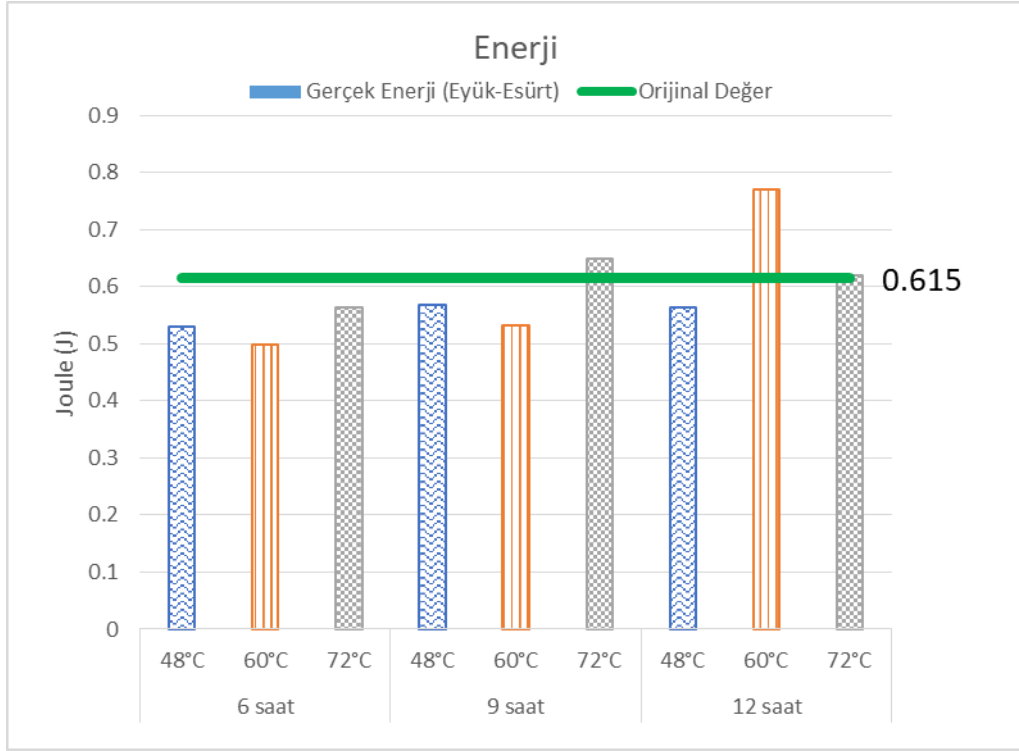
Şekil 7. Test edilen charpy numuneleri.

Yaşlandırma sonucunda malzemenin camsı geçiş sıcaklığı üzerinde sıcaklığa maruz bırakılan D3 (72 °C 6 saat), D6(72 °C 9 saat) ve D9 (72 °C 12 saat) numunelerin yüzeylerinde deformasyon gözlemlenmiştir (Şekil 8). Deneylerde kullandığımız reçine, termoset polimer özelliği göstermektedir ve malzemenin mekanik özelliklerinde belirttiğimiz üzere camsı geçiş sıcaklığı 60 °C'dir. Termoset malzemeler, camsı geçiş sıcaklığının (T_g) üstündeki bir sıcaklığa ısıtıldığında parçalanmakta ve ayrışma eğilimi göstermektedir [24]. Elde ettiğimiz bulgular, bu durumu doğrulamakta olup T_g 'nin aşıldığı numunelerde belirgin deformasyonlar gözlemlenmiştir. Ayrıca, literatürde benzer çalışmalarda da yüksek sıcaklık etkisiyle malzemelerde geometrik tolerans kaybı, yüzey sararması gibi görsel deformasyonların meydana geldiği gözlenmiştir [17,25].



Şekil 8. Deforme olan test numunelerinin makroskobik görüntüsü; a) D3 ve b) D6 c) D9.

Yapılan testler sonucunda elde edilen verilerle Şekil 9'da yer alan grafik elde edilmiştir. Darbe sonucu açığa çıkan enerjinin en fazla olduğu değerin (0.769 J) 12 saat 60 °C'de bekletilen numune olduğu; en düşük olduğu değerin ise (0.499 J) 6 saat 60 °C'de bekletilen test numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. Max ve min değerler arasında yaklaşık %35.11'lik bir fark olduğu görülmüştür.



