



**STEREOLİTOGRAFI (SLA) YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN
MALZEMELERDE YAPAY YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Gizem AKDEMİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gizem AKDEMİR

25/12/2024

STEREOLİTOGRAFI (SLA) YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN MALZEMELERDE YAPAY YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN

ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Gizem AKDEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2025

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 sayesinde endüstride oldukça ilgi görmektedir. Bu çalışmada, SLA teknolojisi kullanılarak çekme testi, darbe testi ve eğme testi numuneleri üretilmiş ve yaşlandırma işleminin bu numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel numuneler, farklı sıcaklıklar (48, 60 ve 72 °C) ile farklı sürelerde (6, 9 ve 12 saat) yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Deneysel bulgular, artan sıcaklıkla birlikte numune boyutlarında bir küçülme meydana geldiğini göstermektedir. Çekme testi sonuçlarına göre, en yüksek akma dayanımı ve maksimum yük değerleri, 9 saat 48 °C’de bekletilen numunelerde gözlemlenirken, en düşük değerler ise 12 saat 72 °C’de bekletilen numunelerde elde edilmiştir. Yaşlandırmanın genel olarak malzemenin akma dayanımını ve mukavemetini iyileştirdiği görülmüştür. Darbe testi sonuçlarına göre, en yüksek enerji absorpsiyonu (0,769 J), 12 saat boyunca 60 °C’de bekletilen numunelerde; en düşük enerji absorpsiyonu (0,499 J) ise 6 saat boyunca 60 °C’de bekletilen numunelerde ölçülmüştür. Yalnızca darbe numuneleri çentikli olarak üretilmiş olup, bu numunelerin camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara maruz kalması durumunda yüzeylerinde belirgin deformasyonlar meydana gelmiştir. Ayrıca, yaşlandırma işleminin malzemenin darbe mukavemetinde genel bir azalmaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Üç nokta eğme testi sonuçlarına göre, en yüksek kopma uzaması değeri 6 saat boyunca 48 °C’de bekletilen numunede 3,14 mm olarak ölçülürken, en düşük değer 6 saat boyunca 60 °C’de bekletilen numunede 2,02 mm olarak kaydedilmiştir. Bu iki değer arasında yaklaşık %35,67’lik bir fark bulunmuştur. Gri ilişki analizi sonuçlarına göre ise ilk sırada yer alan, en optimal parametrenin 12 saat 60 °C olduğu; son sıradaki parametrenin ise 9 saat 60 °C’ ye ait olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91421
Anahtar Kelimeler : Stereolitografi (SLA), yaşlandırma, eklemeli imalat, mekanik özellikler
Sayfa Adedi : 69
Danışman : Doç. Dr. Gültekin UZUN

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ARTIFICIAL AGING PROCESS ON
MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS PRODUCED BY
STEREOLITHOGRAPHY (SLA) METHOD

(M. Sc. Thesis)

Gizem AKDEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2025

ABSTRACT

Additive manufacturing is a computer-controlled production method 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 its high dimensional accuracy and smooth surface finish of the printed parts. In this study, tensile test, impact test and flexure test specimens were produced using SLA technology and the effects of aging on the mechanical properties of these specimens were investigated. The experimental specimens were subjected to aging at different temperatures (48, 60 and 72 °C) and for different durations (6, 9 and 12 hours). The experimental findings show that there is a reduction in sample dimensions with increasing temperature. According to the tensile test results, the highest yield strength and maximum load values were observed in the specimens aged at 48 °C for 9 hours, while the lowest values were obtained in the specimens aged at 72 °C for 12 hours. It was observed that aging generally improved the yield strength and strength of the material. According to the impact test results, the highest energy absorption (0.769 J) was measured in the specimens kept at 60 °C for 12 hours and the lowest energy absorption (0.499 J) was measured in the specimens kept at 60 °C for 6 hours. Only the impact specimens were notched and when these specimens were exposed to temperatures above the glass transition temperature, significant deformations occurred on their surfaces. It was also observed that the aging process led to a general decrease in the impact strength of the material. According to the results of the three-point bending test, the highest elongation at break value was 3.14 mm for the sample kept at 48 °C for 6 hours, while the lowest value was 2.02 mm for the sample kept at 60 °C for 6 hours. A difference of approximately 35.67% was found between these two values. According to the results of gray correlation analysis, it was determined that the most optimal parameter was 12 hours at 60 °C and the last parameter was 9 hours at 60 °C.

Science Code : 91421

Key Words : Stereolithography (SLA), aging, additive manufacturing, mechanical properties

Page Number : 69

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Gültekin UZUN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve birikimini, yol göstericiliğini ve desteğini esirgemeyen; her zaman öğretici ve yenilikçi bir bakış açısı kazanmama olanak sağlayan değerli danışman hocam Doç. Dr. Gültekin UZUN'a en derin teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği bölümünün değerli akademik ve idari kadrosuna, bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde sundukları destekler için şükranlarımı iletirim.

Hayatım boyunca çıktığım her yolda yanımda olan, varlıklarıyla bana güç veren ve tez çalışmam sürecinde sabır ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme – annem, babam, ağabeyim ve yengeme – gönülden teşekkür ederim. Bu süreçte desteğini hissettiren tüm arkadaşlarıma da minnettarım. Varlığı ve sevgisiyle bana her zaman motivasyon kaynağı olan değerli yeğenim Defne'ye özel teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu çalışmaya sağladıkları katkılar nedeniyle Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığı'na FLY-2023-8697 numaralı proje kapsamında teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Eklemeli İmalat ve SLA Yöntemi.....	3
2.2. Polimer Malzemeler	6
2.2.1. Polimerlerin özellikleri.....	6
2.2.2. Polimer malzemelerin sınıflandırılması	8
2.3. Yaşlandırma İşlemi.....	12
2.4. Gri İlişkisel Analiz	13
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	17
4. MATERYAL VE YÖNTEM	25
4.1. Deney Malzemeleri	25
4.2. Deney Numunesi Tasarımı ve Üretim Parametreleri.....	25
4.3. Yaşlandırma İşlemi.....	28
4.4. Çekme Test Cihazı ve Test Süreci.....	29
4.5. Charpy Çentik Darbe Testi Cihazı ve Test Süreci	31
4.6. Üç Nokta Eğme Testi Cihazı ve Test Süreci	32

Sayfa

5. DENEYSEL BULGULAR.....	35
5.1. Yaşlandırma İşlemi Sonrası Numune Ölçülerinin Geometrik Toleransında Meydana Gelen Değişimlerin İncelenmesi	35
5.1.1. Çekme testi numunelerindeki değişim	35
5.1.2. Charpy çentik darbe testi numunelerindeki değişim	38
5.1.3. Üç nokta eğme testi numunelerindeki değişim.....	41
5.2. Çekme Testi Sonuçları.....	44
5.3. Charpy Çentik Darbe Testi Sonuçları.....	48
5.4. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları.....	52
5.5. Gri İlişki Analizi Sonucu	55
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
6.1. Sonuçlar	59
6.2. Öneriler	60
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Eklemeli imalatın avantajları ve dezavantajları.....	3
Çizelge 4.1. Anycubic UV Gri Fotopolimer Reçine Özellikleri.....	25
Çizelge 4.2. Deneysel tasarım.....	29
Çizelge 5.1. Deney sonuçlarından alınan veriler.....	55
Çizelge 5.2. Normalize edilen sayısal veriler.....	56
Çizelge 5.3. Normalize edilen sayısal verilerin uzaklık matrisi değerleri	57
Çizelge 5.4. Gri ilişki katsayıları.....	57
Çizelge 5.5. Gri ilişki analizi sonucunda elde edilen gri ilişki derecesi ve sıralaması	58

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. ASTM standardına göre eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması...	4
Şekil 2.2. Eklemeli imalat süreci	4
Şekil 2.3. Stereolitografi cihazı.....	5
Şekil 2.4. Stereolitografi çalışma prensibi	6
Şekil 2.5. Monomer ve polimerin şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.6. Yarı kristal ve amorf malzemelerin erime ve yumuşama davranışı	8
Şekil 2.7. Polimerlerin moleküler kuvvetlere göre sınıflandırılması.....	9
Şekil 2.8. Termosetlerin iç yapısının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.9. Termoset polimerler için kritik sıcaklığa bağlı faz geçişleri	10
Şekil 2.10. Termoplastiklerin iç yapısının şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.11. Termoplastik polimerler için kritik sıcaklığa bağlı faz geçişleri	11
Şekil 2.12. Elastomerlerin iç yapısının şematik gösterimi.....	12
Şekil 4.1. Test numunesi boyutları	25
Şekil 4.2. LCD tabanlı SLA baskı cihazı	26
Şekil 4.3. Üretilen örnek test numuneleri	27
Şekil 4.4. Yıkama ve kürleme cihazı	27
Şekil 4.5. Protherm Furnaces marka kamara fırını	28
Şekil 4.6. Utest Profi X6 test cihazı.....	30
Şekil 4.7. Çekme test numunesinin cihaza bağlanmış görseli	30
Şekil 4.8. Alarge darbe test cihazı	31
Şekil 4.9. Charpy çentik darbe test numunesinin cihaza bağlanmış görseli	31
Şekil 4.10. Üç nokta eğme test düzeneği	32
Şekil 4.11. Üç nokta eğme test numunesinin cihaza bağlanmış görseli	33

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Çekme numune boyutlarındaki değişimin gösterimi	36
Şekil 5.2. Charpy çentik darbe numune boyutlarındaki değişimin gösterimi.....	39
Şekil 5.3. Üç nokta eğme numune boyutlarındaki değişimin gösterimi	42
Şekil 5.4. Çekme numunesinin akma dayanımı grafiği	45
Şekil 5.5. Çekme numunesinin maksimum yük grafiği	46
Şekil 5.6. Test edilen charpy numuneleri.....	49
Şekil 5.7. Deforme olan charpy numunelerinin makroskobik görüntüsü	50
Şekil 5.8. Charpy numunelerinin darbe dayanımı kıyaslama grafiği.....	51
Şekil 5.9. Üç nokta eğme numunelerinin kopma uzaması kıyaslama grafiği	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

T_g	Camsı Geçiş Sıcaklığı
T_m	Erime Sıcaklığı
hz	Hertz
m²	Metrekare

Kısaltmalar

Açıklamalar

3B	Üç Boyut
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
Eİ	Eklemeli İmalat
GİA	Gri İlişkisel Analiz
PE	Polietilen
PEEK	Polieter Eter Keton
PEI	Polieterimid
PP	Polipropilen
SLA	Stereolitografi
UV	Ultraviyole

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. Böylece bu teknoloji kullanılarak minimum malzeme israfı ile mükemmel mekanik özelliklere sahip parçalar üretilir. Eklemeli imalat; otomotiv, mimarlık, tıp, savunma, doku mühendisliği vb. gibi gelişmekte olan birçok alanda kullanılmaktadır [1,2].

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 [3]. Yüksek boyutsal doğruluğu ve basılan parçaların pürüzsüz yüzey kalitesi nedeniyle endüstride oldukça ilgi görmektedir [4]. Her gün gelişmekte olan bu teknoloji sayesinde günümüzde minimum yazdırma hatası ile son derece hassas üretim yapılabilen, malzeme israfını büyük ölçüde azaltan, sıvı reçine bazlı üç boyutlu SLA yazıcılar kullanılmaktadır [5]. 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 [6].

Polimerler yüksek sıcaklığa uzun süre maruz kaldıklarında yapılarında fiziksel ve kimyasal değişiklikler meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak bazı özelliklerini kaybeden polimerlerin sıcaklığa ve zamana maruz kalma seviyesi, yapılarında meydana gelecek değişikliklerin türünü ve derecesini etkilemektedir [7]. Polimerlerde yaşlanmanın en büyük sebebi ısı ve sıcaklık ile zincir yapısının bozulmasıdır. Yaşlandırmanın etkisi ile moleküller arası bağlar zayıflayarak yapıda farklı moleküller oluşmaktadır. Bu nedenle maruz kalınan uygunsuz koşul altında malzemenin mekanik ve kimyasal dayanımını ölçmek için yaşlandırma testleri yapılır. Yaşlanma polimer yapısını moleküler, makromoleküler ve/veya morfolojik düzeyde değiştirebilir ve böylece mekanik özelliklerde değişikliklere neden

olabilir [8]. Bu test polimerlerde uzun ömürlü kullanılacak endüstriyel ürünler için oldukça önemlidir. Yaşlandırma testleri ürünün kullanılabilirliğini, saklanması, raf ömrünü ve geri dönüşümünü anlamak ve değerlendirmek için önemlidir.

Gri ilişkisel analiz (GİA), birden fazla faktör ve değişken arasındaki karmaşık ilişkileri çözerek süreç parametrelerinin optimum kombinasyonunu bulmak için kullanılan çoklu yanıt optimizasyon işlemidir [9]. Bu yöntem gri ilişki derecesinin hesaplanması ve sistemin ana davranışının katkı ölçüsünün veya sistem faktörleri arasındaki etki derecesinin belirlenmesinde oldukça önemlidir [10]. Çoklu girdi ve çoklu sonuçlar açısından en uygun sonucu veren bu yöntemde siyah, tamamen belirsiz veya hiçbir bilginin bulunmadığı durumu, beyaz ise tüm bilgilerin açıkça tanımlandığı, net bir durumu ifade etmektedir. Gri ise, bilginin kısmi olduğu veya belirsizlik içeren bir durumu temsil eder. Bu tür bir sınıflandırma, bilgiye dayalı karar verme süreçlerinde belirsizlikleri ve belirsizlik derecelerini dikkate alarak daha doğru ve etkin sonuçlar elde etmeyi amaçlar [11].

Bu tez çalışmasında Stereolitografi (SLA) yöntemi kullanılarak çekme, üç nokta eğme ve çentik darbe test numuneleri üretilmiş ve literatüre göre belirlenen üç farklı sıcaklık ve üç farklı süre uygulanarak numuneler yapay yaşlandırma işlemine maruz bırakılmıştır. Testler sonunda çıkan sonuçlar grafiklere dönüştürülerek yorumlanmıştır. Çoklu girdi ve çoklu sonuçlar açısından en uygun yaşlandırma parametresinin tespiti için gri ilişkisel analiz yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen veriler neticesinde ideal üretim parametreleri belirlenmiş ve yaşlandırma işleminin mekanik özelliklere etkisi ortaya konmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

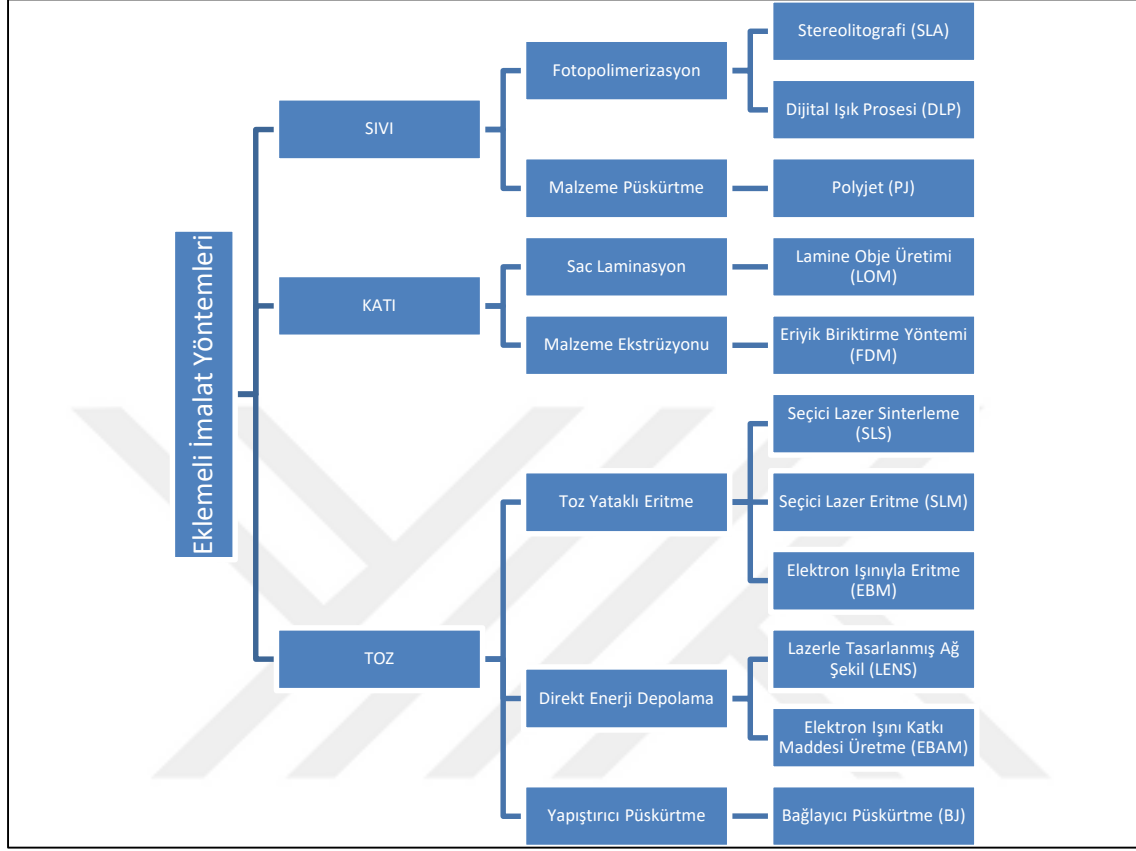
2.1. Eklemeli İmalat ve SLA Yöntemi

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojisi, bilgisayar destekli tasarım (CAD) dosyası tarafından yönlendirilen ince malzeme katmanlarını aşamalı olarak ekleyerek 3B parçalar oluşturulmasını sağlayan bir imalat yöntemidir. Bu teknoloji tasarım özgürlüğü, minimum malzeme israfı, daha kısa teslim süreleri gibi sunduğu esnek üretim imkanlarıyla seri üretimde hala yoğun bir şekilde kullanılan geleneksel imalat tekniklerine kıyasla özelleştirilmiş nesnelerin üretimi için ekonomik bir avantaj elde edilmesini sağlar [12,13]. Tasarımlarına uygun karmaşık parçalar, geleneksel işleme yöntemlerinin (ör. düz kesimler, yuvarlak delikler) veya ticari şekillerin (ör. sac, boru) sınırlamaları olmadan tek adımda yapılabilir [14]. Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere eklemeli imalatın avantajı olduğu kadar dezavantajları da mevcuttur.

Çizelge 2.1. Eklemeli imalatın avantajları ve dezavantajları [15,16]

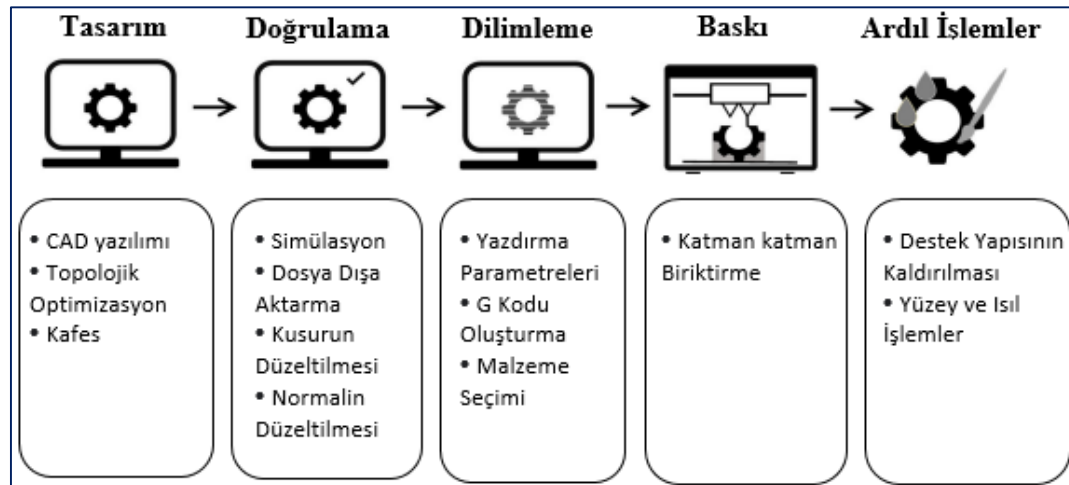
Avantaj	Dezavantaj
Özelleştirilmiş ürünlerin küçük partiler halinde yapılabilmesi geleneksel toplu üretim yöntemlerine göre ekonomik olarak caziptir.	Yüksek makine ve malzeme maliyetleri vardır.
3B CAD modellerinden doğrudan üretim yapılabilir. Bu nedenle alet ve kalıp gerektirmediği için geçiş maliyetleri yoktur.	Üretim aşamasına ek olarak tasarım, malzeme ve üretim bilgisi gerektirdiği için uzman ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.
Dijital dosyalar biçimindeki tasarımlar, bileşenlerin ve ürünlerin değiştirilmesini ve özelleştirilmesini kolaylaştırarak kolayca paylaşılmasını sağlar.	Üretim sonrası malzeme yüzeyinde oluşabilecek pürüzlülük, iç gerilmeler gibi sorunlar olabileceğinden ek olarak ileri proses işlemleri ile parçaların kalitesinin iyileştirilmesini gerektirebilir.
Üretim sırasında kullanılmayan atık malzemeyi yeniden kullanma yeteneği sayesinde malzeme tasarrufu sağlar.	Gelişen teknolojiyle oranı oldukça azalsa da üretme hızları hala düşüktür.
Serbest biçimli kapalı yapılar gibi yeni, karmaşık yapılar, kanallar ve kafesler üretilebilir.	Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılabilen malzemeler sınırlıdır ve her malzeme 3B yazıcıya uygun değildir. Özellikle yüksek sıcaklık veya yüksek mukavemet gerektiren malzemeler konusunda seçenekler kısıtlıdır.
Hızlı prototipleme ile tasarımlar hızlı bir şekilde test edilip iyileştirilebilir, bu da Ar-Ge sürecini hızlandırır.	Bazı eklemeli imalat süreçlerinde aynı kalitede parça üretimi zor olabilir.
Tasarım ve yapım özgürlüğü sağlar. Bu nedenle kişiye özel üretimin önünü açmaktadır.	Çoğu 3B yazıcı, üretim hacmi açısından sınırlıdır. Yani büyük parçalar tek seferde üretilemez ve montaj gerektirebilir. Bu maliyet, işçilik yükünü artırabilir ve parçanın nihai dayanıklılığını etkileyebilir.

