T.C.

MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLMİŞ AUXETİC NANOKOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yazar

Umut TANYERİ

Danışman

Doç. Dr. Farshıd KHOSRAVI

MANİSA–2025

UMUT TANYERİ	ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLMİŞ AUXETİC NANOKOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ	2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm litaretür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Umut TANYERİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER I

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ II

ŞEKİLLER DİZİNİ III

TABLO DİZİNİ IV

TEŞEKKÜR V

ÖZET VI

ABSTRACT VII

1. GİRİŞ 1

1.1. Giriş 1

1.2. Literatür 3

1.2.1.Auxetic ile İlgili Çalışmalar 3

1.2.2.Termoplastik ile İlgili Çalışmalar 11

1.2.2.1.PLA 12

1.2.2.2.ABS 12

1.2.2.3.Nanotakviyeli Kompozitler 13

2. GENEL BİLGİLER 15

2.1. Üç Boyutlu Yazıcılar 15

2.2. Evolvent Eğrisi 16

2.2.1. Evolvent Eğrisinin Özelilkleri 16

2.2.2. Evolvent Eğrisi Tabanlı Auxetic Hücreler 17

2.3. Bilgisayar Destekli Tasarım 17

2.3.1. CATIA 18

3. DENEYSEL KISIM 19

3.1. Evolvent Profilin Tasarımı 19

3.2. Çekme Numunelerinin Tasarımı 24

3.3. Basma Numunelerinin Tasarımı 27

3.4. Saf PLA ve Nanopartikül Takviyeli PLA Filamentlerin Üretimi 29
3.5. Üç Boyutlu Yazıcıda Üretim 34
3.6. Deney Planlaması 35
3.6.1. Filament Çekme Testi 37
3.6.2. Numune Çekme Testi 37
3.6.3. Auxetic Çekme Testi 38
3.6.4. Auxetic Basınç Testi. 38
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 40
4.1. SEM İncelemesi 40
4.2. Filament Çekme Testi Deneyi Sonuçları 50
4.3. Standart Çekme Numunelerin Test Sonuçları 52
4.4. Auxetic Çekme Testi Deneyi Sonuçları 55
4.4.1. Tasarım Temelinde Test Sossnuçları 66
4.4.2. Malzeme Temelinde Test Sonuçları 69
4.5. Auxetic Basınç Testi Deneyi Sonuçları 73
4.5.1. Tasarım Temelinde Test Sonuçları 75
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 82
KAYNAKLAR 84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

3B, 3D	Üç Boyutlu
ABS	Akrilonitril Bütadiyen Stiren
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAE	Bilgisayar Destekli Mühendislik
CAM	Bilgisayar Destekli Üretim
CNT	Karbon Nanotüp
EYM	Eriyik Yığma Modelleme
NURBS	Uniform Olmayan Rasyonel B-Splines
PLA	Polilaktik Asit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiC	Silisyum Karbür
TiO_2	Titanyum dioksit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Peteklerin elastik deformasyonuna yönelik modeller 4

Şekil 1.2 Chiral petek özellikleri 4

Şekil 1.3 Kare dönen yapılar 5

Şekil 2.1 Evolvent Oluşturma 16

Şekil 3.1 Çizgi Profil Tanımlama 21

Şekil 3.2 Yatay Çizginin Oluşturulması 21

Şekil 3.3 X Ekseni Etrafında Çoğaltma 22

Şekil 3.4 Spline ile Evolvent Profilin Oluşturulması 23

Şekil 3.5 Çekme Numune Referans Şablonları 24

Şekil 3.6 Çekme Numunesi-1 25

Şekil 3.7 Çekme Numunesi-2 26

Şekil 3.8 Çekme Numunesi-3 26

Şekil 3.9 Basma Numunesi-1 28

Şekil 3.10 Basma Numunesi-2 28

Şekil 3.11 Basma Numunesi-3 28

Şekil 3.12 PLA'nın fırın içinden görüntüsü 29

Şekil 3.13 PLA nem kurutma için fırın parametrikleri 30

Şekil 3.14 Ekstrüder makinasından görüntü 30

Şekil 3.15 Ekstrüder Parametreleri 31

Şekil 3.16 Sarım öncesi filament soğutma 32

Şekil 3.17 Otomatik Sarım Makinası 33

Şekil 3.18 Otomatik sarım makinası parametreleri 33

Şekil 3.19 Üretimde kullanılan üç boyutlu yazıcı 35

Şekil 3.20 Çekme Test Cihazı 36
Şekil 3.21 Filament çekme testi deney düzeneği 37
Şekil 3.22 Auxetic olmayan çekme numuneleri 38
Şekil 3.23 PLA ile üretilmiş basma numuneleri 39
Şekil 4.1 Saf PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü..... 40
Şekil 4.2 %0,5 CNT takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 41
Şekil 4.3 %1 CNT takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 42
Şekil 4.4 %1,5CNT takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 43
Şekil 4.5 %0,5Sic takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 44
Şekil 4.6 %1 Sic takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 45
Şekil 4.7 %1,5 Sic takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 46
Şekil 4.8 %0,5 TiO2 takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 47
Şekil 4.9 %1 TiO2 takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 48
Şekil 4.10 %1,5 TiO2 takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 49
Şekil 4.11 Test sonrası numunelerin görüntüsü 55
Şekil 4.12 Tasarım-1 saf PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü.... 56
Şekil 4.13 Tasarım-2 saf PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü.... 57
Şekil 4.14 Tasarım-3 saf PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü.... 58
Şekil 4.15 Tasarım 1 %0,5SiC PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü 59
Şekil 4.16 Tasarım 2 %0,5SiC PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü 59
Şekil 4.17 Tasarım 3 %0,5SiC PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü 60
Şekil 4.18 Tasarım 1 %1SiC PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü 60
Şekil 4.19 Tasarım 2 %1SiC PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü 61
Şekil 4.20 Tasarım 3 %1SiC PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü 61
Şekil 4.21 Tasarım 1 %0,5CNT PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü .. 62
Şekil 4.22 Tasarım 2 %0,5CNT PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü .. 63

Şekil 4.23 Tasarım 3 %0,5CNT PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü .. 63

Şekil 4.24 Tasarım 1 %1CNT PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü 65

Şekil 4.25 Tasarım 2 %1CNT PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü 65

Şekil 4.26 Tasarım 3 %1CNT PLA için yük deplasman ve hasar görüntüsü 65

Şekil 4.27 Tasarım 1 için farklı malzemelerden yapılmış çekme testleri 66

Şekil 4.28 Tasarım 2 için farklı malzemelerden yapılmış çekme testleri 67

Şekil 4.29 Tasarım 3 için farklı malzemelerden yapılmış çekme testleri 68

Şekil 4.30 PLA'dan üretilmiş tasarımların kıyaslanması..... 70

Şekil 4.31 %1Sic katkılı PLA'dan üretilmiş tasarımların kıyaslanması 71

Şekil 4.32 %0,5Sic katkılı PLA'dan üretilmiş tasarımların kıyaslanması 71

Şekil 4.33 %0,5CNT katkılı PLA'dan üretilmiş tasarımların kıyaslanması 72

Şekil 4.34 %1CNT katkılı PLA'dan üretilmiş tasarımların kıyaslanması 72

Şekil 4.35 Tasarım-1 için PLA malzeme basınç test grafiği ……. 73

Şekil 4.36 Tasarım-2 için PLA malzeme basınç test grafiği ……. 74

Şekil 4.37 Tasarım-3 için PLA malzeme basınç test grafiği ……. 75

Şekil 4.37 Basma testine göre tasarımların kıyaslanması ……. 76

TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. Filament Testinden Elde Edilen Sonuçlar:

..... 51

Tablo 4.2. Çekme Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar:

..... 53

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde bilgi, deneyim ve akademik rehberliğiyle yol gösteren, çalışmam boyunca desteğini her zaman hissettiren değerli danışmanım Doç. Dr. Farshıd KHOSRAVI'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında 3 boyutlu yazıcı ve filament üretimi konusundaki katkıları ve sağladıkları teknik destek nedeniyle Dr. Öğretim Üyesi Uğur ÖZMEN ve Araştırma Görevlisi Kemal AYAN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde 2024-119 koduyla finans ve motivasyon desteği ile tamamlanmasını sağlayan Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ayrıca teşekkür ederim.

Bu süreçte her daim yanımda olan, sabrıyla ve desteğiyle bana güç veren sevgili eşim Neslihan TANYERİ'ye minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Umut TANYERİ

Manisa, 2025

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Umut TANYERİ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Farshıd KHOSRAVI

Bu tez çalışmasında, farklı nanoparçacık katkıları ve geometrik tasarımlar ile üretilen PLA (polilaktik asit) esaslı kompozit yapıların mekanik özellikleri kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, TiO_2, SiC ve CNT nanotozları kullanılarak PLA matrisi içerisinde üç farklı ağırlık yüzdesinde (%0,5, %1,0 ve %1,5) kompozit filamentler üretilmiş ve bu filamentlerin mekanik davranışları çekme testleri ile karakterize edilmiştir. Filament üretim aşamasını takiben, aynı kompozit malzemeler 3B yazıcıda çekme numunesi formunda üretilmiş ve numunelerin mekanik özellikleri (elastisite modülü, kopma mukavemeti, maksimum gerinim) elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, involute eğrileri temel alınarak geliştirilmiş üç farklı auxetic geometri kullanılarak hem çekme hem de basma numuneleri tasarlanmış ve aynı malzeme kombinasyonları ile 3B yazıcıda üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneysel testler sonucunda auxetic davranışa özgü geometrik deformasyon mekanizmaları incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, nanoparçacık türü ve ağırlık yüzdesinin filament ve baskı numunesinin mekanik performansını önemli ölçüde etkilediğini; ayrıca auxetic geometrinin yük altındaki deformasyon türü, rijitlik ve dayanım üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. Hem malzeme modifikasyonunun hem de geometrik

tasarımın mekanik özellikler üzerinde güçlü ve birbirini tamamlayıcı etkiler ürettiği görülmüştür. Bu çalışma, 3B yazıcı ile üretilecek yüksek performanslı yapısal elemanlarda malzeme tasarımı ve geometrik optimizasyonun birlikte değerlendirilmesine yönelik önemli katkılar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: auxetic, nanokompozit, çekme testi, poisson oranı

2025, 82 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Umut TANYERİ

Manisa Celal Bayar University

Graduate School of Applied and Natural Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Farshıd KHOSRAVI

In this thesis, the mechanical properties of PLA (polylactic acid)-based composite structures produced with different nanoparticle reinforcements and geometric designs were comprehensively investigated. For this purpose, composite filaments were fabricated by incorporating TiO_2, SiC, and CNT nanopowders into the PLA matrix at three different weight fractions (0.5%, 1.0%, and 1.5%), and the mechanical behavior of these filaments was characterized through tensile testing. Following filament fabrication, the same composite materials were used to produce standard tensile specimens via 3D printing, and their mechanical properties—including elastic modulus, tensile strength, and maximum strain were evaluated.

In the second phase of the study, three auxetic geometries developed based on involute curves were utilized to design both tensile and compression specimens, which were manufactured using the same material combinations via 3D printing. Experimental tests conducted on these specimens enabled the investigation of deformation mechanisms specific to auxetic behavior.

The results demonstrated that both the type and weight fraction of nanoparticles significantly influence the mechanical performance of the filaments and the printed specimens. Additionally, auxetic geometry plays a critical role in determining the deformation mode, stiffness, and load-bearing capacity under mechanical loading. Overall, the study shows that material modification and geometric design act as strong and complementary factors in shaping mechanical performance. These findings provide valuable insights for the combined optimization of material selection and geometric design in the development of high-performance structural components produced through additive manufacturing.

Keywords: auxetic, nanocomposite, tensile test, poisson ratio

2025, 82 pages

1-GİRİŞ

Son yıllarda, endüstriyel üretim yöntemleri ve malzeme teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, ürün tasarımı ve performansında önemli ilerlemelere olanak tanımaktadır. Özellikle geleneksel üretim teknikleriyle üretilmesi zor olan karmaşık geometriye sahip yapıların geliştirilmesinde eklemeli imalat (3 boyutlu yazıcı) yöntemleri büyük bir avantaj sunmaktadır. Katmanlı imalat olarak da adlandırılan bu teknoloji, malzemenin katmanlar halinde biriktirilerek üç boyutlu parçaların doğrudan bilgisayar ortamındaki modellerden üretilmesine imkân vermektedir. Prototip üretiminden son ürün üretimine kadar uzanan geniş kullanım alanı sayesinde 3B yazıcı teknolojileri, düşük maliyet, hızlı üretim, kişiselleştirilmiş tasarım ve geometri açısından esneklik gibi özellikleriyle günümüzde en çok araştırılan üretim yöntemlerinden biri haline gelmiştir.

Eklemeli imalatın sağladığı en önemli avantajlardan biri, karmaşık hücresel yapılara sahip geometri tasarımlarının gerçeğe dönüştürülebilmesidir. Bu kapsamda, son yıllarda negatif Poisson oranına sahip auxetic yapılar özel ilgi görmektedir. Klasik malzemeler bir eksen boyunca çekme yüküne maruz kaldıklarında enine yönde daralma eğilimi gösterirken, auxetic malzemeler tam tersi davranış sergileyerek genişleme eğilimi göstermektedir. Bu özel mekanik davranış, malzemenin iç yapısındaki sönümleme kapasitesi, darbe dayanımı, delinme ve yırtılma direncinin artması gibi özellikler sunar. Bu nedenle havacılık, otomotiv, savunma sanayii, spor malzemeleri ve biyomedikal implantlar gibi farklı uygulama alanlarında giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle geometri odaklı bu üstün performans özellikleri, 3B yazıcı teknolojilerinin sunduğu özgürlükle birleştiğinde, yenilikçi tasarımlar için önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Auxetic yapıların performansını belirleyen iki temel faktör vardır: geometrik tasarım ve malzemenin mekanik özellikleri. Geometrinin avantajlarını en üst düzeye çıkarmak için, kullanılan malzemenin de yeterli dayanım ve rijitlik özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Polimer malzemeler, düşük ağırlıkları ve 3B yazıcılarla uyumlu işlenebilirlikleri sayesinde bu tür yapılarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak saf polimerlerin mekanik özellikleri sınırlı olduğundan, dayanım ve sertlik gerektiren uygulamalarda hücresel geometriye dayalı olarak ortaya çıkar.

Bu sınırlamayı aşmak için son yıllarda nanopartikül takviyeli polimer kompozitler ön plana çıkmıştır. Nanopartiküller, yüzey alanlarının büyük olması ve matrisle güçlü etkileşim kurabilmeleri sayesinde polimerin mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Bu tez çalışmasında, 3 boyutlu baskıda yaygın olarak kullanılan ve biyobozunur özellikleri ile çevre dostu bir polimer olan polilaktik asit (PLA) tercih edilmiştir. PLA'ya üç farklı nanopartikül (titanyum, Silisyum Karbür ve karbon esaslı nanopartiküller) ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında ilave edilerek kompozit filamentler hazırlanmıştır. Bu katkıların mekanik dayanım, sertlik ve enerji soğurma özelliklerine olumlu etkilerde bulunması beklenmektedir.

Bu tez kapsamında, nanopartikül takviyeli PLA malzemeler kullanılarak çeşitli auxetic geometriler tasarlanmış ve 3B yazıcı ile üretilmiştir. Tasarımlar CATIA yazılımında oluşturulmuş, farklı hücresel yapılar denenmiş ve bunlar arasında evolvent eğrisi tabanlı özel bir geometri de geliştirilmiştir. Bu sayede, literatürde yaygın olarak kullanılan re-entrant, chiral gibi auxetic tasarımlara ek olarak yeni bir hücresel desenin mekanik davranışı incelenmiştir.

Çalışmanın deneysel kısmında ise mekanik özelliklerin kapsamlı şekilde incelenmesi amacıyla çekme ve basınç testleri için numuneler üretilmiştir. Çekme testi numuneleri, ilgili ASTM standardında belirtilen boyutlara göre hazırlanmış ve hem auxetic geometriye sahip numuneler hem de karşılaştırma amacıyla düz (auxetic özellik taşımayan) numuneler üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Basma testleri için de yine aynı malzeme kombinasyonları kullanılarak farklı nanopartikül oranlarında numuneler üretilmiştir. Bu deneysel çalışma ile hem geometrik tasarımın hem de nanopartikül katkı oranlarının mekanik performansa etkisi bütüncül olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı; nanopartikül katkısının, katkı oranlarının ve auxetic geometri farklılıklarının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini deneysel olarak ortaya koymak ve bu doğrultuda tasarım ve malzeme parametreleri arasındaki ilişkiyi analiz etmektir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçların, eklemeli imalatla üretilen auxetic yapıların daha dayanıklı ve işlevsel hale getirilmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Bu doğrultuda tez kapsamında:

- Nanopartikül takviyeli PLA malzemeler hazırlanmış,
- CATIA V5 yazılımında farklı auxetic geometri tasarımları yapılmış,
- 3B yazıcı ile üretilen numuneler üzerinde çekme (ASTM standartlarında), çekme ve basma testleri gerçekleştirilmiş,
- Elde edilen sonuçlar ışığında nanopartikül takviyesinin ve geometri parametrelerinin mekanik davranışa etkisi değerlendirilmiştir.

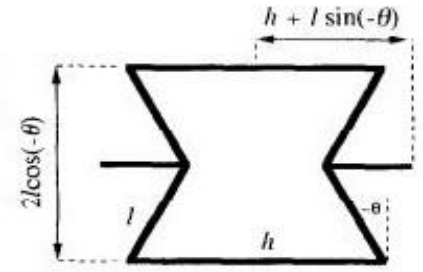
Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde öncelikle auxetic yapıların ve nanopartikül takviyeli polimer malzemelerin literatürdeki yeri ve özellikleri açıklanacak, ardından kullanılan yöntem ve deneysel prosedürler detaylandırılacaktır. Sonraki bölümlerde elde edilen bulgular analiz edilerek tartışılacak ve sonuç bölümünde bu çalışmanın literatüre ve endüstriye olası katkıları vurgulanacaktır.

1.2. Literatür

1.2.1 Auxetic Geometri ile İlgili Çalışmalar

Malzemelerin davranış karakterini anlamamıza yarayan elastisite modülü, poisson oranı gibi önemli parametreler bulunmaktadır. Denis poisson 1800'lü yıllarda yaptığı çalışmalarda uzama zorlanmasının etkisi altındaki cisimlerin zorlanmaya dik olan diğer doğrultularda kısalma meydana geldiğini bulmuştur. Kısalmaya sebep olan zorlanmalarda ise diğer dik doğrultularda uzamaya sebep olduğunu bulmuş ve bu kısalma ve uzama oranına poisson oranı demiştir. Fakat Ken Evans bunun tam tersi davranabilen malzemeler olduğunu "auxetic" olarak adlandırarak şok emici sistemlerde, sızdırmazlık contalarında, biyomedikal alanlar gibi çeşitli yerlerde kullanılmasını önermiştir (Evans,1991).

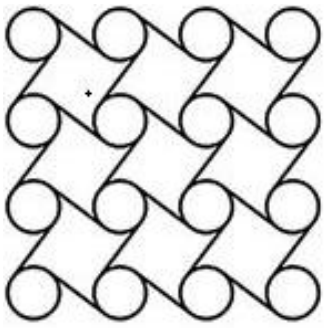
1996 yılında re-entrant olarak adlandırılan yeniden girintileme metodu ile oluşturulan hegzagonal şeklinde balpeteği örgüsü ile oluşturulan auxetic geometri tanıtılmıştır. Altıgenin açılı kenarları içe doğru iç bükey oluşturarak diğer hücrelerle birleşmektedir. Birleşerek oluşan bu yapı 2 boyutlu olarak ele alınarak tüm geometrik parametlerinin malzeme sabitlerini etkileyen matematik modelleri elde edilmektedir (Masters ve Evans, 1996).



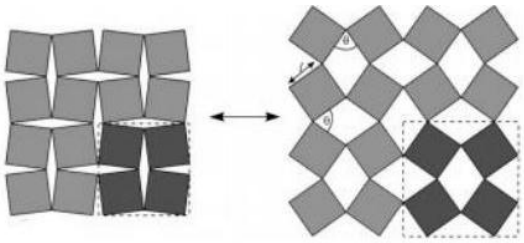
Şekil 1.1 Petek elastik deformasyon modeli (I. G. Masters & K. E. Evans, 1996)

Buradaki çalışmada auxetic yapılar tanıtıldıktan sonra endüstride giyimde enerji yutucu avantajlarından dolayı kullanımı ile ilgili araştırmalar sunmaktadır. Balpeteği hücresel yapısı ile elde edilmiş geometrinin sonlu eleman analiz sonuçları paylaşılmaktadır. Auxetic ve konvansiyonel foamların sonuçları karşılaştırılmaktadır (Grima, J. N., 2000).

Yine 2 boyutlu ele alınarak yapılan çalışmalarda 1997 yılında re-entrant yapıya alternatif bir çalışma yayımlanmıştır. Bu çalışmada chiral balpeteği olarak yeni bir geometri tasarlandığı ifade edilmekte ve re-entrant geometri ile strain-poisson grafiği üzerinden bir karşılaştırması sunulmaktadır. Bu karşılaştırma ile ilgili deneysel çalışmalar yapıldığı belirtilmektedir. Aynı zamanda re-entrant balpeteği geometrisinin deneysel ve teorik karşılaştırması yapılmaktadır (Lakes, 1997).



Şekil 1.2 Chiral petek özellikleri (Lakes, 1997)



Şekil 1.3 Kare dönen yapılar (Grima, J.N., Evans, 2000)

Bunların dışında dönel yapı olarak isimlendirilmiş geometrik çalışma Grima ve Evans tarafından yayımlanan bir çalışmada tanıtılmaktadır. Kare ve üçgen gibi hücrelere sahip yapı negatif poisson oranı davranışı göstermektedir. Şekil değiştirmeden birbirilerinin temas noktaları üzerinde dönmesine yönelik bir mekanizma tanıtılmaktadır. Bu tipteki geometriler yaygın olarak inorganik kristalli malzemelerde bulunmaktadır (Grima ve Evans, 2000).

Geleneksel mühendis malzeme ve yapıların dışına çıkmak insanlığın ilerleyen ve artan ihtiyaçlarına yanıt verebilmek için elzem hale gelmektedir. Bunun yanı sıra imalat metodu olarak eklemeli imalat gibi yöntemler de hızlı deneme yanılma süreçleri için devamlı ilerlemektedir. Auxetic yapıdaki malzemeler günümüzün araştırma konusudur. 2017 yılında Zapperi tarafından yapılan çalışmada doğada bulunan auxetic malzemelerin incelemesi yapılmaktadır. Özgün mikroyapıları ile birçok mekanik özellik içeren bu yapılar bilinen malzemelerden çok farklı olduğu tespit edildiği belirtilmektedir (Zapperi, 2017).

Bu çalışmada geometri için PLA granüller ve hücresel auxetic yapılar kullanıldığı görülmektedir. Yazar auxetic malzemeyi tanımlayarak çeşitli geometrilerden elde edilebileceğini söylemektedir. Çalışmada re-entrant ve chiral olarak bilinen geometriler kullanılmaktadır. İskelet yapısına sahip olması düşük yoğunlukta yüksek mukavemet sağlar. Günümüzde bu mekanizmaya dayanarak mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek tasarımlar üzerinde çalışılmaktadır. Özellikle medikal alanda, yüksek hassasiyetli ve spesifik ürünlerin tasarlanıp üretildiği alanlarda önemli bir yere sahip olduğu belirtilmektedir. 3D yazıcı teknolojisi ile olan ilişkisi göz önüne alındığında, 3D yazıcı, karmaşık ve spesifik tasarımlara yönelik auxetic yapıların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Auxetic yapıların yeniliği, uygulanan yüke karşı sezgiye aykırı tepki gösteren topolojik özelliklerinden

kaynaklanmaktadır. Mekanik özelliklerin karşılaştırılması amacıyla çekme, basma, yüzey pürüzlülük testleri uygulanmakta olduğu görülmektedir. Kiral yapıların varlığının mekanik performansı arttırdığı sonucuna varılmaktadır. Kiral yardımcı numune, maksimum 6,68 MPa'lık bir gerilim sergilemekte olup; eksik kaburga yardımcı numunesi, maksimum 2,26 MPa'lık bir gerilim sergilemektedir. Re-entrant numune, maksimum 3,68 MPa'lık bir gerilim sergilemektedir. Testlerden elde edilen bu sonuçlar, literatürde bildirilen 1-12 MPa aralığına oldukça uygun olarak belirtilmektedir. Tamamı auxetic geometri numulerin yazma yönüne dik yüzey pürüzlülüğü, yazma yönüne paralel alınan ölçümlerden daha yüksek olduğu görülmektedir (Joseph, 2021).

Negatif poisson oranlı malzemeler yüksek teknoloji standartları ile çalışan savunma ve havacılık gibi endüstrilerde de uygulanmaktadır. Çalışmalar ve deneyler, yardımcı malzemelerin (yani NPR'li malzemelerin), yapıldıkları geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında kesme direnci, girinti direnci ve kırılma dayanıklılığı dahil olmak üzere mekanik özellikleri geliştirebildiğini göstermiştir. Bu yardımcı malzemeler ayrıca çok iyi ses ve titreşim emilimi sunar ve havacılık ve savunma alanlarında birçok potansiyel uygulamaya sahip olabilir. Bu rapor, özellikle havacılık ve savunma olmak üzere yardımcı malzemeler, yapısal mekanizmalar, özellikler ve uygulamalara ilişkin araştırma çalışmalarındaki en son gelişmeleri kısaca gözden geçirmektedir. Gerçekten de, bu yeni malzeme türlerinin, kişisel koruyucu ekipmanlar (örn. koruyucu giysiler, vücut zırhı, kurşun geçirmez yelek vb.) ve diğerleri (örn. "akıllı" sensörler, sonar, paneller vb.) gibi Savunma alanında birçok potansiyel uygulaması vardır). Ayrıca bu malzemeler potansiyel olarak özel işlevlere sahip tamamen yeni yapılar inşa etmek için kullanılabilir. Ancak bu malzemelerin ve uygulamalarının gerçek bileşenlere daha iyi anlaşılması için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Ayrıca gelecekteki çalışmalarda askeri personelin yaralanmalardan veya kimyasal ve biyolojik saldırılardan korunmasına yönelik potansiyel uygulamaları araştırmak amacıyla tekstil, kimya ve biyolojik alanlardan araştırmacılarla iş birliği yapılması gerekmektedir. Bir yardımcı malzeme, geleneksel bir malzemeden farklı olan olağanüstü özellikler sergiler. Yani, yardımcı malzeme gerildiğinde kalınlaşır veya sıkıştırıldığında küçülür çünkü negatif Poisson oranına sahiptir. Bu rapor, özellikle havacılık ve savunma olmak üzere yardımcı malzemeler,

yapısal mekanizmalar, özellikler ve uygulamalara ilişkin araştırma çalışmalarındaki en son gelişmeleri kısaca gözden geçirmektedir (Q. Liu, 2006).

Hafif sandviç yapılar, özellikle otomotiv, denizcilik ve havacılık gibi çeşitli uygulama alanlarında hızlı bir şekilde yayılarak kullanılmaktadır. Hızla yayılmanın başlıca nedenleri, bu yapıların yüksek özgül bükülme sertliğine ve enerji emme kapasitesine sahip olmasıdır. Sandviç yapılar temelde çekirdek ve yüz tabakalarından oluşmaktadır. Bu temel bileşenler arasında yapıya seçicilik ve değişkenlik kazandıran esas eleman çekirdek yapılardır. Birçok farklı amaç ve uygulama için çok sayıda analitik ve deneysel çalışma sonucunda geliştirilen çekirdek yapıların temeli, gözenekli malzemeler ve yapılardan oluşur. Birbirlerine göre farklı avantajları bulunan bu yapıların kullanım alanları istenilen özelliklere göre belirlenir. Bilinen birçok mühendislik malzemesi geleneksel olarak nitelendirilen pozitif poisson oranına sahiptir. Son zamanlarda, özellikle eklemeli üretim yöntemlerindeki gelişmelerle geleneksel davranışı olmayan negatif poisson oranlı (NPO) yeni yapılar ve malzemeler de ortaya çıkmaya başlamıştır. Ökzetik malzemeler veya yapılar olarak adlandırılan bu yeni malzemeler, tasarlanabilir malzemeler olarak da bilinmektedir. Bu mekanizma sayesinde yapılar, özellikle enerji sönümleme ve dayanıklılık konusunda çok üstün özelliklere sahip olabilmektedirler. Bu çalışmada eklemeli üretim yöntemi ile üretilen iki geleneksel ve 3 ökzetik çekirdek geometrisine sahip sandviç yapılar üretilmiştir. Tamamen geridönüştürülebilir biyoplastik PLA malzemesinden üretilen yapıların quasi-statik ve dinamik yükler altındaki enerji sönümleme kabiliyetleri, dayanımları ve hasar mekanizmaları deneysel olarak incelenmiştir (Türkoğlu, 2020).