Şekil 9. Test numunelerinin darbe dayanımı kıyaslama grafiği.

48 °C'de bekletilen numunelerde süre ilerledikçe darbe mukavemetinde önce %7.37'lik bir artış olduğu daha sonra %0.71'lik azalış olduğu gözlenmiştir. Alınan bütün değerlerin sonucunda 48 °C'de bekletilen numunelerin yaşlandırılmamış olan numunelere kıyasla darbe mukavemetinde azalış olduğu görülmüştür.

60 °C'de bekletilen numunelerde süre ilerledikçe darbe mukavemetinde önce %6.81'lik daha sonra %44.2'lik bir artış olduğu gözlenmiştir. Alınan bütün değerlerin sonucunda 60 °C'de bekletilen numunelerde süre ilerledikçe darbe mukavemetinde artış olduğu gözlemlenmiştir. 60 °C'de bekletilen numuneler içerisinde 12 saat bekletilen numune hariç diğer numunelerin darbe mukavemetinin orijinal numuneyi geçemediği görülmüştür.

72 °C'de bekletilen numunelerde süre ilerledikçe darbe mukavemetinde önce %15.2'lik bir artış olduğu daha sonra %4.47'lik azalış olduğu gözlenmiştir. 72 °C'de bekletilen numuneler içerisinde 6 saat bekletilen numune hariç diğer numunelerin darbe mukavemetinin orijinal numuneyi geçtiği görülmüştür.

Yaşlandırma işlemi, özellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalan termoset polimerlerin molekülleri arasında oluşan kovalent çapraz bağların yoğunluğunu artırarak malzemenin elastikiyetini arttırmaktadır. Ancak uzun süre devam eden yaşlandırma, bu kovalent bağların oksidasyonuna ve kopmasına yol açarak malzeme yapısında bozulmalara sebebiyet vermektedir. Bu süreç, malzemenin kırılgan hale gelmesine ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerinin zamanla azalmasına sebep olmaktadır [26,27,28]. Yaptığımız çalışmanın sonuçları da bu bilgiyi desteklemektedir ve literatürde yapılan diğer çalışmalarda olduğu gibi yaşlandırma işlemi sonucunda malzemenin darbe mukavemetinde genel olarak azalma gözlemlenmiştir [11,29].