ASTM (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu) tarafından eklemeli imalat teknolojileri yedi alt grupta sınıflandırılmıştır [17,18].



Şekil 2.1. ASTM standardına göre eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması

Eklemeli imalat sürecinde Şekil 2.2’de ki diyagramda gösterilen beş temel aşama vardır.

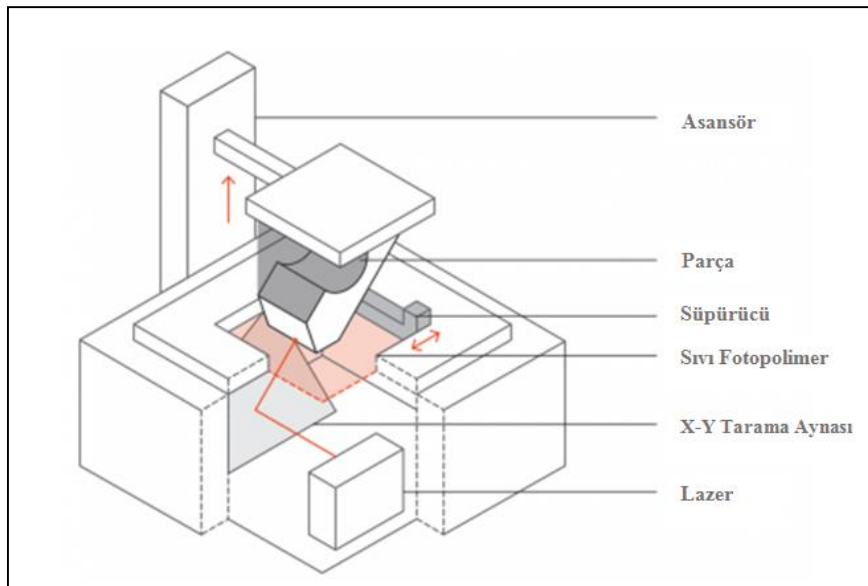


Şekil 2.2. Eklemeli imalat süreci

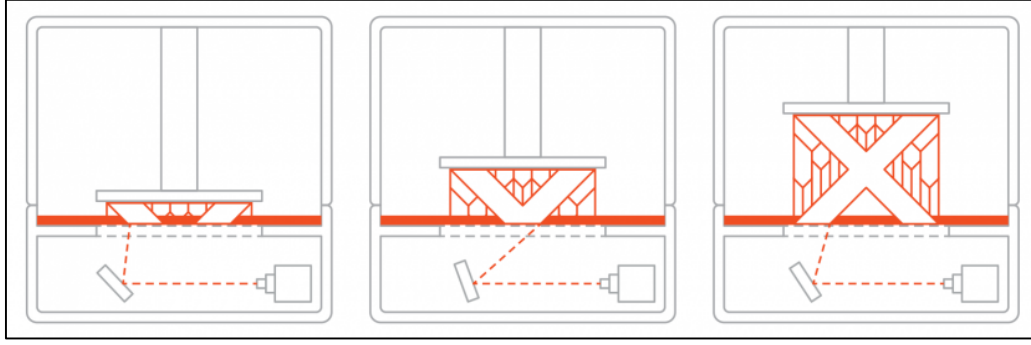
Eklemeli imalat, son kullanım bileşenlerini hızlı bir şekilde üretmesiyle bilinir. Dilimleme işlemi sırasında açıklanan işlem parametresi, katkı maddesiyle üretilmiş bileşenlerin mekanik özelliklerini etkileyecektir. Bu yüzden elde edilmesi istenilen nesneler için işlem parametreleri dikkatli bir şekilde seçilmelidir [20].

1986 yılında Chuck Hull kürlenebilen bir materyalin ince katmanlarını birbirinin üzerine art arda "basmak" suretiyle katı nesneler yapmak için Stereolitografi (SLA) yöntemini geliştirmiş ve patentini almıştır [21]. Eklemeli imalatın en eski yöntemi olan SLA, tüm 3B baskı teknolojileri arasında en yüksek çözünürlük ve doğruluğa, en keskin ayrıntılar ve mükemmel yüzey kalitesine sahiptir [22]. Bu özellikleriyle endüstride oldukça tercih edilen Stereolitografi yöntemi, sıvı reçineyi bir fotopolimerizasyon reaksiyonuyla katılaştırarak 3B nesneler üretir.

Şekil 2.3'te görülen lazer kullanılarak gerçekleştirilen fotopolimerizasyon işleminde ilk olarak tank içine doldurulan sıvı, ultraviyole (UV) ışığı ile reçineyi seçici olarak katılaştırarak ilk katman oluşturulur. Her katman oluşumundan sonra baskı hatası olasılığını en aza indirebilmek için cihazda bulunan süpürücü yardımıyla varsa kabarcıklar ve pürüzlülükler ortadan kaldırılır. Ardından platform aşağı yönde hareket eder ve diğer katmanlar inşa edilmeye devam edilir. Bu işlem daha önce yazılımla dilimlenmiş kesitlere karşılık gelen yola odaklanır ve nesne tamamlanana kadar devam eder [23].



Şekil 2.3. Stereolitografi cihazı



Şekil 2.4. Stereolitografi çalışma prensibi

İnşa süreci tamamlandıktan sonra, bitmiş parçayı elde etmek için birkaç işlem sonrası adıma ihtiyaç vardır [4]. Bunlar:

- Reçine yıkama (Damlayan fazla reçine için parça etil alkol ile yıkanır.)
- Destek kaldırma
- Kürleme (Reçinenin daha fazla sertleşmesi için parça UV ışığına maruz bırakılır.)

İşlem sonrası adımların olması SLA için dezavantaj olarak görülse de lazer ışınının dar boyutları ve kullanılan reçinenin sıkı toleransları nedeniyle tüm boyutlarda son derece hassas olması, iyi yüzey kalitesi, yüksek hız, yeterli doğruluk nedeniyle oldukça avantaj sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde aşırı sertleşme ve sonraki boyutsal yanlışlıklar en aza indirilir [24, 25, 26].

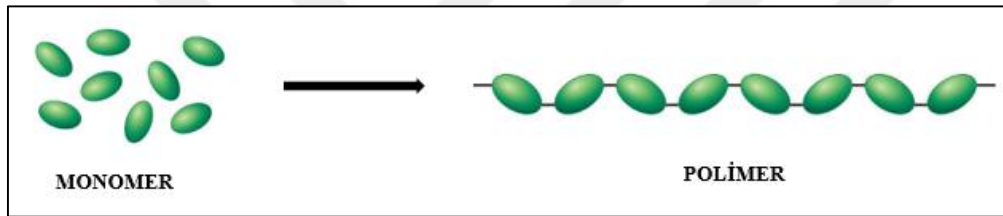
2.2. Polimer Malzemeler

Polimerler geçmişten günümüze endüstride en çok kullanılan malzemeler arasındadır. "Polimer" kelimesi İsveçli kimyager J. J. Berzelius tarafından tanıtılmıştır ve insanlığın polimerlerle tanışması ilk çağlara kadar dayanmaktadır [27]. Günümüzde polimer malzemelerin yerini sentetik polimerler almıştır. Son birkaç yüzyılda insanlar, hem bitkilerin hücre duvarlarını oluşturan malzeme olan selüloz gibi doğal maddeler kullanarak hem de fosil yakıtların sağladığı yüksek karbon atomlarından faydalanarak sentetik polimerlerin nasıl yapıldığını öğrenmişlerdir. Sentetik polimerler, genellikle doğada bulunanlardan çok daha uzun, tekrar eden birimler halinde düzenlenmiş uzun atom zincirlerinden oluşmaktadır. Polimerler bu zincirlerin uzunluğu ve dizildikleri modeller sayesinde güçlü, hafif ve

esnektir. Bu özelliklere ek üretilmek istenen malzemenin nasıl oluşturulacağının bilinmesiyle polimerler hayatımızın önemli parçası haline gelmiştir [28].

2.2.1. Polimerlerin özellikleri

Polimer kavramının tanımlanabilmesi için öncelikle monomer kavramının açıklanması gerekmektedir. Daha karmaşık molekülleri oluşturmak üzere tekrar eden şekilde bir araya getirilebilen küçük moleküllere monomer, monomerlerin kovalent bağlarla birleşmesiyle oluşan daha büyük moleküllere ise polimer denilmektedir. Kelime anlamı "çok parçalı" olan polimerler, birçok tekrarlanan alt birimler içeren uzun molekül zincirlerinden oluşmaktadır [27, 29].



Şekil 2.5. Monomer ve polimerin şematik gösterimi [27]

Belirli sıcaklıklarda birkaç farklı faz geçiş noktasından geçen polimerlerin, geçişler nedeniyle özgül hacimlerinde, mekanik ve fiziksel özelliklerinde değişiklikler meydana gelmektedir. En önemli termal geçiş noktaları, erime sıcaklığı ve camsı geçiş sıcaklığıdır. Bu noktalar çalışma sıcaklığı limitlerini tanımlamak için kritiktir [30].

Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_m)

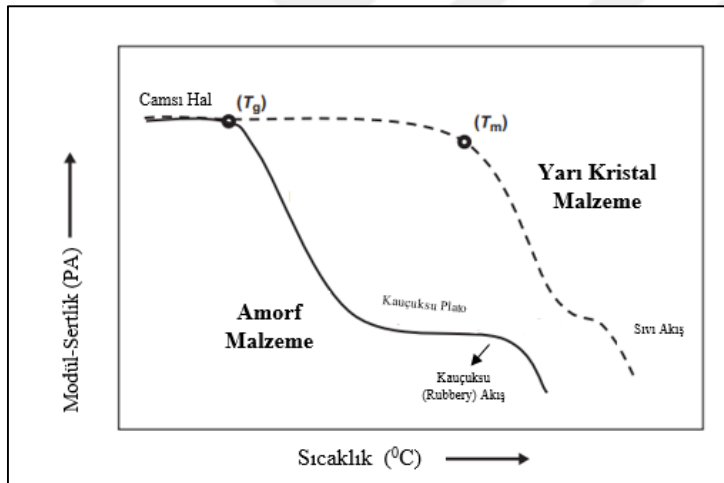
Karbon zincirlerinin hareket etmeye başladığı sıcaklık olan camsı geçiş sıcaklığı, amorf bir katı malzemenin sert, kırılğan bir durumdan yumuşak, kauçuksu duruma dönüştüğü sıcaklığı temsil eder. Bu sıcaklık bir malzeme için çeşitli esnek ve rijit uygulamaların belirlenmesine yardımcı olur [30].

- T_g 'nin üzerinde: Bazı hareketlilik nedeniyle, polimerler kauçuk gibi yumuşak ve esnektir.
- T_g 'nin altında: Malzemelerin moleküler zincirleri yerinde donar ve hareketlilik eksikliği nedeniyle polimerler cam gibi sert ve kırılğandır.

Erime sıcaklığı olarak da bilinen erime noktası, polimerin ısıtıldığında fiziksel olarak katıdan viskoz akışa geçtiği veya bunun tersinin- soğutma üzerine eriyikten katıya geçtiği sıcaklık noktasıdır [30].

- T_m 'nin üzerinde: Katı halden akabilen viskoz sıvı benzeri bir davranışa geçer. Bu faz değişiminde, bir polimer özgül hacimde büyük bir değişiklik yaşar ve polimer zincirleri hareketlilik kazanır.
- T_m 'nin altında: Soğutma yapılırsa malzeme eriyikten katıya geçer.

Bu sıcaklıklar her polimer için farklı değerlerde karşımıza çıkar ve o polimerin karakteristik özelliklerini gösterir. Amorf malzeme sadece camsı geçiş sıcaklığını gösterirken, yarı kristal malzeme hem camsı geçiş hem de erime sıcaklığını gösterir, kristal yapılar sadece erime sıcaklığına sahiptirler.



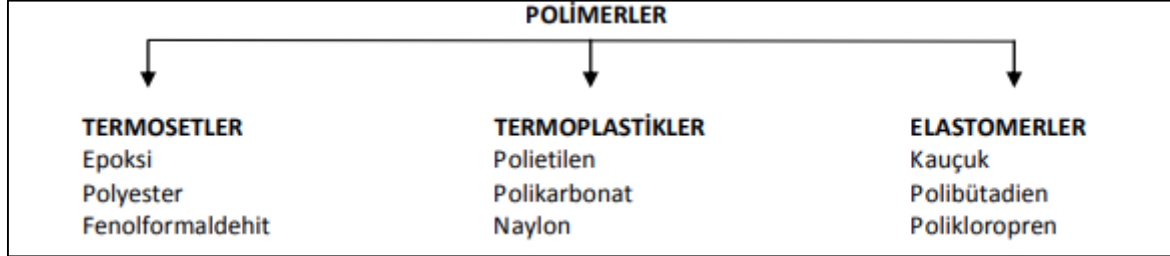
Şekil 2.6. Yarı kristal ve amorf malzemelerin erime ve yumuşama davranışı [31]

Şekil 2.6'da görülen şema, sıcaklık T_g'nin üzerine çıktıkça amorf malzemelerin hızla güçlerini kaybettiğini ve yarı kristal malzemelerin sıcaklık T_m'ye ulaşana kadar mekanik özelliklerini korumaya devam ettiğini gösterir [31].

2.2.2. Polimer malzemelerin sınıflandırılması

Polimerlerde moleküller arasında Van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağı vardır. Bunlar zayıf kuvvetler olmasına rağmen bu kuvvetler tüm polimer zinciri boyunca biriktirici etkiye

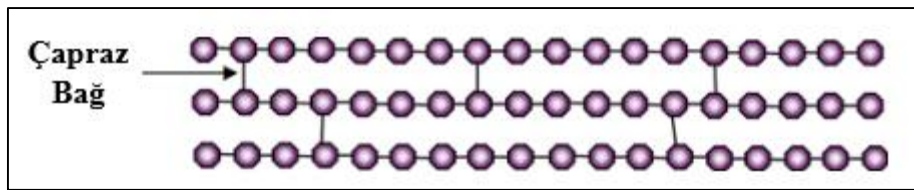
sahiptir. Böylece polimerler, içlerindeki bu moleküller arası kuvvetlerin büyüklüğü temelinde 3 kategoride sınıflandırılır [32].



Şekil 2.7. Polimerlerin moleküler kuvvetlere göre sınıflandırılması [33]

Termosetler

Kalıcı parçalar üretmek, yüksek mukavemet ve sertliğin gerekli olduğu yapısal uygulamalar için kullanılan termosetler, iki veya daha fazla bileşenin ortam koşulları altında birbirleriyle kimyasal olarak reaksiyona girmesiyle veya yüksek oranda çapraz bağlı bir ağ oluşturmak için radyasyon ya da ısı ile indüklenmesiyle oluşur. İlk başta düşük moleküler kütleli yarı sıvı maddeden oluşan bu malzemeler ısıyla sertleşir. Isıyla sertleşen plastiklerin uzun zincirli molekülleri birbirine kovalent bağ yardımıyla bağlanır. Çapraz bağların oluşmasına kürlleme denir [35].

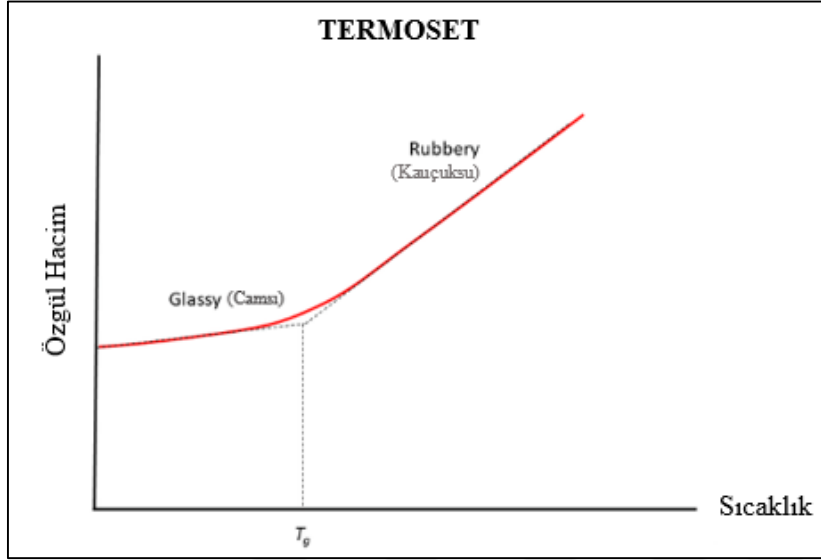


Şekil 2.8. Termosetlerin iç yapısının şematik gösterimi [32]

En yaygın termosetlere örnek olarak; Bakalit, Epoksi Reçine örnek verilebilir. Termoset Polimerlerin temel özelliklerinden bazıları aşağıdaki gibidir [35]:

- Termoset Polimerler, ısıtıldıklarında elastikiyetlerini kaybetmeleri nedeniyle doğası gereği genellikle kırılındır.
- Termosetlerin oluşumu geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Kürlendikten sonra bu polimerler ısı uygulamasıyla yeniden şekillendirilemez.

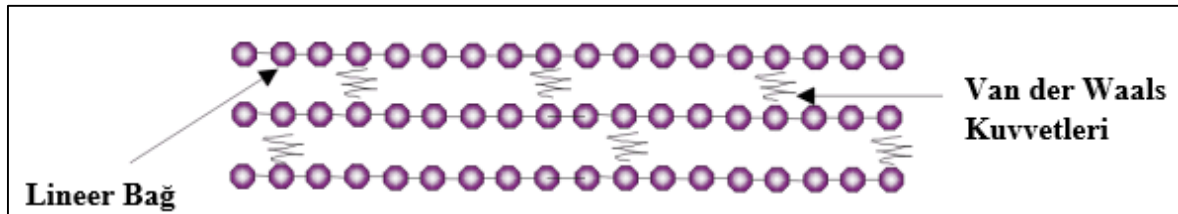
- Termosetin yoğunluğu, polimeri oluşturmak için kullanılan kurucu bileşenlere bağlıdır.
- Termoset plastikler ısıya dayanıklı olma eğilimindedir. Bununla birlikte, yüksek yoğunlukta ısı uygulandığında, erime noktasına ulaşmadan, camsı geçiş sıcaklığının üstündeki bir sıcaklığa ısıtıldığında parçalanır ve ayrışma eğilimi gösterirler.



Şekil 2.9. Termoset polimerler için kritik sıcaklığa bağlı faz geçişleri [30]

Termoplastikler

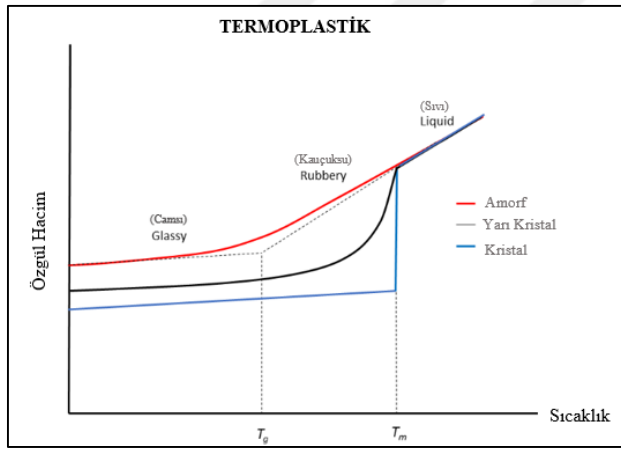
Kolayca kalıplanabildiği için çok çeşitli endüstrilerde kullanılan termoplastikler ısıtıldığında yumuşayarak aktıkları yerde viskoz bir sıvı şeklinde erirler ve soğutuldukça katılaşırlar. Amorf veya kristal yapıları alabilen termoplastiklerde uzun zincirli moleküller lineer bağ biçiminde yer alırlar. Fakat birbirlerine ikincil Van Der Waals kuvvetleriyle bağlanırlar [32, 34]. Sıcaklığın artmasıyla birlikte Van der Waals bağlarının iyice gevşemesi ve camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıkılması ile malzemenin şekillendirilmesi gerçekleşmektedir.



Şekil 2.10. Termoplastiklerin iç yapısının şematik gösterimi [32]

En yaygın termoplastiklere örnek olarak Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polieter Eter Keton (PEEK) ve Polieterimid (PEI) örnek verilebilir. Termoplastik Polimerlerin temel özelliklerinden bazıları aşağıdaki gibidir [36]:

- Termoplastikler, camsı geçiş sıcaklığının üzerinde ısıtıldığında giderek daha yumuşak hale gelirler. Erime sıcaklığının (T_m) üzerinde ise viskoz bir eriyik halinde sıvılaşır.
- Soğutulduğunda tekrar katılaştıran termoplastik polimerler yeniden işleme ve geri dönüşüme izin verecek şekilde birden fazla ısıtma ve soğutma döngüsü ile tekrarlanabilir. Ancak her ısıtma soğutma işleminden sonra yapıda bozulmalar meydana gelebilir. Herhangi bir kimyasal reaksiyon eğilimi olmadığı için hammadde olarak kullanılması uygundur.
- Belirsiz raf ömrü, kısa işlem süresi, yüksek süneklik gibi avantajları olsa da uzun polimer zincirleri nedeniyle nispeten yüksek akış viskozitesine (akması zor) sahip olması dezavantaj olarak gösterilebilir.