Quasi-statik yüklerin yanında orta ve yüksek hızlarda çekme basma testlerin olduğu auxetic poliüretan foamların olduğu çalışma incelenmiştir. Quasi statik için 0,01/s , orta hızda test için 1/s, 10/s, 740/s ve yüksek hızlarda test için 1430/s ve 1870/s değerlerinde testler yapıldığı incelenmiştir. Deneyleri gözlemlemek adına LED OMS ve ultra yüksek hızlarda çalışabilen kamera kullanılmaktadır. Gerinim hızının poisson oranını nasıl etkilediği ile ilgili paylaşılan sonuçlar okunmuştur (Zhai, 2019).

Yapısal bir kompozit metamalzeme oluşturmak için birim hücre geometrisinin birden fazla yönde tekrarlanmasıyla yapay auxetic tasarım anlatılmıştır. Yapılan çalışmada kare, auxetic ve petek gibi üç tip tekdüze mimari meta malzemesinin yanı sıra kare-auxetic, yardımcı-bal peteği ve kare-bal peteğinden bir kombinasyon geometri çalışıldığı anlaşılmıştır. Modellenen tüm metamalzeme şablon tasarımlarının

Ansys Workbench CAE yazılımı ile serbest titreşim analizi gerçekleştirilmektedir. Simülasyon testi için kullanılan malzemeler PLA'dır (polilaktik asit). Doğal frekans ve mod şekilleri gibi analizler irdelenmektedir. Kombinasyonlar arasında en yüksek doğal frekansın yardımcı-kare hibrit geometride yani 858 Hz ile 3. doğal frekansta görüldüğü, kare-petek, yardımcı-bal peteği ile karşılaştırıldığında sırasıyla %35 ve %44'e düştüğü gözlemlenmektedir. Hibrit PLA yardımcı meta malzemesinin ortaya çıkan potansiyel uygulama alanı robotik, havacılık, denizcilik, spor ve biyo-medikal endüstrilerini içermektedir (Kushwaha, 2022).

Re-entrant auxetic balpeteği geometrisi için teorik hesaplamalar, bilgisayar simülasyonları ve Poisson oranının deneysel değerlendirmesinin birleşimi araştırılmaktadır. Termoplastik poliüretandan (TPU) yapılan 3D baskılı numuneler için optimum bal peteği hücre parametreleri belirlenmektedir. 3D yazdırılan re-enrtant petek auxetic numunelerinin düşük çevrim sıkıştırma testleri, auxetic altıgen hücreye dayalı tasarımın, benzer auxetic olmayan yapıya kıyasla neredeyse 1,75 kat daha fazla çok düşük yorulma çevrimlerine dayanabildiğini göstermektedir. 500 sıkıştırma döngüsünden sonra auxetic örnekte 3 boyutlu yapılarda ne hata ne de katman delaminasyonu tespit edilmemektedir. 3D yazdırılmış auxetic özgün geometrilerin tıp ve spordaki uygulamalar için umut verici bir aday sunduğu sonucuna varılmaktadır (Lvov, 2020).

Başka bir çalışma, dijital ışık işleme tekniği yoluyla hiper elastik fotopolimer kullanan yeni bir üç boyutlu içbükey kafes yapısını önermektedir. Önerilen yapıların eksenel düşük hızlı darbe davranışları, darbe deneyi makinesi ve sayısal simülasyonla incelenmektedir. Sonuçlar, yeni 3 boyutlu içbükey yapıların, büyük negatif Poisson oranlarıyla sürekli auxetic davranışlar sunabildiğini göstermektedir. İçbükey açı ve kalınlık gibi yapısal tasarım parametrelerinin Poisson oranı ve enerji emilimi üzerinde önemli etkileri olduğu gözlemlenmektedir. Spesifik olarak, içbükey açıları ve kalınlılkları ile ilgili optimum değer elde edilmektedir. En yüksek negatif Poisson oranı -0,86 ile elde edilmektedir. Bu çalışma, geliştirilmiş darbe direncine sahip yeni meta-kafes yapılarının tasarlanması konusunda yeni bir bakış açısı sunduğu belirtilmektedir (Wang, Luo, Wang, Yao, & Peng, 2022).

Bir diğer araştırma, Ansys 19 simülasyon yazılımı ile üç tür temel meta malzemenin (yani Elmas, Auxetic ve Hexagon) ve onun melezlerinin (yani Auxetic-diamond, Auxetic-hexagon ve Diamond-hexagon) modellenmesine ve sıkıştırılmış

simülasyonuna odaklanmaktadır. Altı meta malzemenin tümü, Polilaktik Asit (PLA) malzemesi varsayılarak simüle edilmektedir. 0,1 MPa'da maksimum eşdeğer von-Mises gerilimi, auxetic-elmas hibrit yapısının sıkıştırma analizi sırasında belirgin olduğu gözlemlenmektedir. Auxetic-elmas hibrit yapı için 40mJ'lik daha yüksek enerji emilimi kaydediği gözlemlenmektedir. Yardımcı, elmas, altıgen, yardımcı-altıgen ve elmas-altıgen için sırasıyla %67, %62, %75, %25 ve %40 oranında azalma gözlemlenmektedir. Simülasyon testi sırasındaki deformasyon sonuçları, temel auxetic yapının ve onun hibritinin daha fazla enerji emdiğini doğrulanmaktadır. Hibrit auxetic metamalzemeler, olağanüstü enerji emme yeteneği sergileyen yeni sınıf yapısal elemanlar olarak tanımlanmaktadır (Shruti, Hemanth, Badgayan, & Sahu, 2021).

Makine ve tıp mühendisliği de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda çeşitli tipte negatif poisson oranlı boru şeklinde yapıların tasarımı değerlendirilmektedir. Bu yazıda, çeşitli hücresel auxetic tüpler, gözeneksiz ve gözenekli auxetic tüpler, makro ve mikro auxetic tüpler dahil olmak üzere boru şeklindeki yapıların tasarım yöntemleri ve ileri üretim teknolojileri kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmektedir. Ayrıca, auxetic boru şeklindeki yapıların davranışı, mekanik özellikleri ve potansiyel uygulamaları ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Son olarak, gelecekteki araştırma çalışmalarına ilham vermek amacıyla yardımcı tüplerdeki zorluklar ve fırsatlar tartışılmaktadır (Luo, Han, Zhang, Zhang, Ren, & Xie, 2021).

Çeşitli kalınlıklardaki yumuşak çelik kapak plakalarının, ø16 mm'lik küresel mermilerin 500 m/s hızla nüfuz etmesi altında re-entrant yapıların çökmesini nasıl etkilediğini araştırmaktadır. Bu etkiyi 3D baskılı titanyum alaşımı (Ti6Al4V) ve ABS plastikten (akrilonitril bütadien stiren) ve tel kesilmiş 304 paslanmaz çelikten (SS304) yapılmış auxetic yapılarla yakalamak için deneysel ve nümerik yöntemlerin bir kombinasyonu kullanılmaktadır. Deneysel olarak yapılar 2,90 mm'lik bir kapak plakasıyla ve kapak plakası olmadan test edilmektedir. Sayısal olarak, kapak plakası kalınlığının yapının tepkisi üzerindeki etkisi, 0,95 mm, 1,50 mm ve 2,90 mm kapak plakalarıyla (ve ayrıca kapak plakası olmadan) test edilmektedir. Auxetic yoğunlaşmanın en kalın örtü altında en fazla olduğu görülmektedir. Balistik deneylerle simüle edilmiş korelasyon üreten bu çalışmada, yumuşak çelik kapak ve arka plakalar için mukavemet ve hasar modelleri geliştirmek amacıyla malzeme karakterizasyon testleri yapılmaktadır. Ti6Al4V yapıları ise kapak plakası kalınlığı arttıkça yardımcı yoğunlaşmada istikrarlı bir iyileşme göstermektedir (Cavenagh, 2023).

Çelik malzemeden yapılmış kürenin yüksek hızlı darbesine maruz kalan petek sandviç panellerin dinamik yanıtı ve hasar mekanizmaları üzerine birleşik deneysel ve sayısal bir çalışma sunmaktadır. Yüzey tabakası kalınlığı, çekirdek yüksekliği, hücre duvarı kalınlığı ve petek hücre boyutunun sandviç panellerin darbe davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için yaklaşık 70 ila 170 m/s hız aralığında darbe testleri yapılmaktadır. Bu geometrik parametrelerin esas olarak her iki sandviç yüzey tabakasının deformasyon ve hasar mekanizmalarını değiştirerek darbe performansını etkilediği gösterilmektedir. Her sandviç konfigürasyonunun balistik sınır hızı ve kritik delme enerjisi nümerik analizle elde edilmektedir. Merminin sandviç panele nüfuz etme süreci ve ilgili enerji emme mekanizmaları analiz edilmekte olup; enerji emilimine en çok yüzey tabakalarının katkıda bulunduğunu göstermektedir. Çekirdek sertliğinin ise, ön yüzey tabakasının deformasyonu ve hasar başlangıcı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Son olarak, belirli bir darbe enerjisi altında delinmeden en yüksek spesifik enerji emilimini elde etmek için optimal bir sandviç yapı tasarımı oluşturmak amacıyla ayrık bir optimizasyon gerçekleştirilmektedir. Optimize edilmiş sandviç panel, ilk tasarıma kıyasla spesifik enerji emiliminde %23,7'lik bir artış sergilediği izlemlenmektedir (Sun, Chen, Wang, Hazell, & Li, 2018).

Yeni bir kafes yapı tipi olan auxetic yapılar, geometrik yapılarından dolayı negatif Poisson oranına sahiptirler ve bu özelliği nedeniyle, kayma mukavemeti, penetrasyon direnci, artan kırılma tokluğu ve çatlama ve yüksek enerjiye karşı direnç gibi özelliklere sahiptir denilerek auxetic yapı tanıtılmaktadır. Çalışmada, 3 boyutlu metal yazıcı ile imal edilecek parçaların abaqus cae yazılımı ile analizi yapılmaktadır. Bilgisayar ortamındaki matematik modellenmiş analizlerin validasyonu için deneysel testlerin sonuçları kullanılarak kontrolü ve karşılaştırması sağlanmaktadır. DMLS metodu ile Alsİ10Mg alüminyum alaşım çubuklar üretilmektedir. Daha sonra deneysel testler yapılarak bu malzemelerin mekanik özellikleri çekme testi ile belirlenmiş ve sonlu eleman simülasyonlarında kullanılmaktadır. Model doğrulandıktan sonra, parametrik bir çalışma ile uygun geometriyi belirlemek için sonlu elemanlar simülasyon sonuçları kullanılmaktadır (Özkan, 2022).

Auxetic yapı kiral geometriden oluşmaktadır. Parça Seçici Elektron Işını Eritme yöntemi kullanılarak malzemesi Ti6Al4V alaşımından üretilmektedir. Yarı statik ve dinamik bası yüklemelerine karşı test yapılmaktadır. LS-DYNA ile

matematik modelleme yapıldıktan sonra analiz sonuçları ve test sonuçları karşılaştırılmaktadır. Modeller, analiz edilen kiral auxetic yapının Poisson oranı üzerindeki geometri etkisini incelemek için kullanılmaktadır. Auxetic sandviç panellerin patlama yükü altında tepkisi kapsamlı bir şekilde hesaplamalı olarak incelenip; burada maksimum panel yer değiştirmesi ve kompozit panelin Özgül Enerji Emilimi (SEA) irdelenmektedir. Patlatma yüklemesi için üç farklı yöntem (ConWep, Pürüzsüz Parçacık Hidrodinamik, Çok Malzemeli Arbitrary Lagrange-Eulerian) deneysel verilere dayanarak doğrulanmaktadır. Maksimum şekil değişimi ve SEA üzerindeki kiral birim hücre genlik etkisinin, analiz edilen çoğu durumda, daha belirgin olan hücre uzunluğu etkisine kıyasla ihmal edilebilir olduğu sonucuna varılmaktadır. Çalışma modern kompozit yapıların patlama yüklemesine tepkisini geliştirmek için tasarlanmış auxetic hücresel çekirdeklere sahip sandviç yapıların kullanılmasının büyük potansiyelini göstermektedir (Novak, Starčevič, Vesenjak, & Ren, 2019).

Tasarımsal hayalgücünün sonu olmadığı bilinerek birçok geometrinin 2 boyutlu ve 3 boyutlu tasarlanması hala mümkündür ve günümüzde halen ihtiyaçtır. 3D yazıcı ile hızlıca prototiplenebilecek nanopartikül takviyesi malzemeler imal edilecektir. Bu çalışmada, özgün 3 boyutlu geometriler CAD yazılımı ile tasarlanacaktır. Tasarlanan negatif poisson oranlı geometrik yapı için yarı statik çekme-basma testi yapılacaktır ve yapıların mekanik davranışları incelenecektir. Nanopartikül takviyeli auxetic geometrinin çekme ve basınç testleri yapılarak geometriyi oluşturan unsurların test sonuçlarını nasıl etkileyeceği araştırılacaktır. Malzeme kompozit olacağından poisson oranının yanında efektif elastiste modülü gözlemlenecektir. Elde edilen geometri ve malzeme kompozisyonu savunma sanayi, havacılık, otomotiv, medikal gibi birçok endüstride darbe ve titreşim emici olarak kullanılabilecektir.

1.2.2. Termoplastik ile İlgli Çalışmalar

Termoplastikler, ısıtıldıklarında yumuşayan, soğutulduklarında yeniden katılaşarak şekil kazanan, geri dönüştürülebilir polimer sınıfını oluşturur. Moleküler yapılarında çapraz bağ içermemeleri sayesinde fiziksel olarak tekrar tekrar işlenebilirler. Eklemeli imalat (Additive Manufacturing) teknolojilerinde bu özellikleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Strong, 2006).

Eriyik Yığma Modelleme (EYM) gibi 3B baskı teknolojilerinde en çok tercih edilen termoplastiklerden ikisi Polilaktik Asit (PLA) ve Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)'dir. Bu malzemeler, tek başlarına kullanılabildikleri gibi çeşitli nano katkı maddeleriyle takviye edilerek mekanik, ısıl ve elektriksel özellikleri artırılabilir (Ngo et al., 2018).

1.2.2.1 Polilaktik Asit (PLA)

PLA, mısır nişastası, şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, biyobozunur bir termoplastiktir. Düşük baskı sıcaklığı, düşük termal genleşmesi ve çevreci yapısı ile 3B yazıcılarda en çok tercih edilen malzemelerden biridir (Farah, Anderson, & Langer, 2016).

PLA'nın erime sıcaklığı 150–180 °C, yoğunluğu yaklaşık 1,25 g/cm³'tür. Biyobozunur ve çevre dostudur. PLA'nın dezavantajları arasında düşük darbe dayanımı, gevrek yapı ve düşük ısıl kararlılık yer almaktadır. Bu eksiklikler nedeniyle PLA genellikle çeşitli nanopartiküllerle takviye edilerek geliştirilir. Özellikle titanyum dioksit (TiO_2), Silisyum Karbür (SiC) ve karbon nanotüpler (CNT) gibi katkılarla mekanik, termal ve fonksiyonel özellikleri iyileştirilmektedir (Wang et al., 2014).

1.2.2.2 Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)

ABS, stiren, akrilonitril ve bütadien monomerlerinden oluşan, petrokimya kaynaklı bir termoplastiktir. Yüksek darbe dayanımı ve ısıl kararlılığı sayesinde endüstride yaygın olarak kullanılır. Ancak baskı sırasında yüksek büzülme oranı ve sıcak tabla ihtiyacı nedeniyle baskı ortamında dikkat gerektirir (Torrado & Roberson, 2016).

Genel özellikleri:

- Erime sıcaklığı: 210–250 °C
- Yoğunluk: ~1,04 g/cm³
- Elastik modül: ~2,1 GPa
- Darbe ve ısı dayanımı yüksektir.

ABS de benzer şekilde nanopartiküllerle güçlendirilebilmektedir. Elektriksel iletkenliğin artırılması veya UV dayanımının iyileştirilmesi gibi özel amaçlarla karbon nanotüpler veya seramik katkılar tercih edilir.

1.2.2.3. Nanopartikül Takviyeli Termoplastikler

Termoplastik matrislere belirli oranlarda (örneğin %0,5–1,5 ağırlıkça) nanopartikül takviyesi, bu malzemelerin mekanik dayanımını, darbe direncini, termal kararlılığını ve yüzey özelliklerini önemli ölçüde geliştirebilmektedir (Cui et al., 2018).

Nanopartiküller, yüksek yüzey/hacim oranları sayesinde matrisle etkili bir bağ kurarak mukavemeti artırır.

Yaygın kullanılan nanopartiküller şunlardır:

a) Titanyum Dioksit (TiO_2)

TiO_2, UV stabilizasyonu ve yüzey sertliği açısından önemli bir katkı malzemesidir. PLA ve ABS gibi matrislere eklendiğinde:

- Mekanik mukavemet artışı (çekme ve eğilme)
- Yüzey sertliği iyileşmesi
- UV ışınlarına karşı direnç sağlar (Chen et al., 2015)

Ayrıca bazı çalışmalarda TiO_2 takviyeli PLA'nın antibakteriyel özellik gösterdiği de bildirilmiştir.

b) Silisyum Karbür (SiC)

Amorf yapıda, kimyasal olarak inert bir seramik olan Silisyum Karbür nanoparçacıkları, termoplastik matrislerin:

- Elastik modülünü,
- Isıl kararlılığını,
- Sürtünme ve aşınma dayanımını artırır (Asgari et al., 2017)

SiC partikülleri, aynı zamanda kompozit yapı içinde çatlak ilerlemesini sınırlayıcı bir bariyer görevi görebilir.

c) Karbon Nanotüp (CNT)

CNT'ler, eşsiz mekanik, termal ve elektriksel özellikleri sayesinde ileri seviye polimer kompozitlerin en yaygın katkı maddelerindendir. PLA ve ABS ile kullanıldığında:

- Çekme dayanımı ve modülü belirgin şekilde artar,
- Elektriksel iletkenlik sağlanabilir,
- Darbe dayanımı geliştirilebilir (Rafiee et al., 2009)

Ancak CNT'lerin homojen dağılımı zorludur ve doğru dispersiyon teknikleri gerektirir. Uygun oranda ve iyi dağılmış CNT katkısı hem sertliği hem de sünekliği aynı anda artırabilir ve darbe dayanımına optimum yanıt verilebilir.

2- GENEL BİLGİLER

2.1 Üç Boyutlu Yazıcılar

Eklemeli imalat (Additive Manufacturing- AM), dijital ortamda tasarlanmış bir modelin ardışık katmanlar halinde fiziksel olarak üretilmesini sağlayan çağdaş bir üretim yöntemidir. Geleneksel talaşlı imalat ve kalıplama gibi yöntemlerden farklı olarak, eklemeli imalat "malzeme ekleme" esasına dayanır. Bu yönüyle, özellikle karmaşık iç yapıya sahip, hafif, gözenekli veya biyomimetik geometrilerin üretiminde önemli avantajlar sunar. Malzeme israfının düşük olması, üretim esnekliği ve prototipleme sürecindeki hızı, bu yöntemi hem endüstride hem de araştırma-geliştirme çalışmalarında cazip hale getirmiştir (Ngo et al., 2018).

Eklemeli imalat yöntemleri, genel olarak yedi ana grupta sınıflandırılır: Eriyik Yığma Modelleme (EYM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), Digital Light Processing (DLP), Direct Energy Deposition (DED), Binder Jetting ve Material Jetting. Bu yöntemlerin her biri belirli malzeme türleri ve uygulamalara göre farklı avantajlara sahiptir. Bunlar arasında EYM yöntemi, uygun maliyeti, sistem kolaylığı ve geniş malzeme uyumluluğu sayesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir (Sürmen, 2019).

EYM yöntemi, ısıtılmış bir ekstrüder aracılığıyla termoplastik filamentin katmanlar hâlinde bir tabla üzerine serilmesi prensibine dayanır. Bu yöntemle genellikle PLA, ABS, PETG gibi termoplastikler kullanılsa da bu malzemelere nano boyutlu parçacıkların (örneğin TiO_2, SiO_2, CNT) katılmasıyla mekanik, termal veya elektriksel performans artırılabilmektedir. Böylece yalnızca geometri değil, aynı zamanda malzeme özellikleri açısından da optimizasyon mümkündür (Cui et al., 2018).

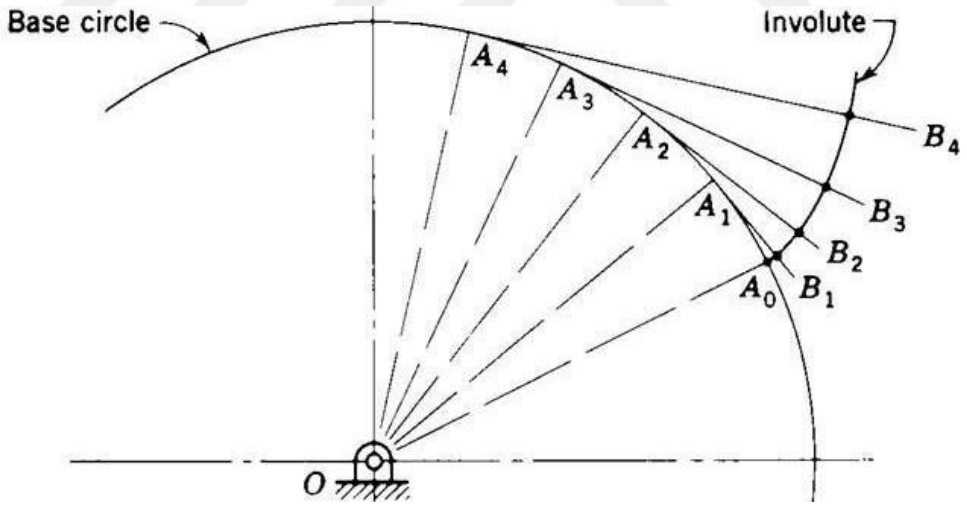
Eklemeli imalat, özellikle auxetic yapılara sahip parçaların üretiminde geleneksel yöntemlerin önüne geçmektedir. Auxetic yapılar, negatif Poisson oranına sahip özel geometrik yapılardır ve genellikle re-entrant, chiral veya sinusoidal hücre formlarına sahiptir. Bu geometrilerin, konvansiyonel imalat yöntemleriyle hassas ve bütüncül olarak üretimi oldukça zordur. EYM gibi katmanlı üretim teknolojileri ise bu yapıları tasarıma sadık biçimde üretebilme imkânı sunar. Ayrıca üretim öncesinde

CAD ortamında parametrik olarak değiştirilebilen hücre yapıları sayesinde, deneysel karşılaştırmalar ve mekanik analizler rahatlıkla yapılabilmektedir (Joseph et al., 2021).

2.2. Evolvent Eğrisi

İnvolute eğrisi (türev eğrisi), dişli tasarımı, mekanik sistemlerin kinematiği ve geometri temelli mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan matematiksel bir eğridir. Basit tanımıyla evolvent, bir çemberin çevresine sarılı hayali bir rijit ipin ucunun, ip gergin kalacak şekilde açılmasıyla oluşan eğridir. İpin ucu açıldıkça, ucun çizdiği yol evovlent eğrisini oluşturur. Bu eğrinin her noktası, açıldığı çemberin teğetlerine diktir.

Şekil 2.1'de dairenin çeşitli eşit aralıklarda polar noktalarına yarıçap çizilerek A0'dan A4 'e kadar noktalar oluşturulmuştur. Bu noktalardan sabit uzunlukta bir çizginin bu noktadan başlayacak şekilde ve yarıçap çizgilerine dik olacak şekilde çizimi ile çizginin diğer uçlarına B1'den B4'e kadar isim verilmiştir. B1 den B4 'e kadar olan bu noktaların birleşimi bize evolvent eğrisini verecektir.



Şekil 2.1 Evolvent Oluşturma

2.2.1. Evolvent Eğrilerinin Özellikleri

Evolvent eğrileri, birçok mühendislik uygulamasında tercih edilir, çünkü:

- Temas yüzeylerinde düzgün ve kaymasız temas sağlar.
- Dişlilerde yük aktarımı sırasında sabit hız oranı sağlar.

- Geometrik olarak hem üretilebilirlik hem de fonksiyonellik bakımından avantajlıdır.

Bu nedenlerle evolvent eğrisi, dişli profil tasarımında yaygın olarak kullanılan standart bir formdur. Ayrıca mekanik yapılar içinde deformasyon altındaki kontrol edilebilir davranışları sebebiyle özel geometri tasarımlarında da kullanılmaktadır.

2.2.2. Evolvent Eğrisi Tabanlı Auxetic Hücreler

Auxetic yapıların temel özelliği olan negatif Poisson oranını elde etmek için kullanılan geometri, büyük ölçüde hücre şekline bağlıdır. Re-entrant veya chiral yapılar gibi klasik auxetic geometrilerin yanında, bu tez çalışmasında evolvent eğrisine dayalı bir auxetic yapı önerilmiştir.

Evolvent eğrisinin içeri doğru kıvrımlı yapısı, uygulanan çekme kuvveti altında hücrelerin dışa doğru genişlemesini ve böylece negatif Poisson davranışı göstermesini sağlar. Bu tür bir yapı, yalnızca auxetic davranış sergilemekle kalmaz, aynı zamanda yük aktarımında kademeli ve yönlenmiş deformasyon sağlayarak darbe dayanımı ve enerji soğurma kabiliyetini artırabilir.

Bu amaçla, CATIA V5 ortamında oluşturulan parametrik evolvent eğrileri kullanılarak hücresel yapı modelleri geliştirilmiş, ardından bu yapılar eklemeli imalatla üretilmiştir. EYM yöntemi ile baskısı yapılan bu yapılar hem düz numunelerle hem de klasik re-entrant auxetic yapılarla mekanik testler bakımından karşılaştırılmıştır.

2.3. Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) ve CATIA Yazılımı

Günümüzde ürün geliştirme sürecinin vazgeçilmez bir parçası hâline gelen Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD – Computer Aided Design), mühendislik ve endüstriyel tasarım disiplinlerinde geometrik modelleme, analiz ve üretim öncesi tüm süreçlerin dijital ortamda gerçekleştirilmesini sağlayan teknolojidir. CAD yazılımları sayesinde iki boyutlu çizimlerin yanı sıra üç boyutlu parçalar modellenebilir, montaj ilişkileri tanımlanabilir ve ürünlerin fiziksel prototipi üretilmeden önce çeşitli analizler yapılabilir.

CAD sistemlerinin sağladığı başlıca avantajlar şunlardır:

- Tasarım süreçlerinin hızlandırılması ve revizyonların kolaylaştırılması,
- Parça ve montaj düzeyinde hatasız üretim verisi oluşturulması,
- Üretim maliyetlerinin ve zamanının azaltılması,
- Farklı mühendislik analizlerine (CAE, CFD, FEM vb.) veri temeli oluşturması.

2.3.1. CATIA Yazılımı

CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application), Dassault Systèmes tarafından geliştirilen, özellikle havacılık, otomotiv, savunma sanayi ve yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerde tercih edilen ileri düzey bir CAD/CAM/CAE yazılım paketidir. Yüzey modelleme, parametrik katı modelleme, montaj modelleme, teknik resim oluşturma ve analiz gibi çok çeşitli modülleri bünyesinde barındırır.

Bu tez çalışmasında, auxetic geometrilerin tasarımı için CATIA'nın Sketcher ve Part Design modülleri aktif olarak kullanılmıştır. Özellikle evolvent eğrisine dayalı özel hücre yapılarının modellenmesi sırasında parametrik çizim araçlarından ve matematiksel tanım desteklerinden faydalanılmıştır. Böylece, hem geleneksel re-entrant yapılar hem de evolvent eğrisi içeren yenilikçi auxetic modeller, üretim için hazır hâle getirilmiştir.

3- DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Evolvent profilin tasarımı

Evovlent eğrileri, dişli tasarımından mimariye ve ileri mühendislik uygulamalarına kadar birçok alanda kullanılmakta olan özel eğrilerdir. Bu eğrilerin en bilinen özelliği, bir silindirin dış yüzeyine sarılı ip parçasının çekilmesiyle elde edilen geometrik iz yoludur. Bu özellik, özellikle gerilim dağılımını optimize eden ve açısal hız aktarımında sabitlik sağlayan tasarımlarda avantaj sağlar. Auxetic yapılarda evolvent eğrisinin kullanılması ise, deformasyon altındaki geometrik davranışı daha kontrollü hale getirmekte ve negatif Poisson oranının daha kararlı bir biçimde yönlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Evolvent eğrisi oluşturma yöntemleri çeşitli yöntemlere dayanmaktadır. İnvolute eğriler CAD ortamlarında temel olarak iki farklı yöntemle modellenebilir:

1. Matematiksel Yöntem ile Nokta Tanımlama:

Bu yöntemde evolvent eğrinin parametrik denklemleri kullanılarak bir dizi nokta tanımlanır. Örneğin, evolvent eğri için genel denklemler şu şekildedir:

$$x(t)=r(\cos t+t\sin t)$$
$$y(t)=r(\sin t-t\cos t)) \quad (1)$$

Burada r başlangıç dairesinin yarıçapı, t ise açısal parametredir. Bu nokta seti daha sonra bir spline eğrisine dönüştürülerek çizim tamamlanabilir.

2. Görsel Kinematik Yöntem (Tangent Curve Simulation):

Bu yöntem, CATIA gibi ileri düzey CAD yazılımlarında daha pratik şekilde uygulanabilir. Bir silindir geometrisi tanımlanır ve bu silindire sarılmış bir düz çizgi, silindir etrafında açılarak sürüklenir. Bu çizginin ucu evolvent eğrisini oluşturur. CATIA'da bu hareket "Law" ve "Sweep" komutlarıyla kinematik tabanlı bir işlem olarak da modellenebilir. Ancak, bu yöntem genellikle daha karmaşık ve işlemci yoğun uygulamalarda tercih edilir.

Bu tez kapsamında, CATIA V5 yazılımı kullanılarak tasarım süreci gerçekleştirilmiştir. Evolvent eğrisi, doğrudan CATIA Generative Shape Design

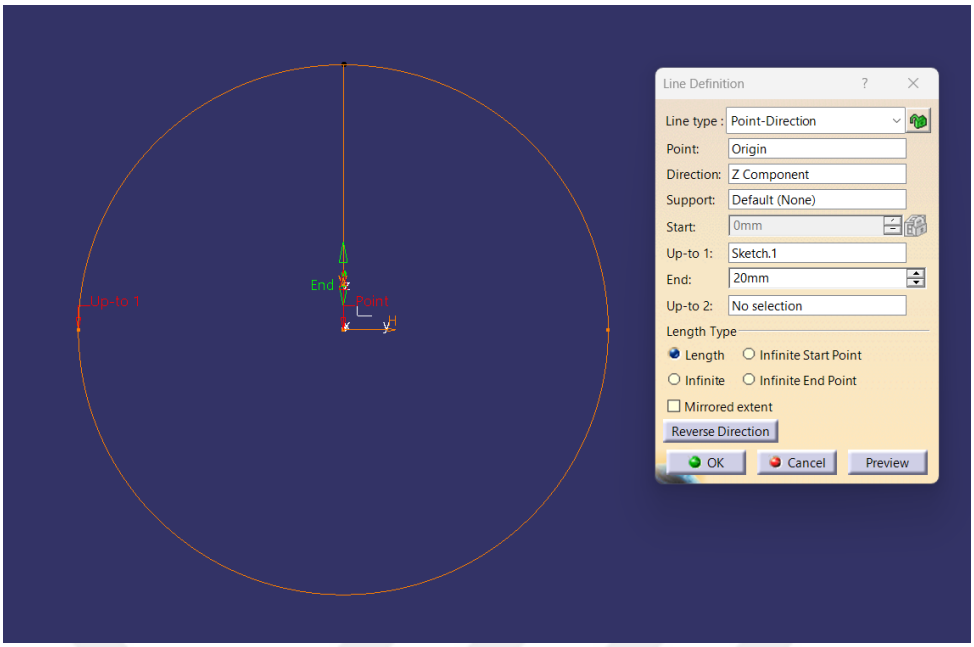
ortamında parametrik olarak çizilmek yerine daha kontrollü ve editlenebilir bir yapı sağlayan NURBS tabanlı spline eğrisi ile modellenmiştir. Bunun nedeni, spline eğrilerin CATIA ortamında üretim için gerekli yüzey akışlarını (surface flow) ve kenar sürekliliklerini (tangent/curvature continuity) daha kolay kontrol altına alabilmesidir.

İlk olarak bir düzlem seçilerek evolvent'e yakın eğriler spline ile çizilmiş, kontrol noktaları üzerinden eğrinin tanımı yapılmıştır. Özellikle eğrinin baş ve bitiş noktalarında, pad komutu sonrası oluşacak hacmin düzgün akmasını sağlamak adına G1 (tangent continuity) süreklilik ilkesi dikkate alınarak tasarım optimize edilmiştir**.**

Evolvent profil tanım gereği bir dairenin radyal doğrusuna dik teğet bir noktadaki rijit bir çubuğun polar olarak izlediği yoldur. Bu yolu CAD yazılımı ile oluşturuken önce X-Y-Z eksen takımları oluşturulur. Burada X, Y, Z doğrultuları XY, YZ ve XZ düzlemleri ifade eder. YZ düzleminden herhangi bir doğrultuya paralel bir line CATIA V5 programında şekil 3.1'deki gibi oluşturulmuştur.

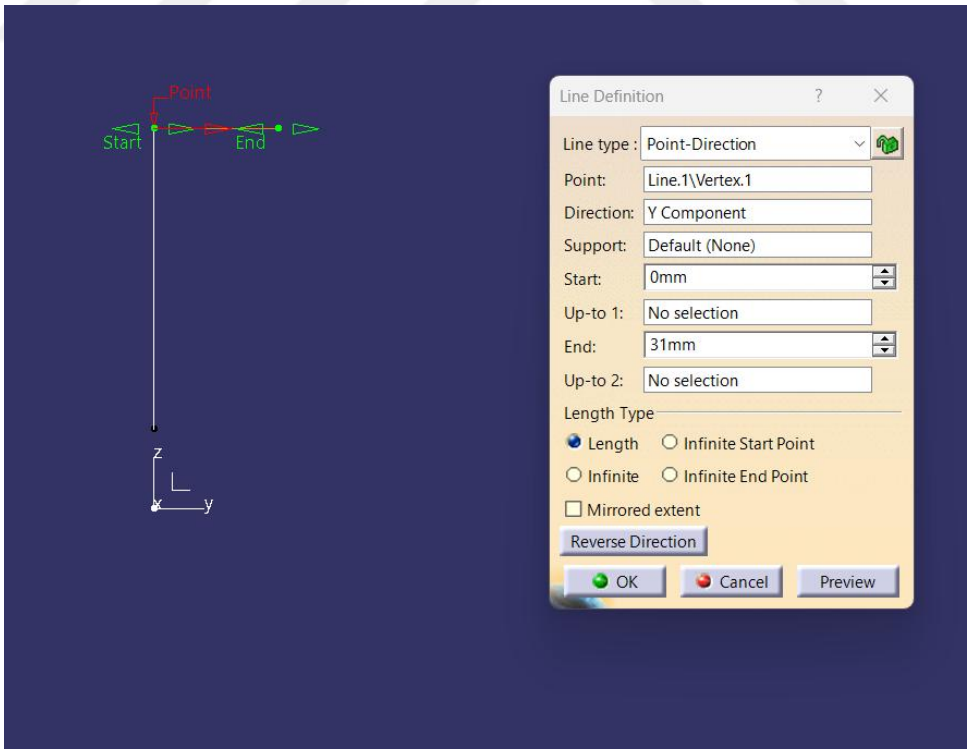
Çalışmalar bahsi geçen tasarım programının "Generative Shape Design" modülü ile yapılmıştır. Araç çubuklarından "Line Definition" ile çizgi oluşturulmaktadır.

Point-direction stratejisi ile bir başlangıç noktası ve doğrultu seçilmektedir. Orjinden başlayan çizgi için "Z" doğrultusunda daireye kadar gelen bir çizgi tanımlanmıştır.



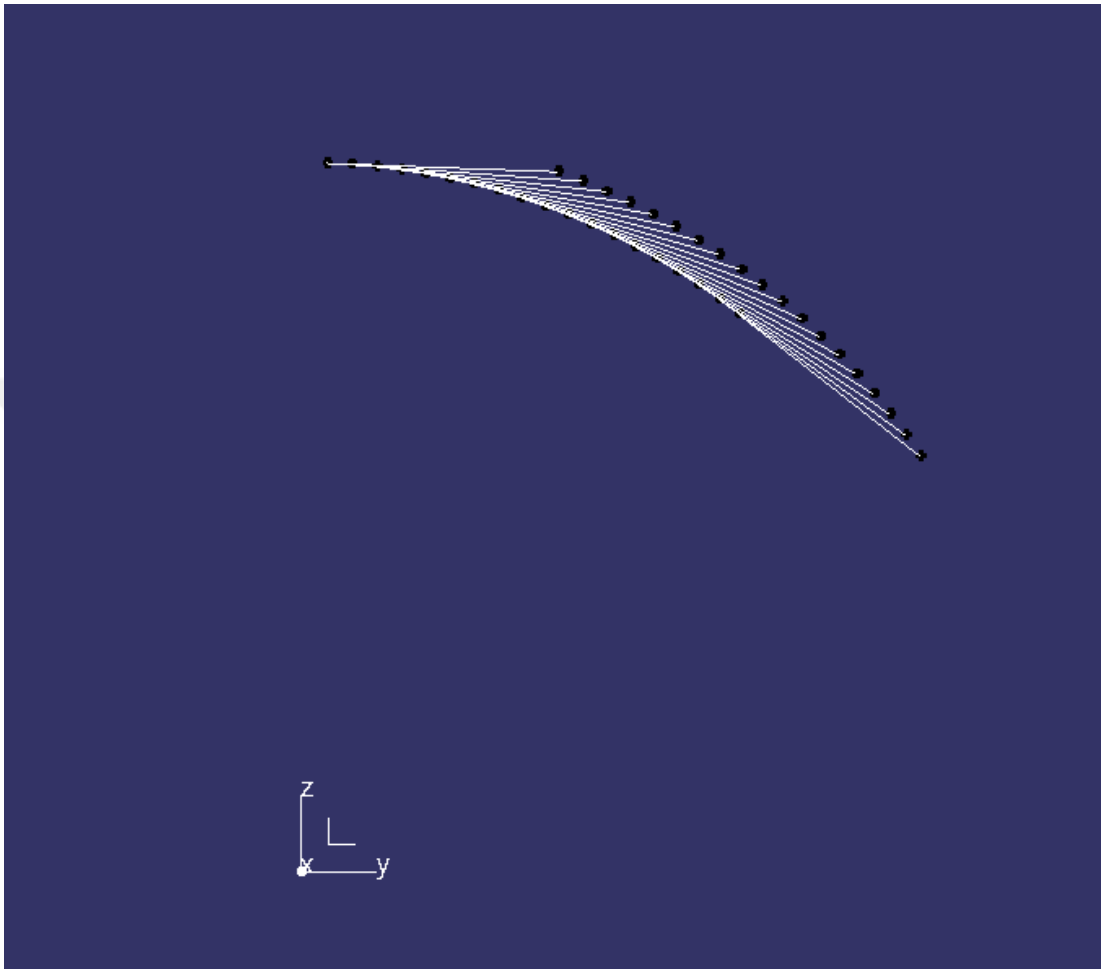
Şekil 3.1 Çizgi profil tanımlama

İkinci adım olarak daireye kadar tanımlanmış yarıçap çizgisine dik "Y" doğrultusuna paralel başka bir çizgi şekil 3.2'teki gibi yine point-direction stratejisi ile tanımlanmıştır.



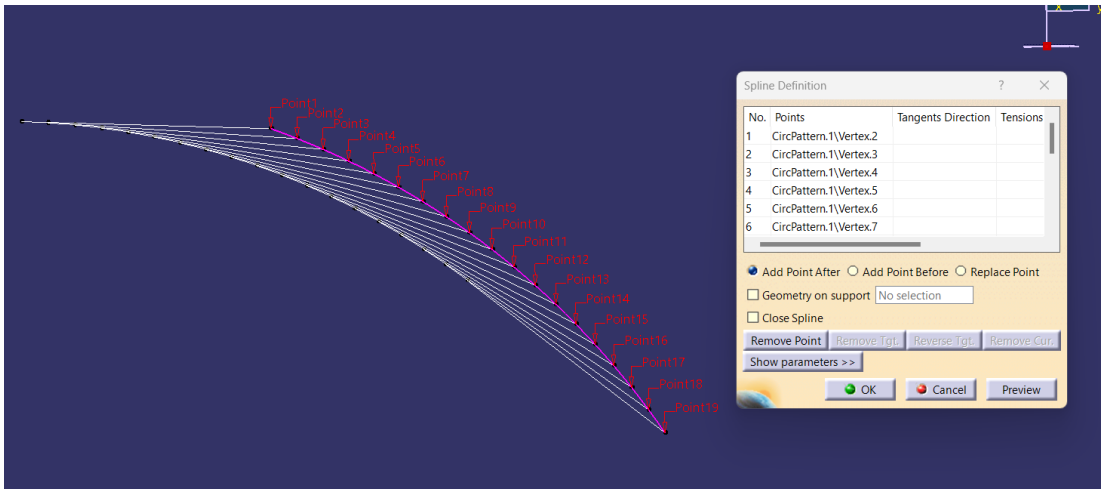
Şekil 3.2 Yatay çizginin oluşturulması

Şekil 3.4'te daire çizgisi gizlenmiştir. Dikey çizgiyide gizleyerek yatay çizginin daire ekseni ("X") etrafında istenilen açılarla çoğaltılması ile elde edilen trajektör şekil 3.4'te elde edilmektedir. Burada açıyı ne kadar küçük yaparsak elde edeceğimiz spline evolventin kalitesi ve çözünürlüğü o kadar yüksek olacaktır.



Şekil 3.3 X ekseni etrafında çoğaltma

Ekranda görülen siyah noktalar Spline komutu ile birleştilerek şekil 3.5'teki evolvent profil elde edilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken evolventi oluşturan parametreler değiştikçe evolvent yay uzunlukları ve profil şekli de değişecektir. Bu tezde evolvent profil olarak her tasarımda aynı profil kullanılmakatadır. Tasarımda çekme ve basma numunelerinde istenen standard ölçülere uyacak şekilde evolvent elde edilmiştir. O yüzden parametrelerin etkisi bu tezin kapsamı değildir. Fakat yeterli çözünürülükte bir eğri için 1 derecelik açı ile çoğlatma yapılmıştır.



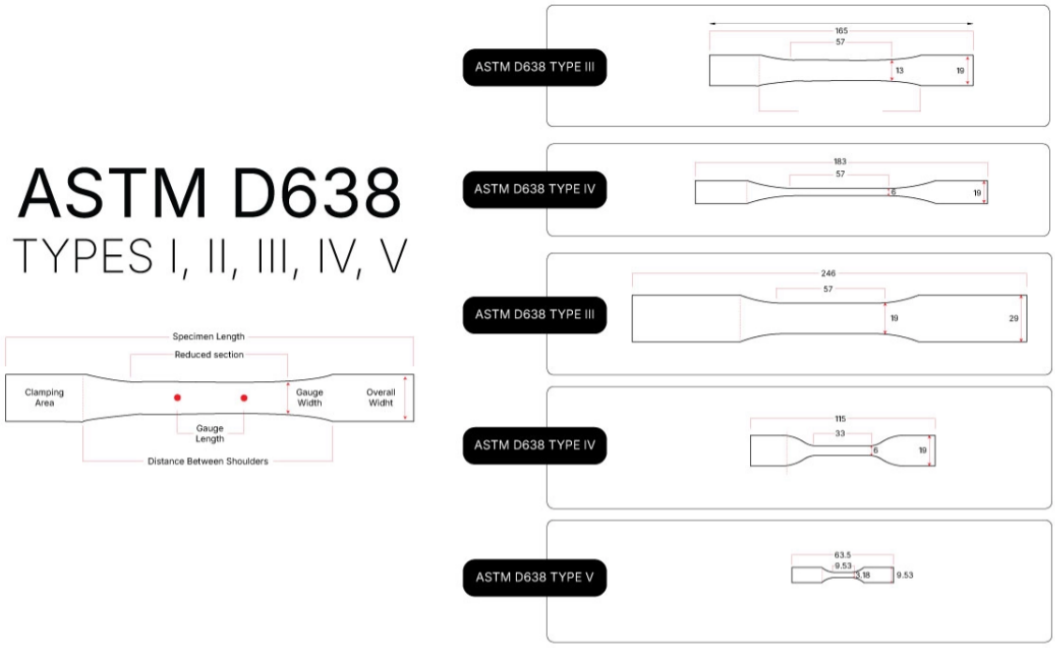
Şekil 3.4 Spline ile evolvent profilin oluşturuması

3.2 Çekme numune tasarımları

Bu çalışmada, çekme testleri için tasarlanan 3 boyutlu numuneler hem auxetic geometriye sahip hem de klasik yapıda olacak şekilde iki temel grup altında toplanmıştır. Tasarımlar, Dassault Systemes tarafından geliştirilen CATIA V5 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazılımın parametrik modelleme kabiliyeti sayesinde hem standartlara uygun boyutlandırma yapılmış hem de auxetic yapılar üzerinde çeşitli geometrik varyasyonlar denenmiştir.

ASTM D638 Standardına Uygunluk:

Çekme numunesi tasarımında, uluslararası geçerliliği olan ASTM D638-14 standardı esas alınmıştır. Bu standart, plastik malzemelerin çekme özelliklerini belirlemek üzere kullanılan deney numunelerinin geometrisini, boyutlarını ve test şartlarını tanımlar. Bu kapsamda, “Type III” numune geometrisi seçilmiştir. Bu tip numuneler, en yaygın kullanılan ve 3D baskıya en uygun yapılar arasında yer almaktadır. Şekil 3.5’te gösterildiği üzere nominal ölçülere göre; numune toplam uzunluğu 246 mm, gauge genişliği 19 mm, gauge boyu 57mm ve kalınlığı ise 3,4 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.5 Çekme Numune Referans Şablonları (ASTM D638-14)

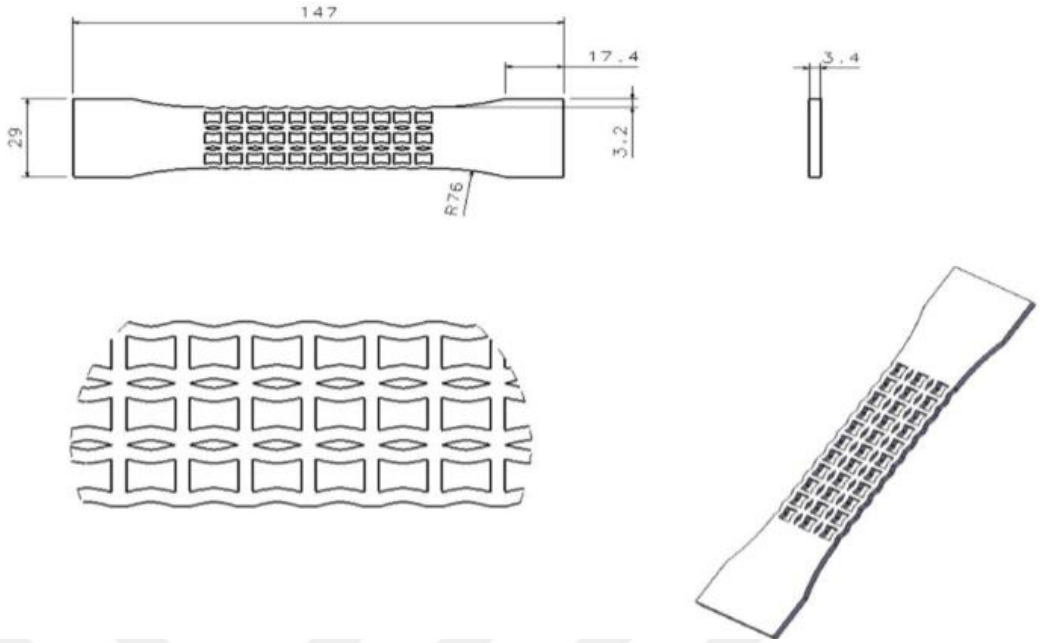
Tasarım sırasında bu ölçüler, CATIA ortamında Sketcher modülünde oluşturulan 2 boyutlu çizimler üzerinden tanımlanmış, ardından Pad komutu ile hacimsel modele dönüştürülmüştür. Özellikle çekme bölgesinde genişlik ve kalınlık hassasiyetle korunmuş, gerilim yoğunlaşmalarını önlemek adına kenar geçişlerine radyüs verilmiştir.

Auxetic Geometrinin Eklenmesi:

Auxetic numune tasarımında, çekme bölgesine klasik dolu yapı yerine negatif poisson oranı sağlayan hücresel desen entegre edilmiştir. Standartta gauge lenght ve widht olarak geçen 19mm ve 57mm ölçülerindeki bu bölgeye auxetic hücresel yapı tasarlanmıştır. Bu hücresel yapı, yine CATIA Sketcher modülü ile parametrik olarak oluşturulmuştur. 3 farklı auxetic yapı geliştirilmiştir:

Köşeli Hücre Yapılı Auxetic Numune:

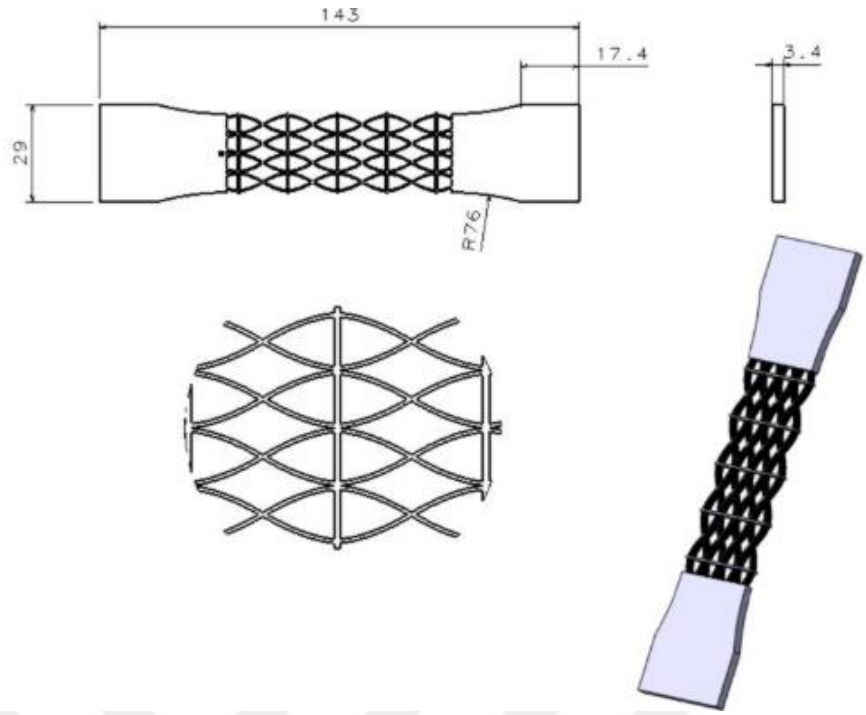
Bu numunede klasik re-entrant desen, sadece düz çizgilerden oluşan bir yapı ile tasarlanmıştır. Hücreler birbirine simetrik şekilde yerleştirilmiş, şekil 3.6'daki tasarım iç içe geçen "V" desenleri oluşturacak biçimde yapılandırılmıştır. Tasarım üç boyutlu yazıcı ile üretimde oluşacak sorunları yaşamamak adına 0.4 ve katları şeklinde nozullara referans alınarak 1.6mm olarak yapılmıştır.



Şekil 3.6 Çekme Numunesi-1

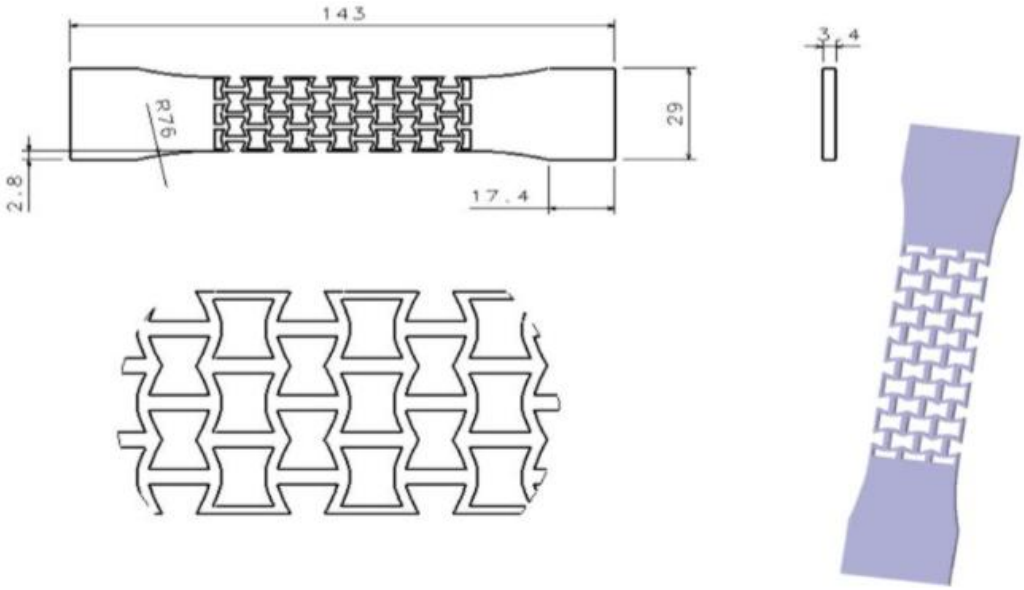
Evolvent Eğrili Auxetic Numune: Şekil 3.6'da ki bu tasarımda, re-entrant geometrinin dış konturunda evolvent eğrisi temel alınmıştır. Evolvent eğrisi, dairesel bir yüzeyden çıkan düz telin ucunun izlediği yörüngeyi temsil eder. Bu eğri, hücrelerin genişledikçe açılı bir biçimde gerilmesini sağlayarak auxetic etkiyi artırır. CATIA'da bu eğri, parametrelerle oluşturulmuş ve Sketch içerisine entegre edilmiştir. Daha sonra Pad komutu ile yüzeye kalınlık kazandırılmıştır.

Burada doğrudan evolvent eğrisi kullanılmaktadır. Dişli çark profillerinde olduğu gibi evolvent eğrisinin bir belli bir boyda kesilmiş halidir.



Şekil 3.7 Çekme Numunesi-2

Evolvent Re-entrant numune: Şekil 3.7'deki üçüncü tasarımda ise hücreler bir kısmı evolvent profilden oluşmaktadır. Daha önceki re-enrant yapınını "V" şeklindeki kısmı düz çizgi yerine evolvent eğrilerle yuvarlatılmıştır. Aynı şekilde et kalınlıkları 1.6mm olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3.8 Çekme Numunesi-3

Bu üç auxetic numune, aynı dış boyutlarda olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece, test sonuçları arasında sadece iç geometriden kaynaklanan farklar

değerlendirilebilir hale getirilmiştir. Şekil 3.8'deki tasarımda hücresel yapıların açıları da mekanik özelliklere etkisi olduğu düşünülmektedir.