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 3B SLA yazıcıda reçine ile üretilen charpy çentik darbe test numuneleri, aynı parametrelerde üretilmiş, farklı süre ve sıcaklıkta ısıtılma maruz bırakılmış ve charpy çentik darbe testlerine tabi tutularak yaşlandırma şartlarının malzemenin darbe mukavemetine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- 1- SLA yöntemi literatürde kullanılmış olmakla birlikte, bu çalışmada ele alınan farklı parametre kombinasyonlarının daha önce detaylı bir şekilde incelenmediği görülmüştür. Bu bağlamda, çalışmanın literatüre özgün bir katkı sunduğu değerlendirilmektedir.
- 2- Malzemelerin camsı geçiş sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa maruz bırakılması durumunda yüzeylerinde deformasyon olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki diğer çalışmalar da bu durumu destekler nitelikte olup, yüksek sıcaklık etkisiyle geometrik tolerans kaybı ve yüzey sararması gibi görsel deformasyonların meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, elde edilen bulgular literatürdeki mevcut verilerle uyum göstermektedir.
- 3- Darbe sonucu açığa çıkan enerjinin en fazla olduğu değerin (0.769 J) 12 saat 60 °C’de bekletilen numune olduğu; en düşük olduğu değerin ise (0.499 J) 6 saat 60 °C’de bekletilen test numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. Max ve min değerler malzemenin camsı geçiş sıcaklığında görülmüş olup aralarında yaklaşık %35.11’lik bir fark olduğu görülmüştür.
- 4- Süre açısından boyut değişimi incelendiğinde; 12 saate kadar bir azalma gözlenmiş ancak 12. saatte tüm sıcaklıklarda ani bir artış meydana gelmiştir. Yüzdesel değişimde maksimum ve minimum değerler arasında yaklaşık %53’lük bir fark olduğu görülmüştür.
- 5- ASTM D6110 Standardına göre $W_o = 12.7 \pm 0.15$ / $T=3-12.7$ mm tolerans aralığı için 12.7 mm genişlik (W_o), 6 mm kalınlık (t) ölçüleri sonuçlarının yaşlandırma işlemi sonucuna uygun olduğu görülmüştür.
- 6- Yaşlandırma süresi ve sıcaklık artışının darbe mukavemetini arttırdığı söylenebilir. Sadece 9 saat 72 °C’de ve 12 saat 60 °C ile 72 °C’lerde orijinal numune değerinin üstünde mukavemet değeri ölçülmüştür.
- 7- Yaşlandırma işleminin malzemenin darbe mukavemetini genel olarak azalttığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışma, polimer malzemelerin kullanılabilirliği, depolanması, raf ömrü ve geri dönüşüm süreçlerinin anlaşılması ve değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımakta olup, literatüre bu doğrultuda değerli bir katkı sağlamaktadır. Geliştirilen çalışmalar sayesinde endüstride kullanılan polimer malzemelerde hem malzemelerin performansına hem de ürünlerin güvenilirliğine yönelik bilgiler elde edileceği öngörülmektedir. Gelecekteki araştırmalarda, camsı geçiş sıcaklığına kadar sıcaklık uygulamalarının gerçekleştirilmesi önerilmektedir; zira bu sıcaklık değerinin üzerinde meydana gelen ani artış ve azalışlar, malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimlerin öngörülmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, SLA (StereoLitografi) yöntemiyle üretilen reçinelerin üretim süreci, çevresel ışık, sıcaklık ve diğer birçok parametreden etkilenebilmekte olup, bu reçineler oldukça hassas bir yapı sergilemektedir. Literatürde SLA yöntemine ilişkin çalışmalar sınırlı sayıda bulunmakta ve üretim parametreleri ile farklı renk ve mekanik özelliklere sahip reçineler üzerine yeterli bulgu yer almamaktadır. Bu nedenle, gelecekteki araştırmalarda üretim parametrelerinin ve reçine çeşitliliğinin genişletilerek bu konulara dair literatüre daha kapsamlı katkılar sağlanması önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri'ne bu çalışmaya göstermiş oldukları destek için teşekkür ederiz. (Proje no: FLY-2023-8697).

KAYNAKLAR

- [1] D.W. Rosen, What are Principles for Design for Additive Manufacturing?, Proceedings of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing, 2014, Singapore.
- [2] N. Guo, M.C. Leu, Additive manufacturing: technology, applications and research needs, Frontiers of Mechanical Engineering, 8(3) (2013) 215-243.
- [3] A.A. Giannopoulos, D. Mitsouras, S. Yoo, P.P. Liu, Y.S. Chatzizisis, F.J. Rybicki, Applications of 3D printing in cardiovascular diseases, Nature Reviews Cardiology, 13(12) (2016) 701-718.
- [4] M.S. Mannoor, Z. Jiang, T. James, Y.L. Kong, K.A. Malatesta, W.O. Soboyejo, N. Verma, D.H. Gracias, M.C. McAlpine, 3D Printed Bionic Ears, Nano Letters, 13 (2013) 2634-2639.
- [5] S. Lohfeld, P. McHugh, D. Serban, D. Boyle, G. O'Donnell, N. Peckitt, A route for digital design and manufacturing of customised maxillofacial implants, Journal of Biomechanics, 39 (2006) 427.
- [6] Y. Jun, K. Choi, Design of patient-specific hip implants based on the 3D geometry of the human femur, Advances in Engineering Software, 41 (2010) 537-547.
- [7] R. Huang, M. Riddle, D. Graziano, J. Warren, S. Das, S. Nimbalkar, J. Cresko, E. Masanet, Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components, Journal of Cleaner Production, 135 (2016) 1559-1570.