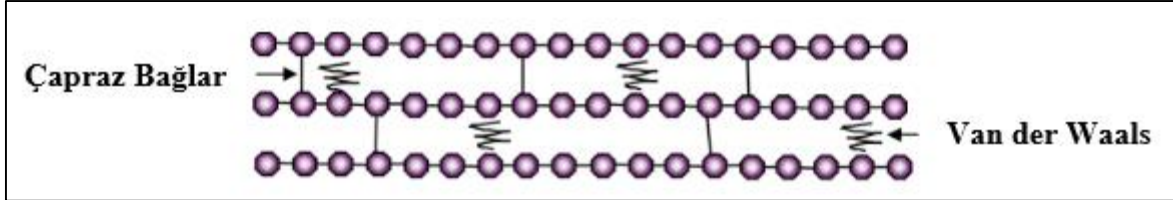
Şekil 2.11. Termoplastik polimerler için kritik sıcaklığa bağlı faz geçişleri [30]

Erime faz geçişi, termoplastiklerin sergilediği bir özelliktir. Termosetler için, temel moleküler çapraz bağ yapılarından dolayı erime ve sonraki akış fiziksel olarak mümkün değildir [30].

Elastomerler

Esnek ve sağlamlığı ile ön planda olan elastomerlerde uzun moleküler zincirler, ara ara çapraz bağlanma ile amorf lineer (doğrusal) bağlanma şeklinde bulunur. Normal şartlarda

uzun moleküler zincirler düzensiz bir şekilde sarılı halde bulunur. Ancak bir kuvvet uygulandığında çekildikleri yönde hizalanırlar ve kuvvet serbest bırakıldığında polimerlerin orijinal konumunu geri kazanmasına yardımcı olan zincirler arasına birkaç 'çapraz bağ' eklenir. Bu çapraz bağlar sayesinde elastomerler orijinal haline geri dönerler [32,34].



Şekil 2.12. Elastomerlerin iç yapısının şematik gösterimi [32]

2.3. Yaşlandırma İşlemi

Polimerler yaşam döngüleri boyunca belirli çevresel koşullara uzun süre maruz kaldıklarında yapılarında değişim meydana gelebilir. Bu değişim polimerlerin özelliklerinde ve performanslarında çoğunlukla geri döndürülemez değişikliklere yol açar ve kullanım sürelerini kısaltır. Sıcaklığa ve zamana maruz kalma düzeyi polimerin yapısında meydana gelebilecek değişikliklerin türünü ve derecesini etkilemektedir. Bu yüzden ürün tasarımcılarının meydana gelebilecek değişiklikleri ve bunlardan doğabilecek sorunları önceden doğru bir şekilde tahmin etme yeteneği kritik bir öneme sahiptir [37].

Polimerlerin uzun vadeli davranışını tahmin edebilmek için yaşlandırma işlemi yapılmaktadır. Yaşlanma terimi genellikle, çevresel faktörlere maruz kalmanın bir sonucu olarak zaman içinde kademeli şekilde gelişen malzeme yapısı, kimyasal doğası veya özelliklerindeki değişiklikleri ifade etmektedir. Yaşlanmanın meydana gelmesinin temel nedeni ısı ve sıcaklıkla polimer yapısında oluşan bozunmadan kaynaklanmaktadır. Meydana gelen pek çok değişiklik topluca “termal bozunma” olarak bilinir. Yaşlanmanın etkisiyle moleküller arası bağlar zayıflamakta ve farklı moleküller oluşmaya başlamaktadır [8].

Bir polimerik malzemenin doğal yaşlanması, güvenilir sonuçlar sağlayabilen tek yaklaşımdır. Fakat bununla birlikte sahada maruz kalma, anlamlı veriler toplamak ve daha sonra güvenilir sonuçlar çıkarmak için uzun analiz süreleri (onlarca yıl) gerektirmektedir. Bu yüzden buna alternatif olarak hızlandırılmış yaşlandırma işlemi yapılmaktadır.

Yaşlandırma işlemi, yüksek sıcaklıklarda yürütülen kısa süreli testler sonucunda polimerlerin düşük sıcaklıklardaki uzun süreli maruz kalmalarını değerlendirilmesine izin verdiği için oldukça önemlidir [37].

Hızlandırılmış yaşlandırma işlemi iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Oda sıcaklığında bekletilerek yapılan işleme doğal yaşlandırma, dış etkenlerle belirli sıcaklık-süre parametrelerine, belirli sayıda döngü boyunca maruz bırakılana ise yapay yaşlandırma işlemi denilmektedir. Yapay yaşlandırma işleminde, bir ürün veya materyalin kullanma sürecinde maruz kalacağı ışık, nem, sıcaklık veya kuvvet gibi dış etkenler normalde karşılaşılandan daha yüksek seviyelerde uygulanarak gerçekleştirilir. Uygun çevre odaları veya özel cihazlar kullanılarak uzun süre maruz kalma nedeniyle aynı parametrelerin polimer üzerindeki etkileri çok kısa bir süre içinde simüle etmeye çalışılır. Böylece polimerik malzemenin dayanıklılık değerlendirmesi için gereken uzun süre azaltılmış olur. Hızlandırılmış yaşlandırma işlemi ürünün hizmet ömrüyle ilgili bilgileri önceden tahmin etme fırsatı sağladığı için büyük bir önem kazanmış ve araştırmalara konu olmuştur [37, 38].

2.4. Gri İlişkisel Analiz

1982 yılında Julong Deng, kısmen bilinen ve kısmen bilinmeyen bilgilerle karar vermeye odaklanan Gri Sistem teorisini kurmuştur. Bilinen ve bilinmeyen bilgiler arasındaki bu bilgilere gri bilgi denilmektedir. Belirsizliğin sayısallaştırmasını amaçlayan bu sistem, eksik veya belirsiz verilere sahip modellere dayalı tüm alanlarda uygulanabilen kısa vadeli zaman serilerini modellemek ve tahmin etmek için kullanılır. Gri sistem teorisinin alt sistemi olan gri ilişkisel analiz (GİA) en yaygın olarak karmaşık sistemlerin çözümünde kullanılır [39].

Gri ilişkisel analiz, incelenmekte olan ve sıralanabilecek nesneleri tanımlayan veri serileri arasındaki benzerlik ve farklılıklar hakkındaki bilgileri kullanır. İncelenen özelliklerin öneminin belirlenmesiyle sonuçlanan ve veri analizini sağlayan bu yöntemde belirlenmiş sıralara veya atfedilen noktalara sahip çalışılan özellikler için incelenen fenomen üzerinde en büyük etkiye sahip olan özellikleri gösteren bir önem dizisinin belirlenmesi sağlanır [40].

Gri İlişki Analizindeki adımlar şunları içerir [41]:

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

Sorunları ve yanıt değişkenlerini tanımlama veya kalite özelliklerinin tanımlanması yapılır. Veri toplanmasıyla birlikte alternatiflerin her bir kriter için alacağı değerleri gösteren karar matrisi hazırlanır.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(m) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & \dots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \quad (2.1)$$

Bu denklem n tane alternatif, m tane kriterden oluşmaktadır. Denklemde yer alan x_{ij} i. alternatifin, j. kriter için aldığı değeri vermektedir.

Adım 2: Normalleştirme (Standardizasyon)

Farklı birimlere sahip olan kriterleri birbiriyle karşılaştırmak için normalleştirme işlemi yapılır. Normalleştirme işleminde büyük, küçük veya ideal değerin seçilmesine göre üç farklı eşitlik kullanılır;

$$x'_i(j) = \frac{x_i(j) - \min_{i=1}^n x_i(j)}{\max_{i=1}^n x_i(j) - \min_{i=1}^n x_i(j)} \quad (\text{büyük değer daha iyi ise}) \quad (2.2)$$

$$x'_i(j) = \frac{\max_{i=1}^n x_i(j) - x_i(j)}{\max_{i=1}^n x_i(j) - \min_{i=1}^n x_i(j)} \quad (\text{küçük değer daha iyi ise}) \quad (2.3)$$

$$x'_i(j) = 1 - \frac{|x_i(j) - x_{idl}(j)|}{\max\{\max_{i=1}^n x_i(j) - x_{idl}(j), x_{idl}(j) - \min_{i=1}^n x_i(j)\}} \quad (\text{ideal değer daha iyi ise}) \quad (2.4)$$

Eşitliklerde yer alan $x_{idl}(j)$ ideal değeri göstermektedir.

Adım 3: Normalleştirilmiş karar matrisinin ve referans serisinin oluşturulması

Bu kısımda adım 2'de elde edilen değerlerden yararlanılarak normalleştirilmiş karar matrisi oluşturulur;

$$X'_{ij} = \begin{bmatrix} x'_1(1) & x'_1(2) & \dots & x'_1(m) \\ x'_2(1) & x'_2(2) & \dots & x'_2(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_n(1) & x'_n(2) & \dots & x'_n(m) \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \quad (2.5)$$

Normalleştirilmiş karar matrisinde bulunan bütün sütunlardaki en büyük değerler kullanılarak referans serisi elde edilmektedir;

$$x'_0 = x'_0(1), x'_0(2), \dots, x'_0(m) \quad (2.6)$$

Adım 4: Fark matrisinin elde edilmesi

Fark matrisi Adım 3'te elde edilen normalleştirilmiş karar matrisinden referans serisinin çıkartılmasıyla bulunmaktadır;

$$\Delta_{0i}(j) = |x'_0(j) - x'_i(j)| \quad (2.7)$$

$$\Delta_{ij} = \begin{bmatrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{01}(2) & \dots & \Delta_{01}(m) \\ \Delta_{02}(1) & \Delta_{02}(2) & \dots & \Delta_{02}(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{0n}(1) & \Delta_{0n}(2) & \dots & \Delta_{0n}(m) \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \quad (2.8)$$

Adım 5: Gri ilişki katsayısının bulunması

Fark matrisindeki bütün değerler için gri ilişkisel katsayı bulunur;

$$\gamma_{0i}(j) = \frac{\min_{i=1}^n \min_{j=1}^m \Delta_{0i}(j) + \zeta \times \max_{i=1}^n \max_{j=1}^m \Delta_{0i}(j)}{\Delta_{0i}(j) + \zeta \times \max_{i=1}^n \max_{j=1}^m \Delta_{0i}(j)} \quad (2.9)$$

Denklemde yer alan “ ζ ” değeri 0 ile 1 arasında bir değerdir (çoğunlukla 0,5 alınır).

Adım 6: Gri ilişki derecesinin bulunması

Gri ilişki derecesi Adım 5’te hesaplanan katsayılar ile ilgili kriterin ağırlığının çarpılıp, her bir alternatif için toplanmasıyla bulunur.

$$\Gamma_{0i} = \sum_{j=1}^m w(j)\gamma_{0i}(j), \quad \sum_{j=1}^m w(j) = 1 \quad (2.10)$$

Denklemden j. Kriterin ait ağırlığını $w(j)$ temsil etmektedir.

Gri ilişki derecesinin her bir alternatif için aldığı değerler büyükten küçüğe doğru sıralandığında, alternatifler en iyiden en kötüye doğru sıralanmış olur.

Bu adımlar sonunda not değerine göre optimum seviye seçilir. Karmaşıklık ve belirsizliğin ortadan kaldırılmasında kullanılan en iyi yollardan biri olan bu yöntemde renklerin durumlarını temsil etmektedir. Buna göre siyahla bilginin olmadığı durum, beyazla bilginin var olduğu durum, griyle ise arada kalan durum ifade edilmektedir [11]. Endüstrinin çoğu alanında kullanılmaya başlayan bu analiz yöntemi sayesinde kısmen bilinen bilgilerden değerli bilgiler üretmek mümkün hale gelmiştir. Yani zayıf tarih veya kısa döngülü sistemlerin olumsuz etkileri GİA aracılığıyla bir dereceye kadar büyük ölçüde azaltılabilmektedir [42].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yaşlandırmanın polimerler üzerindeki mekanik özelliklere etkisini görebilmek adına birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda malzemeler çeşitli yöntemlerle üretilmiş ve farklı koşullarda yaşlandırma işlemine maruz bırakılmıştır. Mekanik testler sonucunda elde edilen sonuçlar yardımıyla polimerlerin uzun vadeli davranışıyla ilgili bilgi sahibi olunmuştur.

Mansour ve arkadaşları SLA için geliştirilen Accura SI40 epoksi reçinesinden ürettikleri numuneleri, kontrollü (karanlık bir kaptaki, %50 bağıl nem ve 20°C sıcaklıkta muhafaza edilmiş) ve kontrolsüz (rafta bekletilmiş) ortamda 24 gün yaşlandırma döngüsünde saklamış, daha sonra bu numunelere çekme, eğilme ve darbe testleri yapmışlardır. Çalışma sonunda yaşlanma ilerledikçe young modülünün %48,36, maksimum çekme geriliminin %46,18, eğilme modülünün %36,3 ve mukavemet gibi özelliklerin arttığını; kopmada yüzde uzamanın %28,41 ve darbe dayanımının %39,7 azaldığını gözlemlemişlerdir [43].

Puebla ve arkadaşları yapı oryantasyonu, yaşlandırma ve ön koşullandırmanın SLA ile üretilmiş malzemeler üzerinde mekanik etkisini araştırmak adına WaterShed™ reçinesini kullanarak farklı yönlerde (düz, bir kenar üzerinde, dik), farklı yaşlandırma sürelerinde (4, 30 ve 120 gün) ve farklı ön koşullandırma (ortam, kurutucu ve ASTM ön koşullandırması) şartlarıyla numuneler üretmişlerdir. Numunelere çekme testi yapmış çıkan sonuçları ANOVA programı ile değerlendirmişlerdir. Bunun sonucunda en kısa zaman diliminde (4 gün) yaşlandırılan numunelerin ve ASTM ön koşullandırmasına tabi tutulan numunelerin en düşük nihai gerilme mukavemetine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak düz inşa edilen numunelerin en düşük nihai gerilme mukavemeti ve elastisite modülü değerine sahip olduğunu, mekanik özelliklerin dikey ve bir kenar üzerinde üretilenlerden istatistiksel olarak farklı olduğu kanısına varmışlardır. Dikey yönde oluşturulan numuneler en yüksek nihai gerilme mukavemeti ve elastisite modülü değerine sahip olduğunu ancak bir kenar üzerine inşa edilen numunelerin mekanik özelliklerinin dikey olarak oluşturululardan istatistiksel olarak farklı olmadığı sonucuna ulaşmışlardır [44].

Tröger ve arkadaşları akrilat bazlı reçinelerin yaşlanma davranışını tanımlayabilmek ve polimerler üzerindeki etkilerini araştırmak için FlexSLw SE/SM-25, FlexSLw SE/SM-1500 ve SL Y-C 9300 reçinelerini kullanarak SLA yöntemiyle özel bir test modeli (3mat-Xtree)

tasarlamışlardır. Baskı işlemi sonrası her bir taraf için FlexSLw-1500, SLY-C9300 reçine modellerine 20 dakika ve FlexSLw-25 reçinesi modeline 45 dakika kürleme işlemi yapmışlardır. Modelleri termal hava akışlı fırın kullanarak saatte 30 kez hava değişimi ile 7 gün boyunca 70°C'lik yaşlandırma sıcaklığına maruz bırakmışlardır. Bunun sonucunda genel yaşlanma süreci boyunca esnekliğin kaybolduğunu, Young (Elastisite) modülü FlexSLw-1500 ve SLY-C 9300 malzemesi için %10 aralığında azalırken yumuşak malzeme FlexSLw-25 malzemesinde yaklaşık %5,6'lık artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Kopma uzaması FlexSLw-1500 için %40, SLY-C 9300 için %11,3 ve FlexSLw-25 için %13,9 azalmıştır. Gerilme mukavemeti, FlexSLw-1500 için %11 ve FlexSLw-25 için %14,9'luk bir düşüş gösterirken SLY-C-9300 için gerilme mukavemetinde önemli bir değişiklik göstermediği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte yaşlanmadan sonra numunelerin renk değiştirdiğini gözlemlemişler ve destekli üretilen yapılarda, destek yapısının çatlaklara neden olabileceği kanısına varmışlardır[45].

Marin ve arkadaşları metakrilatlanmış reçine kullanılarak SLA yöntemiyle üretilen numunelere farklı sıcaklıklarda (45, 60 ve 75 °C) farklı sürelerde (5, 15, 30 ve 60 dk) UV ikincil kürleme işlemi uygulamışlardır. Daha sonra bu numuneleri tezgah üstü sıcaklık ve nem kabini kullanarak düşük/yüksek sıcaklık adım döngüsüyle yapay olarak yaşlandırmışlardır. Toplam 12 saat süren bu işlemde numunelere, 2 saat -20 °C 'den 50°C 'ye ısıtma rampası, 4 saat 50°C 'de sabit sıcaklık, 2 saat 50°C 'den 20°C 'ye soğutma rampası, 4 saatte -20 °C sabit sıcaklık uygulanmıştır. Numuneler 7, 14 ve 28 günlük yaşlandırmadan sonra test edilmiştir. Testler sonucunda düşük ve orta sıcaklıkta (45°C ve 60 °C) uzun süreli (60 dakika) UV kürlemenin en iyi mekanik performansın yanı sıra kırılma dayanımı da artırdığını gözlemlemişlerdir. Bu yüzden 60 °C'de 30 dakika süreyle yapılan işlemin tamamen kırılma dayanımı olmayan mekanik mukavemeti optimize etmek için en iyi yol olduğu kanısına varmışlardır. Öte yandan, yüksek sıcaklıkta (75 °C) gerçekleştirilen kürleme işlemlerinin çoğunun, reçine örneklerinde kırılmaya yol açtığı saptanmıştır. Ayrıca, kısa süreli (5 dakika) ve yüksek sıcaklıkta (75 °C) uygulanan UV kürlemenin, reçinenin mekanik özelliklerini zirveye çıkardığı; ancak daha uzun süreli maruz kalmaların, nihai yükte belirgin bir azalma ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir [46].

Wu ve arkadaşları polimer reçinelerin, yüksek sıcaklıklara veya UV'ye maruz kaldıklarında sararma sorunu yaşamalarını ele alarak çalışmalarında epoksi ve vinil ester reçinelerini kullanarak termal, UV ve doğal yaşlanma koşullarında sararma mekanizmalarını ve

etkileyen faktörlerini incelemişlerdir. Hava izolasyonu, antioksidan , UV soğurucu gibi sararma önleyici yöntemler seçmişler ve etkinliklerini değerlendirmişlerdir. Yaşlandırmadan önce ve sonra reçineler, sararma indekslerini, yüzey morfolojisini , ağırlık kaybını, mekanik özelliklerini (örn. modül ve Vickers sertliği), camsı geçiş sıcaklığını ve FTIR spektrumlarını analiz etmek üzere karakterize edilmiştir. Termal yaşlandırma için numuneler çeşitli süreler boyunca 150 °C'lik sabit bir sıcaklığa, UV yaşlandırma için numuneler çeşitli sürelerde 0,77 W m⁻² nm⁻¹ UV'ye ve doğal yaşlandırma için numuneler dış ortama konularak çeşitli sürelerde doğal ortamda sıcaklığa ve UV'ye maruz bırakılmıştır. Karşılaştırma amacıyla kontrol grubu da havadan veya UV'den izole edilmiş vakum poşetindeki örneklerle hazırlanmıştır. Buna göre Vinil esterin epoksiden daha iyi sararma direncine sahip olduğu, antioksidan ve UV soğurucunun sararma önleyicilik açısından etkili değilken hava izolasyonunun en iyi performansı gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca aynı yaşlandırma süresinde, termal yaşlandırmanın en koyu rengi verdiği, bunu UV yaşlandırmanın izlediği ve doğal yaşlanmanın en açık sararma rengine sahip olduğu gözlemlenmiştir [47].

Şahbaz ve arkadaşı enjeksiyon makinesinde yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemeden numuneler elde etmiş, üretilen numunelere fırın içerisinde 90 °C sıcaklıkta 96 saat yapay yaşlandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Yaşlandırma yapılan ve yapılmayan numunelere çekme, üç nokta eğilme, basma, yırtılma ve sertlik ölçüm deneyleri yapmışlardır. Buna göre yaşlandırma yapılan numunelerin çekme deneyi sonucu elastisite modülü ve çekme dayanımında artış görmüş olup buna karşın kopma uzaması değerlerinde belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Üç nokta eğilme deneyi sonuçlarında ise yaşlandırma işleminin eğilme dayanımı ve eğilmede elastisite modülü değerlerini belirgin bir şekilde arttırdığını görmüşlerdir. Basma deneylerinde benzer şekilde basma dayanımı ve basmada elastisite modülü değerlerini arttırdığı buna karşın yırtılma deneyinde yırtılma direncinin düştüğünü belirlemişlerdir. Sertlik ölçüm deneylerinde de ise yapay yaşlandırma yapılan numunelerin sertlik değerlerinde artış gözlemlendiği sonucuna varılmıştır [48].