Tüm numuneler, EYM tipi bir 3D yazıcı ile üretileceği için tasarımlar sırasında yazıcının teknik sınırları göz önünde bulundurulmuştur. Bu bağlamda;

- Yazıcı nozulu 0,4 mm çapında olduğu için tüm hücre içi boşluklar, bu çapın en az 2 katı olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece dolgu yapmadan net geometriler elde edilmiştir.
- Et kalınlığı her bölgede minimum 1,6 mm olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu sayede hem mukavemet açısından yeterli yapı sağlanmış hem de üretim sırasında çökme, eksik katman gibi problemler önlenmiştir.
- Auxetic desenlerin arasındaki minimum mesafe, nozzle çapı ve yazıcının hassasiyeti dikkate alınarak 0,8 mm'den daha küçük olmamıştır.
- Tasarımlarda, dikey yönlü baskıya uygunluk gözetilmiş, sarkma ve destek ihtiyacını minimuma indirmek amacıyla eğimli açılar 45 derece sınırı içinde tutulmuştur.
- Ayrıca, tüm modellerin STL formatında düzgün mesh geometrisine sahip olması sağlanmıştır. CATIA'dan STL'ye dönüştürme sırasında yüzey toleransları optimize edilerek detay kaybı engellenmiştir.

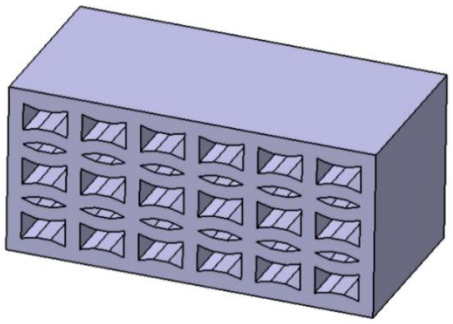
Bu tasarım süreci sonunda hem klasik hem de auxetic yapıya sahip 4 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Her üç auxetic tasarım, hücresel yapıları açısından farklılık gösterse de aynı dış geometrik sınırları paylaşmaktadır. Bu sayede, farklı auxetic yapıların mekanik performansa etkisi doğrudan karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilecektir. Özellikle evolvent eğrili numune, klasik düz kenarlı auxetic yapılara göre farklı bir deformasyon davranışı sergilemesi açısından bu çalışmada özel olarak değerlendirilmiştir**.**

3.3 Basma Numunelerinin Tasarımı

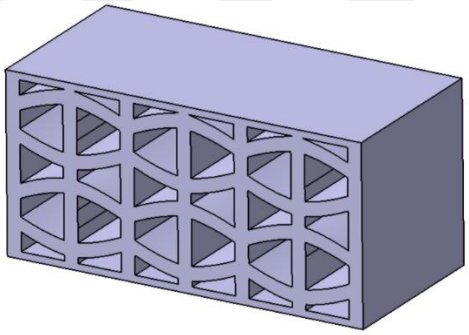
Çekme numuneleri için yapılan tasarımlardan yola çıkılarak basma numune tasarımları gerçekleştirilmiştir. Basma deneyleri için ASTM D7136 test düzeneğine uygun 20x20x40 mm ebatlarında numuneler olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.9'da

gösterilen modeller CATIA Part Design modülünde Pad komutu ile çizim yapılan düzlemlere dik doğrultuda ekstrüde edilerek oluşturulmuştur.

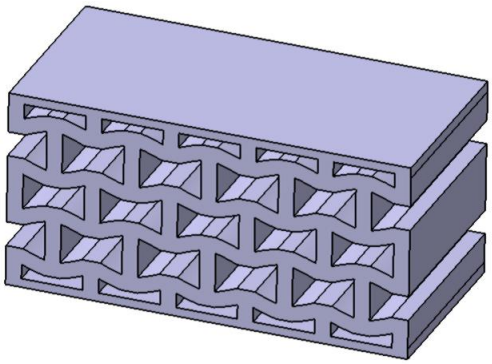
Şekilde 3.9 3.10 ve 3.11'de tasarımlar üç boyutlu yazıcı nozullarındaki kısıtların ve nanokompozitlerin nozulu tıkaması problemi sebebiyle 1,6 mm et kalınlığında tasarlanmıştır.



Şekil 3.9 Basma Numunesi -1



Şekil 3.10 Basma Numunesi -2



Şekil 3.11 Basma Numunesi -3

3.4 Saf PLA ve Nanopartikül Takviyeli PLA Filamentlerin Üretimi

2B ve 3B formatta auxetic yapıda tasarımlar yapılmıştır. Bu tasarımlar farklı malzeme konfigürasyonları ile üretilmek istenmektedir. Buradaki amaç farklı nano boyutta partikül katkıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemektir. Karmaşık geometrik tasarımlar hazırladığımızdan bunun yanısıra hızlı ve ucuz maliyeti nedeni ile üç boyutlu yazıcıda parçaları üretmeye karar verdik. Ancak auxetic deney numunelerinin bu malzeme konfigürasyonu ile üç boyutlu yazıcı ile üretilebilmeleri için yazıcıda ilk önce filament üretimi gerekmektedir. Bu filamentler saf pla, %0,5, %1 ve %1,5 SiC, titanyum ve karbon nanotüp olarak toplam 10 filament olarak üretilmiştir.

PLA ve takviyeli PLA'lar üretilmeden önce PLA malzemeler granül halindedir. Granül halinde bu malzemeler neme karşı çok duyarlıdır. Bu durum üretilecek filamentin kalitesini de etkilemektedir. Bu tür olumsuz etkilerden arındırmak için PLA malzemeler vakum ve nem alma operasyonundan geçirilmelidir. PLA'daki nemler filament çekerken hava kabarcığı ve bulanık görüntü şeklinde kendini göstermiştir. Bu yüzden her çekilecek filament bir gün öncesinden şekil 3.12'de gösterildiği gibi fırında bekletilip nem kurutma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.12 PLA'nın fırın içinden görüntüsü

Fırında bekletme süresi olarak en az 12 saat öngörülmüştür. Fan değeri yüzde 90 olarak ve set sıcaklığı 50°C olarak ayarlanarak PLA granüllerin filament üretimi öncesi nemi kurutulmuştur (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 PLA nem kurutma için fırın parametrikleri

PLA filamentleri nemi alınmış pla granüllerinin vidalı mille çalışan bir ekstrüdere huniden boşaltılıp bakır nozuldan çıkarılması ile üretilmektedir. Ekstrüder mekanizma olarak motor-redüktör, vidalı milden oluşmaktadır. Granülleri ısıtmak için iki ayrı ısıtıcı bulunmaktadır. Bu ısıtıcılar PLA granüllerini eritip nozullardan filament şeklinde çıkması için önemlidir.

Nozullardan çıkmış filamentler önce soğutucuya oradan da kasnaklara sarılması için otomatik kasnak sarıcıya gitmektedir (Şekil 3.14). Filament şekilde kasnağa sarılmış malzemeler yazıcıda kullanmaya hazır hale gelmiştir.



Şekil 3.14 Ekstrüder makinasından görüntü

Şekil 3.14’teki prosesi sağdan sola üç alt prosese ayırırsak ilk proses granülden sıcak filament elde eder. Ortadaki proses sıcak filamenti ölçü varyasyonları minimize etmek için fanlarla soğutur. Ortadaki pr

Oseste fan hızı ve benzeri gibi özel bir parametre bulunmamaktadır. En soldaki proseste filamentler bir komparatör yardımı ile ölçülür. Amaç 1,75 mm çapında

filament üretmektedir. Varyasyon kaçınılmaz olduğundan 1,5mm'nin altı ile 2 mm ve üstü bizim için kritik değerdir. Çünkü 2mm üstündeki filamentler üç boyutlu yazıcıda baskı nozullarını tıkamaktadır.

Şekil 3.15'te gösterilen birinci prosesin ana parametreleri motor hızı, havuz sıcaklığı ve nozul sıcaklığıdır. Makine motoru, ısıtıcılar ayarladığımız sıcaklığa gelene kadar aktif olmamaktadır. Makinadaki bakır nozul yüksek hacimde üretimlerde tıkanabilme sorunu yaratmaktadır. Tamamen tıkanması durumunda sökülüp temizlenmektedir. Ama daha az tıkalı olması durumunda 1,75 mm çapı elde etmemizde zorluklar yaratmıştır. Filament üretimi süreklilik istediğinden böyle bir durum yaşanmaması için makine önden çalıştırılarak kontrol edilmiştir. Tüm bu hazırlıklar yaklaşık 1 saati bulmakta hatta bazen geçmektedir. Sorunsuz ilerleyen saf PLA filament üretimi prosesinde ekstrüder hızı 10 rpm olarak girilmektedir. Sıcaklıklar 180 ve 190 olarak girilmiştir. Fakat üretim takibinde ölçüm sapmaların önlem almak için proses sırasında parametrelerle oynanmıştır. Örneğin yüksek motor hızı filamentlerin nozuldan çıktıktan sonra sarkıp dolanmasına sebep olmuştur. Düşük motor hızı ise filamenti sündürmüştür. Bu da düşük çaplara sebep olmuştur.



Şekil 3.15 Ekstrüder Parametleri (1.Proses)

Granüller konik beslemeye manuel olarak yüklenmiştir. Granüller doğrudan konik besleme havuzundan vidalı milin diş adımları arasına girmektedir. Yükleme miktarları yaptığımız tasarımların CAD ortamında ağırlıkların ölçülüp doluluk oranına karar verilmiştir. Bu ağırlık oranı 1,75mm çapındaki filamentin uzunluğunu belirlemiştir. Yaklaşık 200m uzunluk olarak hesaplanmıştır.

İkinci proseste sıcak nozuldan çıkan filament sünek haldedir. Kasnakta sarma hareketi sırasında aynı zamanda çekme zorlanması ile karşı karşıya kalan filament ölçüsel kararlılığı korumak için oda sıcaklığına gelmeli ve rijit olmalıdır. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi tüm bunlar için fanlar ile soğutma yapılmaktadır.

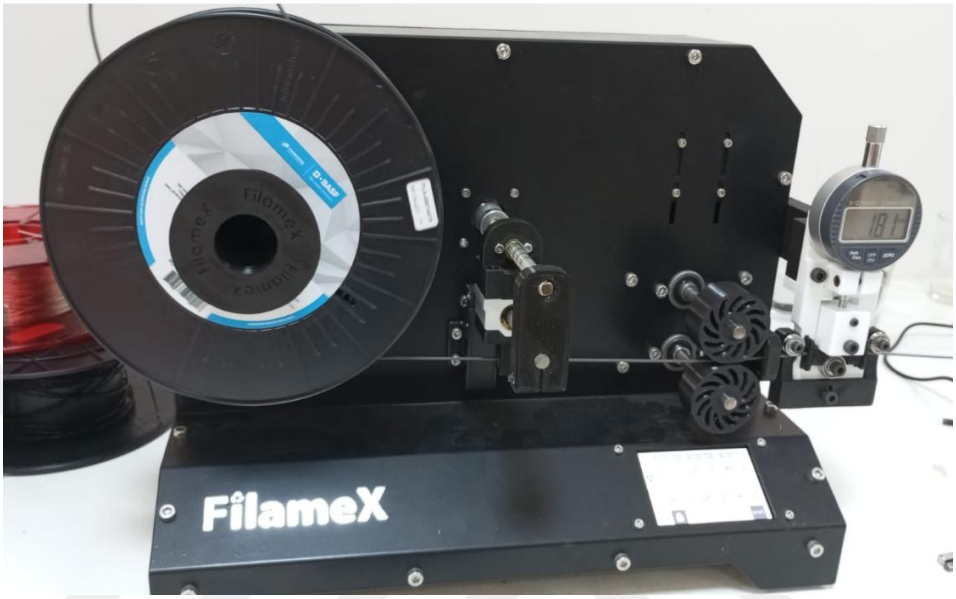


Şekil 3.16 Sarım Öncesi Filament Soğutma

Üçüncü ve son proseste soğutulmuş filament komparatör ölçümünden geçerek kasnak yatağına bağlanan kasnak ölçüleri makinaya girilmiştir. Kasnak ölçüleri olarak kasnak genişliği ve çapı girilmektedir. Şekil 3.17'de anlık filament çapı 1,81 mm okunmaktadır. Kasnak genişliğine göre filament doğrusal hareketle kasnak genişliğinde gezdiren vida vardır. Bu vidanın hızı da ayarlanabilen parametredir. Dakikada 10 mm gidip gelecek şekilde ayarlanmıştır. Kasnağa filament sarıldıkça boş çapa göre çapı büyümektedir. Vida hızı kasnağın sarım hızı ile birlikte ayarlanmıştır. Ve çap değişiminden etkilenmemesi için proses sırasında değiştirilmiştir. Daha yüksek hızlarla başlayıp proses sonlarında 3,5 rpm'lere yaklaşmıştır. (Şekil 3.18) Filamentin sarım makinasına çekim hızı 10,5 rpm olarak girilmiştir. Bu devir hızı birinci prosesten çıkan sıcak filamenti doğrusal çekim hızını belirlemektedir. Yüksek hızlarda filamenti sündürmekte ve düşük çaplara sebep olmaktadır. Düşük hızlarda filamenti kalınlaştırmakta hatta sıcak nozul çıkışında sarkma ve malzeme birikimine sebep olmaktadır. Bu da proses bütünlüğünü bozma riski demektir. Bu sebeple bu hız birinci prosesteki ekstrüder mili hızı ile etkileşimli değerlendirilmiştir.

Katılan nanopartiküllerin türü dahi bu parametreleri üretim esnasında değişken hale getirmiştir. Nanopartikülün sıcaklığa karşı duyarlılığı, mekanik özelliklere olan etkisi filamentin üretimi etkilemiştir. Titanyum oksit üretim sırasında daha sünek olduğundan komparatörden çok fazla değişken ölçü okunmuştur. Değişken ölçülerden dolayı çekim hızı ve ekstrüder motor hızı arasında denge kurulmaya çalışılmıştır. Proses parametrelerine çok fazla müdahele edildiğinden üretim aksaklıkları yaşanmıştır. Karbon takviyeli olan filament ise çok gevrek davrandığından sarım

kasnağına sarılırken teğetsel kuvvetlerden dolayı kırılmalar yaşanmıştır. Yüzde 0,5 oran için daha az kırılma olduğundan üretimi mümkün olabilmiştir. Yüzde 1 karbon takviyesinde birkaç defa yeniden üretmek zorunda kalınmıştır. Gevrek olmasının avantajlı bir özelliği olarak ölçüsel sapmalar daha az olmuştur.



Şekil 3.17 Otomatik Sarım Makinası



Şekil 3.18 Otomatik sarım makinası parametreleri

Nanopartikül Takviyesi**:** SiC, CNT, TiO_2 olmak üzere üç farklı nanopartikül sıcak ortamda oksitlenme riskine karşı buzdolabında saklanmıştır. Nanopartiküller

yüzde oranları her birinde 0,5 – 1 – 1,5 olarak eklenmiştir. Bu karışım için yöntem olarak öncelikle kloroform ile karıştırılması düşünülmüştür. Kloroform ile çözelti oluşturulup daha sonra kloroformun uçması ile elde edilen katıdan küçük granüller oluşturulmuştur. Kloroform olmadan PLA granülü ile toz partiküller çalkalanarak karıştırılmış ve bir sorun olmadan homojen dağılım elde edilmiştir.

İstenen 200m uzunluğunda filament ağırlığı 600 gramdı. Bu ağırlığın sırası ile 3 gram, 4,5 gram ve 6 gram partikül takviyesi ile elde edilmiştir. Ağırlıklar için terazide darası alınan beherler kullanılmıştır.

Her nanopartiküllü filament üretimi bittiğinde yenisine başlamadan önce kontaminasyonların önüne geçmek için boşta üretim yapılmış ve saf PLA ekstrüde edilmiştir. Ekstrüderde kalan önceki tozlar temizlendiğinde şeffaf PLA nozuldan çıkmaya başlamaktadır. Ayrıca nanopartikül tozların ilavesi için alkolle temizlenmiş kaşık kullanılmıştır.

3.5 Üç Boyutlu Yazıcıda Üretim

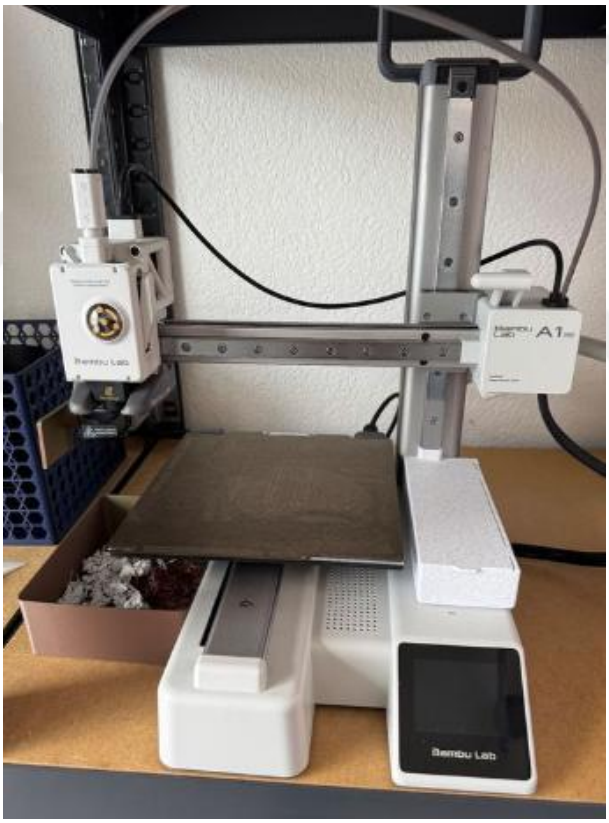
Bu çalışmada kullanılan numuneler, EYM (Eriyik Yığma Modelleme) teknolojisine sahip bir üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Üretim sürecinde %100 doluluk oranı tercih edilerek parçaların maksimum mekanik dayanım göstermesi hedeflenmiştir. Katman kalınlığı 0,2 mm olarak belirlenmiş, böylece yüzey kalitesi ile üretim süresi arasında optimum denge sağlanmıştır.

Yazdırma hızı 60 mm/s olarak ayarlanmış, dolgu açısı ise 45° seçilmiştir. Bu açı, iç yapıda düzgün bir dolgu deseni oluşturarak yük dağılımını optimize etmektedir. Nozul sıcaklığı 205 °C, tabla sıcaklığı ise 60 °C olarak sabitlenmiştir. Bu parametreler hem saf PLA hem de nanoparçacık katkılı PLA filamentlerin üretimi için uygun sıcaklık değerleri olarak literatürde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Üretim sürecinde özellikle nanoparçacık içeren PLA filamentlerin baskısı sırasında belirli aralıklarla nozul tıkanmaları yaşanmıştır. Bu durum, katkı malzemelerinin partikül boyutu, filament içindeki homojen dağılımı ve viskozite değişimleri gibi faktörlerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Tıkanmalar, üretim süresini uzatmış ve bazı parçaların yeniden üretilmesini gerektirmiştir. Bu sorun,

nanokompozit filamentlerin üretim süreci açısından dikkat edilmesi gereken önemli bir pratik problem olarak kaydedilmiştir.

Üretimde kullanılan 3B yazıcının genel görünümüne aşağıda yer verilmiştir (Şekil 3.19). Bu yazıcı açık kaynak kodlu bir sistem olup, kullanıcıya baskı parametreleri üzerinde tam kontrol sağlamaktadır. Yazıcıya G kodları oluşturmak için Bambu Lab ‘ın kendi yazılımı olan Bambu Studio kullanılmıştır. Bu yazıcı 180x180 mm ebatlarında parça basma kapasitesine sahiptir. Üretilecek numuneler için uygun boyutlara sahiptir. Ayrıca akış telafisi özelliğinden yararlanarak filament üretiminde yaşanan çap değişkenliklerini biraz olsun etkisizleştirmiştir.



Şekil 3.19 Üretimde Kullanılan Üç Boyutlu Yazıcı

3.6 Deney Planlaması

Yapılan tasarımlar ve üretilen filamentler ile çekme testleri ve basma testleri gerçekleştirilmiştir. Deney tekrar sayısı “3” olarak belirlenmiştir. Sayının yüksek olması testlere ait güvenilirliği arttıracaktır ama yüksek adet test hem maliyet hem zaman açısından optimize edilmek zorundadır.

Deneyler şekil 3.20'de gösterilen cihazla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan mekanik deneyler, Shimadzu 100 kN kapasiteli Evrensel Test Cihazı (UTM) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Shimadzu tarafından üretilen bu cihaz, metal, polimer, kompozit ve diğer mühendislik malzemelerinin çekme, basma ve eğilme gibi mekanik özelliklerini yüksek doğrulukla belirlemek amacıyla tasarlanmıştır.

Shimadzu 100 kN UTM, yüksek rijitliğe sahip çerçeve yapısı ve hassas yük hücresi sayesinde geniş yük aralığında güvenilir ölçümler sunmaktadır. Cihazın yük kapasitesi 100 kN olup, bu değer hem laboratuvar ölçeğindeki malzemeler hem de endüstriyel numuneler için yeterli çalışma aralığını sağlamaktadır. Deney sırasında uygulanan yük, yer değiştirme ve zaman verileri cihazın kontrol birimi tarafından gerçek zamanlı olarak kaydedilmekte ve analize uygun formatta depolanmaktadır.

Cihaz, servo kontrollü bir tahrik sistemi ile donatılmıştır. Bu sayede yük veya uzama kontrollü modlarda stabil, tekrarlanabilir ve kullanıcı tarafından tanımlanabilen test hızlarında çalışabilmektedir. Deneylerde kullanılan kavrama türleri, numune formuna uygun şekilde değiştirilebilmekte; düz numuneler, yuvarlak kesitli numuneler veya basma blokları için özel fikstürler kullanılabilmektedir. Ek olarak, opsiyonel olarak bağlanabilen uzunluk ölçer (ekstansometre) ile akma dayanımı, elastik modül ve uzama değerleri yüksek hassasiyetle elde edilebilmektedir.



Şekil 3.20 Çekme Testi Cihazı

3.6.1 Filamentlerin Çekme Testi Deneyleri

Öncelikle üç boyutlu yazıcı etkilerini arındırabilmek için şekil 3.24'teki filament çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri üretimde ekstrüzyon parametrelerin de etkisini içeren, malzemeler arasındaki farkı görebilmek için deneyselleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre üç boyutlu yazıcıdan ASTM standartlarına göre üretilecek olan deney numune sayılarının planlaması ve stratejisi oluşturulmuştur. Şekil 3.21'te yer alan testte makara üzerindeki teğetsel kuvvet filament için eksenel çeki zorlaması oluşturmuştur. Filamentler arasındaki çap farklılığı en az olacak şekilde deney verileri toplanmıştır.



Şekil 3.21 Filament çekme testi deney düzeneği

3.6.2 Auxetic Olmayan Numunelerin Çekme Testi Deneyleri

Üç boyutlu yazıcının etkilerini içeren fakat auxetic tasarım etkilerinden arınmış testler için saf PLA, %0,5, %1, %1,5 nanomateryal katkılı (CNT, TiO_2, SiC) numunler hazırlanmıştır. Üç boyutlu yazıcı ile 3 tekrar sayısına göre üretilen numunelerin bir

görüntüsü şekil 3.22'de yer almaktadır. Şekildeki numuneler içerisinde bulunan nanomateryalin rengini almaktadır.



Şekil 3.22 Auxetic olmayan çekme numuneleri

3.6.3 Auxetic Numunelerin Çekme Testi Deneyleri

Auxetic tasarımların çekme deneyleri gerçekleştirilirken yüzde 1,5 oranlar ve TiO2'ler deneye alınmamıştır. Malzeme testi sonuçları irdelendiğinde böyle yüzde 1 ve 1,5'ler arasında yaklaşık sonuçlar hatta yüzde 1,5 katkının mukavemet düşürücü olduğu gözlenlenmiştir. Böylelikle örnek numuneleri şekil 3.26'da yer alan auxetic geometriler üretilmiştir. Burada tekrar sayısı yine 3 alınarak deney sayısı hesaplandığında 3 farklı auxetic tasarım için PLA ve 2 farklı oranda 2 tür malzeme olmak üzere toplam 5 malzeme olduğunda 5*3*3 = 45 adet üretim yapılmıştır.

3.6.4. Basma Testi Deneyleri

Basma testi deneylerinin geometrik etkileri görmek amacıyla sadece katkısız PLA ile 3 tekrar setinden deney yapılması planlanmıştır. Böylelikle 3 farklı tasarımdan

3 tekrar için yazıcıdan 9 parça üretim deney için şekil 3.23'te görüldüğü gibi üretilmiştir.

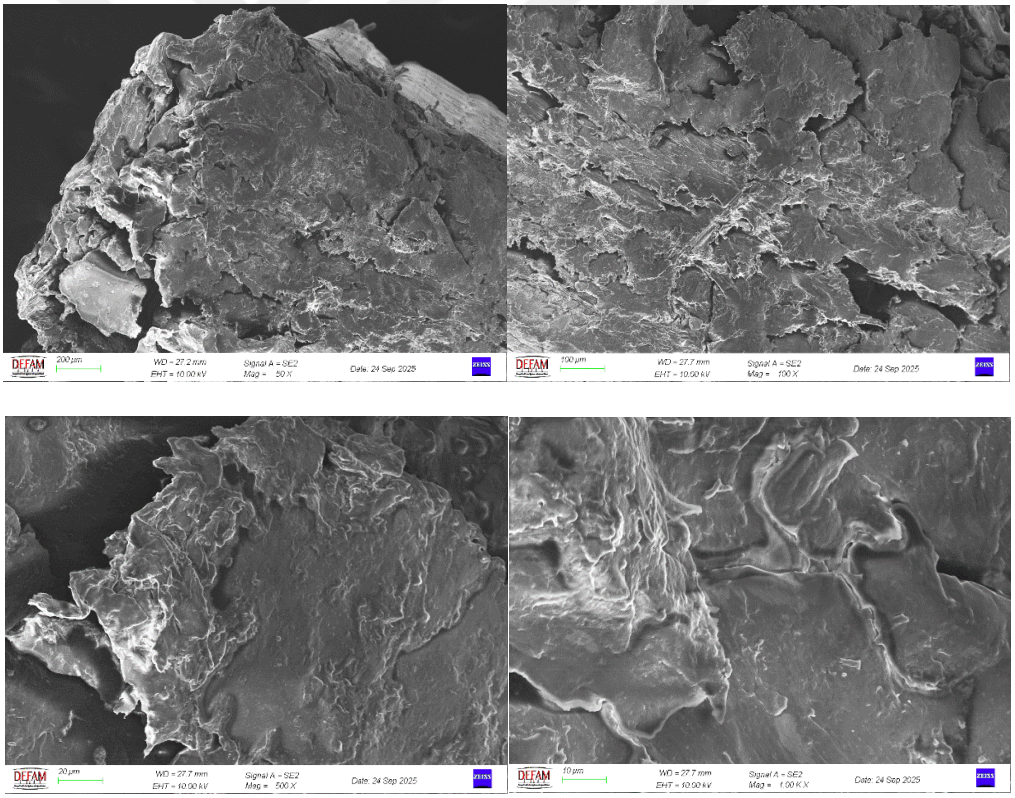


Şekil 3.23 PLA ile üretilmiş basma numuneleri

4- BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 SEM İncelemesi

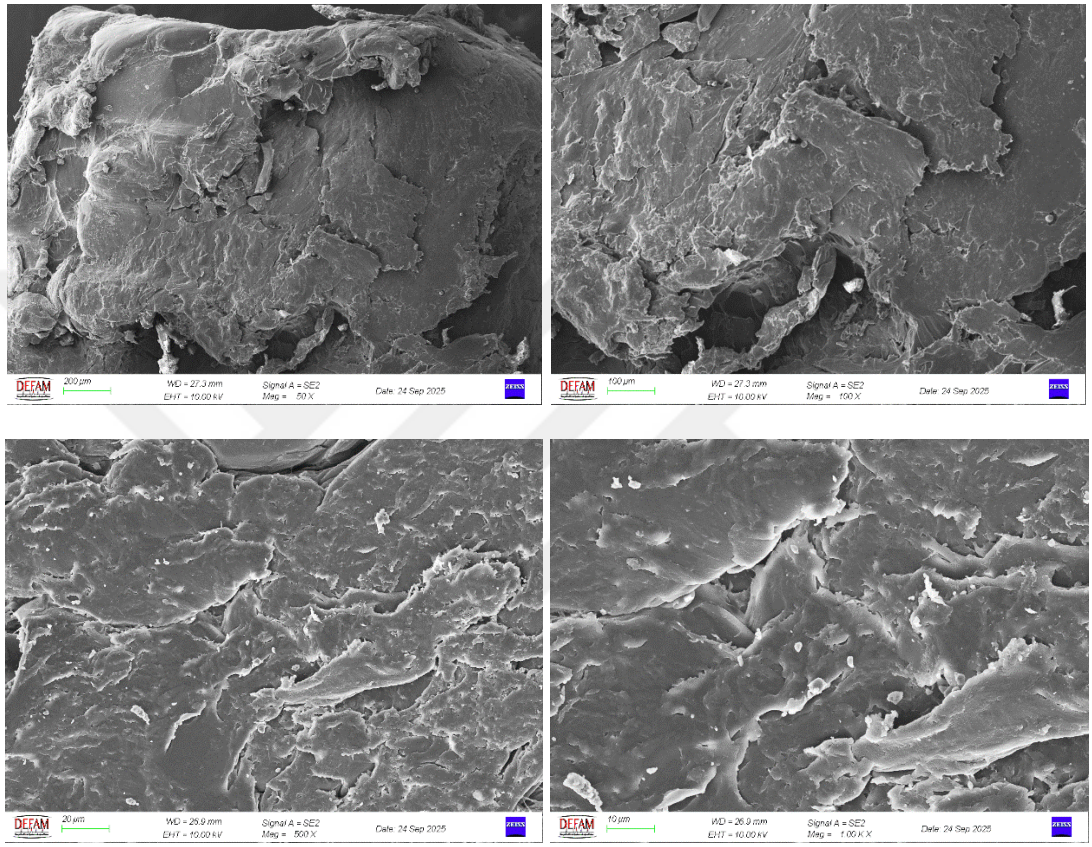
Saf PLA numunelerin çekme kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri (Şekil 4.1) incelendiğinde, yüzeyin büyük oranda düzlemsel ve tabakalı bir karakter sergilediği, mikrovoid ve fibril yapıların ise son derece sınırlı olduğu görülmektedir. Yüksek büyütmede, kırılma yüzeyinin keskin çatlak ilerleme izleri ve cleavage benzeri plakalar içerdiği, bu nedenle saf PLA'nın çekme yüklemesi altında tipik bir gevrek kırılma modu ile hasarlandığı anlaşılmaktadır. Kırılma yüzeyinde belirgin üretim kusurları veya büyük gözeneklerin gözlenmemesi, numunelerin homojen bir iç yapıya sahip olduğunu ve kırılmanın esas olarak malzemenin kendi kırılgan doğasından kaynaklandığını göstermektedir.