- [8] H.K. Sürmen, Eklemeli imalat (3B baskı): teknolojiler ve uygulamalar, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24 (2) (2019) 373-392.
- [9] F.P.W. Melchels, J. Feijen, D.W. Grijpma, A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering, Biomaterials, 31 (2010) 6121-6130.
- [10] M. Mukhtarkhanov, A. Perveen, D. Talamona, Application of stereolithography based 3D printing technology in investment casting, Micromachines, 11 (2020) 946.
- [11] İ. Aktitiz, K. Aydın, A. Topçu, Stereolitografi (SLA) tekniği ile basılan 3 boyutlu polimer yapılarda ikincil kürlenme süresinin mekanik özelliklere etkisi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(4) (2020) 949-958.
- [12] ASTM D3045, Standard practice for heat aging of plastics without load, ASTM International, 2018.
- [13] S. Mansour, M. Gilbert, R. Hague, A study of the impact of short-term ageing on the mechanical properties of a stereolithography resin, Materials Science and Engineering, 447(2007) 277-284.
- [14] C. Tröger, A.T. Bens, G. Bermes, R. Klemmer, J. Lenz, S. Irsen, Ageing of acrylate-based resins for stereolithography: thermal and humidity ageing behaviour studies, Rapid Prototyping Journal, 14(5) (2008) 305-317.
- [15] K. Puebla, K. Arcaute, R. Quintana, R.B. Wicker, Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography, Rapid Prototyping Journal, 18(5) (2012) 374-388.
- [16] E. Marin, F. Boschetto, M. Zanocco, H.N. Doan, T.P.M. Sunthar, K. Kinashi, D. Iba, W. Zhu, G. Pezzotti, UV-curing and thermal ageing of methacrylated stereo-lithographic resin, Polymer Degradation and Stability, 185, 2021.
- [17] C. Wu, B.C. Meng, L. Tam, L. He, Yellowing mechanisms of epoxy and vinyl ester resins under thermal, UV and natural aging conditions and protection methods, Polymer Testing, 114 (2022).
- [18] P. Arjun, V.K. Bidhun, U.K. Lenin, V.P. Amritha, R.V. Pazhamannil, P. Govindan, Effects of process parameters and annealing on the tensile strength of 3D printed carbon fiber reinforced polylactic acid, Materials Today: Proceedings, 62 (2022) 7379-7384.
- [19] S. Bhandari, R.A. Lopez-Anido, D.J. Gardner, Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing, Additive Manufacturing, 30, 2019.
- [20] S. Valvez, A.P. Silva, P.N.B. Reis, F. Berto, Annealing effect on mechanical properties of 3D printed composites, Procedia Structural Integrity, 37: 738-745, 2022.
- [21] N. Jayanth, K. Jaswanthraj, S. Sandeep, N.H. Mallaya, S.R. Siddharth, Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 123 (2021).
- [22] M. Coşkun, 3 boyutlu yazıcıda üretilmiş parçalara uygulanan ısı işlemlerin mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Malzeme Bilimi Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kastamonu, Türkiye, 2019.
- [23] ASTM D6110, Standard test method for determining the charpy impact resistance of notched specimens of plastics, ASTM International, 2018.
- [24] Knowledge in Practice Centre, Thermoset Polymers, <https://compositeskn.org/KPC/A105>, 24.01.2024.
- [25] H.C. Özdemir, Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş parçalara üretim sonrası yapılan işlemlerin yüzey kalitesine ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2023.
- [26] M. Saçak, Polimer Kimyası, 10. Baskı, Gazi Kitabevi, Ankara, 2023.
- [27] Unacademy, Thermosetting Polymers, <https://unacademy.com/content/jee/study-material/chemistry/thermosetting-polymers/>, 2024.
- [28] Byju's, What is Thermosetting Polymer?, <https://byjus.com/chemistry/thermosetting-polymers/>, 2024.
- [29] I. García-Moreno, M.A. Caminero, G.P. Rodríguez, J.J. López-Cela, Effect of thermal ageing on the impact and flexural damage behaviour of carbon fibre-reinforced epoxy laminates, Polymers, 11(1) (2019) 80.