Aktitiz ve arkadaşları SLA yöntemi ile ürettikleri polimer parçalara farklı sürelerde (30, 60, 180 ve 300 dk) UV ikincil kürlleme işlemi uygulayarak ikincil kürlleme süresinin polimer yapıların mekanik (çekme testi, çentik darbe testi) ve termal (diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi) özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çekme testi sonucunda işlem uygulanmış polimerlerin elastisite modülü değerinde yaklaşık %49'luk bir artış

gerçekleştiğini ve maksimum çekme dayanımının 63,71 MPa mertebelerine ulaştığını; çentik darbe testi sonucunda darbe dayanımının 20,58 kJ/m² seviyelerinden 2,25 kJ/m² seviyelerine düştüğünü yani kürlleme süresi ile birlikte polimer yapılarında reaksiyona girmiş polimer zinciri seviyesinin artmasıyla malzemelerin daha gevrek davranış sergilemesine sebebiyet verdiği görülmüştür. DSC analiz sonuçlarında ise 180 dakika ve üzeri ikincil kürlleme proseslerinin karbon-karbon çift bağlarının oluşması için yeterli olduğu kanısına varmışlardır [6].

R. Turan ve arkadaşları SLA yöntemi ile farklı doluluk oranlarına sahip (%25, %50 ve %100 doluluk) çekme ve basma numuneleri üreterek doluluk oranının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, %25, %50 ve %100 doluluk oranının, SLA tabanlı 3B yazıcı ile üretilen çekme ve basma numunelerinin mekanik özellikleri üzerinde etkisi olduğunu, kullanılan doluluk oranları arasından en yüksek çekme ve basma mukavemetinin %100 doluluk oranında olduğu belirlemişlerdir. Bu değerler sırasıyla 10,095 MPa ve 10,098 MPa'dır. Ayrıca ortalama çekme ve basma mukavemeti değerlerinin doluluk oranı arttıkça yükseldiğini gözlemlemişlerdir [49].

Zirak ve arkadaşları SLA hızlı prototipleme fotosensitif reçinesini kullanarak farklı alt yapı yönelimlerinin termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, kürlenmiş reçinenin mekanik özelliklerinin farklı alt yapı yönelimleriyle değiştirildiğini göstermektedir. Maksimum polimerizasyon miktarı için maksimum çekme dayanımının sırayla en fazla 45°C, 0°C ve 90°C alt yapı konumlarında elde edildiği kanısına varmışlardır [50].

Ambrosio ve arkadaşları SLA teknolojisiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerinde farklı üretim parametrelerinin (yapı yönü, katman kalınlığı ve kürlleme sonrası süre) etkisini üç farklı reçine (S-Pro, X-Green, ABS) kullanarak araştırmışlardır. Sonuçlar reçinelerin farklı kimyasal bileşimlerinin yanı sıra mekanik özellikler (nihai çekme dayanımı, Young modülü, kopma uzaması) üzerindeki en etkili faktörün yapı yönü olduğunu göstermiştir. Yapılan testler sonucunda maksimum çekme mukavemeti değeri S-Pro ve X-Green için enine yapı yönünde elde edilirken ABS için uzunlamasına yapı yönünde elde edilmiştir [51].

Liu ve arkadaşları SLA ile üretilen parçalarda yapı yönünün mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Numuneler düz veya bir kenar üzerinde, eksen ve yapı açısıyla

farklı yapı yönelimleriyle üretilmiş ve çekme, basma, darbe testleri yapılmıştır. Sonuç olarak yerleşim planının çekme ve darbe özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu, yapı açılarının basınç dayanımında önemli faktör olduğu ve eksenin çekme ve darbe özelliklerinde önemli etkisinin olmadığı kanısına varmışlardır. Ayrıca numunelerin düz olarak üretilmiş parçalarının kenarda üretilene göre daha iyi mekanik sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [52].

Rios ve arkadaşları SLA ile biyouyumlu bir dental reçine kullanarak implant cerrahi kılavuzlarının baskı yönünün (0°C, 45°C, 70°C ve 90°C) depolama koşullarının (açık ve koyu ayar) ve depolama süresinin (0, 1, 7 ve 14 gün) gravür yüzey doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda 0 derecelik baskı yönünün test edilen baskı yönleri arasında en yüksek üretim doğruluğunu gösterdiği; 90 derecelik baskı yönünün, değerlendirilen baskı yönleri arasında en düşük üretim hassasiyetini elde ettiği sonucuna varılmıştır [53].

Revilla-Leon ve arkadaşları eğimli stereolitografi (TSLA) ile üretilen reçine-seramik kronların farklı baskı yönlerinin (0°C, 45°C, 75°C ve 90°C) oyma yüzey doğruluğu (gerçeklik ve hassasiyet) üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Buna göre test edilen baskı yönelimleri arasında, numunelerin çukur yüzeylerinde en iyi üretim doğruluğu ve hassasiyet değerlerinin 0 derece baskı yöneliminde olduğu ve numunelerin çukur yüzeylerinde en düşük üretim doğruluğu ve hassasiyet değerlerinin 90 derecelik baskı yöneliminde olduğunu gözlemlemişlerdir [54].

Arjun ve arkadaşları PLA malzemesini kullanarak FDM yöntemiyle üretilen numuneleri fırında dört farklı sürede (30, 60, 120 ve 240 dakika), dört farklı sıcaklık (65, 95, 125 ve 155 °C) uygulayarak sıcaklığın malzemenin çekme dayanımına etkisini incelemişlerdir. Yapılan işlemler sonucunda 95°C'de 120 dakika tavlamanın çekme mukavemetini iyileştirdiği, numunenin nihai çekme dayanımının optimize edilmiş sıcaklık koşullarında %14 arttığı gözlemlenmiştir [55].

Bhandari ve arkadaşları 3B baskılı malzemelerin katmanlar arası yapışma mukavemeti tepkisinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve bu malzemelerin mekanik performans sınırlamasının üstesinden gelmek için termal analiz yapmışlardır. Bunun için FDM yöntemi kullanarak karbon fiberle güçlendirilmiş PLA ve PETG malzemesiyle

numune basmışlar ve dinamik mekanik analiz (DMA) ile malzemenin camsı geçiş sıcaklığını ölçerek buna göre tavlama sıcaklığını belirlemişlerdir. Fırın kullanarak iki farklı sıcaklık (90 ve 110 °C) ve 4 farklı sürede (0, 30, 240 ve 480 dakika) numuneler tavlannmış bunun sonucunda tavlama yoluyla son işlemenin, 3B baskılı kompozitlerin azaltılmış katmanlar arası gerilme mukavemetinin geri kazanılmasında etkili olduğunu bulmuşlardır. Aynı zamanda bu işlemin ara katman Young (Elastisite) modülünü ve sünekliğini arttırdığını gözlemlemişlerdir [56].

Valvez ve arkadaşları FDM yöntemi kullanarak karbon ve aramid elyaflarla güçlendirilmiş PETG malzemesiyle numune basmış, bu numuneleri fırında üç farklı sıcaklık (90, 110 ve 130 °C) ve üç farklı süreye (30, 240 ve 480 dakika) maruz bırakarak mekanik özelliklerdeki değişimi incelemişlerdir. Sonuç olarak incelenen malzemeler ne olursa olsun, en iyi mekanik özelliklerin en yüksek sıcaklık ve en uzun maruz kalma süresi için elde edildiğini, ancak yüksek geometrik bozulmalar nedeniyle 90°C'lik bir sıcaklık ve 30 dakikalık sürenin daha etkili olduğu kanısına varmışlardır [57].

Jayanth ve arkadaşları PLA malzemesini kullanarak FDM yöntemiyle çekme numuneleri üretmişlerdir. Numuneleri belirledikleri 3 farklı sıcaklık (90, 100 ve 120 °C) ve üç farklı sürede (60, 120 ve 240 dakika) sıcak hava fırınında bekletmişler, süre bitiminde numuneler oda sıcaklığına soğuyana kadar fırının içerisinde tutmuşlardır. Yapılan ekme ve ısıl bozulma sıcaklık testi sonucunda sıcaklığa maruz bırakılan numunenin orijinale göre mukavemetinde ve ısıl bozulma sıcaklığında kayda değer bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. 100 °C'de 240 dakika bekletilen numuneden alınan değerler mümkün olan en iyi iyileşmeyi elde etmek için en iyi olası durum olduğunu göstermektedir [58].

Coşkun yaptığı çalışmada sıcaklık ve bekleme süresi değişkenleri uygulanarak numunenin yk dayanımının arttırılıp arttırılamayacağı araştırmıştır. Bunun için FDM yöntemiyle PLA+ malzemesi kullanılarak çekme numuneleri üretilmiş farklı sıcaklıklarda (100 °C, 150 °C, 200 °C) ve farklı sürelerde (30 dakika, 60 dakika, 90 dakika) sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Elde edilen verilere göre sıcaklık ve bekletme srelerindeki değişimin; akma mukavemet değerleri, kopma, gerilme, elastikiyet modülü, çekme mukavemeti değerlerinde bir düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir [59].

Özdemir, gerçekleştirdiği çalışmada FDM yöntemini kullanarak farklı doluluk oranlarına sahip numuneler üretmiştir. Malzemenin sıcaklık ve süreye bağlı olarak gösterdiği davranışı incelemek amacıyla, numuneleri üç farklı sıcaklık (100 °C, 150 °C, 200 °C) ve üç farklı süre (30 dakika, 60 dakika, 90 dakika) boyunca sıcak hava fırınında bekletmiştir. İşlem gören numuneler, boyutsal değişim açısından gözlemlenmiş ve çekme testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, doluluk oranının artmasıyla çekme dayanımında belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiş, ancak süreye bağlı olarak numunelerin geometrik ölçülerinde azalma ve yüzeylerinde deformasyon meydana geldiği tespit edilmiştir [60].





4. MATERİYAL VE YÖNTEM

4.1. Deney Malzemeleri

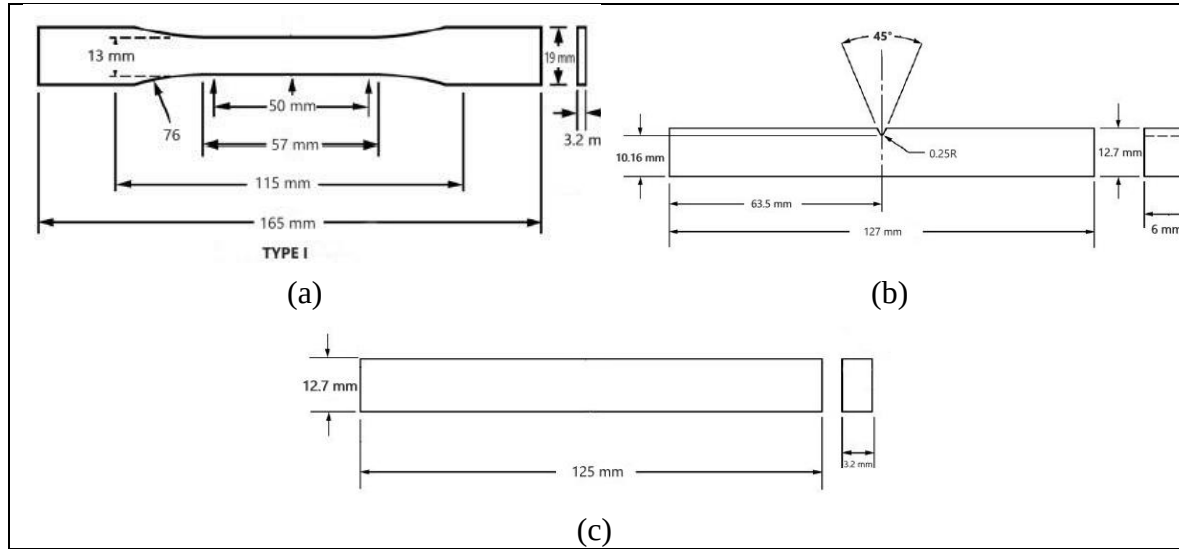
Tez kapsamında modellerin yazıcıda üretilmesi için Anycubic UV Gri Fotopolimer Reçine tercih edilmiştir. Bu malzemenin genel özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Üretici firmadan alınan bilgilere göre malzemenin camsı geçiş sıcaklığı 60 °C’dir.

Çizelge 4.1. Anycubic UV Gri Fotopolimer Reçine Özellikleri [61]

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

4.2. Deney Numunesi Tasarımı ve Üretim Parametreleri

Mekanik özellikleri değerlendirmek için SLA yöntemi ile çekme, üç nokta eğme ve charpy çentik darbe test numuneleri sırasıyla ASTM D638 [62], ASTM D790 [63] ve ASTM D6110 [64] standartlarına göre üretilmiştir. Elde edilen mekanik özellik değerlerinin güvenilir olduğundan emin olmak amacıyla her set için üç numune hazırlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan test numunelerinin teknik çizimleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



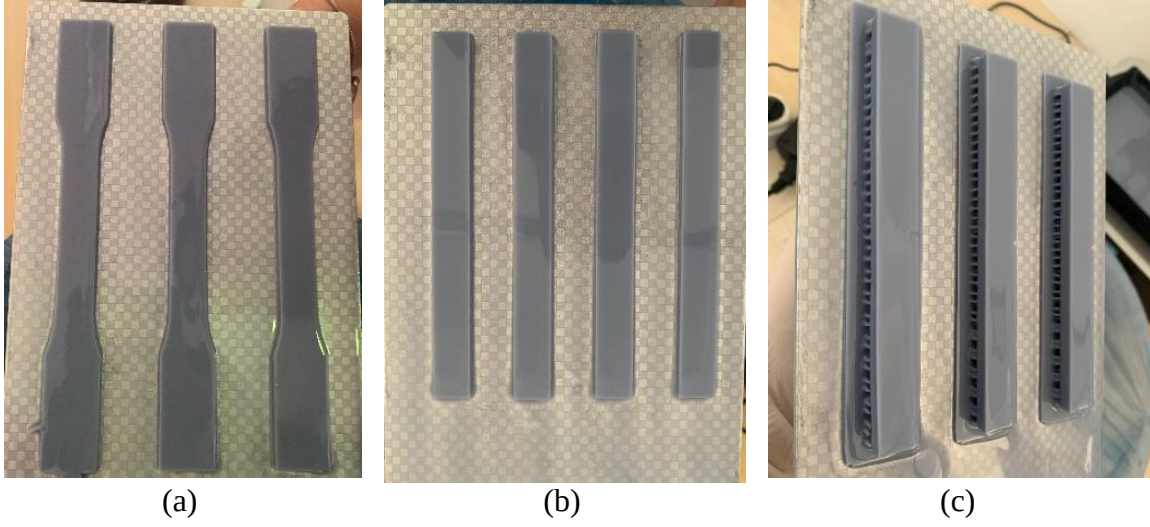
Şekil 4.1. Test numunesi boyutları; a) çekme deneyi b) charpy deneyi c) üç nokta eğme deneyi

Solidworks CAD programı kullanılarak Şekil 4.1’de gösterilen standart boyutlarına göre test numuneleri modellenmiştir. CAD programında tasarlanan yapılar Photon_WorkShop programı kullanılarak STL dosyası formatında dışarı aktarılmıştır. Numunelerin basımında Şekil 4.2’de verilen Anycubic Photon Mono X SLA yazıcısı kullanılmıştır. Cihaz parametreleri, üreticiden alınan bilgiler doğrultusunda çalışmaya uyarlanmış ve 0,05 mm katman kalınlığı, 2 s normal pozlama süresi, 40 s alt pozlama süresi olacak şekilde ayarlanmıştır [61].



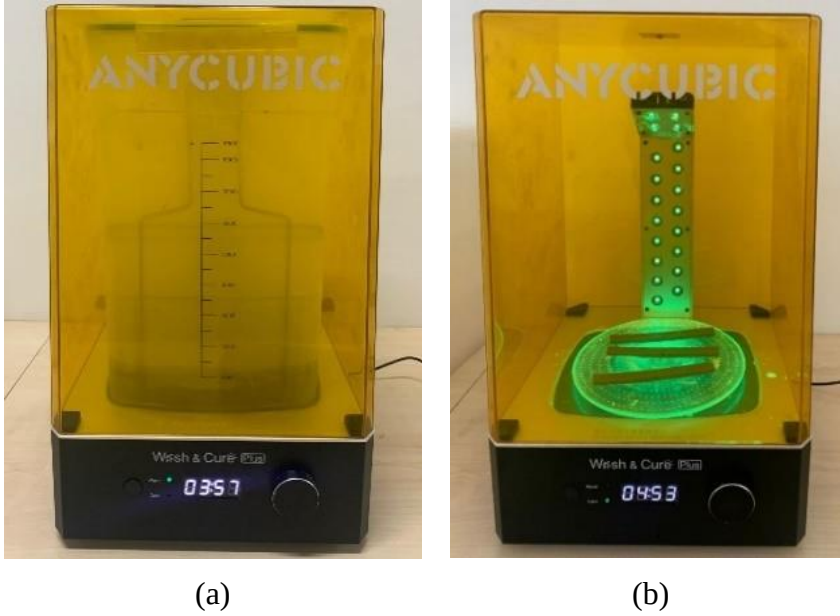
Şekil 4.2. LCD tabanlı SLA baskı cihazı [65]

Çekme ve üç nokta eğme test numuneleri düz yapı yöneliminde (0 °C) desteksiz üretilirken; Charpy test numunesi çentikli olduğu için düz yapı yöneliminde (0 °C), platformdan 8mm yukarıda destek kullanılarak üretilmiştir. Modelin tabladaki konumu katman sayısını etkilemektedir. Modelin platform yüksekliği arttıkça katman sayısı da artmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar 0 °C baskı yönünün daha iyi sonuçlar verdiğini kanıtlamaktadır [6, 52, 53, 54]. Üretilen test numuneleri Şekil 4.3’te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Üretilen örnek test numuneleri

Basımı tamamlanan test numunelerinin yüzeyinde reaksiyona girmemiş reçinelerin giderilmesi için Şekil 4.4a'da verilen yıkama cihazında %99,9 saflıkta izopropil alkol kullanılarak 4 dk yıkanmıştır. Ardından Şekil 4.4b'de verilen kürleme cihazında 5 dakika boyunca UV ışın altında kürlenmiştir. Üretimi tamamlanan numunelerin boyutları yaşlandırma işlemi öncesinde dijital kumpas ile ölçülmüştür.



Şekil 4.4. Yıkama ve kürleme cihazı; a) yıkama cihazı b) kürleme cihazı [65]

4.3. Yaşlandırma İşlemi

Aynı parametrelerde üretilen numuneler, farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtılma maruz bırakılarak malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu işlem için Gazi Üniversitesi Teknolojisi Fakültesi laboratuvarlarında bulunan Protherm Furnaces marka fırın kullanılmıştır. Fırının sahip olduğu kontrol ekranı ve sıcaklık algılama sensörleri, sıcaklık ölçümlerinin doğruluğunu güvenilir bir şekilde sağlamaktadır.

Cihaz ve test düzeneği Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Numunelerin fırın taşına doğrudan temasını engellemek amacıyla çelik bir kolon kullanılmış, sıcaklığın homojen bir şekilde dağılımını sağlamak için ise ızgara tel tercih edilmiştir.



Şekil 4.5. Protherm Furnaces marka 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. Çizelge 4.2'de deney setlerinde yer alan değerler gösterilmiştir. Her deney üç tekrarlı test şeklinde gerçekleştirilmiştir.

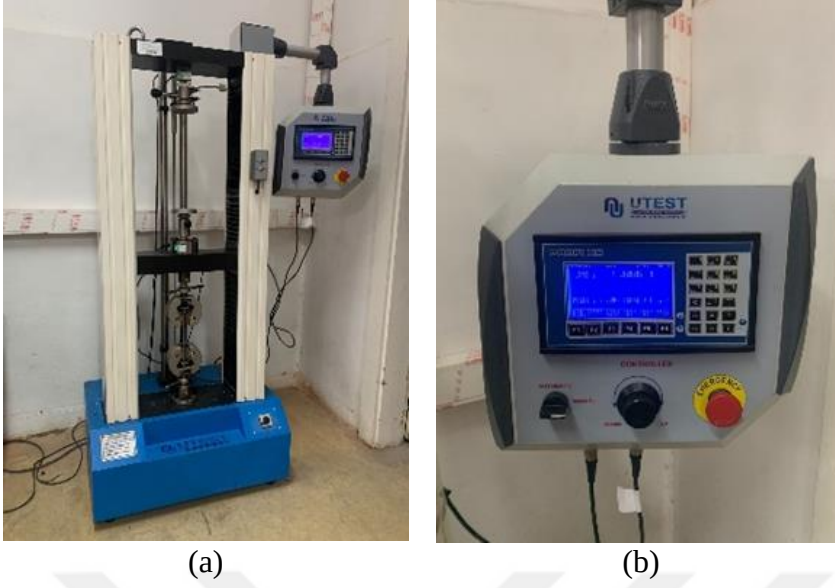
Çizelge 4.2. Deneysel tasarım

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.	-	-

4.4. Çekme Test Cihazı ve Test Süreci

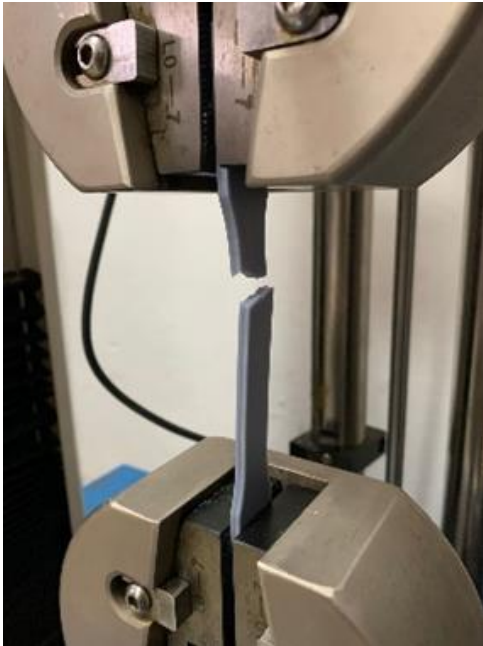
Çekme testi, mühendislik malzemelerinin çeşitli yükler altında deformasyon (uzama) ve dayanım davranışlarını ölçerek, malzemenin mekanik özelliklerini anlamamıza olanak tanır. Endüstriyel üretim süreçlerinde, malzeme performansının zaman içinde tutarlılığının sağlanması, nihai ürünlerin dayanıklılığı ve güvenliği açısından büyük önem taşır. Bu test, plastik malzemelerin çekme dayanımını, elastik modülünü, uzama kapasitesini ve kırılma noktasını belirleyerek, malzemenin fiziksel özelliklerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. Elde edilen veriler, malzeme seçiminde, üretim süreçlerinde kalite kontrolünün sağlanmasında ve nihai ürünlerin standartlara uygunluğunun denetlenmesinde kritik bir rol oynar.