Şekil 4.1 Saf PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

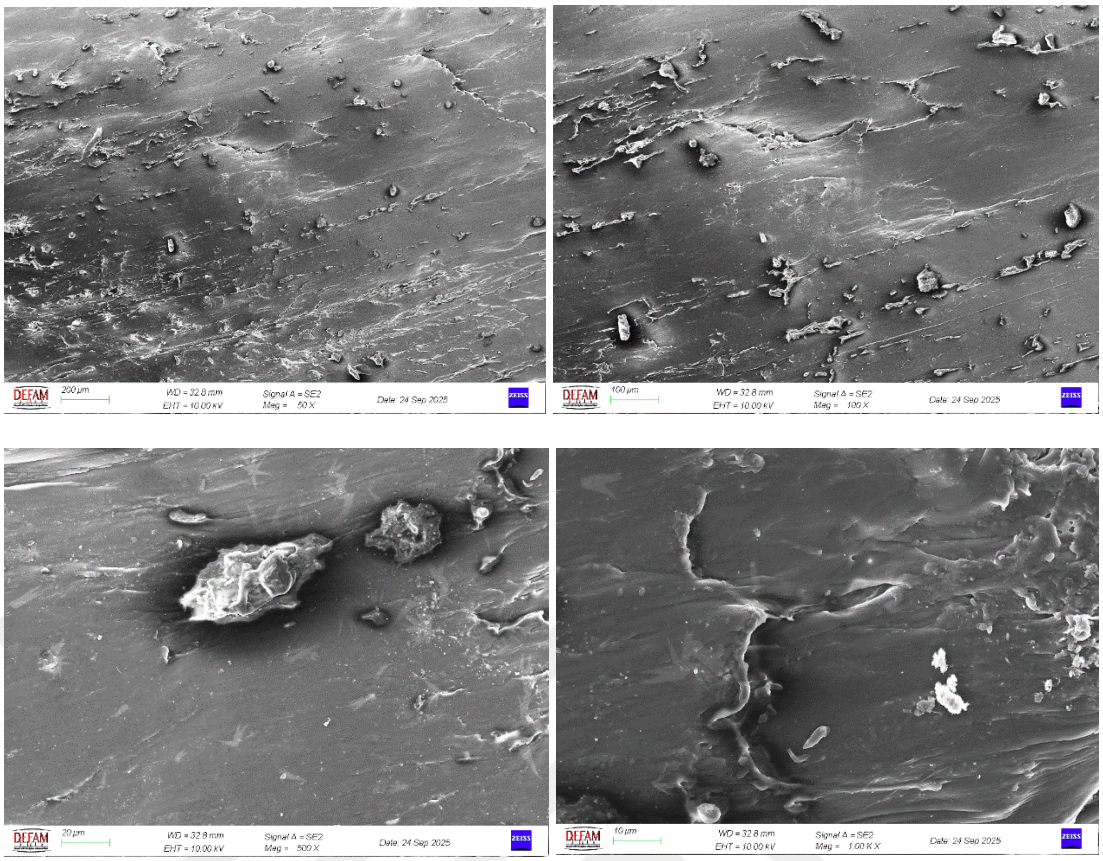
0,5% CNT takviyeli PLA filamentlerinin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4.2), saf PLA'ya kıyasla belirgin şekilde daha pürüzlü ve heterojen bir kırılma topografyası gözlenmektedir. Mikrovoid oluşumları,

CNT çekilme izleri ve düzensiz çatlak hatları, CNT'lerin matris içerisinde yük transferine katkıda bulunduğunu ve kırılma sırasında enerjiyi dağıtarak daha sünek bir hasar mekanizması oluşturduğunu göstermektedir. Bu bulgular, CNT takviyesinin PLA'nın gevrek kırılma modunu zayıflattığını ve kırılma tokluğunu artırdığını doğrulamaktadır.



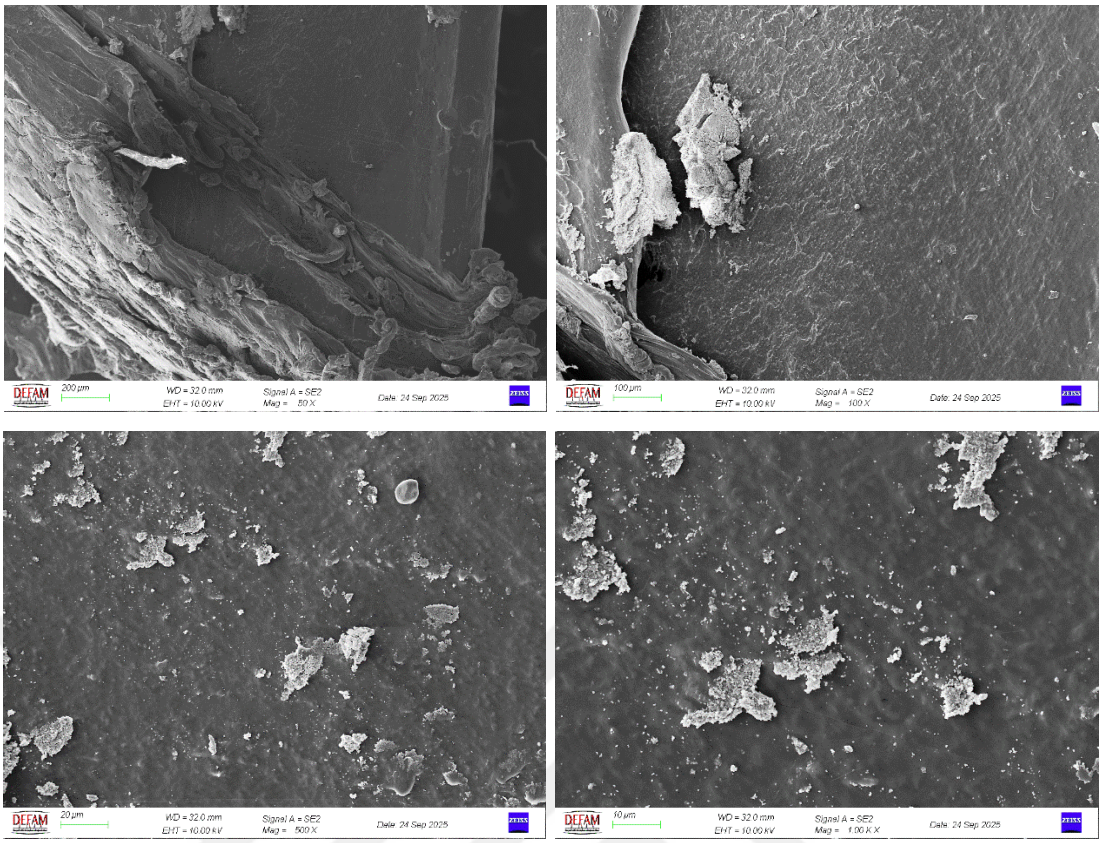
Şekil 4.2 %0,5 CNT takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

1% CNT takviyeli PLA numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntülerinde (şekil 4.3), CNT oranının artmasıyla birlikte matris içerisinde belirgin CNT aglomerasyonlarının oluştuğu görülmektedir. Bu aglomeralar, kırılma yüzeyinde geniş ve daha düz kırılma plakaları oluşturmuş, matrisin daha rijit bir karakter kazanmasına neden olmuştur. Mikro ölçekte çatlak yön değiştirmeleri ve ara yüzey yırtılmaları CNT takviyesinin yük aktarımına katkı sunduğunu doğrulamakla birlikte, sünek kırılma davranışının %0,5 CNT seviyesine göre bir miktar azaldığı anlaşılmaktadır.



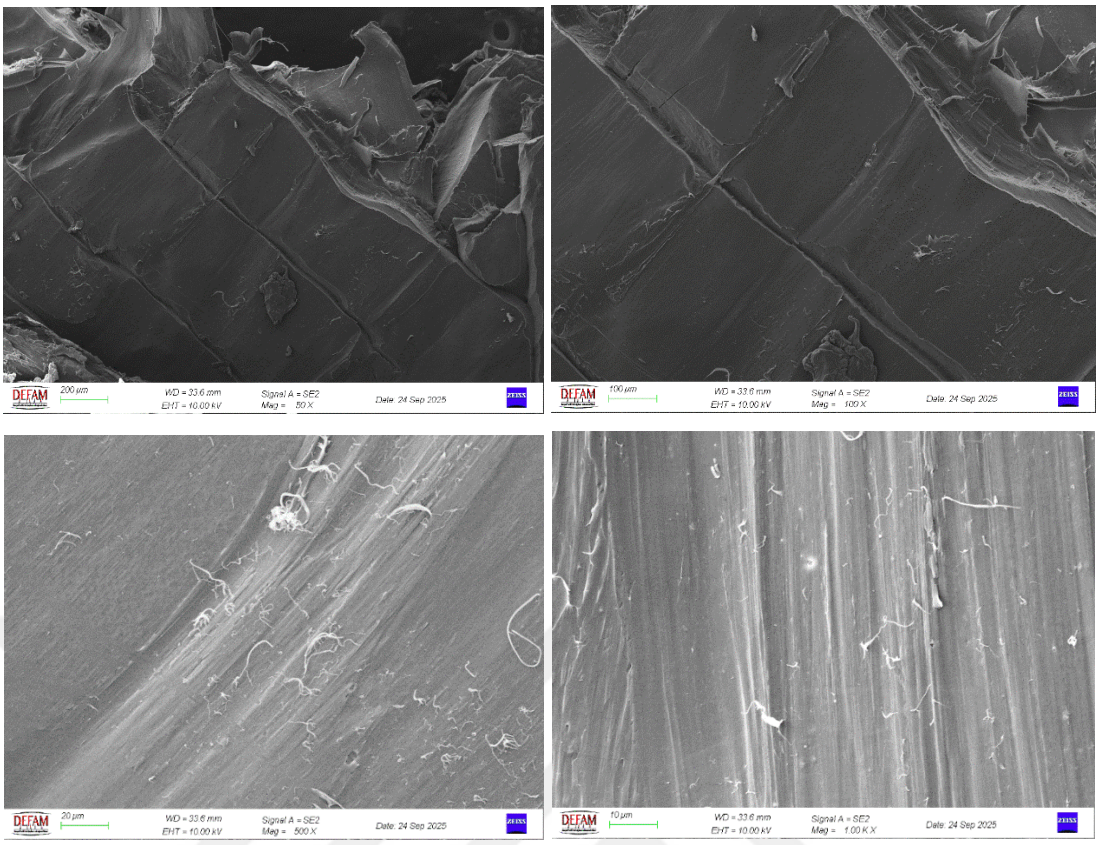
Şekil 4.3 %1 CNT takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

%1,5 CNT takviyeli PLA numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntülerinde (Şekil 4.4), matris boyunca yaygın CNT aglomerasyonları ve bu aglomeraların çevresinde oldukça düz, camsı PLA bölgeleri gözlenmiştir. Bu durum, yüksek CNT oranında dispersiyon kalitesinin bozulduğunu ve malzemenin mikro ölçekte heterojen bir yapı kazandığını göstermektedir. Kırılma yüzeyinin katmanlı ve sert plakalar hâlinde oluşması, %0,5 ve %1 CNT takviyeli numunelere kıyasla kırılma tokluğunun azaldığını, malzemenin daha rijit ve kırılgan bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.



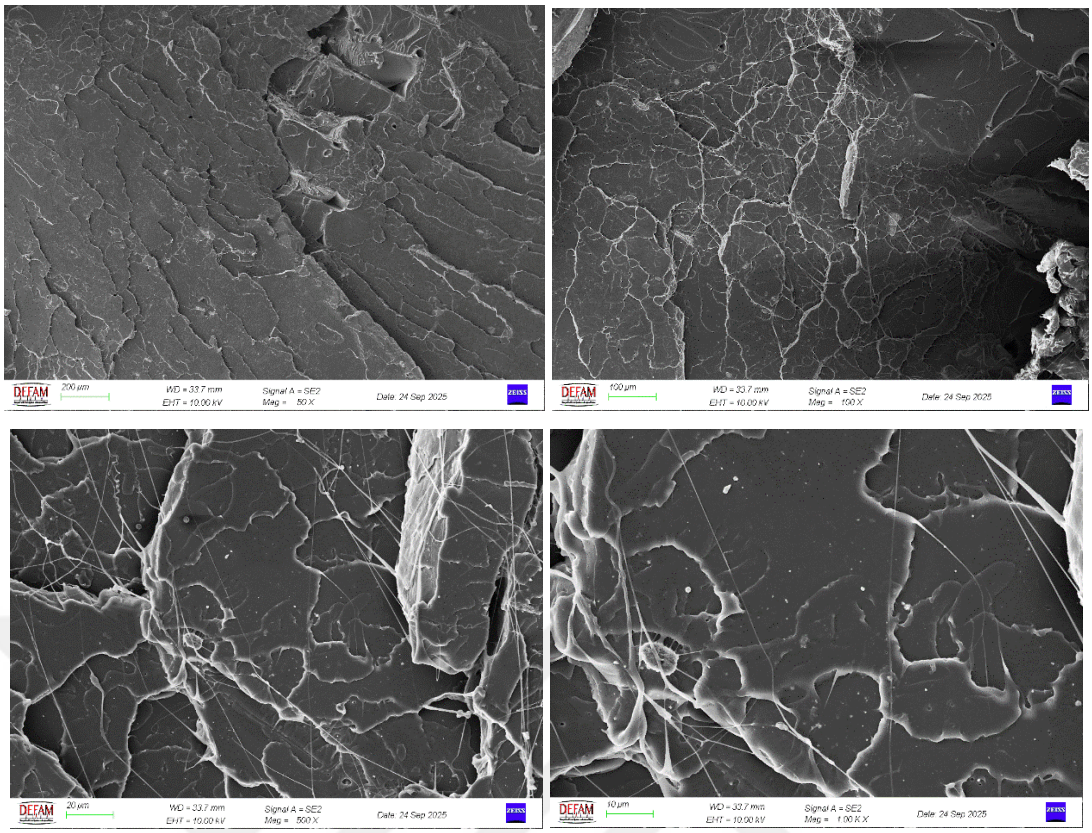
Şekil 4.4 %1,5 CNT takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

%0,5 SiC takviyeli PLA numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri (Şekil 4.5) incelendiğinde, yüzeyin saf PLA'ya benzer şekilde düzlemsel ve yönlenmiş akış izleri ile karakterize olduğu görülmektedir. Tabakalı bloklar hâlinde gelişen kırılma morfolojisi, SiC'nin seramik karakteri nedeniyle çatlak ilerlemesini daha doğrusal bir biçimde yönlendirdiğini ve kırılma modunun büyük ölçüde yarı-gevrek karakterini koruduğunu göstermektedir. Bu bulgular, SiC takviyesinin elastisite modülünde artış sağlarken, CNT takviyesinde gözlenen belirgin sünekleşme etkisini oluşturmadığını ortaya koymaktadır.



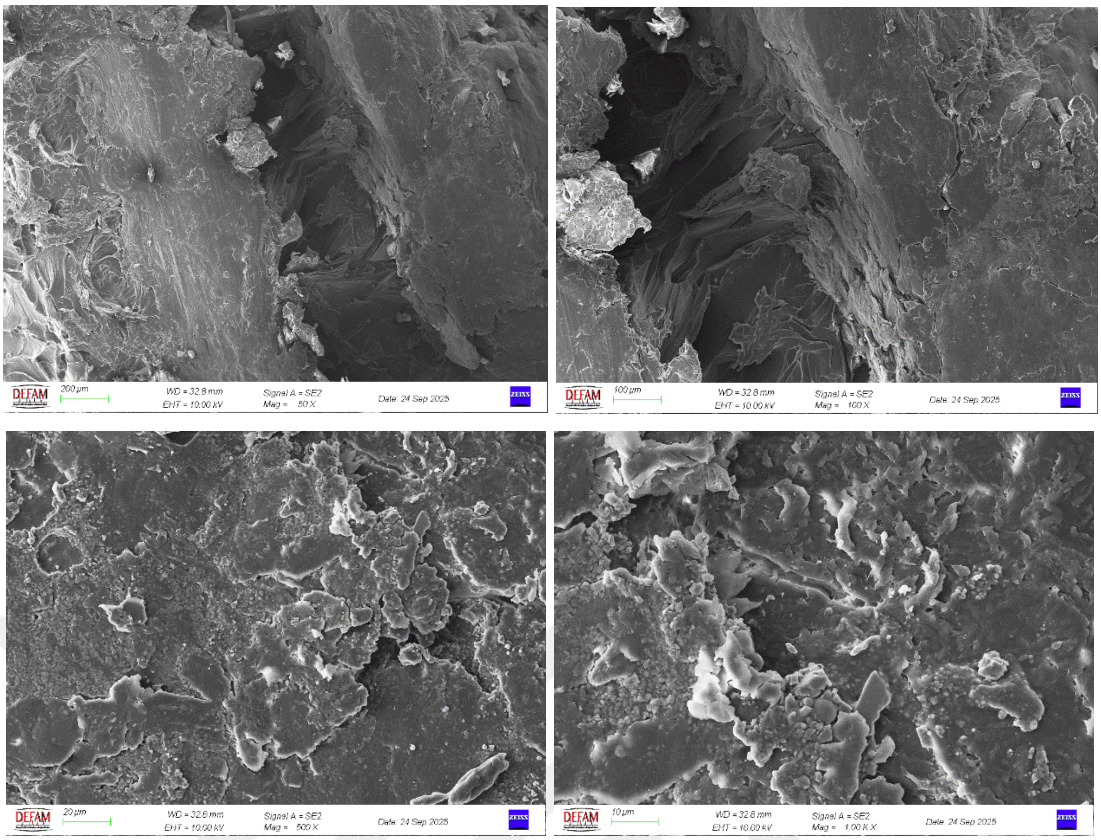
Şekil 4.5 %0,5 SiC takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

%1 SiC takviyeli PLA numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntülerinde (Şekil 4.6), matris boyunca çok sayıda ince çatlak ağı ve bloklu bir kırılma morfolojisi gözlenmiştir. SiC partikülleri etrafında oluşan mikro boşluklar ve tabakalı kırılma düzlemleri, seramik fazın çevresinde gerilme yığılmasının arttığını ve çatlak başlatma eğiliminin yükseldiğini göstermektedir. Bu bulgular, SiC oranının %0,5'ten %1'e çıkarılmasıyla elastisite modül ve rijitliğin artmasına karşın, kırılma davranışının daha belirgin şekilde gevrekleştiğini ortaya koymaktadır.



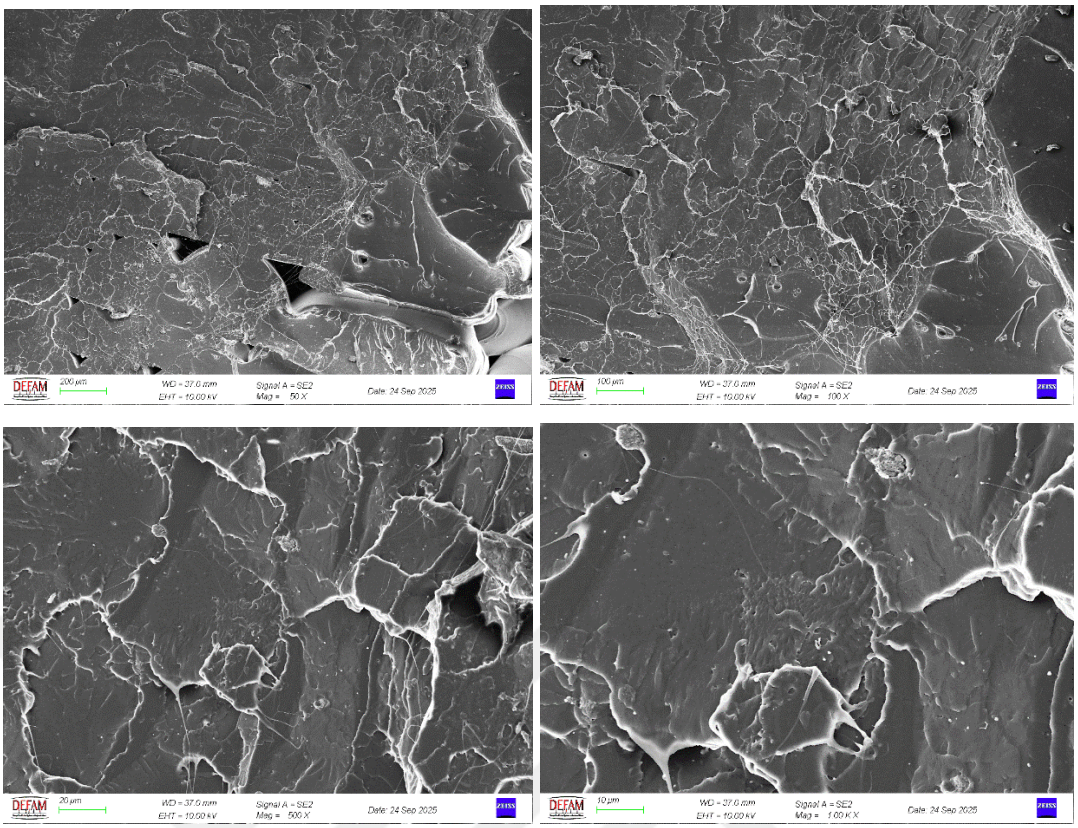
Şekil 4.6 %1 SiC takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

%1,5 SiC takviyeli PLA numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri (Şekil 4.7), matris boyunca yaygın SiC aglomerasyonlarının oluştuğunu açıkça ortaya koymaktadır. Düzensiz granüler yapıya sahip bu aglomeralar, çevrelerinde mikro boşluklar ve çatlak başlangıç bölgeleri oluşturarak kırılma sürecini kontrol etmektedir. Makro ölçekte, tabakalı kırılma plakaları ile SiC zengin bölgelerin bir arada bulunması, malzemenin mikro yapısının oldukça heterojen bir hâl aldığını ve ara yüzey ayrılmasının baskın bir hasar mekanizması olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, SiC oranının %1'in üzerine çıkarılması ile kompozitin sertliğinin artmasına karşın kırılma tokluğunun olumsuz etkilendiğini ve malzemenin daha gevrek bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.



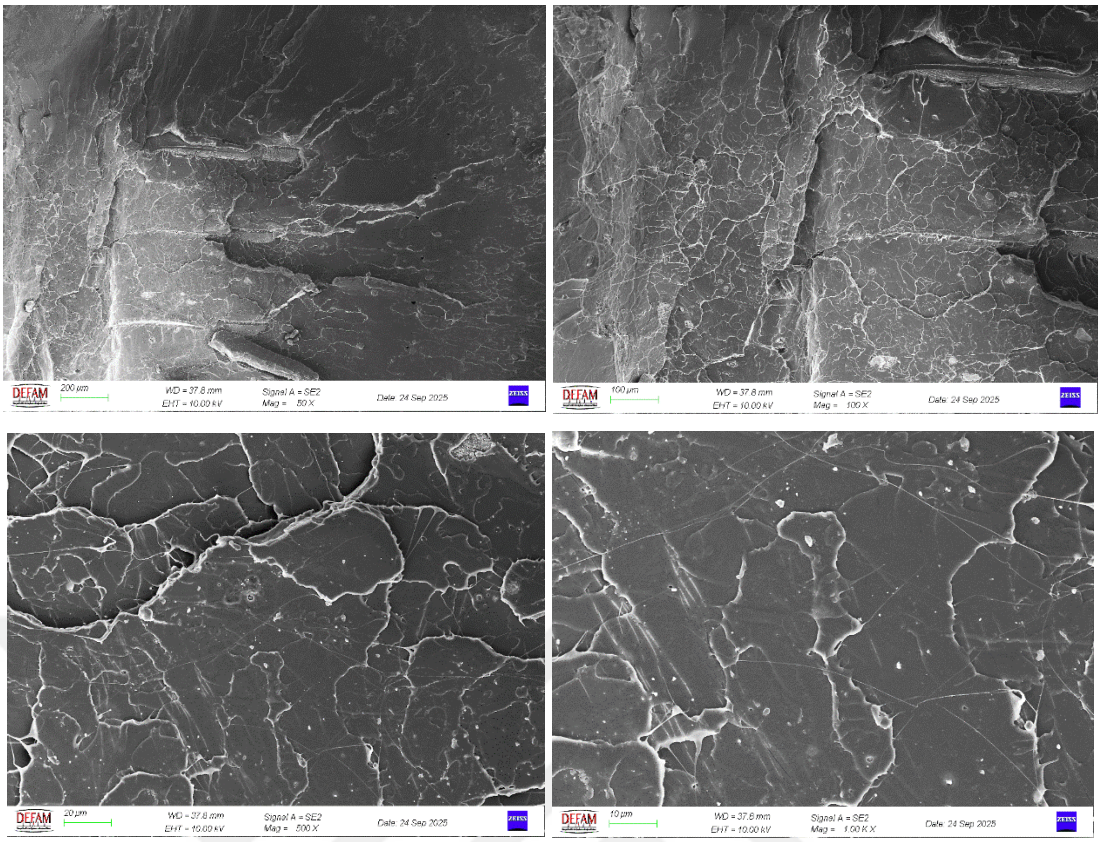
Şekil 4.7 %1,5 SiC takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

%0,5 TiO_2 takviyeli PLA numunelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri (Şekil 4.8), saf PLA'ya kıyasla daha pürüzlü ve çatlak ağlarıyla karakterize bir morfoloji ortaya koymuştur. Kırılma yüzeyinde bir yandan bloklu ve düzlemsel plakalar, diğer yandan ise mikro çukurcuklar ve çatlak sapmaları içeren bölgeler gözlenmiştir. TiO_2 nanoparçacıklarının matris içerisindeki varlığı, çatlak ilerleme yolunu saptırarak kırılma enerjisinin belirli ölçüde artmasına katkı sağlamakta, ancak CNT takviyesinde olduğu kadar belirgin bir lif çekilmesi mekanizması oluşturmadığından kırılma davranışı yarı sünek–yarı gevrek bir karakter göstermektedir.