Bu çalışmada çekme testleri, ASTM D638 (Tip-I) standardına uygun olarak, 10 kN kapasiteli UTEST Profi X6 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın görseli Şekil 4.6'da sunulmaktadır.



Şekil 4.6. Utest Profi X6; a) çekme test cihazı b) kontrol ünitesi

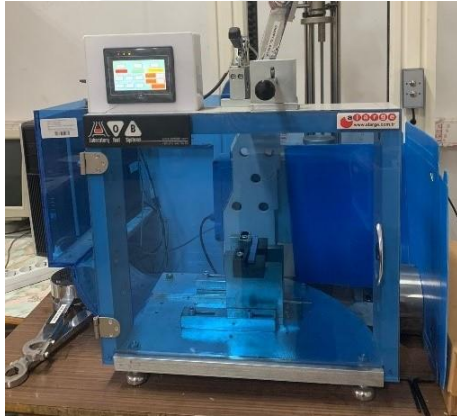
Şekil 4.1a'da verilen ölçülere göre hazırlanan numuneler, Şekil 4.7'de gösterildiği gibi cihaza bağlanarak 5 mm/dk. çekme hızı uygulanmıştır. Test sonucunda elastisite modülü (MPa), maksimum yük (N), kopma uzaması (%), akma dayanımı (N/mm²) gibi mekanik verilere ulaşılmıştır. Bu veriler kullanılarak, her bir numuneye ait mühendislik gerilme-gerinim (stress-strain) grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.7. Çekme test numunesinin cihaza bağlanmış görseli

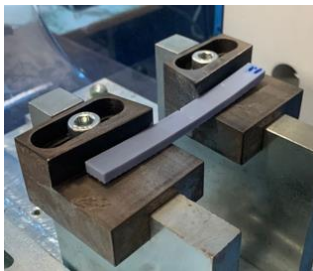
4.5. Charpy Çentik Darbe Testi Cihazı ve Test Süreci

Charpy çentik darbe testi, polimer malzemelerin ani darbelere karşı dayanıklılıklarını ve kırılma esnasında enerji absorpsiyon kapasitelerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, Charpy çentik darbe testleri ASTM D6110 standardına uygun olarak, Şekil 4.8’de gösterilen Alarge marka sarkaçlı darbe test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test sırasında emilen enerji, sarkacın darbe öncesi ve sonrası yüksekliği arasındaki fark ile orantılı olup, kullanılan cihaz tarafından bu değer otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu yöntem, özellikle polimer malzemelerin ani darbe ve şok yükleri altındaki mekanik davranışlarının incelenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

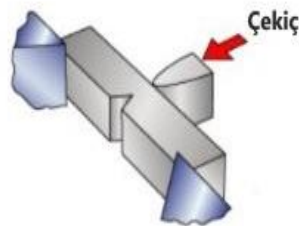


Şekil 4.8. Alarge darbe test cihazı

Şekil 4.1b’de belirtilen ölçülere göre hazırlanan test numuneleri, Şekil 4.9’da gösterilen şekilde test cihazına yerleştirilmiş ve deneyler, 5 Joule enerji kapasiteli çekiç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen veriler doğrultusunda, yaşlandırma işleminin numunelerin darbe dayanımı üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir.



(a)



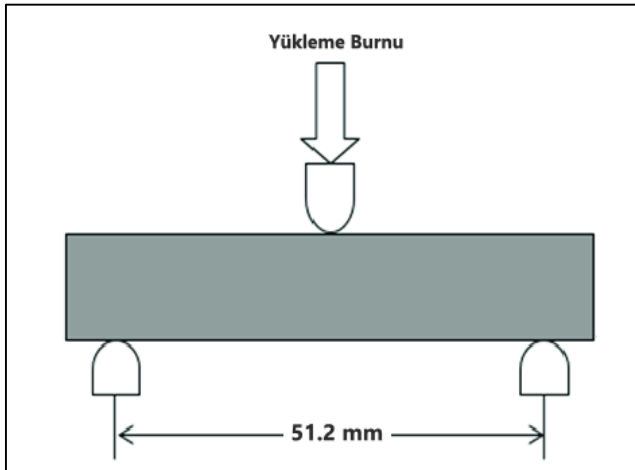
(b)

Şekil 4.9. Charpy çentik darbe test numunesinin cihaza bağlanmış görseli

4.6. Üç Nokta Eğme Testi Cihazı ve Test Süreci

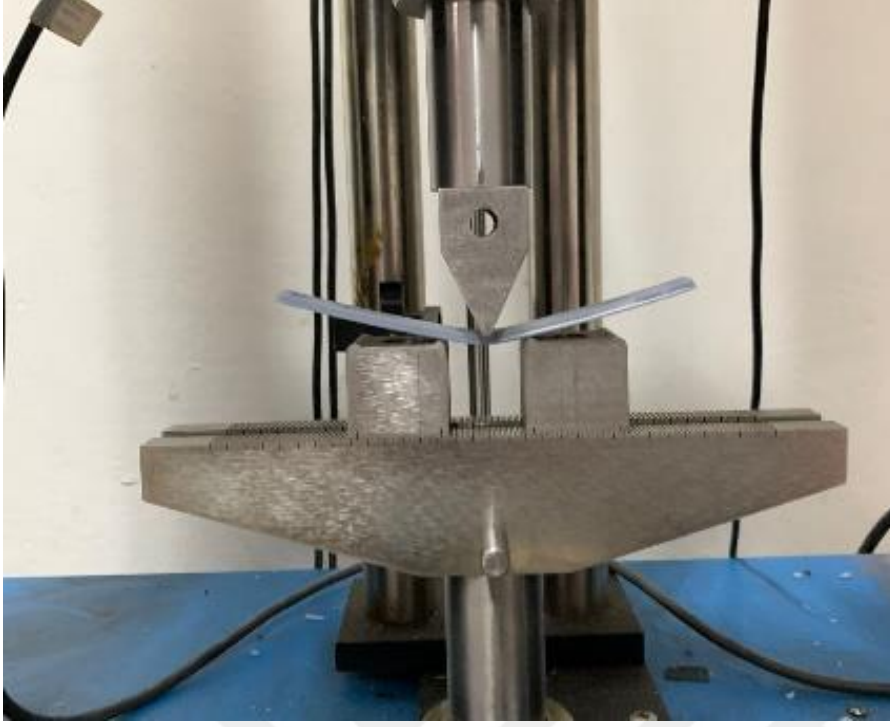
Üç nokta eğme testi, plastik malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu test, özellikle plastiklerin bükülme dayanımı, elastik modülü ve kırılma davranışları hakkında bilgi sağlamaktadır. Test sırasında numune, iki destek noktasına yerleştirilir ve ortasından bir kuvvet uygulanarak eğilmeye zorlanır. Test sürecinde, numunenin deformasyonu ve kırılma noktası kaydedilerek malzemenin mekanik performansı analiz edilmektedir. Ayrıca bu yöntem, malzeme homojenliği, üretim hataları ve yaşlanma süreçlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla da kullanılmaktadır. Testin uygulanması nispeten kolay ve maliyet etkin olduğu için, plastiklerin kalite kontrol ve malzeme geliştirme süreçlerinde sıklıkla tercih edilir.

Bu çalışmada üç nokta eğme testleri, ASTM D790 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Şekil 4.6’da gösterilen UTEST Profi X6 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Standarda göre, destek açıklığı ile numune derinliği arasında 16:1 oranı sağlanması gerekmektedir. Bu oran temel alınarak gerekli hesaplamalar yapılmış ve Şekil 4.10’da verilen test düzeneği hazırlanmıştır.



Şekil 4.10. Üç nokta eğme test düzeneği

Şekil 4.1c’de verilen ölçülere göre hazırlanan numuneler, Şekil 4.11’de gösterildiği gibi cihaza yerleştirilmiş ve 2 mm/dk. ilerleme hızı uygulanmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, yaşlandırma işleminin eğilme modülü üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.



Şekil 4.11. Üç nokta eğme test numunesinin cihaza bağlanmış görseli



5. DENEYSEL BULGULAR

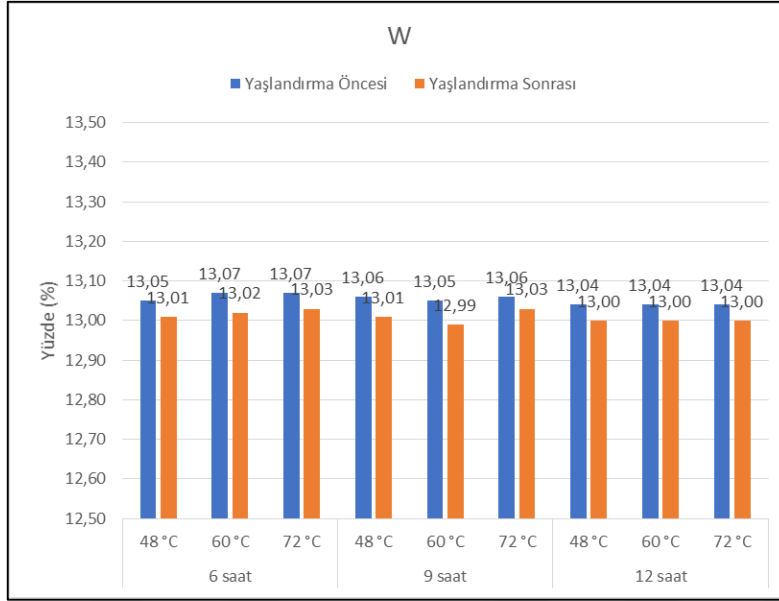
Bu bölümde, tez kapsamında gerçekleştirilen testlerin sonuçları değerlendirilmiş; işlem görmüş ve görmemiş numuneler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafikler ile yorumlanmış ve literatürdeki diğer çalışmalarla ilişkilendirilerek analiz edilmiştir.

5.1. Yaşlandırma İşlemi Sonrası Numune Ölçülerinin Geometrik Toleransında Meydana Gelen Değişimlerin İncelenmesi

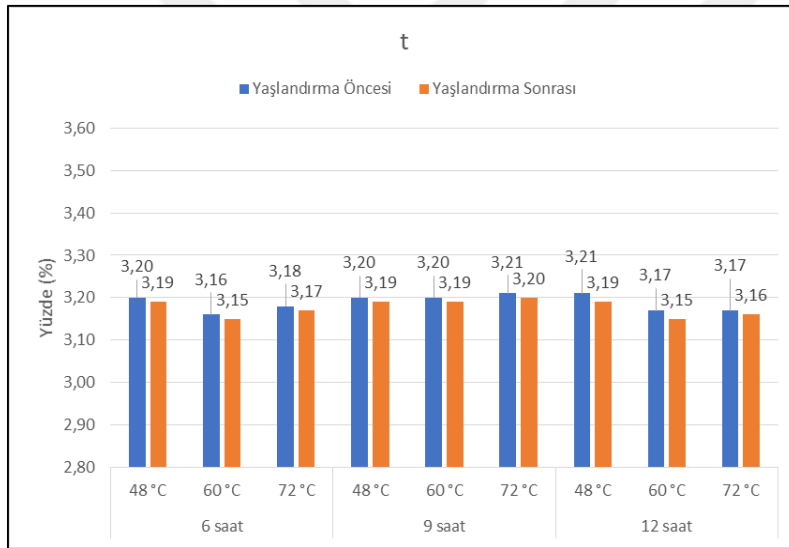
Numuneler, termal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmadan önce ve sonra dijital kumpas ile ölçülmüş, genişlik (W) ve kalınlık (t) değerleri kaydedilmiştir. Grafikler yardımıyla işlem sonrası meydana gelen numune boyutlarındaki değişimin yüzdelik değerlendirilmesi yapılmıştır.

5.1.1. Çekme testi numunelerindeki değişim

Yaşlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin boyutsal değişimlerindeki değerler, Şekil 5.1’de sunulmaktadır. Elde edilen boyutsal değerler ASTM D638 standardında belirtilen tolerans aralıkları ($W = 13 \pm 0,5$ mm; $t = 3,2 \pm 0,4$ mm) içerisinde kaldığı belirlenmiştir[62].



(a)



(b)

Şekil 5.1. Çekme numune boyutlarındaki değişimin gösterimi a) Genişlik (W), (b) kalınlık (t)

Elde edilen veriler doğrultusunda, numunenin dar kesitindeki genişlik ölçülerinde en yüksek değişim oranının (%0,46) 9 saat boyunca 60 °C’de bekletilen numunede, en düşük değişim oranının ise (%0,23) 9 saat boyunca 72 °C’de bekletilen numunede gerçekleştiği belirlenmiştir. Kalınlık ölçümleri açısından ise en yüksek değişim oranı (%0,63) 12 saat boyunca 60 °C’de bekletilen numuneye aitken, en düşük değişim oranı (%0,31) 9 saat boyunca 60 °C’de bekletilen numunede gerçekleşmiştir. Ayrıca, maksimum değişim oranının minimum değişim oranına oranla genişlik ölçümlerinde yaklaşık iki kat, kalınlık ölçümlerinde ise yaklaşık üç kat fazla olduğu tespit edilmiştir.

Bekleme süresi açısından değişim gözlemlendiğinde;

48 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,07’lik bir artış gözlemlenmiş, ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %0,07’lik bir azalma meydana gelmiştir. Kalınlık ölçülerindeki değişim oranında ise 6 saatten 9 saate çıkarıldığında herhangi bir farklılık görülmezken, 9 saatten 12 saate çıkarıldığında %0,31’lik bir artış tespit edilmiştir. 60 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,08’lik bir artış kaydedilmiş; ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %0,15’lik bir azalma meydana gelmiştir. Kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranında ise bekleme süresi 6 saatten 9 saate çıkarıldığında %0,01’lik bir azalış olurken, 9 saatten 12 saate çıkarıldığında %0,32’lik bir artış tespit edilmiştir. 72 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,08’lik bir azalma meydana gelmiş, ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %0,08’lik artış kaydedilmiştir. Kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranında ise bekleme süresi 6 saatten 9 saate çıkarıldığında %0,01’lik bir artış olurken, 9 saatten 12 saate çıkarıldığında herhangi bir değişiklik tespit edilmemiştir.

Sıcaklık derecesine bağlı olarak değişim gözlemlendiğinde;

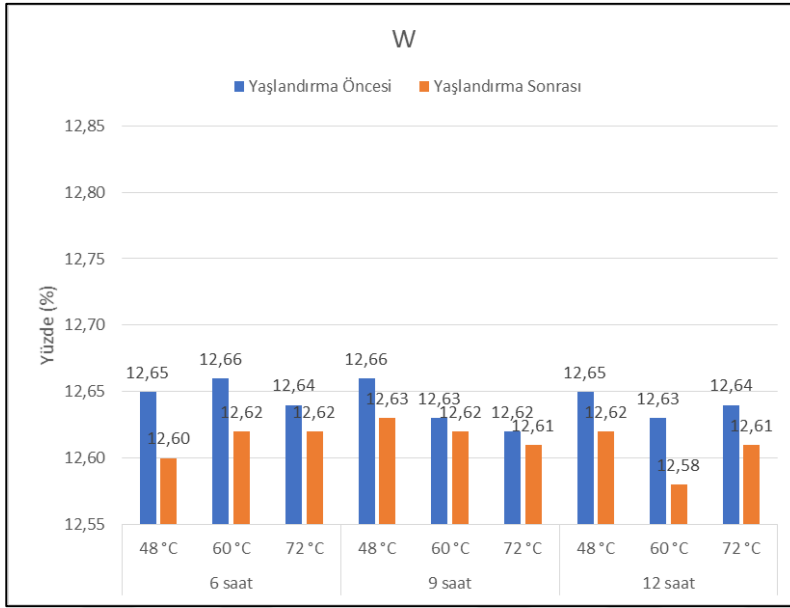
6 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ ye yükseltilmesiyle genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,07’lik artış gözlemlenmiş; sıcaklığın 60 °C’den 72 °C’ye yükseltilmesiyle ise %0,07’lik bir azalma meydana gelmiştir. Kalınlık ölçülerindeki değişim oranına ilişkin olarak, sıcaklık 48 °C’den 60 °C’ ye çıkarıldığında %0,01 artış olurken, 60 °C’den 72 °C’ye çıkarıldığında ise %0,01’lik azalış tespit edilmiştir.

9 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ ye yükseltilmesiyle genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,08’lik artış gözlemlenmiş; ancak sıcaklığın 60 °C’den 72 °C’ye yükseltilmesiyle ise %0,23’lük bir azalma meydana gelmiştir. Kalınlık ölçülerindeki değişim oranına ilişkin olarak, sıcaklık 48 °C’den 60 °C’ ye çıkarılmasıyla herhangi bir değişiklik gözlemlenmezken, 60 °C’den 72 °C’ye çıkarıldığında ise %0,01’lik artış tespit edilmiştir. 12 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklık arttırıldıkça genişlik ölçülerindeki değişim oranı sabit kalmıştır. Kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranında ise sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ ye çıkarılmasıyla %0,01’lik artış gözlemlenmiş; 60 °C’den 72

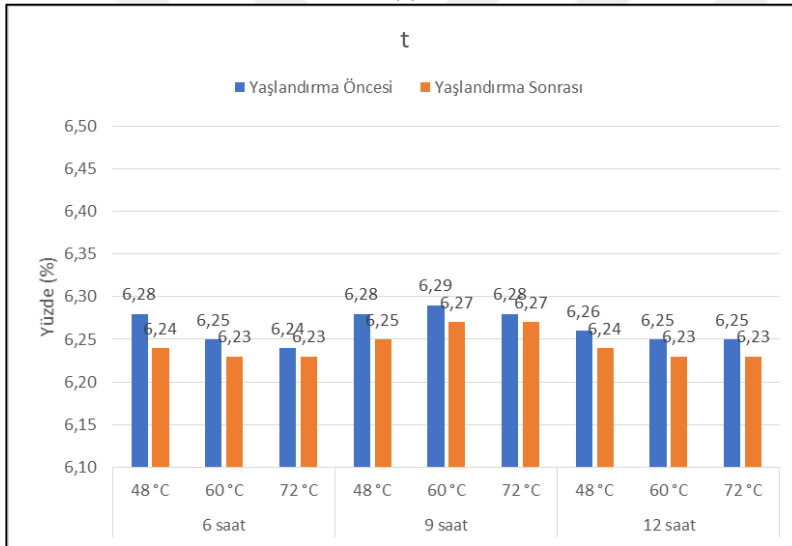
°C'ye çıkarıldığında ise %0,31'lik azalış tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar, sıcaklığın artışıyla birlikte numune boyutlarında bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca, genişlik ölçülerindeki değişim oranında, 48 °C ve 60 °C 'de sürenin artmasıyla önce artış ardından azalış gözlemlenirken; camsı geçiş sıcaklığının üzerinde olan 72 °C'de bu etki ters yönde ilerlemiş, önce azalma ardından artış meydana gelmiştir. Bekleme süresinin artmasına baktığımızda ise 6 saat ve 9 saatte boyunca bekletilen numunelerde sıcaklık arttıkça önce artış, sonra ise azalma görülmüş; 12 saatlik bekleme süresinde ise değişim sabit kalmıştır. Kalınlık ölçümlerindeki değişim oranında, sıcaklık artışıyla birlikte düzenli bir değişim gözlemlenmediği için genelleme yapılamamıştır. Ancak, bekleme süresi artırıldığında, 6 saat ve 12 saat boyunca bekletilen numunelerde oran önce artış, ardından azalış göstermiş; 9 saatlik bekleme süresinde ise oran önce sabit kalmış, ardından artış kaydedilmiştir.

5.1.2. Charpy çentik darbe testi numunelerindeki değişim

Charpy çentik darbe testi numunelerine uygulanan yaşlandırma işlemi sonrasında, numune boyutlarında meydana gelen boyutsal değişimlerindeki değerler Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Bu değerlerin, ASTM D6110 standardı tarafından belirtilen tolerans sınırları ($W = 12,7 \pm 0,15$ mm, $T = 3-12,7$ mm) içerisinde kaldığı belirlenmiştir [64].



(a)



(b)

Şekil 5.2. Charpy çentik darbe numune boyutlarındaki değişimin gösterimi a) Genişlik (W), (b) kalınlık (t)

Elde edilen veriler doğrultusunda, numunenin genişlik ölçülerinde en yüksek değişim oranının (%0,40) 12 saat boyunca 60 °C’de bekletilen numunede, en düşük değişim oranının ise (%0,08) 9 saat boyunca 60 °C’de bekletilen numunede gerçekleştiği belirlenmiştir. Kalınlık ölçümleri açısından ise en yüksek değişim oranı (%0,64) 6 saat boyunca 48 °C’de bekletilen numuneye aitken, en düşük değişim oranı (%0,16) 9 saat boyunca 72 °C’de bekletilen numunede gerçekleşmiştir. Ayrıca, maksimum değişim oranının minimum değişim oranına oranla genişlik ölçümlerinde yaklaşık beş kat, kalınlık ölçümlerinde ise yaklaşık 4 kat fazla olduğu tespit edilmiştir.

Bekleme süresi açısından değişim gözlemlendiğinde;

48 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılması, genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,16’lık bir azalmaya neden olmuş; ancak sürenin 9 saatten 12 saate uzatılmasıyla herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranı ise, hem 6 saatten 9 saate hem de 9 saatten 12 saate çıkarıldığında %0,16’lık bir azalma göstermiştir. 60 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,24’lük bir azalış kaydedilmiş; ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %0,32’lik bir artış meydana gelmiştir. Kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranında ise bekleme süresi artışıyla herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiş, oran sabit kalmıştır. 72 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,08’lik bir azalma meydana gelmiş, ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %0,16’lık artış kaydedilmiştir. Kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranında ise bekleme süresi 6 saatten 9 saate çıkarıldığında değişim oranı sabit kalırken, 9 saatten 12 saate %0,16’lık artış gözlemlenmiştir.

Sıcaklık derecesine bağlı olarak değişim gözlemlendiğinde;

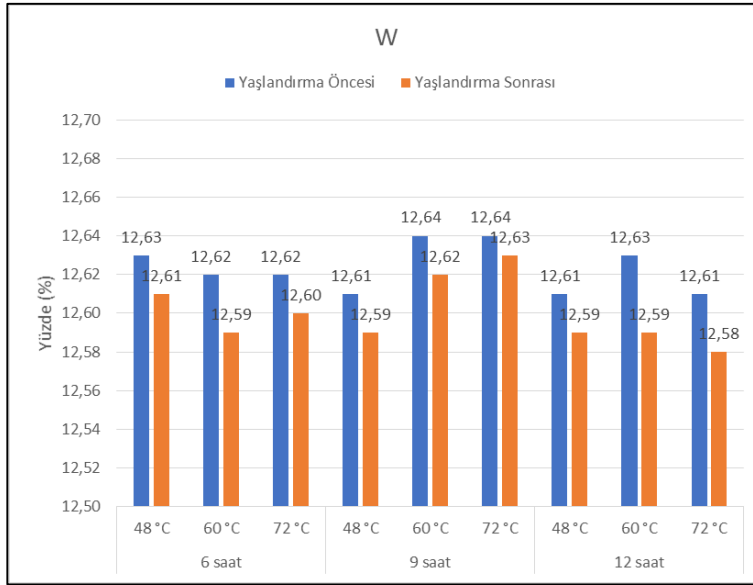
6 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ ye yükseltilmesiyle genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,08’lik bir azalış olurken, sıcaklığın 60 °C’den 72 °C’ye yükseltilmesiyle %0,16’lık bir azalma meydana gelmiştir. Kalınlık ölçülerindeki değişim oranında ise, sıcaklık 48 °C’den 60 °C’ ye çıkarılması, artış oranının yarıya düşerek %32’lik azalmaya yol açtığını göstermiştir. Benzer şekilde, 60 °C’den 72 °C’ye çıkarıldığında değişim oranı yine yarıya inmiş ve %0,16’lık bir azalma tespit edilmiştir.

9 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ ye yükseltilmesiyle genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,16’lık azalış gözlemlenmiş; ancak sıcaklığın 60 °C’den 72 °C’ye yükseltilmesiyle değişim oranı sabit kalmıştır. Kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranında ise, sıcaklığın hem 48 °C’den 60 °C’ye hem de 60 °C’den 72 °C’ye yükseltilmesi durumunda %0,16’lık bir azalma tespit edilmiştir. 12 saat boyunca bekletilen numunelerde, %0,16’lık bir değişim tespit edilmiştir. Bu değişim, sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ye yükseltilmesiyle artış yönünde, 60 °C’den 72 °C’ye yükseltilmesiyle ise azalış yönünde gerçekleşmiştir. Kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranında ise sıcaklık artışıyla

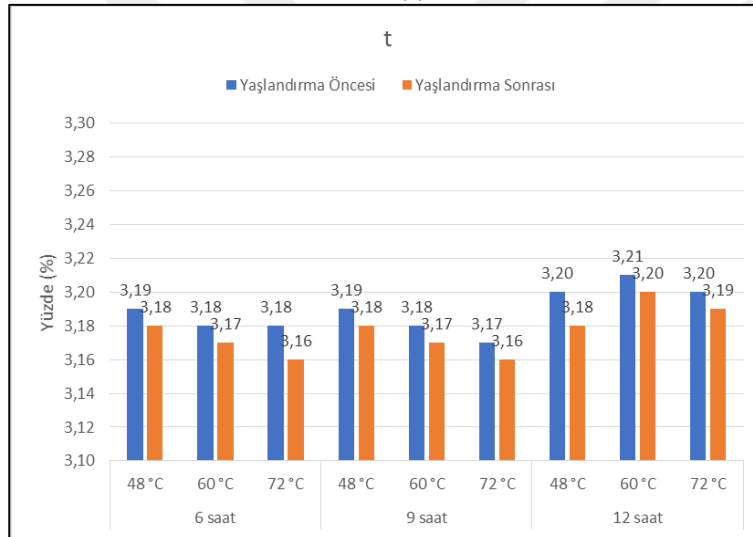
herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiş, oran sabit kalmıştır. Deneysel bulgular, sıcaklık artışının numune boyutlarındaki değişimleri azalttığını ortaya koymaktadır. Genişlik ölçülerine ilişkin değişim oranında, 48 °C’de bekleme süresi arttıkça oran önce azalmış, ardından sabit kalmış; 60 °C ve 72 °C’de ise önce azalma, ardından artış gözlenmiştir. Bekleme süresinin artışına bakıldığında, süre arttıkça düzenli bir değişim gözlemlenmediği için genelleme yapılamamıştır. Benzer şekilde, kalınlık ölçülerindeki değişim oranında da sıcaklık arttıkça düzenli bir değişim olmamış ve bu nedenle genel bir yoruma varılamamıştır. Ancak, bekleme süresi artırıldığında, 6 saat ve 9 saat boyunca bekletilen numunelerde sürekli bir azalma meydana gelirken, 12 saat bekletilen numunelerde oran sabit kalmıştır.

5.1.3. Üç nokta eğme testi numunelerindeki değişim

Yaşlandırma işlemi sonrasında numunelerin boyutsal değişimlerine ilişkin yüzdesel değerler Şekil 5.3’te yer almaktadır. Değerlendirmeler, ASTM D790 standardı referans alınarak yapılmıştır [63].



(a)



(b)

Şekil 5.3. Üç nokta eğme numune boyutlarındaki değişimin gösterimi a) Genişlik (W), (b) kalınlık (t)

Bu verilere göre, genişlik ölçümlerinde en yüksek değişim oranının (%0,32) 12 saat boyunca 60°C’de bekletilen numune gerçekleştirirken en düşük değişim oranının (%0,08) 9 saat boyunca 72 °C’de bekletilen numune gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kalınlık ölçümleri açısından, en yüksek boyutsal değişim oranı (%0,63) 6 saat boyunca 72 °C’de bekletilen numune için, en düşük değişim oranı (%0,31) 12 saat boyunca 60 °C’de bekletilen numune için tespit edilmiştir. Genişlik ölçümlerinde maksimum ve minimum değerler arasındaki fark yaklaşık %0,24 olarak hesaplanırken, kalınlık ölçümlerindeki bu fark %0,32 olarak bulunmuştur.

Bekleme süresi açısından değişim gözlemlendiğinde;

48 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresindeki artış devam ettikçe değişim oranında herhangi bir farklılık gözlenmemiş ve oran %0,16 olarak sabit kalmıştır. Bununla birlikte, kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranında, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılması durumunda oran sabit kalırken, 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %0,32’lik bir artış tespit edilmiştir. 60 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,08’lik bir azalış kaydedilmiş; ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %0,16’lık bir artış meydana gelmiştir. Kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranında ise bekleme süresi artışıyla herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiş, oran sabit kalmıştır. 72 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,08’lik bir azalma meydana gelmiş, ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %0,16’lık artış kaydedilmiştir. Kalınlık ölçülerine ilişkin değişim oranında ise bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla %0,31’lik bir azalış olurken, sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %0,01’lik bir azalış tespit edilmiştir.

Sıcaklık derecesine bağlı olarak değişim gözlemlendiğinde;

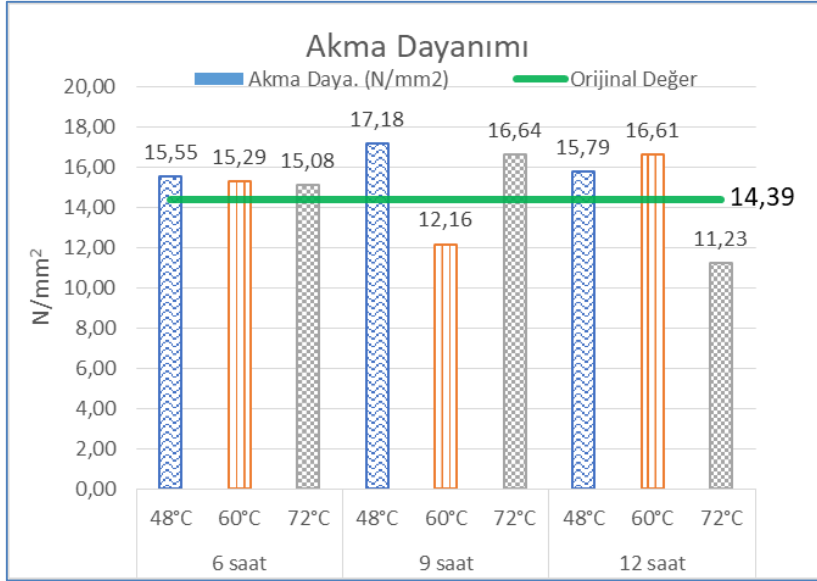
6 saat boyunca bekletilen numunelerde, %0,08’lik bir değişim tespit edilmiştir. Bu değişim, sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ye yükseltilmesiyle artış yönünde, 60 °C’den 72 °C’ye yükseltilmesiyle ise azalış yönünde gerçekleşmiştir. Kalınlık ölçülerindeki değişim oranına ilişkin olarak, sıcaklık 48 °C’den 60 °C’ye çıkarıldığında oran sabit kalırken, 60 °C’den 72 °C’ye çıkarıldığında ise %0,32’lik artış tespit edilmiştir. 9 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ye yükseltilmesiyle genişlik ölçülerindeki değişim oranı sabit kalırken; sıcaklığın 60 °C’den 72 °C’ye yükseltilmesiyle ise %0,08’lik bir azalma meydana gelmiştir. Kalınlık ölçülerindeki değişim oranına ilişkin olarak, sıcaklık 48 °C’den 60 °C’ye çıkarılmasıyla herhangi bir değişiklik gözlenmezken, 60 °C’den 72 °C’ye çıkarıldığında ise %0,01’lik artış tespit edilmiştir. 12 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ye yükseltilmesiyle genişlik ölçülerindeki değişim oranında %0,16’lık artış gözlemlenmiş; ancak sıcaklığın 60 °C’den 72 °C’ye yükseltilmesiyle %0,08’lik bir azalma meydana gelmiştir. Kalınlık ölçülerindeki değişim oranına ilişkin olarak, sıcaklık 48 °C’den 60 °C’ye çıkarılmasıyla %0,32’lik azalma gözlemlenirken, 60 °C’den 72 °C’ye çıkarıldığında herhangi bir değişiklik tespit edilmemiştir.

Deneysel bulgular, sıcaklık artışının numune boyutlarındaki değişimleri azalttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, genişlik ölçülerindeki değişim oranında, 48 °C’de süre arttıkça oran sabit kalırken 60 °C ve 72°C ‘de önce azalış sonra artış olmuştur. Bekleme süresinin artışına baktığımızda ise 6 saat ve 12 saat boyunca bekletilen numunelerde önce artış sonra azalış gözlemlenirken, 9 saat bekletilen numunelerde oran önce sabit kalmış daha sonra azalmıştır. Kalınlık ölçülerindeki değişim oranında, sıcaklık arttıkça düzenli değişim gözlemlenmediği için herhangi bir genelleme yapılamamıştır. Bununla birlikte, bekleme süresi artırıldığında, 6 saat ve 9 saat bekletilen numunelerde oran önce sabit kalmış, ardından artış göstermiş; ancak 12 saat bekletilen numunelerde bu eğilim değişmiş, oran önce azalmış, ardından sabit kalmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, tüm numunelerde sıcaklığın artmasıyla birlikte genişlik ve kalınlık ölçümlerinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Literatürde yapılan diğer çalışmalar da benzer geometrik bozulmalara rastlandığı ve bununda parçaların boyut kararlılığını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir [57,60]. Bu azalmanın, genellikle çapraz bağlı yapılardaki termal gerilmelerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Termoset polimerler, ısının etkisiyle yüksek derecede çapraz bağlı ağ yapıları oluşturmaktadır. Termoset polimerlerin ısınması, ağ yapılarındaki çapraz bağların daha da kuvvetlenmesine neden olabilmektedir. Bununla birlikte, sıcaklık artışıyla polimer zincirlerinin iç yapısında ki atomlar arasındaki mesafenin azalması, hacim kaybına ve dolayısıyla polimer boyutunda küçülmeye neden olmaktadır. Isının etkisiyle gerçekleşen bu büzülme, termoset polimerlerin düşük özgül ısı genleşme katsayısı ile de ilişkilendirilmektedir [27, 35, 66].

5.2. Çekme Testi Sonuçları

Bu çalışma, aynı üretim parametrelerine sahip numunelerin farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma işlemine tabi tutulmasının ardından mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemek amacıyla tasarlanmıştır. Yapılan testler sonucunda elde edilen akma dayanımı grafiği 5.4’te, maksimum yük grafiği Şekil 5.5’te verilmiştir.



Şekil 5.4. Çekme numunesinin akma dayanımı grafiği

Çekme numuneleri akma dayanımı bakımından incelendiğinde en fazla akma dayanımı değerinin (17,18 N/mm²) 9 saat 48 °C’de bekletilen numune olduğu, en düşük akma değerinin (11,23 N/mm²) ise 12 saat 72 °C’de bekletilen test numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum ve minimum değerler arasında yaklaşık %34,63’lük bir fark olduğu görülmüştür.

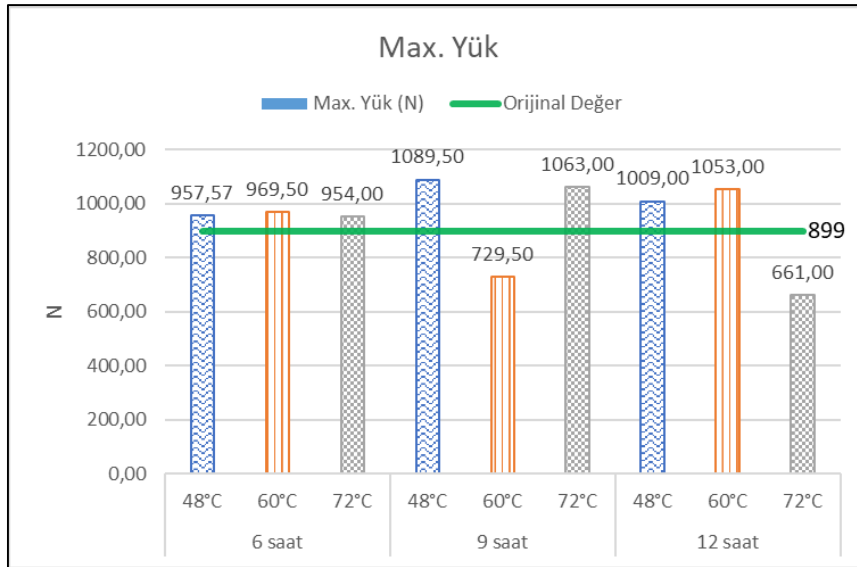
Bekleme süresi açısından değişim gözlemlendiğinde;

48 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla akma dayanımında %10,48’lik bir artış gözlemlenmiş, ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %8,09’luk bir azalma meydana gelmiştir. Elde edilen tüm veriler, 48 °C’de bekletilen numunelerin akma dayanımında, orijinal numunelere kıyasla bir iyileşme sağladığını ortaya koymuştur. 60 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla akma dayanımında %20,47’lik bir azalış gözlemlenmiş, ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %36,59’luk bir artış meydana gelmiştir. Elde edilen veriler, 60 °C’de 9 saat bekletilen numune haricindeki tüm numunelerde, orijinal numuneye kıyasla akma dayanımında iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur. 72 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla akma dayanımında %10,34’lük bir artış gözlemlenmiş, ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %32,51’lik bir azalış meydana gelmiştir. Elde edilen veriler, 72 °C’de 12 saat bekletilen

numune haricindeki tüm numunelerde, orijinal numuneye kıyasla akma dayanımında iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur.

Sıcaklık derecesine bağlı olarak değişim gözlemlendiğinde;

6 saat boyunca bekletilen numunelerde, bekleme süresinin artışına paralel olarak akma dayanımında bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, sıcaklığın 48 °C'den 60 °C'ye yükseltilmesi durumunda %1,67, 60 °C'den 72 °C'ye yükseltilmesi durumunda ise %1,37 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen tüm veriler, 6 saat boyunca sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin akma dayanımında, orijinal numunelere kıyasla bir iyileşme sağladığını ortaya koymuştur. 9 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C'den 60 °C'ye yükseltilmesiyle %29,22'lik azalma olurken, 60 °C'den 72 °C'ye yükseltilmesiyle ise %36,84'lük artış gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler, 60 °C'de bekletilen numune haricindeki tüm numunelerde, orijinal numuneye kıyasla akma dayanımında iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur. 12 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C'den 60 °C'ye yükseltilmesi durumunda akma dayanımında %5,19 oranında bir artış gözlenirken, 60 °C'den 72 °C'ye yükseltilmesiyle %32,39 oranında ani bir düşüş meydana gelmiştir. Elde edilen veriler, 72 °C'de bekletilen numune haricindeki tüm numunelerde, orijinal numuneye kıyasla akma dayanımında iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur.



Şekil 5.5. Çekme numunesinin maksimum yük grafiği

Numuneler maksimum yük bakımından incelendiğinde en fazla maksimum yük değerinin (1089,5 N) 9 saat 48 °C’de bekletilen numune olduğu, en düşük maksimum yük değerinin (661 N) ise 12 saat 72 °C’de bekletilen test numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum ve minimum değerler arasında yaklaşık %39,33’lük bir fark olduğu görülmüştür.

Bekleme süresi açısından değişim gözlemlendiğinde;

48 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla maksimum yük değerinde %13,77’lik bir artış gözlemlenmiş, ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %7,38’lik bir azalma meydana gelmiştir. Elde edilen tüm veriler, 48 °C’de bekletilen numunelerin maksimum yük değerinin, orijinal numunelere kıyasla bir iyileşme sağladığını ortaya koymuştur. 60 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla maksimum yük değerinde %24,75’lik bir azalış gözlemlenmiş, ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %44,37’lik bir artış meydana gelmiştir. Elde edilen veriler, 60 °C’de 9 saat bekletilen numune haricindeki tüm numunelerde, orijinal numuneye kıyasla maksimum yük değerinde iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur. 72 °C’de bekletilen numunelerde, bekleme süresinin 6 saatten 9 saate çıkarılmasıyla maksimum yük değerinde %11,42’lik bir artış gözlemlenmiş, ancak sürenin 9 saatten 12 saate çıkarılmasıyla %37,81’lik bir azalış meydana gelmiştir. Elde edilen veriler, 72 °C’de 12 saat bekletilen numune haricindeki tüm numunelerde, orijinal numuneye kıyasla maksimum yük değerinde iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur.