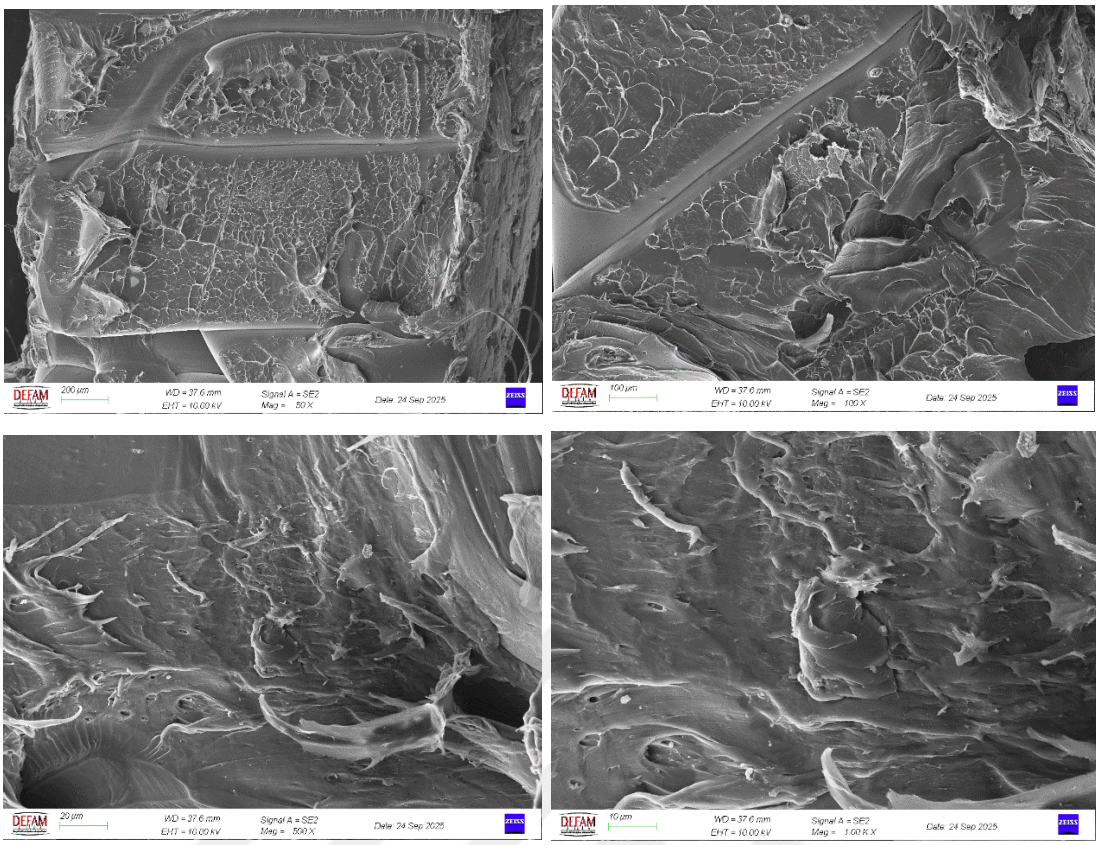
Şekil 4.8 %0,5 TiO_2 takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

%1 TiO_2 takviyeli PLA numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntülerinde (Şekil X), kırılma yüzeyinin büyük bloklar hâlinde ayrıldığı ve bu bloklar arasında yoğun bir çatlak ağının geliştiği görülmektedir. Çatlakların özellikle TiO_2 zengin bölgeler çevresinde yoğunlaşması, seramik fazın çevresinde gerilme yığılmasının arttığını göstermektedir. %0,5 TiO_2'ye kıyasla daha parçalı ve gevrek bir kırılma morfolojisi gözlenmiş olup, TiO_2 takviyesinin elastisite modülünü yükseltmekle birlikte kırılma tokluğunu sınırlı düzeyde iyileştirdiği, hatta yüksek oranlarda kısmen azalttığı söylenebilir.



Şekil 4.9 %1 TiO_2 takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

%1,5 TiO_2 takviyeli PLA numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntülerinde (Şekil 4.10), katmanlar boyunca belirgin interlayer ayrılmaları, bazı bölgelerde düz ve camsı kırılma tabakaları, diğer bölgelerde ise yoğun çatlak ağları ve yırtılma bantları gözlenmiştir. Bu morfoloji, yüksek TiO_2 oranında matrisin mikro yapısının oldukça heterojen hâle geldiğini ve ara yüzey aderansının zayıfladığını göstermektedir. TiO_2 nanoparçacıkları çatlak sapmasına katkı sağlasa da artan aglomerasyon ve gerilme yığılması nedeniyle kırılma davranışı %1 TiO_2'ye kıyasla daha gevrek bir karaktere dönüşmektedir.



Şekil 4.10 %1,5 TiO_2 takviyeli PLA'nın kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

4.2. Filamentlerin Çekme Testi Sonuçları

Filament testinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1 Filament Testinden Elde Edilen Sonuçlar:

	Numuneler	**Elastiste Modülü (MPa)**	**Mak. Gerimler (MPa)**	**Elastiste modülü ortalamaları (MPa)**	**Mak. Gerilmelerin Ortalamaları (MPa)**
	a-1	671,60	37,55		
Saf	a-2	631,25	43,24	663,56	38,94
	a-3	687,82	36,02		
	%0,5-1	770,99	57,77		
CNT	%0,5-2	783,54	64.05	774,08	56,93
	%0,5-3	767,71	48,98		
	%1-1	806,11	54,04		
CNT	%1-2	836,98	51,78	827,30	54,68
	%1-3	838,80	58,22		
	%1,5-1	691,93	34,01		
CNT	%1,5-2	583,70	33,02	629,41	34,49
	%1,5-3	612,60	36,44		
	%0,5-1	724,61	60,44		
SiC	%0,5-2	790,23	51,38	779,58	55,69
	%0,5-3	823,90	55,23		
	%1-1	935,26	59,70		
SiC	%1-2	1,063,77	61,23	937,39	59,57
	%1-3	813,15	57,77		
SiC	%1,5-1	690,94	34,45	730,44	35,93

	%1,5-2	720,15	35,56		
	%1,5-3	780,24	37,78		
	%0,5-1	870,79	50,03		
TiO_2	%0,5-2	830,17	51,46	839,46	50,99
	%0,5-3	817,42	51,46		
	%1-1	675,46	66,49		
TiO_2	%1-2	632,21	52,83	727,19	56,12
	%1-3	873,91	49,05		
	%1,5-1	680,23	32,35		
TiO_2	%1,5-2	640,47	35,43	667,01	35,08
	%1,5-3	680,32	37,45		

4.3. Standart Çekme Numunelerin Test Sonuçları

Tablo 4.2'de çekme numunelerden elde edilen mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.2 Çekme numunelerinden elde edilen mekanik özellikler

	Numuneler	**Elastiste Modülü (MPa)**	**Mak. Gerimler (MPa)**	**Elastiste modülü ortalamaları (MPa)**	**Mak. Gerilmelerin Ortalamaları (MPa)**
	a-1	1137,76	44,38		
Saf	a-2	1013,30	41,53	1053,67	43,48
	a-3	1009,96	44,54		
	%0.5-1	850,59	48,88		
CNT	%0.5-2	981,25	44,66	932,90	46,02
	%0.5-3	966,86	44,52		
	%1-1	948,29	46,36		
CNT	%1-2	894,99	56,82	1044,98	52,71
	%1-3	1291,66	54,94		
	%1.5-1	936,64	54,56		
CNT	%1.5-2	1072,51	45,97	926,01	50,65
	%1.5-3	768,90	51,43		
	%0.5-1	998,83	43,21		
SiC	%0.5-2	1476,22	50,21	1285,10	46,79
	%0.5-3	1380,24	46,95		
	%1-1	829,16	53,91		
SiC	%1-2	1111,22	56,48	914,77	55,76
	%1-3	803,92	56,88		

	%1,5-1	1220,79	47,49		
SiC	%1,5-2	1081,72	57,65	1083,92	51,40
	%1,5-3	949,25	49,06		
	%0,5-1	998,24	36,41		
TiO_2	%0,5-2	1129,35	45,48	1082,34	44,28
	%0,5-3	1119,43	50,95		
	%1-1	850,59	48,88		
TiO_2	%1-2	981,25	44,66	932,90	46,02
	%1-3	966,86	44,52		
	%1,5-1	827,56	43,65		
TiO_2	%1,5-2	805,36	41,85	841,11	42,75
	%1,5-3	890,42	42,75		

Çekme testi sonuçları incelendiğinde, saf PLA numunelerinin ortalama elastisite modülünün 1053,67 MPa, maksimum gerilmesinin ise 43,48 MPa olduğu görülmektedir. Bu değerler, nanotanecik takviyeli numuneler için referans oluşturmakta ve diğer numunelerde gözlenen mekanik iyileşme veya zayıflamaların temel karşılaştırma noktasıdır. CNT takviyeli numunelerde, %0,5 oranında CNT ilavesi elastisite modülünü saf PLA'ya göre bir miktar düşürerek 932,90 MPa seviyesine çekmiş olsa da maksimum gerilmede 46,02 MPa ile hafif bir artış sağlamıştır. Bu durum, düşük CNT oranında henüz tam bir nanotüp ağı oluşmaması ve CNT'nin matris içerisinde yeterli perkolasyon sağlayamaması ile açıklanabilir. %1 CNT takviyesinde ise hem elastisite modülünün 1044,98 MPa ile saf PLA'ya oldukça yakın bir değere yükseldiği hem de maksimum gerilmenin 52,71 MPa ile tüm CNT gruplarındaki en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. Bu sonuç, CNT'nin %1 seviyesinde PLA içinde optimum dağılım ve etkin yük transferi sağladığını, kırılma tokluğu ve dayanım üzerinde belirgin bir iyileşme oluşturduğunu göstermektedir. Ancak CNT oranı %1,5'e çıkarıldığında elastisite modülü 926,01 MPa seviyesine düşmüş, maksimum gerilme ise 50,65 MPa ile yüksek kalmasına rağmen %1 CNT

seviyesinin altında kalmıştır. Bu düşüş, SEM analizlerinde gözlenen CNT aglomerasyonlarıyla uyumlu olup, yüksek CNT içeriğinin matris bütünlüğünü bozduğu ve lokal gerilme yığılmalarına neden olduğu anlaşılmaktadır.

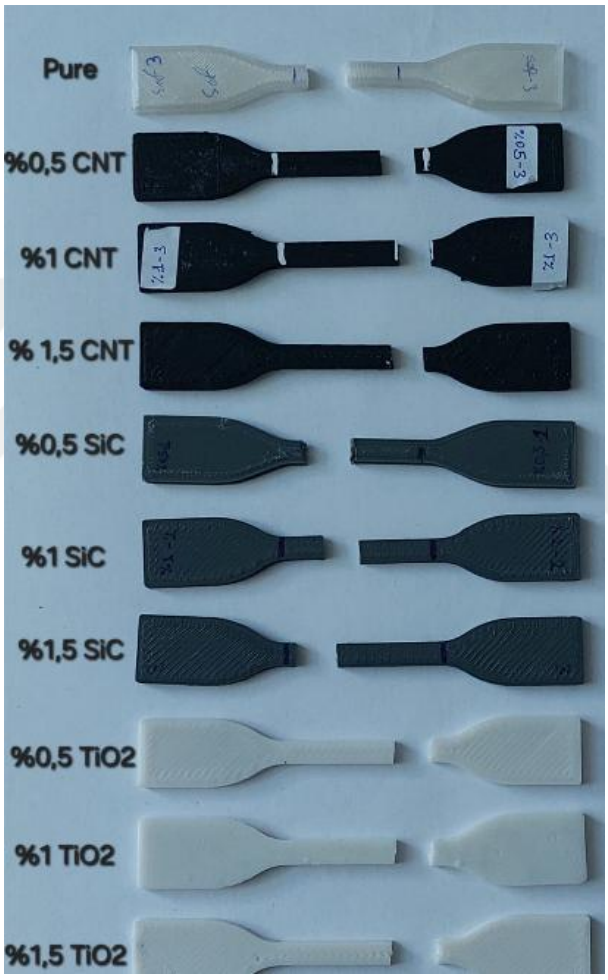
SiC takviyeli numunelerde mekanik davranış CNT'den daha sert ve rijit karakter göstermiştir. %0,5 SiC ilavesi elastisite modülünü 1285,10 MPa ile tüm numuneler arasında en yüksek seviyeye çıkarmış, maksimum gerilme ise 46,79 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, SiC'nin seramik faz özellikleri nedeniyle özellikle elastisite modülünü artırıcı etkisinin güçlü olduğunu göstermektedir. %1 SiC takviyesinde elastisite modülü 914,77 MPa seviyesine düşmesine rağmen maksimum gerilme 55,76 MPa ile tüm tablo içerisinde elde edilen en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Bu sonuç, SiC'nin çatlak sapmasını artırarak yük taşıma kapasitesini yükseltmesi ile ilişkilendirilebilir. %1,5 SiC oranında ise elastisite modülü 1083,92 MPa değerine yükselmiş ancak maksimum gerilme 51,40 MPa seviyesine gerilemiştir. Bu durum, yüksek SiC oranında aglomerasyon ve ara yüzey ayrılmalarının etkisiyle malzemenin heterojenleştiğini ve optimum etkinin %1 civarında olduğunu göstermektedir.

TiO_2 takviyelerinde ise mekanik özelliklerin değişimi CNT ve SiC kadar keskin olmamakla birlikte, belirgin eğilimler gözlenmiştir. %0,5 TiO_2 takviyesi elastisite modülünü 1082,34 MPa seviyesine yükseltmiş ve maksimum gerilme 44,28 MPa ile saf PLA'ya yakın bir değer vermiştir. Bu oran, TiO_2'nin matris içerisinde çatlak sapmasına katkı sağladığını ancak belirgin bir dayanım artışı oluşturmadığını göstermektedir. %1 TiO_2 numunelerinde elastisite modülü 932,90 MPa, maksimum gerilme ise 46,02 MPa olarak ölçülmüştür; bu değerler, TiO_2'nin orta seviyede katkı sağladığını ancak CNT ve SiC kadar etkili bir takviye olmadığını göstermektedir. TiO_2 oranının %1,5'e çıkarılmasıyla elastisite modülü 841,11 MPa'a düşmüş ve maksimum gerilme 42,75 MPa ile saf PLA'nın dahi altına inmiştir. Bu düşüş, SEM görüntülerinde belirginleşen TiO_2 aglomerasyonları ve tabakalar arası ayrılma davranışıyla uyumludur; yani yüksek TiO_2 içeriği PLA matrisinin bütünlüğünü bozmakta ve gevrek kırılma eğilimini artırmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, CNT takviyesinde optimum etki %1 seviyesinde görülmüş, SiC katkılarında elastisite modülü açısından optimum %0,5 dayanım açısından ise optimum %1 olarak belirlenmiştir. TiO_2 takviyelerinde ise %0,5–1 aralığı en dengeli davranışı vermiş, %1,5 TiO_2 tüm mekanik performanslarda

düşüşe neden olmuştur. Bu sonuçlar, nanotanecik tipinin ve oranının mekanik performansı belirlemede kritik rol oynadığını, aşırı takviye miktarının tüm türlerde aglomerasyona bağlı performans kaybı oluşturduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 4.3'te auxetic tasarımların mekanik özelliklerini değerlendirirken kesit alanı değişkenliği sonuçları farklı etkileyebileceğinden şekil 4.11'deki gibi parçaların kırılana kadar dayanabileceği maksimum kuvvet ve bu kuvvete kadar parçada gerçekleşen eksenel uzama değerlendirilmiştir.

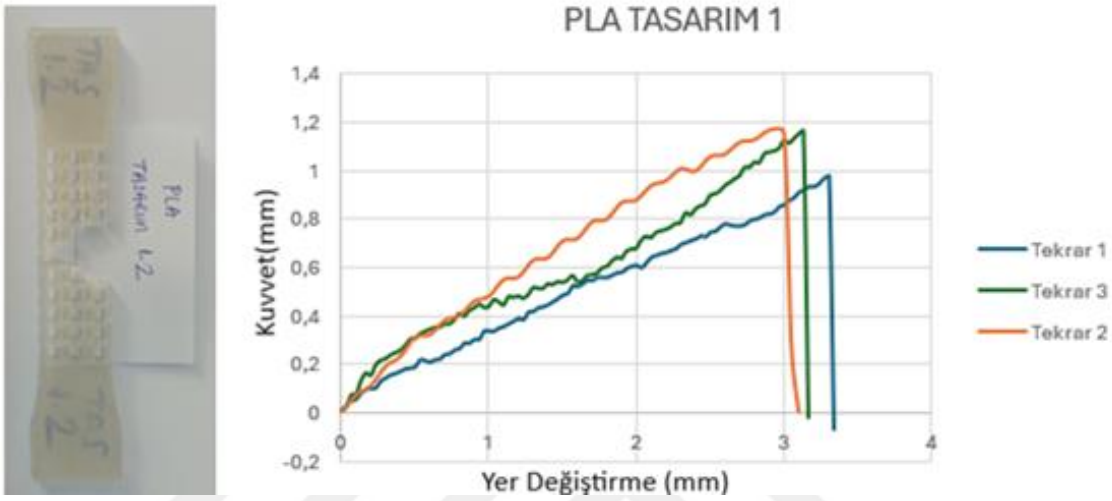


Şekil 4.11 Test sonrası numunelerin görüntüsü

4.4. Auxetic Geometrilerin Çekme Testleri

Auxetic geometrilerin çekme testlerinde yüzde 1,5 katkılı olanların mekanik özelliklere saf PLA'ya göre daha olumsuz etkisi olmasında ötürü testlere dahil edilmemiştir. Çekme testi sonrası üretimden kaynaklanan süreksizlikler sebebi ile bazı

numunelerde istenmeyen yerlerde kırılma gerçekleştiğinden deney tekrarı yapılmıştır. Çoğunluğu benzer noktalardan kırılma gösteren, gürültü faktörlerin ortadan kaldırıldığı saf katkısız PLA malzemeden üretilmiş tasarım-1 için yük-deplasman grafiği şekil 4.12 ‘deki gibi elde edilmiştir. Kırılma şekilleri her tekrarda benzer noktalarda şekil 4.12 ‘teki noktalardan olmuştur.

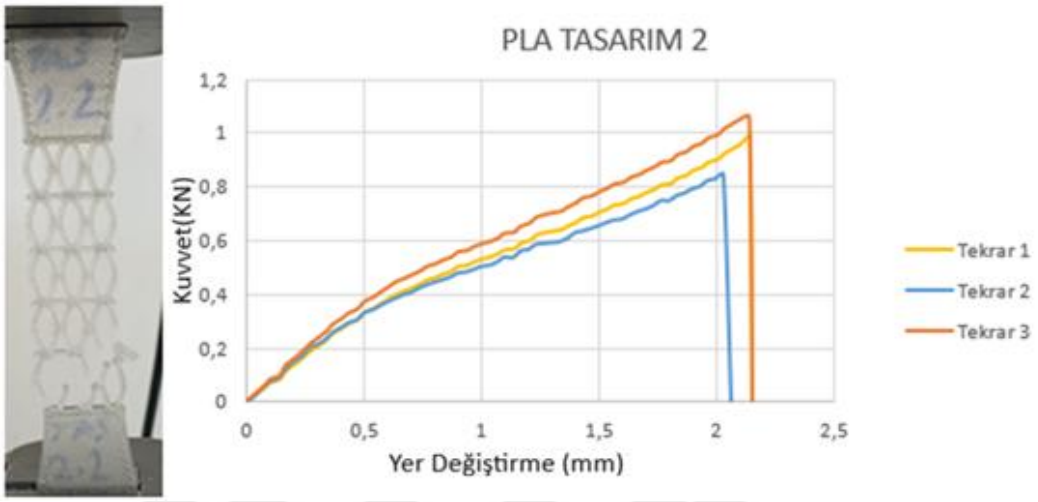


Şekil 4.12 Tasarım-1 saf PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

Üç farklı PLA kafes yapı tasarımına ait çekme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet–yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, her bir tasarım için maksimum kuvvet ve kopma yer değiştirmesi değerlerinin tekrarlar arasında belirli bir saçılım gösterdiği görülmüştür. Bu farklılıkların, deney koşullarının sabit tutulmasına rağmen, katkılı imalat sürecine özgü üretim kaynaklı malzeme süreksizliklerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Özellikle katmanlar arası bağlanma kalitesindeki lokal değişimler, filament akışındaki süreksizlikler ve mikro boşluk oluşumu, numunelerin etkin taşıyıcı kesit alanını ve gerilme dağılımını doğrudan etkilemiştir. Bu durum, aynı tasarıma ait numunelerde dahi kırılmanın farklı konumlarda gerçekleşmesine neden olmuştur.

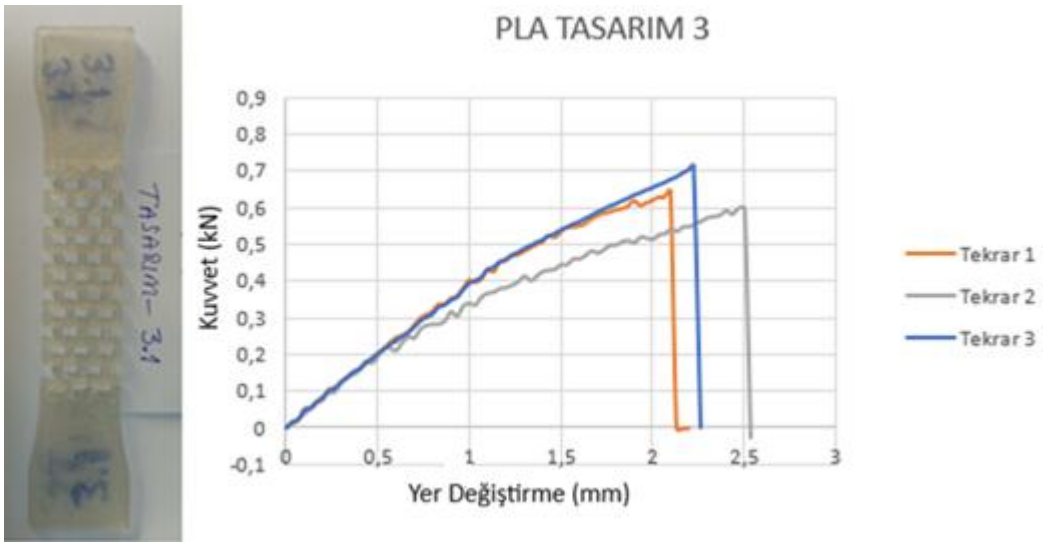
Tasarım 1 numunelerinde şekil 4.12’de maksimum kuvvet değerleri yaklaşık 0,95–1,15 kN aralığında değişmiş, kopma anındaki yer değiştirme ise yaklaşık 3,0–3,3 mm olarak ölçülmüştür. Eğrilerin genel eğimi benzer olmakla birlikte, bazı numunelerde kopmanın kafes bölgesinin orta kesiminde, bazılarında ise geçiş bölgelerine daha yakın noktalarda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, hücre

duvarları boyunca oluşan lokal zayıf bölgelerin yük altında erken hasar başlatıcı rol oynadığını göstermektedir. Buna rağmen, Tasarım 1'in geometrik sürekliliği, hasarın kademeli olarak ilerlemesine olanak tanımış ve ani kırılma davranışı büyük ölçüde sınırlandırılmıştır.



Şekil 4.13 Tasarım-2 saf PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

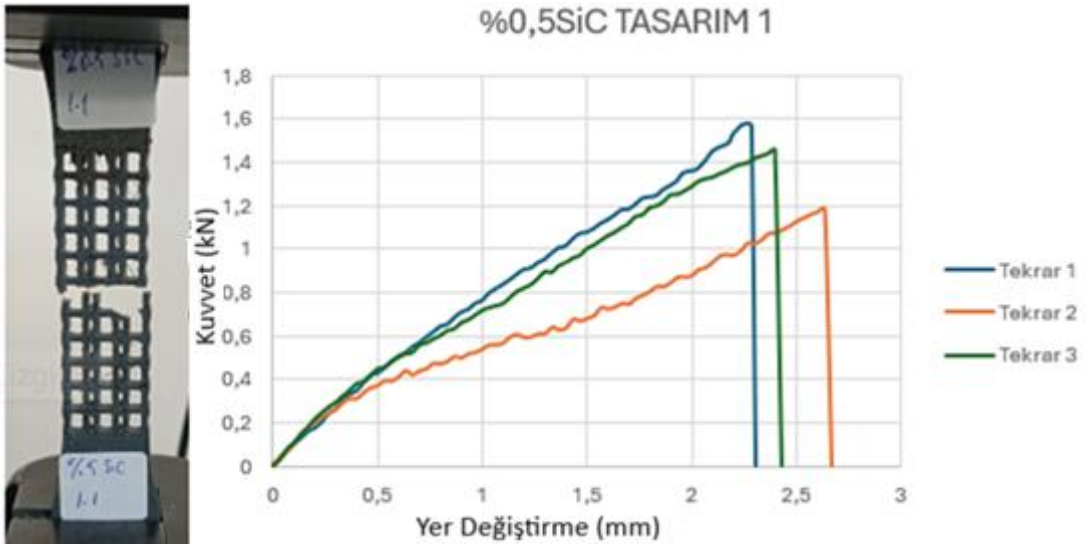
Tasarım 2 için elde edilen şekil 4.13'te maksimum kuvvet değerleri yaklaşık 0,85–1,05 kN aralığında olup, kopma yer değiştirmeleri 2,0–2,2 mm seviyesinde gerçekleşmiştir. Tekrarlar arası saçılımın Tasarım 1'e kıyasla daha sınırlı olması, evolvent hücre geometrisinin yük aktarımını daha homojen bir şekilde gerçekleştirdiğini düşündürmektedir. Ancak üretim kaynaklı katman süreksizliklerinin yoğunlaştığı bölgelerde kırılmanın ani olarak geliştiği ve kırılma konumunun numuneden numuneye değiştiği belirlenmiştir. Bu durum, daha rijit hücre geometrilerinin, üretim kusurlarına karşı daha hassas olabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.14 Tasarım-3 saf PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

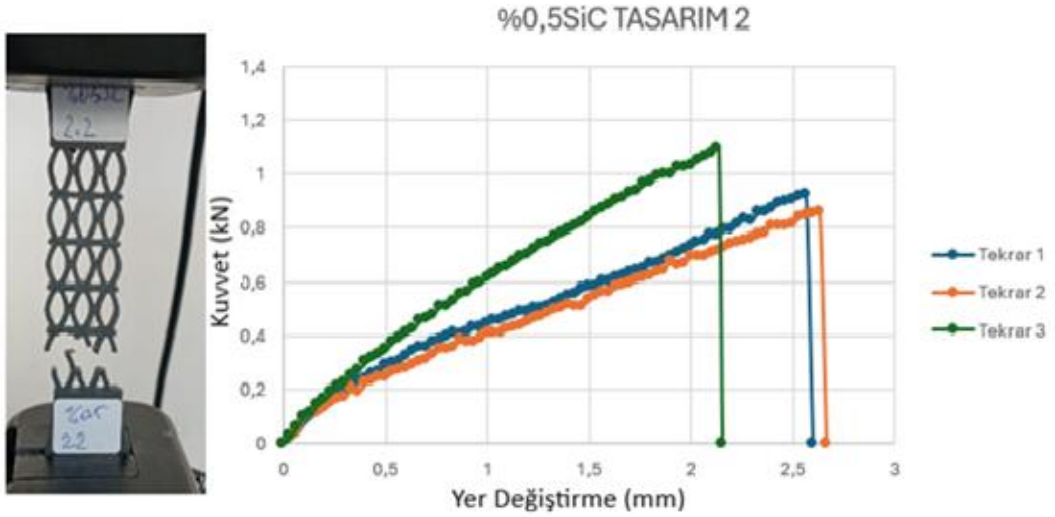
Şekil 4.14'te Tasarım 3 numunelerinde ise maksimum kuvvet değerlerinin yaklaşık 0,60–0,72 kN aralığında kaldığı ve kopma yer değiştirmelerinin 2,1–2,5 mm arasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Hücre yoğunluğunun artmasına rağmen mekanik performansın düşmesi, üretim sırasında oluşan mikro boşluklar ve keskin geometrik geçişler nedeniyle lokal gerilme yığılmalarının daha erken oluşmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bu tasarımda kırılmanın, çoğunlukla kafes yapının belirli bir hücre sırasında yoğunlaştığı ve ilerleyici bir hasar yerine ani kopma şeklinde geliştiği gözlemlenmiştir.