Sıcaklık derecesine bağlı olarak değişim gözlemlendiğinde;

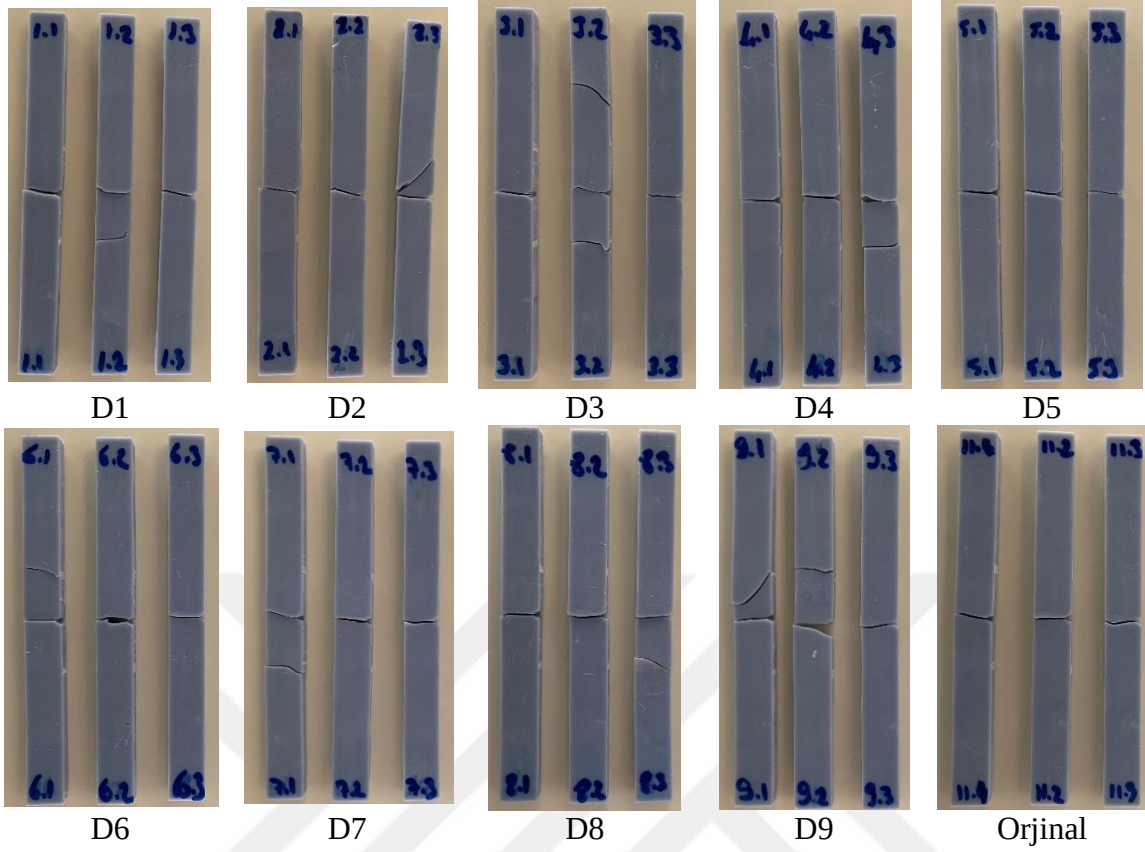
6 saat boyunca bekletilen numunelerde, bekleme süresinin artışıyla maksimum yük değerinde, 48 °C’den 60 °C’ye %1,24’lük bir artma olduğu, 60 °C’den 72 °C’ye %1,59’luk bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler birbirine oldukça yakın değerler göstermiş olup, tüm numunelerin maksimum yükünün, orijinal numunelere kıyasla iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. 9 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ye yükseltilmesiyle maksimum yük değerinde %33,04’lük azalma olurken, 60 °C’den 72 °C’ye yükseltilmesiyle ise %45,71’lik artış gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler, 60 °C’de bekletilen numune haricindeki tüm numunelerde, orijinal numunelere kıyasla maksimum yük değerinde iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur. 12 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C’den 60 °C’ye yükseltilmesi durumunda maksimum yük

değerinde %4,3 oranında bir artış gözlenirken, 60 °C'den 72 °C'ye yükseltilmesiyle %37,22 oranında ani bir düşüş meydana gelmiştir. Elde edilen veriler, 72 °C'de bekletilen numune haricindeki tüm numunelerde, orijinal numunelere kıyasla maksimum yük değerinde iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur.

Yapılan analizler sonucunda, orijinal numuneye kıyasla yaşlandırmanın genel olarak malzemenin akma dayanımını ve mukavemetini iyileştirdiği görülmüştür. Literatürde yer alan ilgili çalışmalar da bu bulguları desteklemektedir [6, 43, 46, 48, 55, 56, 58]. Bununla birlikte, malzemenin camsı geçiş sıcaklığı olan 60 °C ve 72 °C'de yer alan değerlerde ani azalış ve artış gözlemlenmiştir. Numunelerde gözle görülür bir deformasyonla karşılaşılmamıştır.

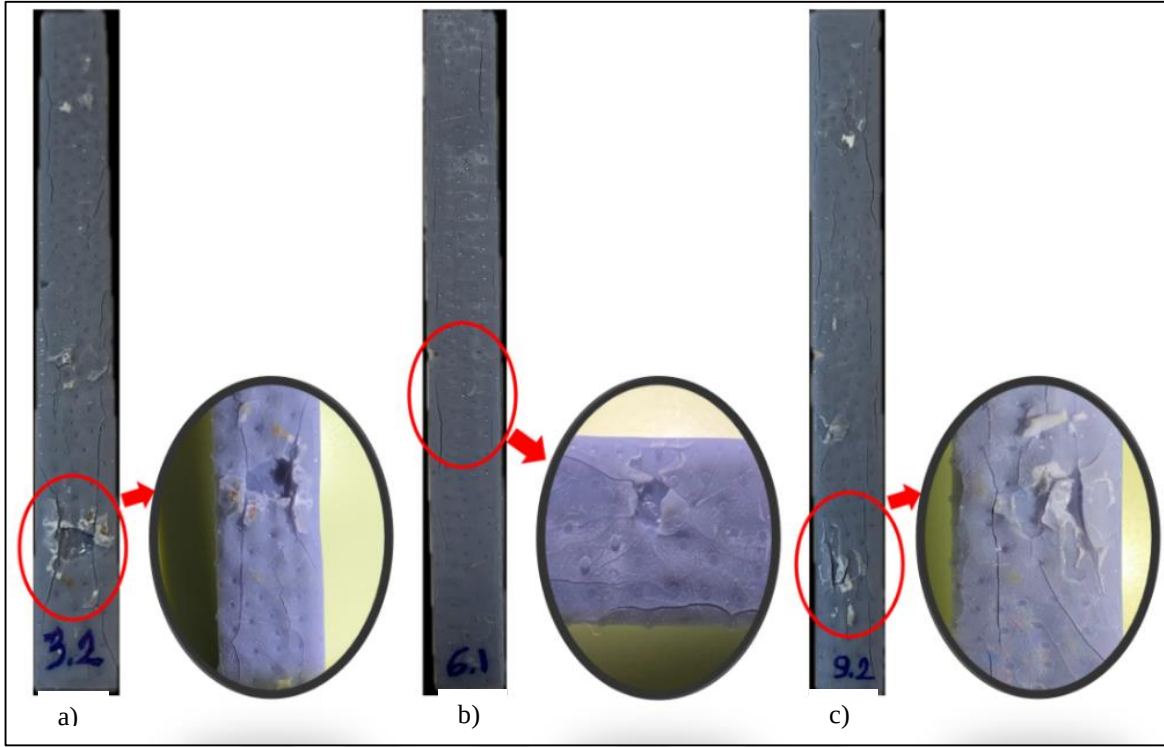
5.3. Charpy Çentik Darbe Testi Sonuçları

Bu çalışma 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 5.6'da kırılan numunelerin tamamı yer almaktadır. Buna göre malzemelerin çoğu çentiğin bulunduğu orta noktadan kırılmıştır.



Şekil 5.6. Test edilen charpy numuneleri

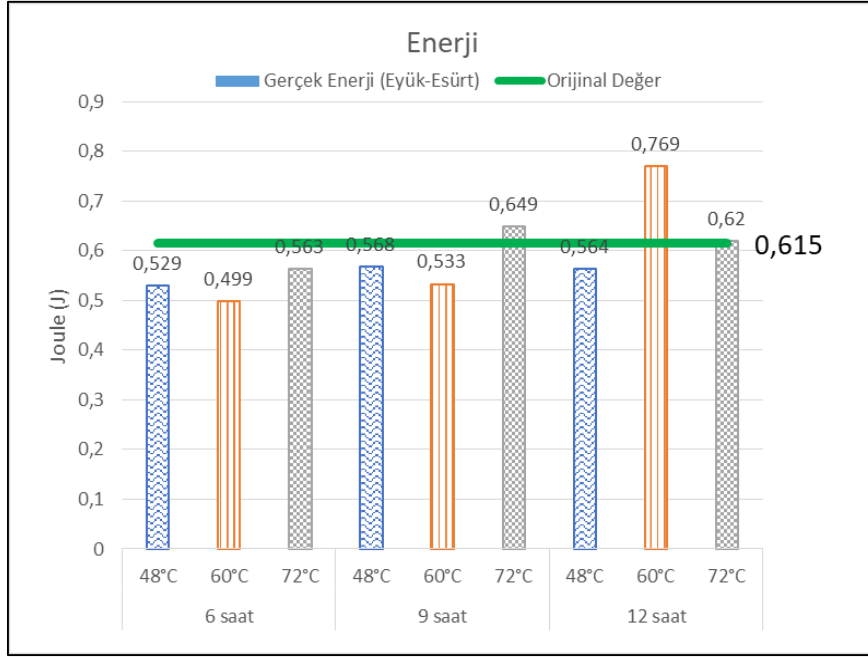
Yaşlandırma işlemi sonucunda, malzemenin camı geçiş sıcaklığı üzerinde sıcaklığa maruz bırakılan D3 (72 °C 6 saat), D6(72 °C 9 saat) ve D9 (72 °C 12 saat) numunelerinin yüzeylerinde deformasyon tespit edilmiştir (Şekil 5.7). Desteksiz üretilen diğer test numunelerinde ise benzer bir bulguya rastlanmamıştır. Literatürde gerçekleştirilen bir diğer çalışmada da destek yapılarının çatlak oluşumuna yol açabileceği belirtilmiştir [45].



Şekil 5.7. Deforme olan charpy numunelerinin makroskobik görüntüsü a) D3, b) D6, c) D9

Deneylerde kullandığımız reçine, termoset polimer özelliği göstermektedir ve malzemenin mekanik özelliklerinde belirttiğimiz üzere camsı geçiş sıcaklığı $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Termoset malzemeler, camsı geçiş sıcaklığının üstündeki bir sıcaklığa ısıtıldığında parçalanmakta ve ayrışma eğilimi göstermektedir [35]. Elde ettiğimiz bulgular, bu durumu doğrulamakta olup Tg'nin aşıldığı numunelerde belirgin deformasyonlar tespit edilmiştir. Ayrıca, literatürde benzer çalışmalarda da yüksek sıcaklık etkisiyle malzemelerde geometrik tolerans kaybı, yüzey sararması gibi görsel deformasyonların meydana geldiği gözlemlenmiştir [45, 47, 60].

Yapılan testler sonucunda elde edilen verilerle Şekil 5.8'de yer alan grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.8. Charpy numunelerinin darbe dayanımı kıyaslama grafiği

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. Maksimum ve minimum değerler arasında yaklaşık %28,73’lük bir fark olduğu görülmüştür.

Bekleme süresi açısından değişim gözlemlendiğinde;

48 °C’de bekletilen numunelerde süre ilerledikçe darbe mukavemetinde önce %7,37’lik bir artış olduğu daha sonra %0,70’lik azalış olduğu gözlemlenmiştir. 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 %0,07’lik daha sonra %44,28’lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir. 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 %15,28’lik bir artış olduğu daha sonra %4,47’lik azalış olduğu gözlemlenmiştir. 72 °C’de bekletilen numuneler içerisinde 6

saat bekletilen numune hariç diğer numunelerin darbe mukavemetinin orijinal numuneyi geçtiği görülmüştür.

Sıcaklık derecesine bağlı olarak değişim gözlemlendiğinde;

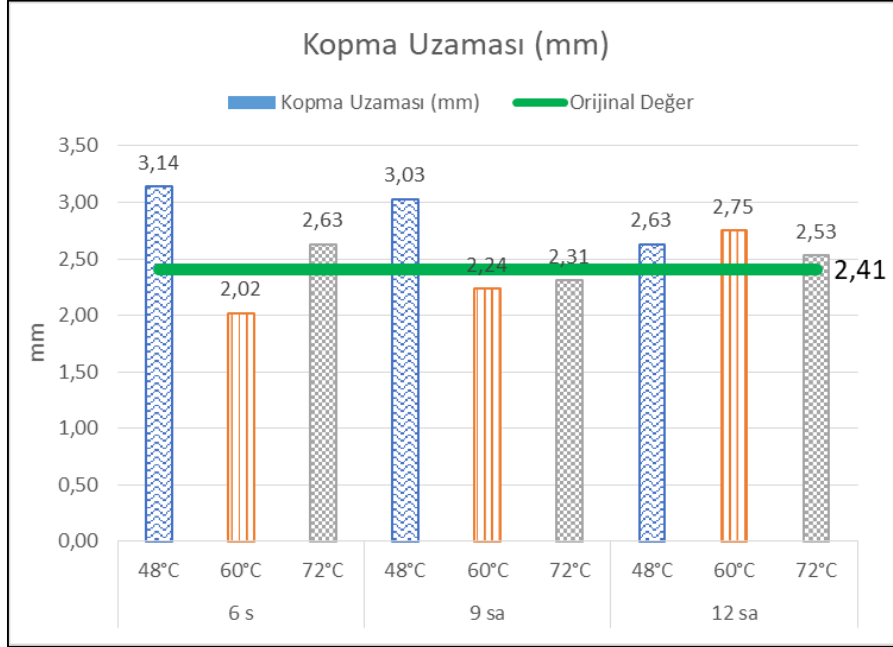
6 saat boyunca bekletilen numunelerde, bekleme süresinin artışıyla darbe mukavemetinin, 48 °C'den 60 °C'ye yükseltilmesiyle %5,67'lik bir azalış olduğu, 60 °C'den 72 °C'ye %18,83'lük bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Alınan bütün değerlerin sonucunda 6 saatte bekletilen numunelerin, orijinal numunelere kıyasla darbe mukavemetinde azalış olduğu görülmüştür. 9 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C'den 60 °C'ye yükseltilmesiyle darbe mukavemetinde %6,16'lık azalma olurken, 60 °C'den 72 °C'ye yükseltilmesiyle ise %21,76'lık artış gözlemlenmiştir. 9 saatte bekletilen numuneler içerisinde 72 °C'de bekletilen numuneler hariç diğer numunelerin darbe mukavemetinin, orijinal numuneyi geçemediği görülmüştür. 12 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C'den 60 °C'ye yükseltilmesi durumunda darbe mukavemetinde %36,35'lik artış gözlenirken, 60 °C'den 72 °C'ye yükseltilmesiyle %19,38'lik azalış meydana gelmiştir. 12 saatte bekletilen numuneler içerisinde 48 °C'de bekletilen numuneler hariç diğer numunelerin darbe mukavemetinin orijinal numuneyi geçtiği görülmüştür.

Yapılan analizler sonucunda orijinal numuneye kıyasla yaşlandırmanın genel olarak malzemenin darbe dayanımını düşürdüğü 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 [27, 67, 68]. Yaptığımız çalışmanın sonuçları da bu bilgiyi desteklemektedir ve literatürde yapılan diğer çalışmalarda olduğu gibi yaşlandırma işlemi sonucunda malzemenin darbe mukavemetinde genel olarak azalma gözlemlenmiştir [6, 43, 69].

5.4. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Bu çalışma, aynı üretim parametrelerine sahip numunelerin farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma işlemine tabi tutulmasının ardından mekanik özelliklerinde meydana gelen

değişimleri incelemek amacıyla tasarlanmıştır. Yapılan testler sonucunda elde edilen verilerle Şekil 5.9’da yer alan grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.9. Üç nokta eğme numunelerinin kopma uzaması kıyaslama grafiği

Üç nokta eğme numuneleri kopma uzaması bakımından incelendiğinde en fazla kopma uzaması değerinin (3,14 mm) 6 saat 48 °C’de bekletilen numune olduğu, en düşük kopma uzaması değerinin (2,02 mm) ise 6 saat 60 °C’de bekletilen test numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum ve minimum değerleri arasında yaklaşık %35,67’lik bir fark olduğu görülmüştür.

Bekleme süresi açısından değişim gözlemlendiğinde;

48 °C’de bekletilen numunelerde süre ilerledikçe kopma uzaması değerlerinde önce %3,50’lik bir azalış olduğu, daha sonra %13,20’lik azalış olduğu gözlemlenmiştir. Alınan bütün değerlerin sonucunda 48 °C’de bekletilen numunelerin, yaşlandırılmamış olan numunelere kıyasla kopma uzamasında artış olduğu görülmüştür. 60 °C’de bekletilen numunelerde süre ilerledikçe kopma uzaması değerlerinde önce %10,89’luk bir artış olduğu, daha sonra %22,78’lik artış olduğu gözlemlenmiştir. 60 °C’de bekletilen numuneler içerisinde 12 saat bekletilen numune hariç diğer numunelerin kopma uzaması değerinin, orijinal numuneyi geçemediği görülmüştür. 72 °C’de bekletilen numunelerde süre

ilerledikçe kopma uzaması değeriinde önce %12,17'lik bir azalış olduğu daha sonra %9,52'lik artış olduğu gözlemlenmiştir. 72 °C'de bekletilen numuneler içerisinde 9 saat bekletilen numune hariç diğeri numunelerin kopma uzaması değeriinin orijinal numuneyi geçtiğı görülmüştür.

Sıcaklık derecesine bağılı olarak değişim gözlemlendiğinde;

6 saat boyunca bekletilen numunelerde, bekleme süresinin artışıyla kopma uzaması değeriinde 48 °C'den 60 °C'ye yükseltilmesiyle %35,67'lik bir azalış olduğu, 60 °C'den 72 °C'ye %30,20'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Alınan bütün değeriilerin sonucunda 6 saatte 60 °C'de bekletilen numuneler hariç diğeri numunelerin, orijinal numunelere kıyasla kopma uzaması değeriinde artış olduğu görülmüştür. 9 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C'den 60 °C'ye yükseltilmesiyle kopma uzaması değeriinde %26,07'lik azalma olurken, 60 °C'den 72 °C'ye yükseltilmesiyle ise %3,13'lük artış gözlemlenmiştir. 9 saatte bekletilen numuneler içerisinde 48 °C'de bekletilen numuneler hariç diğeri numunelerin kopma uzaması değeriinin, orijinal numuneyi geçemediğı görülmüştür. 12 saat boyunca bekletilen numunelerde, sıcaklığın 48 °C'den 60 °C'ye yükseltilmesi durumunda darbe mukavemetinde %4,56'lık artış gözlenirken, 60 °C'den 72 °C'ye yükseltilmesiyle %8'lik azalış meydana gelmiştir. 12 saatte bekletilen numuneler içerisinde bekletilen tüm numunelerin kopma uzaması değeriinin, orijinal numuneyi geçtiğı görülmüştür.

Maruz bırakılma süresinin artmasıyla birlikte, 48 °C'de bekletilen numunelerde kopma uzamasının azaldığı, buna karşın 60 °C'de bekletilen numunelerde kopma uzamasının arttığı gözlemlenmiştir. Malzemenin camsı geçiş sıcaklığının üzerinde yer alan 72 °C'de ise bu eğilim düzensiz bir şekilde seyretmiş, kopma uzamasında ani düşüş ve artışlar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 72 °C'de elde edilen kopma uzaması değeriileri birbirine oldukça yakın olup, orijinal numunenin kopma uzaması değeriıyla yakın sonuçlar göstermektedir. Numunelerde gözle görülür bir deformasyonla karşılaşılmaştır.

Yaşlandırma işlemi yapılan polimerlerde üç nokta eğme testi sonucunda kopma uzamasının artıp artmadığı, polimerin türüne, yaşlandırma koşullarına (sıcaklık, zaman, ışık, nem gibi) ve kullanılan malzemenin kimyasal özelliklerine bağılı olarak değişmektedir. Literatürde üç boyutlu yazıcıyla elde edilen numunelerin kopma uzamasında azalmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, mevcut çalışmamızda olduğu gibi bazı özel durumlarda,

belirli koşullar altında, polimerdeki çapraz bağlanmaların artması sonucunda kopma uzamasının geçici olarak artabileceği tespit edilmiştir. Bu durum, genellikle çapraz bağlanma ya da moleküler yapıda meydana gelen değişikliklerin polimerin elastikiyetini artırmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, termoset polimerlerin yüksek derecede çapraz bağlı ağ yapıları oluşturması, ısı işlem yoluyla indüklenen kimyasal reaksiyonlara bağlıdır[35]. Termal yaşlandırma, polimer yapısındaki çapraz bağ yoğunluğunun artışı teşvik ederek başlangıçta malzemenin mekanik performansını artırabilir. Ancak, uzun süreli termal maruziyet, polimer zincirlerinde meydana gelen zincir kırılması (degradasyon) sonucunda mekanik dayanımda azalma ile ilişkilendirilmektedir. Bu durum, yaşlandırma süresine ve sıcaklık profiline bağlı olarak malzemenin yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir.

5.5. Gri İlişki Analizi Sonucu

Bu çalışmada, malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi amacıyla, yaşlandırma işlemi sırasında elde edilen deneysel veriler değerlendirilmiş ve en uygun işlem parametresinin belirlenmesi için Gri İlişki Analizi uygulanmıştır. Analiz kapsamında, sıcaklık ve süre parametreleri için elde edilen veriler gruplandırılmış, ardından her bir grup için ortalama değerler hesaplanarak tablo şeklinde sunulmuştur. Gri İlişki Analizi'nde kullanılan sayısal veriler ise Çizelge 5.1'de yer almaktadır.

Çizelge 5.1. Deney sonuçlarından alınan veriler

Deney No	Sıcaklık	Süre	Çekme Testi		Charpy Testi	Üç Nokta Eğme Testi
			Akma Dayanımı	Max Yük	Enerji	Kopma Uzaması
D1	48 °C	6 Saat	15,553	957,570	0,529	3,140
D2	60 °C		15,288	969,500	0,499	2,020
D3	72 °C		15,084	954,000	0,563	2,630
D4	48 °C	9 Saat	17,175	1089,500	0,568	3,030
D5	60 °C		12,163	729,500	0,533	2,240
D6	72 °C		16,635	1063,000	0,649	2,310
D7	48 °C	12 Saat	15,793	1009,000	0,564	2,630
D8	60 °C		16,610	1053,000	0,769	2,750
D9	72 °C		11,226	661,000	0,620	2,530
Orijinal			14,390	899,000	0,615	2,410

Deney sonuçlarına ait sayısal verilerin arzu edilen özelliklere yakınlık durumlarını değerlendirebilmek amacıyla normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Gruplandırılmış olan veriler arasında büyük değerin arzu edildiği sütunlar için “Büyük Değer İyidir” denklemi kullanılmıştır. “Büyük Değer İyidir” denklemi eşitlik 2.2’de verilmiştir. Eşitlik 2.2’de verilen denklemde yer alan “i” sayısı deney sıra numarasını belirtmektedir. Denklemde yer alan $x_i(j)$ ifadesi, orjinal deney verisini temsil etmekte olup, $\max_{i=1}^n x_i(j)$ ifadesi, veri grubunun en büyük değerini, $\min_{i=1}^n x_i(j)$ ifadesi ise veri grubunun en küçük değerini temsil etmektedir. $x'_i(j)$ fonksiyonu ise normalizasyon işleminin sonucunu ifade etmektedir.