%0,5 SiC katkılı PLA kullanılarak üretilen üç farklı kafes yapı tasarımına ait çekme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet–yer değiştirme eğrileri, katkısız PLA numunelerine benzer şekilde tekrarlar arasında belirli bir saçılım sergilemekle birlikte, genel olarak daha yüksek rijitlik ve artan maksimum kuvvet seviyelerine işaret etmektedir. Bununla birlikte, aynı tasarıma ait numunelerde gözlemlenen eğri farklılıklarının ve kırılma konumlarındaki değişkenliğin, SiC partiküllerinin matris içerisindeki dağılım homojenliğine ve katkılı filamentin üretim sürecinde oluşan mikro süreksizliklere bağlı olduğu değerlendirilmektedir. Özellikle katmanlar arası bağlanma bölgelerinde SiC yoğunlaşmasına bağlı lokal gevrekleşme, kırılma başlangıç noktalarının numuneden numuneye değişmesine neden olmuştur. Şekil 4.15 'te Tasarım 1 için maksimum kuvvet değerleri yaklaşık 1,10–1,60 kN aralığında değişmiş, kopma yer değiştirmeleri ise yaklaşık 2,2–2,6 mm seviyesinde gerçekleşmiştir.



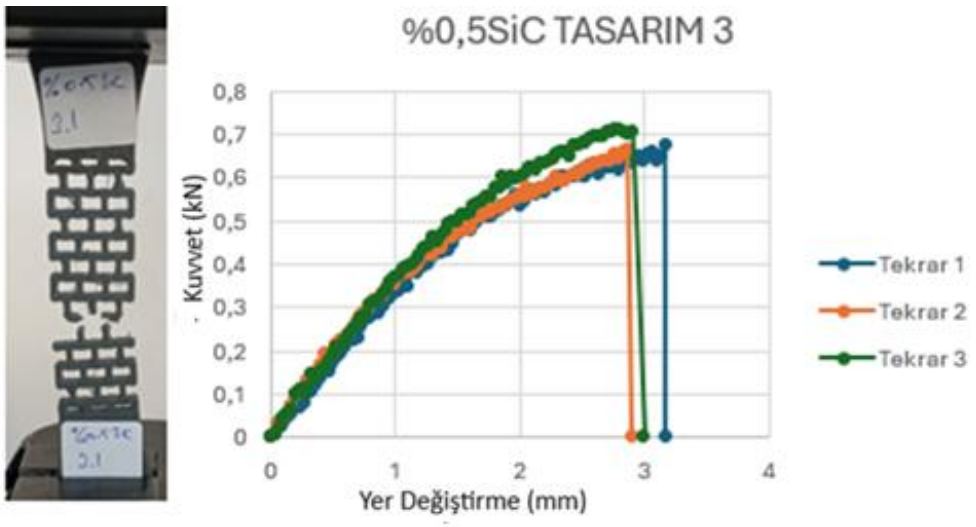
Şekil 4.15 Tasarım-1 %0,5SiC PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

Tasarım 2 numunelerinde şekil 4.16'da maksimum kuvvet değerleri yaklaşık 0,85–1,10 kN aralığında ölçülmüş, kopma yer değiştirmeleri ise 2,1–2,6 mm arasında değişmiştir. Evolvent hücre geometrisinin yük aktarımını daha homojen gerçekleştirmesine rağmen, SiC katkısının katmanlar arası bağlanma kalitesine olan hassasiyeti, bu tasarımda kırılma davranışını belirgin şekilde etkilemiştir.

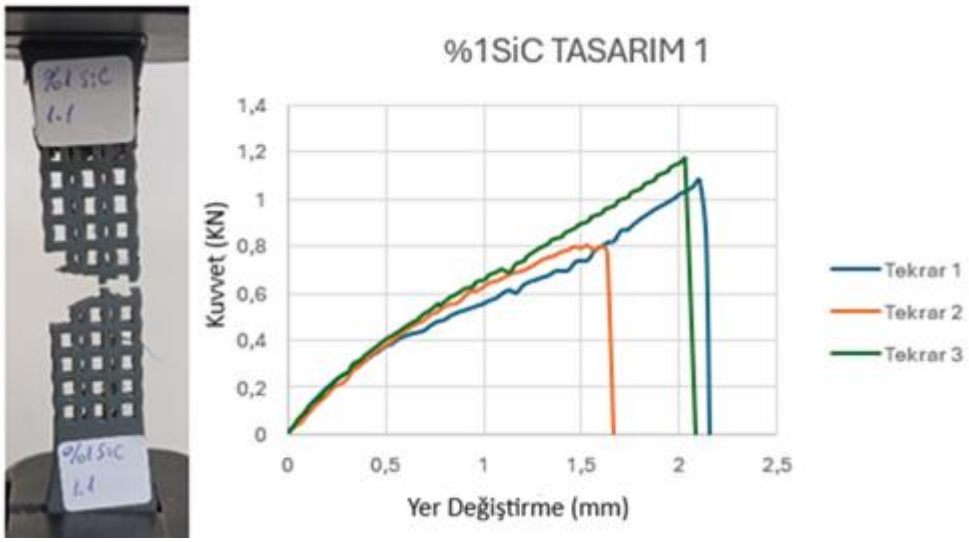


Şekil 4.16 Tasarım-2 %0,5SiC PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

Tasarım 3 şekil 4.17'de maksimum kuvvet değerleri yaklaşık 0,60–0,75 kN aralığında kalmış, kopma yer değiştirmeleri ise yaklaşık 2,85–3,1 mm seviyesinde gerçekleşmiştir. Diğer tasarımlara kıyasla daha düşük taşıma kapasitesine rağmen, bazı numunelerde daha uzun bir deformasyon süreci gözlemlenmiştir.



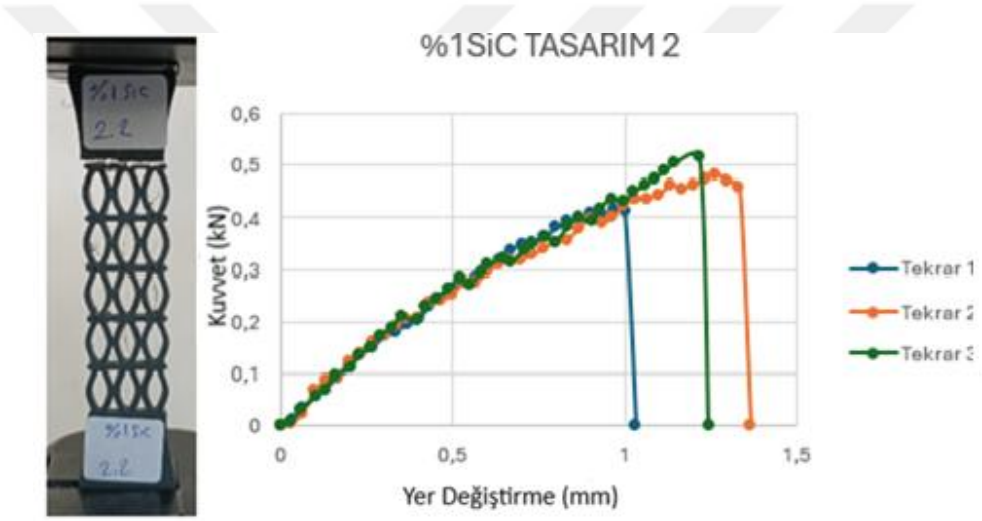
Şekil 4.17 Tasarım-3 %0,5SiC PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü



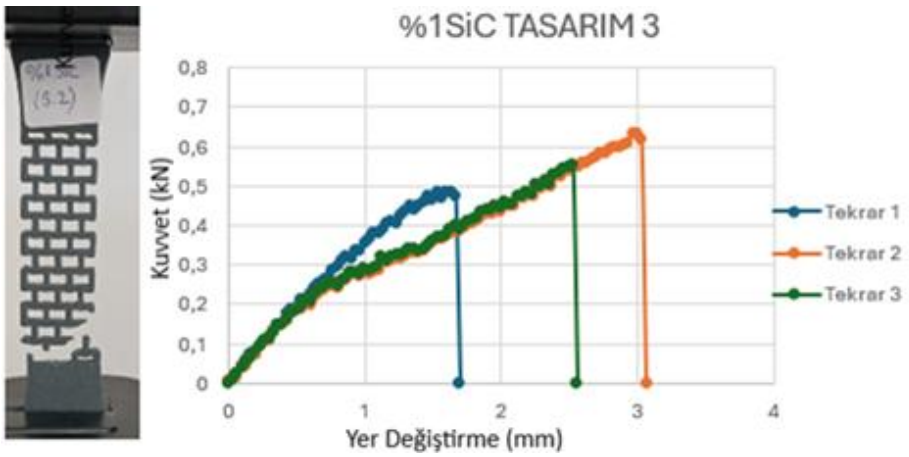
Şekil 4.18 Tasarım-1 %1 SiC PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

%1 SiC katkılı PLA ile üretilen kafes yapıların çekme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet–yer değiştirme eğrileri, SiC oranındaki artışa bağlı olarak genel bir rijitlik artışı ile daha belirgin bir gevrek davranış eğilimi sergilemiştir. Şekil 4.18'de Tasarım 1 için maksimum kuvvet değerleri yaklaşık 0,95–1,15 kN aralığında

gerçekleşmiş ve kopma yer değiştirmeleri 1,7–2,2 mm seviyesinde kalmıştır. Şekil 4.20'de Tasarım 3 numunelerinde maksimum kuvvetler yaklaşık 0,45–0,65 kN aralığında ölçülmüş, buna karşın kopma yer değiştirmeleri 2,5–3,2 mm aralığında değişmiştir. Tasarım 2'de ise maksimum kuvvet değerleri yaklaşık 0,45–0,55 kN seviyesinde olup, Şekil 4.19'da hasar görüntüsündeki gibi bazı numunelerde kopmanın kafes yapının etkin deformasyon bölgesi dışında, uç bağlantı veya geçiş bölgelerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu istenmeyen kopma davranışı, SiC katkısının katmanlar arası bağlanma kalitesine olan duyarlılığının artması ve lokal gerilme yığılmalarının geometriden bağımsız olarak hasar başlatıcı rol üstlenmesi ile ilişkilendirilmektedir.

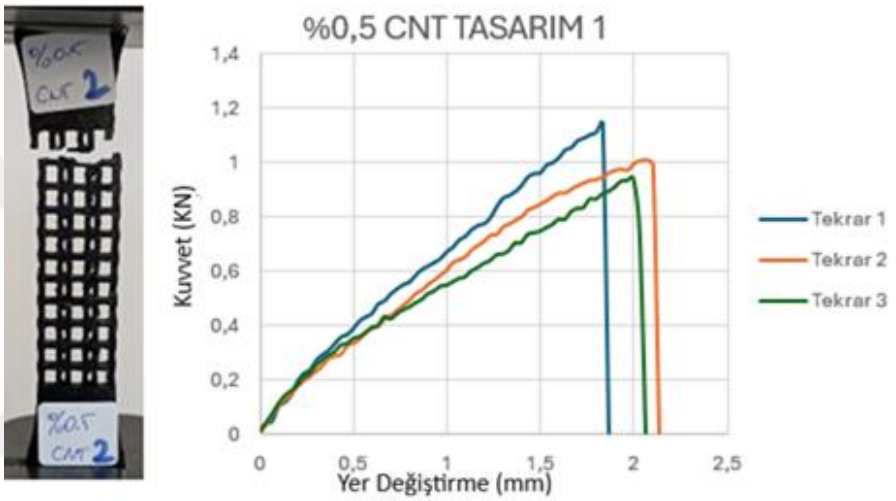


Şekil 4.19 Tasarım-2 %1 SiC PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü



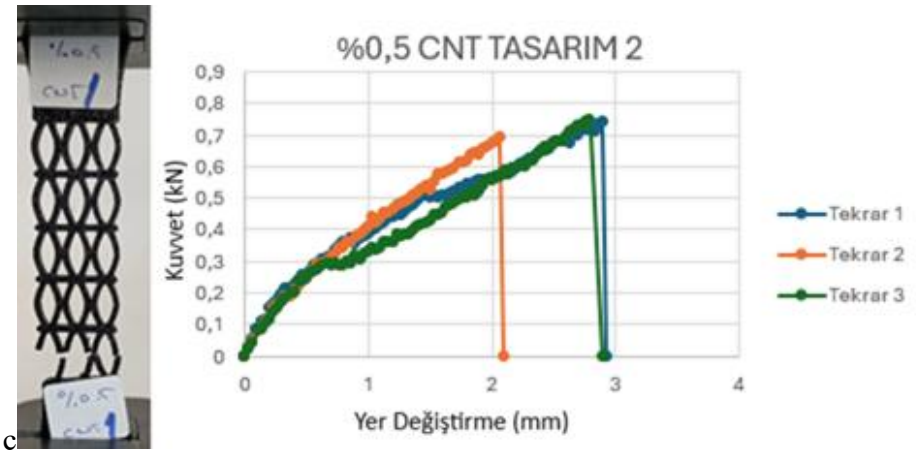
Şekil 4.20 Tasarım-3 %1 SiC PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

%0,5 CNT katkılı Tasarım 1 için maksimum kuvvet değerleri şekil 4.21'de yaklaşık 0,95–1,15 kN aralığında ölçülmüş, kopma yer değiştirmeleri ise 1,9–2,2 mm seviyesinde gerçekleşmiştir. Kuvvet–yer değiştirme eğrilerinin başlangıç eğimi, katkısız ve SiC katkılı PLA numunelerine kıyasla daha yüksek olup, CNT katkısının başlangıç rijitliğini artırdığı görülmektedir. Buna karşın eğrilerin doğrusal olmayan bölgesinde ani kuvvet düşüşleri gözlenmemiş, hasarın kademeli olarak ilerlediği bir deformasyon davranışı sergilenmiştir. Kırılmaların çoğunlukla kafes bölgesi içerisinde meydana gelmesi, yükün geometrik olarak etkin şekilde taşındığını göstermektedir.



Şekil 4.21 Tasarım-1 %0,5CNT PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

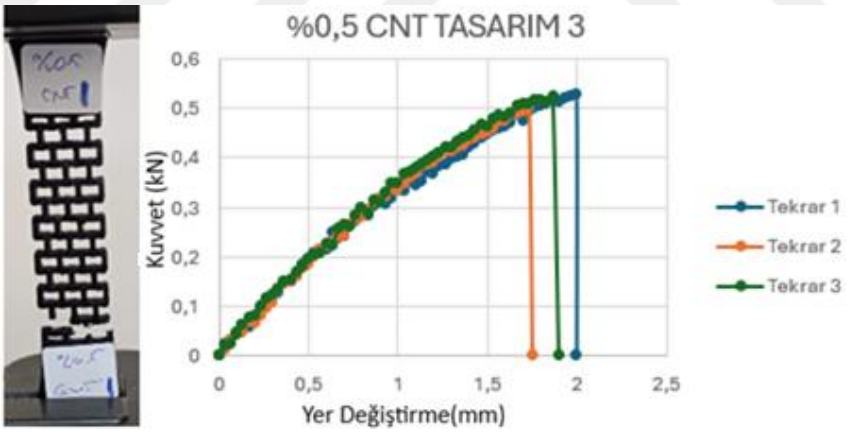
Şekil 4.22'de Tasarım 2 numunelerinde maksimum kuvvet değerleri yaklaşık 0,65–0,80 kN aralığında, kopma yer değiştirmeleri ise 2,5–3,0 mm seviyesinde ölçülmüştür. Evolvent hücre geometrisinin CNT katkısıyla birlikte daha dengeli bir yük aktarımı sağladığı, eğrilerdeki düzgün kuvvet artışından anlaşılmaktadır. Ancak bir tekrar numunesinde kopmanın daha erken gerçekleşmesi, üretim sırasında oluşan lokal katman zayıflıklarının, CNT katkısına rağmen tamamen ortadan kaldırılamadığını ortaya koymaktadır. Buna rağmen, kırılmanın kafes bölgesinde yoğunlaşması, istenmeyen uç veya geçiş bölgesi hasarlarının büyük ölçüde sınırlandığını göstermektedir.



c

Şekil 4.22 Tasarım-2 %0,5CNT PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

Şekil 4.23'te Tasarım 3 için maksimum kuvvet değerleri yaklaşık 0,50–0,55 kN aralığında ölçülmüş, kopma yer değiştirmeleri ise 1,8–2,2 mm arasında değişmiştir. Hücre yoğunluğunun artmasına rağmen, CNT katkısı sayesinde kuvvet–yer değiştirme eğrilerinin tekrarlar arasında oldukça benzer olduğu ve mekanik davranışın daha öngörülebilir hale geldiği gözlemlenmiştir.

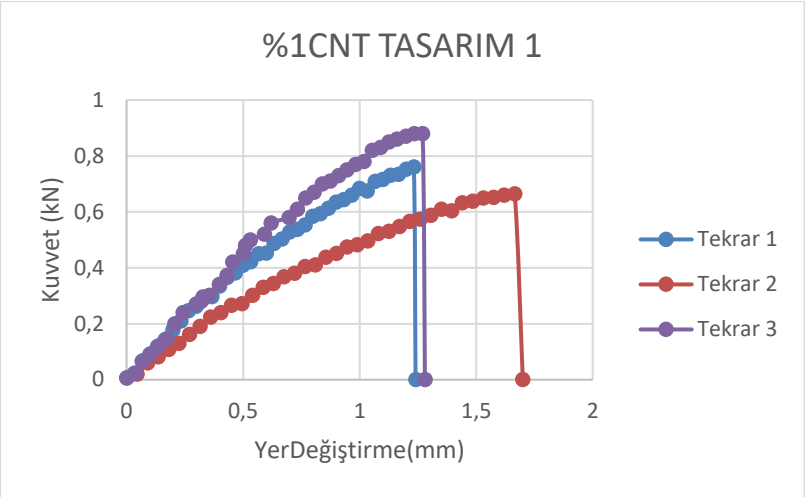


Şekil 4.23 Tasarım-3 %0,5CNT PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

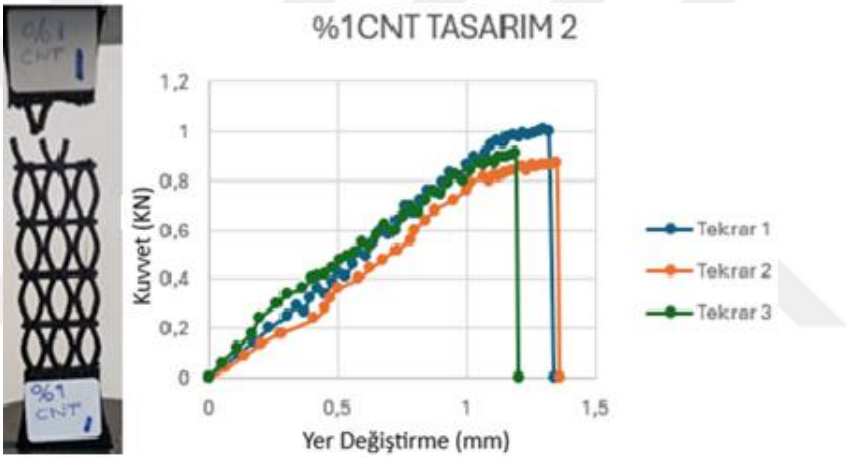
%1 CNT katkılı deneylerdeki sonuçlarda şekil 4.24'te Tasarım 1 numuneleri, çekme yükü altında yaklaşık 1,3–1,6 mm yer değiştirme aralığında kopma davranışı sergilemiştir. Üç deney tekrarı incelendiğinde, maksimum taşıma kapasitesinin 0,65–0,90 kN aralığında değiştiği görülmektedir. Ortalama maksimum kuvvet değeri yaklaşık 0,78 kN olarak hesaplanmıştır. Eğriler incelendiğinde, başlangıçta doğrusalya yakın elastik bir bölge gözlemlenmiş, ardından rijitliğin azaldığı ve kırılmaya kadar

artan bir kuvvet trendi olduğu tespit edilmiştir. Deney tekrarları arasında özellikle maksimum kuvvet değerlerinde sınırlı bir saçılma olduğu görülmektedir. Şekil 4.25 'te Tasarım 2 numuneleri, tüm tasarımlar arasında en yüksek maksimum kuvvet değerlerini göstermiştir. Numuneler yaklaşık 1,1–1,3 mm yer değiştirme seviyelerinde kopmuş olup, maksimum kuvvet değerleri 0,85–1,05 kN aralığında ölçülmüştür. Ortalama maksimum kuvvet yaklaşık 0,95 kN olarak belirlenmiştir. Kuvvet–yer değiştirme eğrileri, Tasarım 1'e kıyasla daha yüksek bir eğime sahip olup, bu durum Tasarım 2'nin daha yüksek efektif rijitlik sergilediğini göstermektedir. Deney tekrarları arasındaki sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu ve tekrarlanabilirliğin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Tasarım 3 numunelerinde maksimum yer değiştirme şekil 4.26'dan görüleceği üzere değerleri yaklaşık 1,0–1,3 mm aralığında gerçekleşmiştir. Maksimum kuvvet değerleri 0,75–0,90 kN arasında değişmekte olup, ortalama maksimum kuvvet yaklaşık 0,83 kN olarak hesaplanmıştır. Tasarım 3'ün kuvvet–yer değiştirme eğrileri, Tasarım 1'e benzer bir eğilim göstermekle birlikte, maksimum kuvvet değerleri bakımından daha dengeli bir dağılım sergilemiştir. Bununla birlikte, kopma öncesinde ani kuvvet düşüşleri gözlemlenmiş ve bu durum kırılmanın daha gevrek bir karaktere sahip olduğunu göstermiştir.

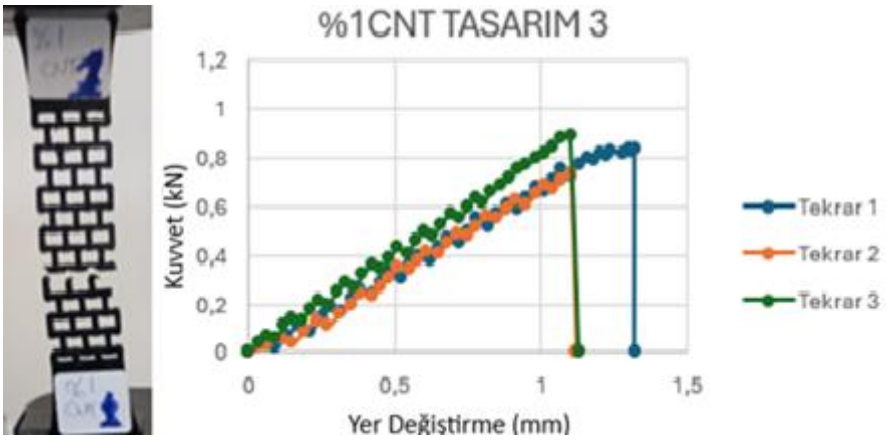
Üç auxetic %1 CNT katkılı tasarım birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek taşıma kapasitesi ve rijitlik Tasarım 2'de elde edilmiştir. Tasarım 3, orta seviyede bir mekanik performans sunarken, Tasarım 1 en düşük maksimum kuvvet değerlerine sahiptir. Deney tekrarları arasındaki saçılmanın sınırlı olması, üretim ve test süreçlerinin tekrarlanabilirliğini doğrulamaktadır. Sonuçlar, auxetic geometri seçiminin %1 CNT katkılı yapıların çekme davranışı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.24 Tasarım-1 %1 CNT PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü



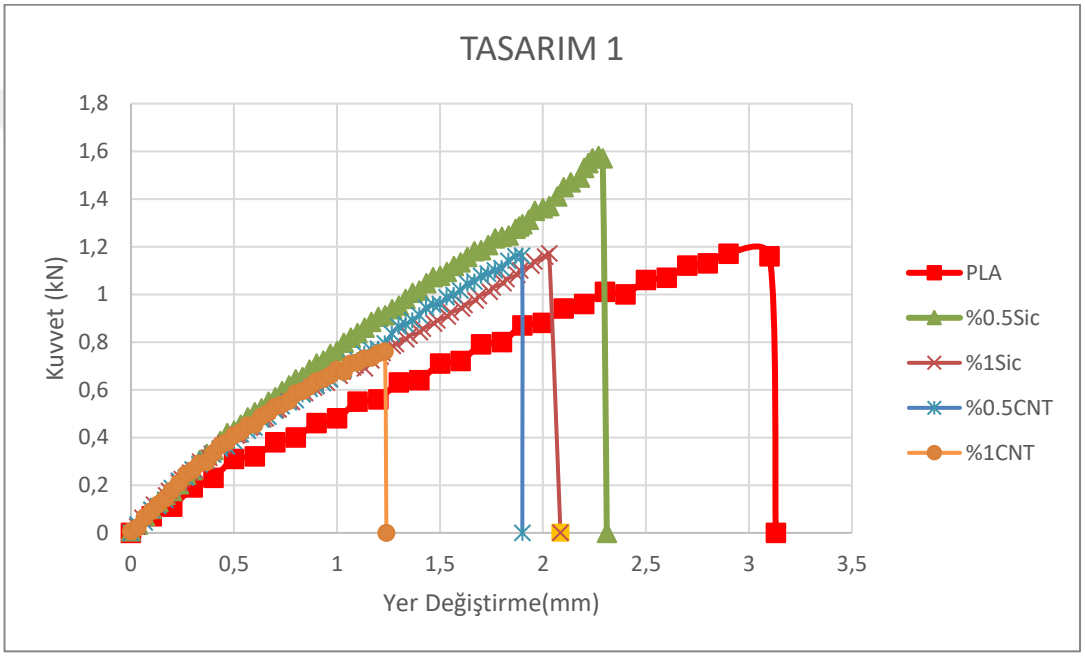
Şekil 4.25 Tasarım-2 %1 CNT PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü



Şekil 4.26 Tasarım-3 %1 CNT PLA için yük deplasman eğrisi ve hasar görüntüsü

4.4.1 Tasarım Temelinde Test Sonuçları

Tasarım 1'e ait kuvvet–yer değiştirme eğrileri şekil 4.27'de incelendiğinde, numuneler arasında hem maksimum yük taşıma kapasitesi hem de deformasyon davranışı açısından belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. Saf PLA numunesi, kademeli bir kuvvet artışı sergileyerek yaklaşık 1,2 kN maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve yaklaşık 3,1 mm yer değiştirme sonrasında ani kırılma göstermiştir. Bu durum, Tasarım 1 geometrisinin saf PLA için daha yüksek süneklik sağladığını göstermektedir.



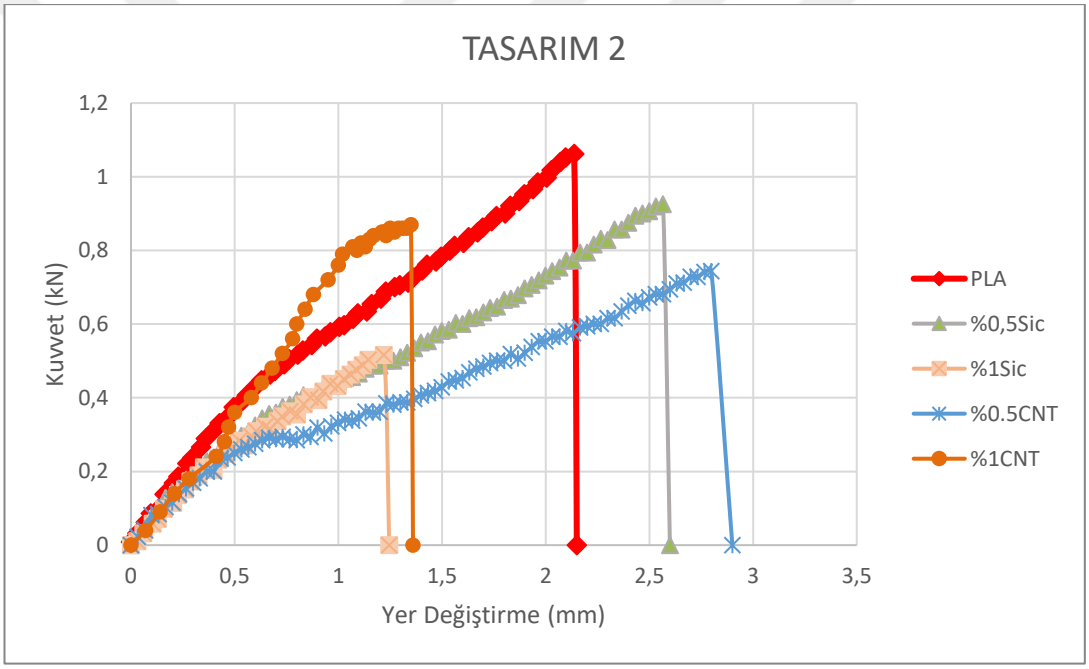
Şekil 4.27 Tasarım 1 için farklı malzemelerden yapılmış çekme testleri

%0,5 SiC katkılı numune, tüm numuneler arasında en yüksek yük taşıma kapasitesini sergileyerek yaklaşık 1,6 kN maksimum kuvvet değerine ulaşmıştır. Ancak bu numunede kırılma, yaklaşık 2,3 mm yer değiştirmede gerçekleşmiş olup, yüksek dayanım ile sınırlı deformasyon kapasitesinin birlikte ortaya çıktığı bir davranış gözlenmiştir. %1 SiC katkılı numunede ise maksimum kuvvet değeri yaklaşık 1,15 kN seviyesinde kalmış ve kırılma yaklaşık 2,0 mm yer değiştirmede meydana gelmiştir.