Normalizasyon işlemi sonucunda elde edilen veriler tablo haline getirilmiş ve tabloda yer alan her bir sütun için en büyük değerin tespit edilmesi sağlanmıştır. Normalize edilen veriler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Normalize edilen sayısal veriler

Deney No	Sıcaklık	Süre	Çekme Testi		Charpy Testi	Üç Nokta Eğme Testi
			Akma Dayanımı	Max Yük	Enerji	Kopma Uzaması
D1	48 °C		0,727	0,692	0,111	1,000
D2	60 °C	6 Saat	0,683	0,720	0,000	0,000
D3	72 °C		0,649	0,684	0,237	0,545
D4	48 °C		1,000	1,000	0,256	0,902
D5	60 °C	9 Saat	0,158	0,160	0,126	0,196
D6	72 °C		0,909	0,938	0,556	0,259
D7	48 °C		0,768	0,812	0,241	0,545
D8	60 °C	12 Saat	0,905	0,915	1,000	0,652
D9	72 °C		0,000	0,000	0,448	0,455
Orijinal			0,532	0,555	0,430	0,348

Normalize edilen veriler tablosundaki her bir sütun için sapma dizisi hesaplanarak tablo haline getirilmiş ve uzaklık matrisi elde edilmiştir. Elde edilen uzaklık matrisi Çizelge 5.3’te verilmiştir. Denklemlerde yer alan $\Delta_{0i}(j)$ ifadesi referans verisinin sapma dizisini temsil etmektedir.

Çizelge 5.3. Normalize edilen sayısal verilerin uzaklık matrisi değerleri

Deney No	Sıcaklık	Süre	Çekme Testi		Charpy Testi	Üç Nokta Eğme Testi
			Akma Dayanımı	Max Yük		
D1	48 °C		0,273	0,308	0,889	0,000
D2	60 °C	6 Saat	0,317	0,280	1,000	1,000
D3	72 °C		0,351	0,316	0,763	0,455
D4	48 °C		0,000	0,000	0,744	0,098
D5	60 °C	9 Saat	0,842	0,840	0,874	0,804
D6	72 °C		0,091	0,062	0,444	0,741
D7	48 °C		0,232	0,188	0,759	0,455
D8	60 °C	12 Saat	0,095	0,085	0,000	0,348
D9	72 °C		1,000	1,000	0,552	0,545
Orijinal			0,468	0,445	0,570	0,652

Eşitlik 2.9’da verilen denklemdeki veriler, uzaklık matrisi tablosundan temin edilerek gri ilişki katsayıları hesaplanmış ve bu katsayılar çizelge şeklinde sunulmuştur. Denklemde yer alan “ ξ ” değeri 0 ile 1 arasında bir değerdir ve çoğunlukla 0,5 alınır. Hesaplanan gri ilişki katsayıları Çizelge 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Gri ilişki katsayıları

Deney No	Sıcaklık	Süre	Çekme Testi		Charpy Testi	Üç Nokta Eğme Testi
			Akma Dayanımı	Max Yük		
D1	48 °C		0,647	0,619	0,360	1,000
D2	60 °C	6 Saat	0,612	0,641	0,333	0,333
D3	72 °C		0,587	0,613	0,396	0,523
D4	48 °C		1,000	1,000	0,402	0,836
D5	60 °C	9 Saat	0,372	0,373	0,364	0,384
D6	72 °C		0,846	0,890	0,529	0,403
D7	48 °C		0,683	0,727	0,397	0,523
D8	60 °C	12 Saat	0,840	0,854	1,000	0,589
D9	72 °C		0,333	0,333	0,475	0,479
Orijinal			0,516	0,529	0,467	0,434

Her bir yaşlandırma parametresi için gri ilişki katsayılarının ortalamaları hesaplanarak gri ilişki dereceleri elde edilmiştir. Ardından, bu derecelerin büyüklükleri karşılaştırılarak bir sıralama yapılmıştır. Gri ilişki analizi sonucunda elde edilen gri ilişki dereceleri ve sıralama,

Çizelge 5.5'te sunulmuştur. Buna göre en optimal parametrenin 12 saat 60 °C olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.5. Gri ilişki analizi sonucunda elde edilen gri ilişki derecesi ve sıralaması

Deney No	Sıcaklık	Süre	Gri İlişki Derecesi	Gri İlişki Sıralaması
D1	48 °C		0,657	4
D2	60 °C	6 Saat	0,480	8
D3	72 °C		0,530	6
D4	48 °C		0,809	2
D5	60 °C	9 Saat	0,373	10
D6	72 °C		0,667	3
D7	48 °C		0,583	5
D8	60 °C	12 Saat	0,821	1
D9	72 °C		0,405	9
Orijinal			0,487	7

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan Stereolitografi (SLA) tekniği kullanılarak üretilen test numuneleri, sabit üretim parametreleri altında hazırlanmış ve farklı süre ve sıcaklıklarda ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin mekanik özelliklerindeki değişimleri değerlendirmek amacıyla çekme testi, Charpy çentik darbe testi ve üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir.

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. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, yaşlandırma işleminin malzeme mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymak üzere aşağıda özetlenmiştir.

- Deneysel sonuçlar, artan sıcaklıkla birlikte numune boyutlarında bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca, genişlik ölçülerindeki değişim oranı incelendiğinde, 48 °C ve 60 °C 'de sürenin artmasıyla önce artış ardından azalış gözlemlenirken; malzemenin camsı geçiş sıcaklığının üzerinde olan 72 °C'de bu etki ters yönde ilerlemiş, önce azalma ardından artış meydana gelmiştir. Literatürde yapılan diğer çalışmalarda da sıcaklığın artmasıyla geometrik tolerans kaybının yaşandığı görülmüştür. Bu bağlamda, elde edilen bulgular literatürdeki mevcut verilerle uyum göstermektedir.
- Bu çalışma kapsamında yalnızca Charpy çentik darbe numuneleri destekli olarak üretilmiş ve bu numunelerin camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara maruz bırakılması sonucunda yüzeylerinde belirgin deformasyonlar oluştuğu tespit edilmiştir. Literatürdeki diğer çalışmalar da bu durumu destekler nitelikte olup, destekli üretilen numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında daha fazla deformasyona uğradığını; yüksek sıcaklık etkisiyle çatlaklar, yüzey sararması gibi görsel deformasyonların meydana geldiğini ortaya koymaktadır.
- Çekme testi sonuçları incelendiğinde, hem akma dayanımı hem de maksimum yük değerleri açısından en yüksek değer 9 saat 48 °C'de bekletilen numunelere, en düşük değer ise 12 saat 72 °C'de bekletilen numunelere ait olduğu tespit edilmiştir. Yapılan

analizler sonucunda, orijinal numuneye kıyasla yaşlandırmanın genel olarak malzemenin akma dayanımını ve mukavemetini iyileştirdiği görülmüştür.

- Darbe testi sonuçlarına göre, en yüksek enerji absorpsiyonunun (0,769 J) 12 saat 60 °C’de bekletilen numunede gerçekleştiği, en düşük enerji absorpsiyonunun ise (0,499 J) 6 saat 60 °C’de bekletilen numunede gözlemlendiği tespit edilmiştir. Maksimum ve minimum enerji değerlerinin malzemenin camsı geçiş sıcaklığında ortaya çıktığı, bu iki değer arasında yaklaşık %28,73’lük bir fark olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yaşlandırma işleminin malzemenin darbe mukavemetinde genel bir azalmaya yol açtığı sonucuna varılmıştır.
- Üç nokta eğme testi sonuçlarına göre, kopma uzaması değerinin en yüksek 3,14 mm ile 6 saat boyunca 48 °C’de bekletilen numunede, en düşük 2,02 mm ile 6 saat boyunca 60 °C’de bekletilen numunede olduğu tespit edilmiştir. Maksimum ve minimum değerler arasında yaklaşık %35,67’lik bir fark olduğu görülmüştür. Test numunelerinde maruz bırakılma süresi arttıkça 48 °C’de bekletilen numunelerde kopma uzamasının azaldığı, buna karşın 60 °C’de bekletilen numunelerde kopma uzamasının arttığı sonucuna varılmıştır. Malzemenin camsı geçiş sıcaklığının üzerinde yer alan 72 °C’de ise bu eğilim düzensiz bir şekilde seyretmiş, kopma uzamasında ani düşüş ve artışlar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 72 °C’de elde edilen kopma uzaması değerleri birbirine oldukça yakın olup, orijinal numunenin kopma uzaması değeriyle yakın sonuçlar göstermektedir.
- Genel olarak, gerçekleştirilen testler sonucunda, numunelerin camsı geçiş sıcaklığına kadar ısıtılması durumunda malzeme mukavemetinde bir artış gözlemlendiği; ancak yaşlandırma fırınında bekleme süresinin artmasıyla birlikte mekanik dayanımın azaldığı tespit edilmiştir.
- Gri ilişki analizi sonuçlarına göre ise ilk sırada yer alan, en optimal parametrenin 12 saat 60 °C olduğu; son sıradaki parametrenin ise 9 saat 60 °C’ ye ait olduğu tespit edilmiştir.

6.2. Öneriler

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 nerilmektedir; 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.





KAYNAKLAR

1. Rosen, D.W. (2014). *What are Principles for Design for Additive Manufacturing?*. Proceedings of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing(Pro-AM 2014), 85-90.
2. Guo, N. and Leu, M.C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215–243.
3. Melchels, F.P.W. ,Feijen, J. and Grijpma, D.W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121-6130.
4. Mukhtarkhanov, M., Perveen, A. and Talamona, D.(2020). Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting. *Micromachines*, 11(10), 946.
5. Gür,Y. (2021). Bilgisayarlı Tomografi Verilerinden Anatomik Ayak Kemik Yapısının Ultraviyole Ledli 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretimi. *European Journal of Science and Technology*, 22, 128-133.
6. Aktitiz ,İ., Aydın,K. ve Topçu, A.(2020). Stereolitografi (SLA) Tekniği ile Basılan 3 Boyutlu Polimer Yapılarda İkincil Kütleme Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 949-958.
7. ASTM D3045-18. (2018). Standard Practice for Heat Aging of Plastics Without Load.
8. Verdu, J.(1994). Effect of Aging on the Mechanical Properties of Polymeric Materials. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 31(10), 1383-1398.
9. Kuo, Y., Yang, T. and Huang, G.W.(2008). The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems. *Computers & Industrial Engineering*, 55(1), 80–93.
10. Wang, X. (2019). Application of Grey Relation Analysis Theory to Choose High Reliability of the Network Node. *Journal of Physics: Conference Series*, 1237(3), 032056.
11. Kökçam , A.H., Uygun, Ö. ve Kılıçaslan, E. (2018). Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Optimum Lastik Seçimi. *Zeki Sistemler Teori ve Uygulamaları Dergisi*, 1(1), 31-35.
12. Zue, Z., Hu, Z., Seet, H.L., Liu, T., Liao, W., Ramamurty, U. and Nai, S.M.L.(2023). Recent progress on the additive manufacturing of aluminum alloys and aluminum matrix composites: Microstructure, properties, and applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,190(5), 104047.
13. Calignano, F. and Mercurio,V. (2023). An overview of the impact of additive manufacturing on supply chain, reshoring, and sustainability. *Cleaner Logistics and Supply Chain* , 7, 100103.

14. DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson-Heid, A., De, A. and Zhang, W.(2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92(5) , 112–224.
15. Ford,S. and Despeisse, M.(2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587.
16. Costabile, G., Fera, M., Fruggiero, F., Lambiase, A. and Pham , D.(2017). Cost models of additive manufacturing: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(2), 263–282.
17. ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.
18. ISO/ASTM 52900:2021(E) , Additive manufacturing- General principles – Fundamentals and Vocabulary.
19. Nieto, D.M. and Sánchez, D.M. (2021). Design for Additive Manufacturing: Tool Review and a Case Study. *Applied Sciences*, 11(4), 1571.
20. Veeman, D., Sudharsan, S., Surendhar, G.J., Shanmugam, R. and Guo, L.(2023). Machine learning model for predicting the hardness of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene. *Materials Today Communications*, 35(10), 106147.
21. Hull, C.W., (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, *US Patent*, 4575330.
22. Yalçın, B. ve Ergene,B. (2017). Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemeli İmalat Yöntemi ve Metalurjisi. *SDU International Journal of Technological Science* , 9(3), 65 – 88.
23. Ba’rtolo, P.J. (2011). Stereolithography: Materials, Processes and Applications. *Springer Science & Business Media*
24. İnternet: Dassault Systems, <https://www.3ds.com/make/service/3d-printing-service/sla-stereolithography>, Son Erişim Tarihi: 11.01.2024.
25. Srivastava, M., Rathee, S., Patel, V., Kumar, A. and Koppad, P.G. (2022). A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2612-2641.
26. Roberson, G.A. and Sinha, P.K. (2022). 3D printing in orthodontics: A practical guide to the printer technology and selection. *Seminars in Orthodontics*, 28(2), 100-106.
27. Saçak, M. (2023). Polimer Kimyası. *Gazi Kitapevi*, 10. Baskı.
28. İnternet: Science History Institute, <https://www.sciencehistory.org/education/classroom-activities/role-playing-games/case-of-plastics/history-and-future-of-plastics/>, Son Erişim Tarihi: 11.01.2024.

29. Zhou, L., Fu, J. and He, Y. (2020). A Review of 3D Printing Technologies for Soft Polymer Materials. *Advanced Functional Materials*, 30(28), 2000187.
30. İnternet: Thermal phase transitions of polymers - A102, <https://compositeskn.org/KPC/A102>, Son Erişim Tarihi: 11.01.2024.
31. Shrivastava, A. (2018). Introduction to Plastic Engineering. *Plastic Design Library*.
32. İnternet: Semesters.in, <https://semesters.in/what-are-polymers-and-classification-of-polymers-notes-pdf-ppt/>, Son Erişim Tarihi: 11.01.2024.
33. Gerengi, H. Altundal, G. (2013). Lastik ve Plastik Teknolojileri Programlarında Okutulan Elastomer Teknolojisi Dersi İçeriğinin Oluşturulması. *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 3(4), 72-78.
34. Sastri, V.R. (2022). Materials Used in Medical Devices. *Plastic Design Library*.
35. İnternet: Thermoset polymers - A105, <https://compositeskn.org/KPC/A105>, Son Erişim Tarihi: 11.01.2024.
36. İnternet: Thermoplastic polymers - A161, <https://compositeskn.org/KPC/A161>, Son Erişim Tarihi: 11.01.2024.
37. Maxwell, A.S., Broughton, W.R., Dean, G. and Sims, G.D.(2005). Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials. *National Physical Laboratory*, MPR 016.
38. Frigione, M. and Rodriguez-Prieto, A.(2021). Can Accelerated Aging Procedures Predict the Long Term Behavior of Polymers Exposed to Different Environments?. *Polymers*, 13(16), 2688.
39. Nayakappa, P.A., Gaurish, W. and Mahesh, G.(2019). Grey Relation Analysis Methodology and its Application. *Research Review International Journal of Multidisciplinary*, 4(2), 2455-3085.
40. Gerus- Gos'ciewska, M. and Gos'ciewski, D. (2022). Grey Relational Analysis (GRA) as an Effective Method of Research into Social Preferences in Urban Space Planning. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 11(1), 102.
41. Tayyar, N., Akcanlı, F., Genç, E. ve Erem I. (2014). BİST'e Kayıtlı Bilişim ve Teknoloji Alanında Faaliyet Gösteren İşletmelerin Finansal Performanslarının Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve Gri İlişkisel Analiz (GİA) Yöntemiyle Değerlendirilmesi. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, 61, 19 – 40.
42. Xu, G., Guo, P., Li, X. and Jia, Y. (2014). Grey Relational Analysis and Its Application Based on the Angle Perspective in Time Series. *Journal of Applied Mathematics*, 8,1-7.
43. Mansour, S., Gilbert, M. and Hague, R. (2007). A study of the impact of short-term ageing on the mechanical properties of a stereolithography resin. *Materials Science and Engineering A*, 447(1-2), 277-284.

44. Puebla, K., Arcaute, K., Quintana, R. and Wicker, R.B. (2012). 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), 374-388.
45. Tröger, C., Bens, A.T., Bermes, G., Klemmer, R., Lenz, J. and Irsen, S. (2008). Ageing of acrylate-based resins for stereolithography: thermal and humidity ageing behaviour studies. *Rapid Prototyping Journal*, 14(5), 305-317.
46. Marin, E., Boschetto, F., Zanocco, M., Doan, H.N., Sunthar, T.P.M., Kinashi, K., Iba, D., Zhu, W. and Pezzotti, G. (2021). UV-curing and thermal ageing of methacrylated stereolithographic resin. *Polymer Degradation and Stability*, 185(2), 109503.
47. Wu, C., Meng, B.C., Tam, L. and He, L. (2022). Yellowing mechanisms of epoxy and vinyl ester resins under thermal, UV and natural aging conditions and protection methods. *Polymer Testing*, 114(2), 107708.
48. Şahbaz, M. ve Akdoğan, E. (2022). Yüksek Yoğunluklu Polietilen Malzemelerde Termal Yaşlandırmanın Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. *European Journal of Science and Technology*, 34, 757-762.
49. Turan, S.R., Ulkir, O., Kuncan, M. ve Buldu, A. (2022). Stereolithografi Eklemeli İmalat Yöntemiyle Farklı Doluluk Oranlarında Üretilen Numunelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(3), 399-407.
50. Zirak, N., Shirinbayan, M., Benfriha, K., Deligant, M. and Tcharkhtchi, A. (2022). Stereolithography of (meth)acrylate-based photocurable resin: Thermal and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(22).
51. Ambrosio, D., Gabrion, X., Malecot, P., Amiot, F. and Thibaud, S. (2020). Influence of manufacturing parameters on the mechanical properties of projection stereolithography–manufactured specimens. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(5), 265-277.
52. Liu, H., Yang, N., Sun, Y., Yang, L. and Li, N. (2019). Effect of the build orientation on the mechanical behaviour of polymers by stereolithography. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 612.
53. Rios, A.L.S., Kesterke, M.J., Pylant, G.D., Barmak, A.B., Kontogiorgos, E.D. and Revilla-Leon, M. (2023). Effect of print orientation, storage conditions, and storage time on intaglio surface accuracy of implant surgical guides fabricated by using a stereolithography technology. *The Journal of Prosthetic Dentistry*.
54. Revilla-Leon, M., Supaphakorn, A., Barmak, A.B., Rutkunas, V. and Kois, J.C. (2023). Influence of print orientation on the intaglio surface accuracy (trueness and precision) of tilting stereolithography definitive resin-ceramic crowns. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 144, 104960.

55. Arjun, P., Bidhun, V.K., Lenin, U.K., Amritha, V.P., Pazhamannil, R.V. and Govindan, P. (2022). Effects of process parameters and annealing on the tensile strength of 3D printed carbon fiber reinforced polylactic acid. *Materials Today: Proceeding*, 62(5), 7379-7384.
56. Bhandari, S., Lopez-Anido, R.A. and Gardner, D.J. (2019). Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. *Additive Manufacturing*, 30(2), 100922.
57. Valvez, S., Silva, A.P., Reis, P.N.B. and Berto, F. (2022). Annealing effect on mechanical properties of 3D printed composites. *Procedia Structural Integrity*, 37, 738–745.
58. Jayanth, N., Jaswanthraj, K., Sandeep, S., Mallaya, N.H. and Siddharth, S.R. (2021). Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 123, 104764.
59. Coşkun, M. (2019). *3 boyutlu yazıcıda üretilmiş parçalara uygulanan ısı işlemlerin mekanik özelliklere etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
60. Özdemir, H.C. (2023). *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.
61. İnternet: GRAY Colored UV basic Resin Anycubic 0.5 kg. <https://anycubic.biz/gray-grey-colored-uv-basic-resin-anycubic-05-kg>. Son Erişim Tarihi: 11.01.2024.
62. ASTM D638 – 22, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
63. ASTM D790 – 17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
64. ASTM D6110 – 18, Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics.
65. İnternet: Anycubic, <https://www.anycubic.com/>. Son Erişim Tarihi: 11.01.2024.
66. Wegman, R.F. and Twisk, J.V. (2013). Thermoset Material. *Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding*, Second Edition.
67. İnternet: Thermosetting Polymers, <https://unacademy.com/content/jee/study-material/chemistry/thermosetting-polymers/>, Son Erişim Tarihi: 08.12.2024.
68. İnternet: Thermosetting Polymers, <https://byjus.com/chemistry/thermosetting-polymers/>, Son Erişim Tarihi: 08.12.2024.
69. García-Moreno, I., Caminero, M.A., Rodríguez, G.P. and López-Cela, J.J. (2019). Effect of Thermal Ageing on the Impact and Flexural Damage Behaviour of Carbon Fibre-Reinforced Epoxy Laminates. *Polymers*, 11(1), 80.





Gazili olmak ayrıcalıktır