CNT katkılı numuneler değerlendirildiğinde, %0,5 CNT içeren numunenin kuvvet artış eğrisinin %1 SiC katkılı numuneye benzer şekilde ilerlediği ve yaklaşık

1,15 kN maksimum kuvvete ulaştığı görülmektedir. Bu numunede kırılma yaklaşık 1,9 mm yer değiştirmede gerçekleşmiştir. %1 CNT katkılı numune ise daha yüksek başlangıç rijitliği sergilemiş olmasına rağmen, kırılma yaklaşık 1,3 mm gibi daha düşük bir yer değiştirmede meydana gelmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Tasarım 1 geometrisi saf PLA için yüksek deformasyon kabiliyeti sağlarken, %0,5 SiC katkısı maksimum yük taşıma kapasitesini belirgin şekilde artırmıştır. Buna karşılık, yüksek oranlı CNT katkısı kırılmanın daha erken gerçekleşmesine ve daha kırılgan bir davranışa neden olmuştur. Bu sonuçlar, katkı türü ve oranının yanı sıra tasarım geometrisinin mekanik performans üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



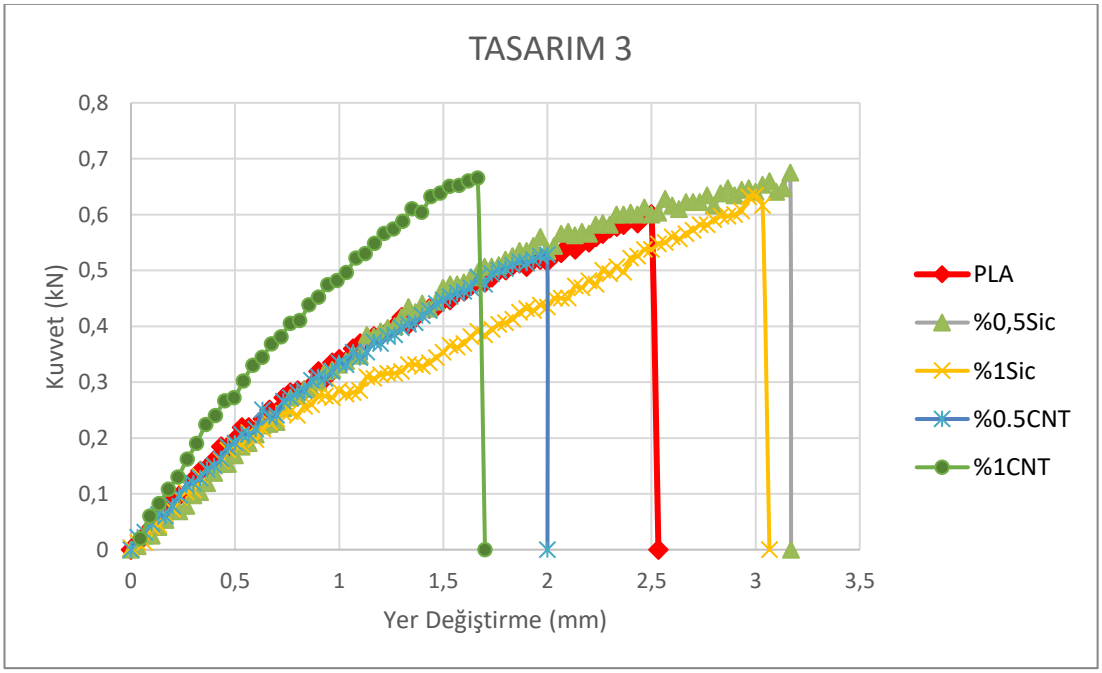
Şekil 4.28 Tasarım 2 için farklı malzemelerden yapılmış çekme testleri

Tasarım 2'ye ait kuvvet–yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, numuneler arasında hem maksimum taşıma kapasitesi hem de kırılma yer değiştirmesi açısından belirgin farklılıklar olduğu şekil 4.28 üzerinde görülmektedir. Saf PLA numunesi, yükle birlikte doğrusal sayılabilecek bir artış sergileyerek yaklaşık 1,05 kN maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve yaklaşık 2,2 mm yer değiştirme sonrasında ani kırılma göstermiştir.

%0,5 SiC katkılı numune, saf PLA'ya kıyasla daha düşük bir maksimum kuvvet seviyesine ulaşmasına rağmen (yaklaşık 0,9 kN), daha uzun bir deformasyon süreci sergileyerek yaklaşık 2,5 mm yer değiştirmeye kadar dayanım göstermiştir. %1 SiC katkılı numunede ise maksimum kuvvetin belirgin şekilde azaldığı (yaklaşık 0,5 kN) ve kırılmanın yaklaşık 1,2 mm gibi daha düşük bir yer değiştirmede gerçekleştiği gözlenmiştir.

CNT katkılı numuneler incelendiğinde, %1 CNT içeren numunenin başlangıç rijitliğinin belirgin şekilde arttığı ve kuvvetin hızlı bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Ancak bu numune, yaklaşık 1,4 mm yer değiştirmede ani kırılma göstermiştir. %0,5 CNT katkılı numune ise daha düşük eğimli bir kuvvet artışı sergilemiş, ancak deformasyon kabiliyeti artarak yaklaşık 2,9 mm yer değiştirmede kırılma gerçekleşmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Tasarım 2'de saf PLA en yüksek maksimum yük taşıma kapasitesini sergilerken, %0,5 SiC ve %0,5 CNT katkıları deformasyon kapasitesini artırmıştır. Buna karşılık, yüksek oranlı katkılar (%1 SiC ve %1 CNT) kırılmanın daha erken gerçekleşmesine ve daha kırılgan bir davranışa yol açmıştır. Bu sonuçlar, katkı türü ve oranının yanı sıra geometrik tasarımın da mekanik davranış üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.29 Tasarım 3 için farklı malzemelerden yapılmış çekme testleri

Tasarım 3'e ait kuvvet–yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, tüm numunelerde yük artışıyla birlikte yer değiştirme miktarının arttığı ve başlangıç bölgesinde benzer rijitlik eğilimleri sergilendiği şekil 4.29'da görülmektedir. Saf PLA numunesi yaklaşık 0,55 kN seviyesine kadar yük taşıyabilmiş ve yaklaşık 2,5 mm yer değiştirme sonunda ani kırılma ile yük taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

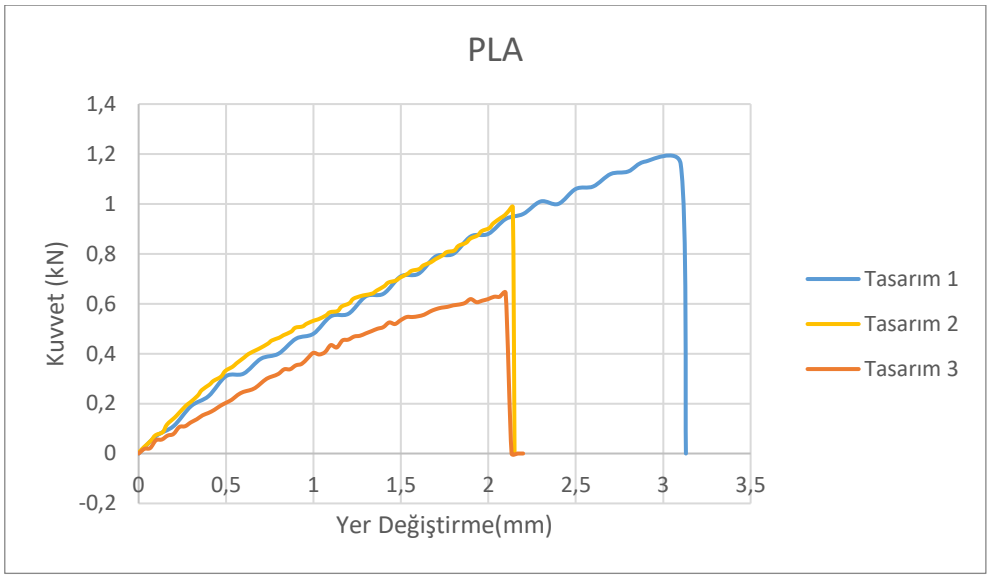
%0,5 SiC katkılı numune, saf PLA'ya kıyasla daha yüksek maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve yaklaşık 3,2 mm yer değiştirmeye kadar dayanım göstermiştir. Bu durum, düşük oranlı SiC katkısının hem taşıma kapasitesini hem de deformasyon kabiliyetini artırdığını göstermektedir. %1 SiC katkılı numunede ise maksimum kuvvet değeri benzer seviyelerde olmasına rağmen eğrinin daha kademeli ilerlediği ve yaklaşık 3,0 mm yer değiştirme sonrasında kırılma gerçekleştiği gözlenmiştir.

CNT katkılı numuneler incelendiğinde, %1 CNT içeren numunenin başlangıç rijitliğinin belirgin şekilde arttığı ve daha dik bir eğri sergilediği görülmektedir. Ancak bu numune, yaklaşık 1,6 mm gibi daha düşük bir yer değiştirme değerinde ani kırılma göstermiştir. %0,5 CNT katkılı numune ise saf PLA'ya benzer bir maksimum kuvvet seviyesine ulaşmış, ancak kırılma yaklaşık 2,0 mm yer değiştirmede gerçekleşmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, SiC katkısı sünek davranışı ve toplam deformasyon kapasitesini artırırken, CNT katkısı özellikle yüksek oranlarda rijitliği artırmakla birlikte kırılgan davranışı belirgin hâle getirmiştir. Bu durum, katkı türü ve oranının mekanik davranış üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

4.4.2 Malzeme Temelinde Test Sonuçları

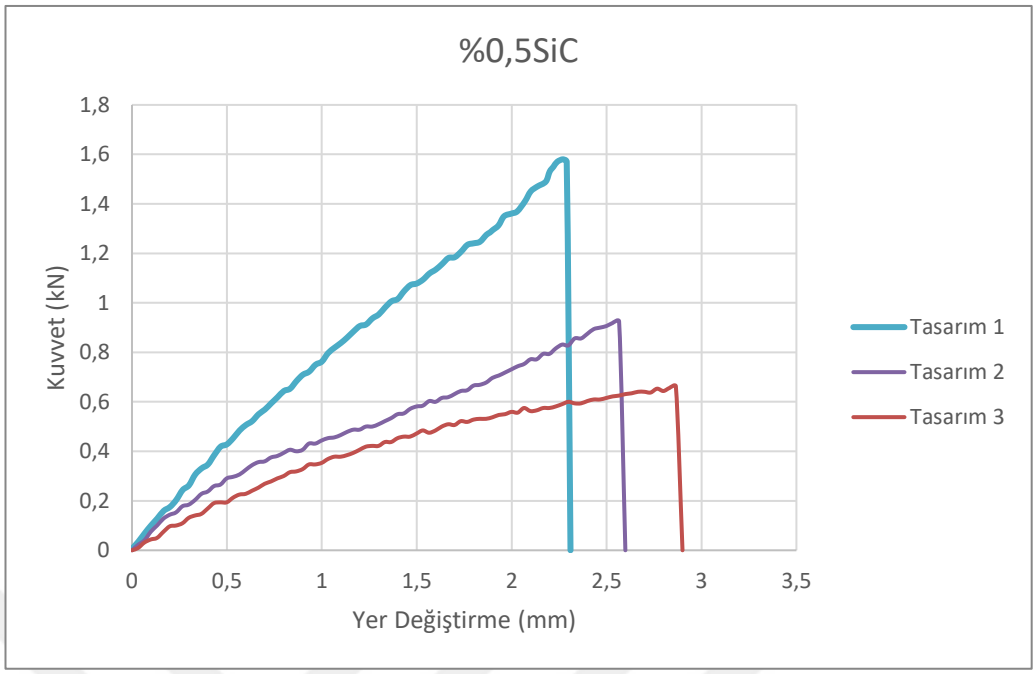
Malzeme bazında Tasarım 1, Tasarım 2 ve Tasarım 3'e ait kuvvet–yer değiştirme eğrileri birlikte değerlendirildiğinde, mekanik davranışın yalnızca tasarım geometrisiyle değil, aynı zamanda üç boyutlu yazdırma süreci ve nanopartikül katkılarının malzeme iç yapısında oluşturduğu değişkenliklerle birlikte şekillendiği görülmektedir. Aynı malzeme için farklı tasarımlar arasında gözlenen maksimum yük taşıma kapasitesi ve kırılma yer değiştirmesindeki farklılıklar, bu çoklu etkileşimin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.30 PLA ile üretilmiş tasarımların kıyaslanması

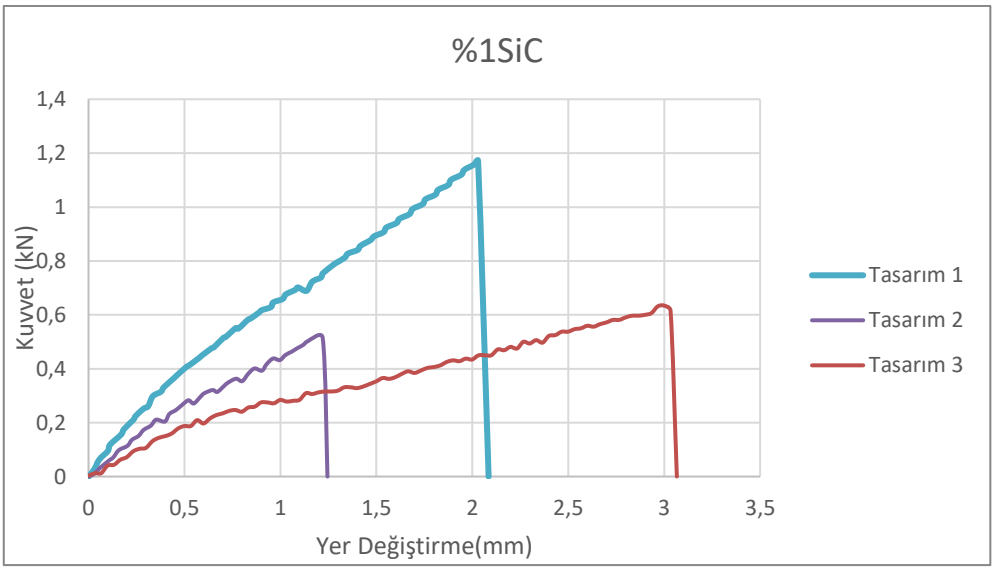
Saf PLA numunelerinde, Tasarım 1 en yüksek maksimum kuvvet (yaklaşık 1,2 kN) ve en yüksek deformasyon kapasitesini (yaklaşık 3,1 mm) sergilerken, Tasarım 2 ve Tasarım 3'te kırılma daha düşük yer değiştirmelerde gerçekleşmiştir. (Şekil 4.30) Bu durum, özellikle kesit daralmasının bulunduğu bölgelerde üç boyutlu yazdırma sırasında oluşan katman yönlenmesi ve bağlanma sürekliliğinin, maksimum gerilmenin oluştuğu düzlemde etkin taşıyıcı kesiti sınırlamasıyla ilişkilendirilmektedir.

Şekil 4.32'de %1 SiC katkılı numunelerde Tasarım 1 en yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşırken, Tasarım 2 ve Tasarım 3'te daha erken kırılma gözlenmiştir. SiC nanoparçacıklarının yüksek özkütleye sahip olması, filament içerisinde yerel yoğunluk farklılıklarına ve mikro boşluk oluşumuna yol açabilmekte; bu durum maksimum gerilme düzleminde etkin kesit alanının azalmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak nominal tasarım kesiti korunmasına rağmen, gerçek taşıyıcı alanın küçülmesiyle kırılma daha düşük yüklerde gerçekleşmiştir.



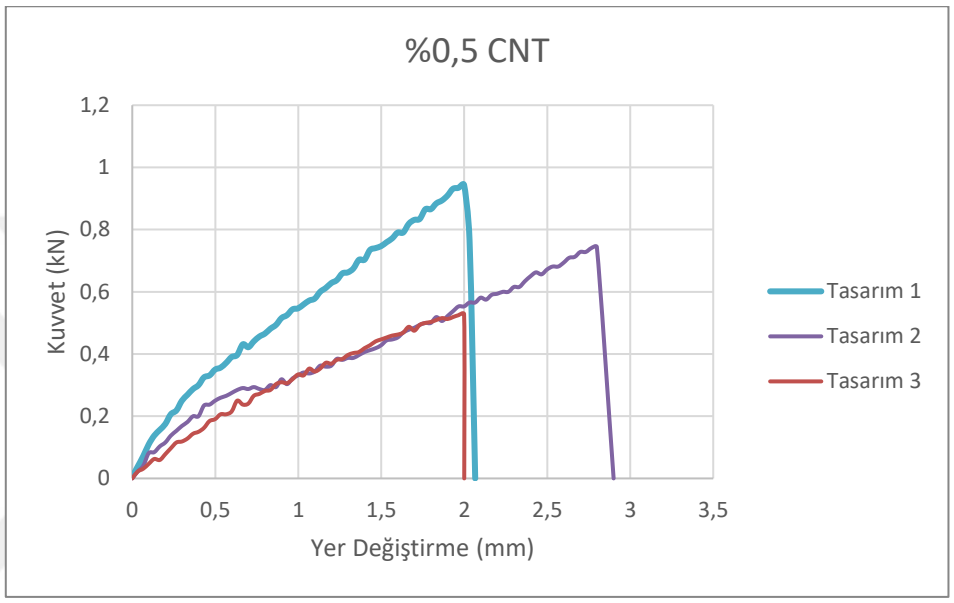
Şekil 4.31 %0,5Sic katkılı üretilmiş tasarımların kıyaslanması

%0,5 SiC katkılı numunelerde ise daha homojen bir iç yapı oluştuğu ve tasarım etkisinin daha belirgin hâle geldiği şekil 4.31'de görülmektedir. Bu koşullarda özellikle Tasarım 1, maksimum gerilme düzleminde daha kararlı bir kesit alanı sunmuş ve yaklaşık 1,6 kN ile tüm malzeme–tasarım kombinasyonları arasında en yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır.

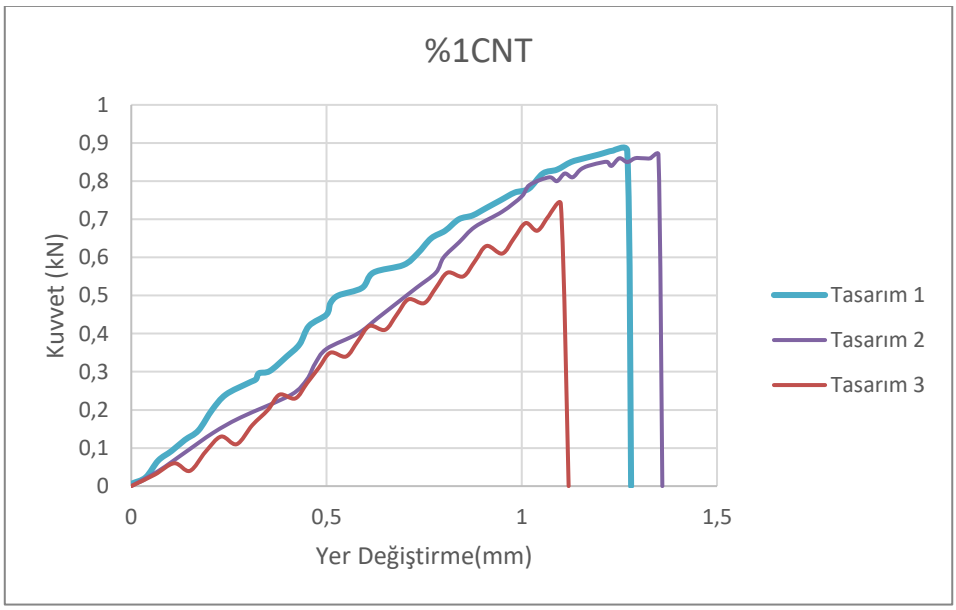


Şekil 4.32 %1Sic katkılı üretilmiş tasarımların kıyaslanması

CNT katkılı numunelerde, düşük özkütleye rağmen CNT'lerin aglomerasyona eğilimli yapısı, özellikle %1 CNT oranında tüm tasarımlarda daha erken kırılmaya yol açmıştır. (Şekil 4.34) Bu durum, maksimum gerilmenin oluştuğu bölgelerde yerel rijitlik artışları ve gerilme yığılmalarının oluşmasıyla ilişkilendirilmektedir. %0,5 CNT katkılı numunelerde ise tasarım geometrisinin etkisi kısmen korunmuş, ancak Tasarım 3'te kırılma yine şekil 4.33'ten anlaşılacağı üzere erken gerçekleşmiştir.



Şekil 4.33 %0,5CNT katkılı üretilmiş tasarımların kıyaslanması

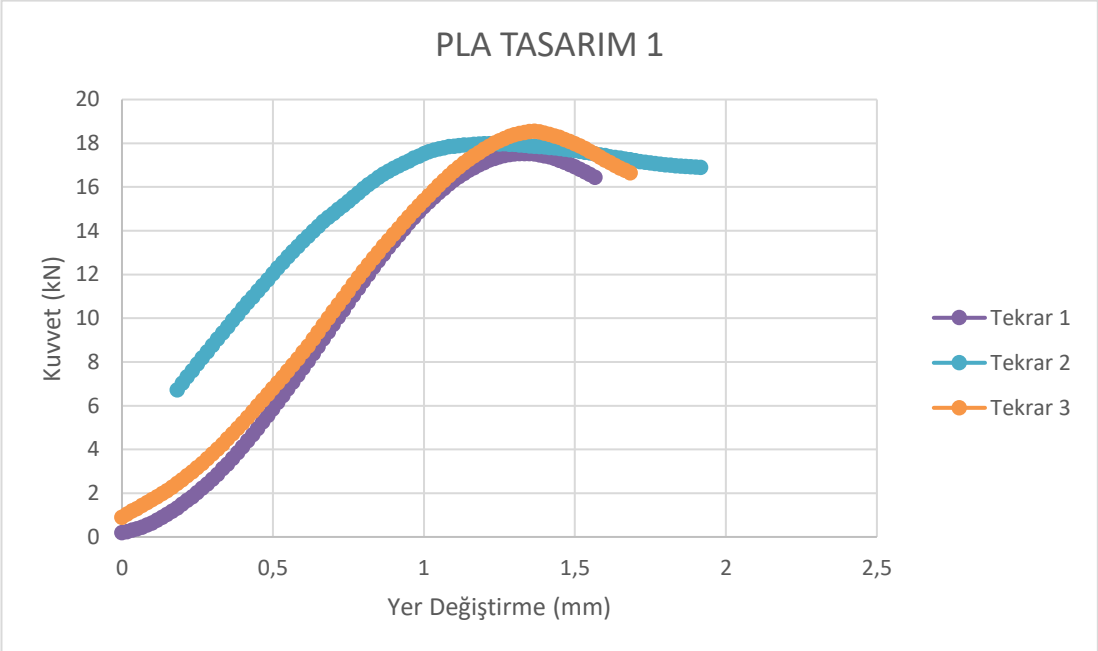


Şekil 4.34 %1 CNT katkılı üretilmiş tasarımların kıyaslanması

Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük ve orta katkı oranlarında tasarım geometrisinin mekanik davranış üzerindeki etkisi belirginliğini korurken, yüksek nanopartikül katkı oranlarında üç boyutlu yazdırma parametreleri ve özkütle kaynaklı iç yapı değişkenlikleri baskın hâle gelmektedir. Bu sonuçlar, mekanik performansın yalnızca nominal tasarım kesitine değil, maksimum gerilme düzleminde oluşan gerçek ve etkin taşıyıcı kesite bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

4.5. Auxetic Geometrilerin Basma Testleri

PLA malzemesi kullanılarak üretilen auxetic geometrilere ait basma testi sonuçları incelendiğinde, Tasarım 1, Tasarım 2 ve Tasarım 3 arasında belirgin mekanik davranış farklılıkları olduğu görülmektedir. Her bir tasarım için gerçekleştirilen üç tekrar, genel eğilim açısından tutarlı bir kuvvet–yer değiştirme davranışı sergilemiş, ancak maksimum kuvvet ve tepe noktası sonrası davranışta sınırlı farklılıklar gözlenmiştir.

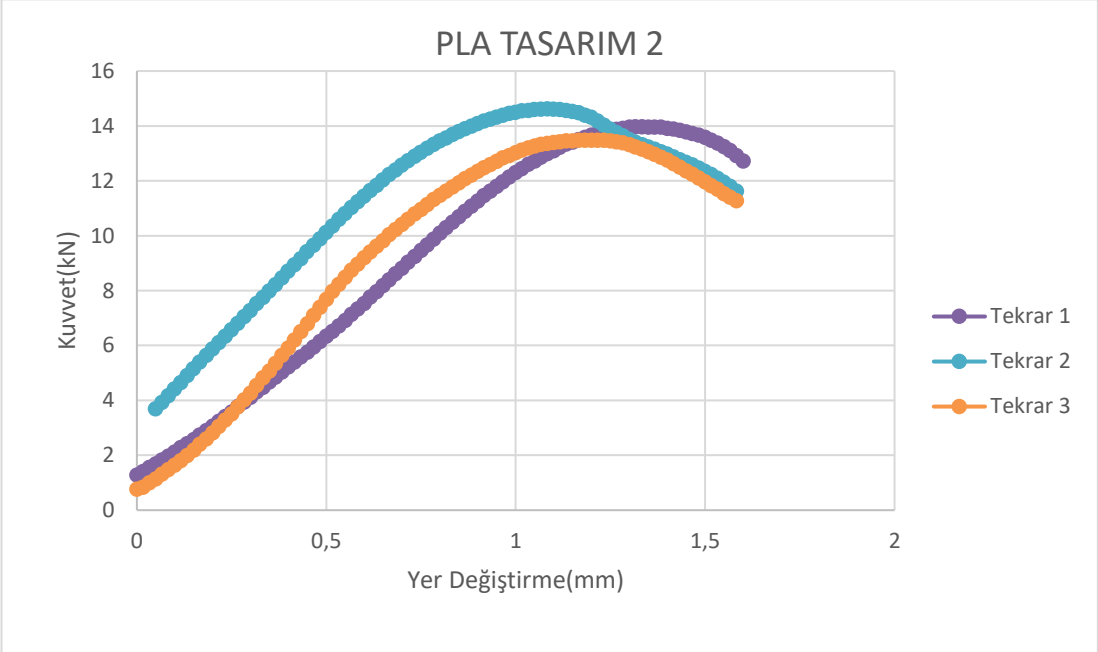


Şekil 4.35 PLA tasarım 1 basınç testi grafiği

PLA Tasarım 1 için elde edilen şekil 4.35'teki kuvvet–yer değiştirme eğrileri, yükle birlikte kuvvetin hızlı bir şekilde arttığını ve yaklaşık 17–19 kN aralığında maksimum kuvvet değerine ulaşıldığını göstermektedir. Maksimum kuvvet sonrası

bölgede, eğrilerde belirgin bir plato ve sınırlı bir yük düşüşü gözlenmiş olup, bu durum tasarımın basma yükü altında görece kararlı bir deformasyon davranışı sergilediğine işaret etmektedir. Tekrarlar arasındaki küçük sapmalar, yazdırma sürecine bağlı lokal farklılıklar dışında genel davranışı değiştirmemiştir.

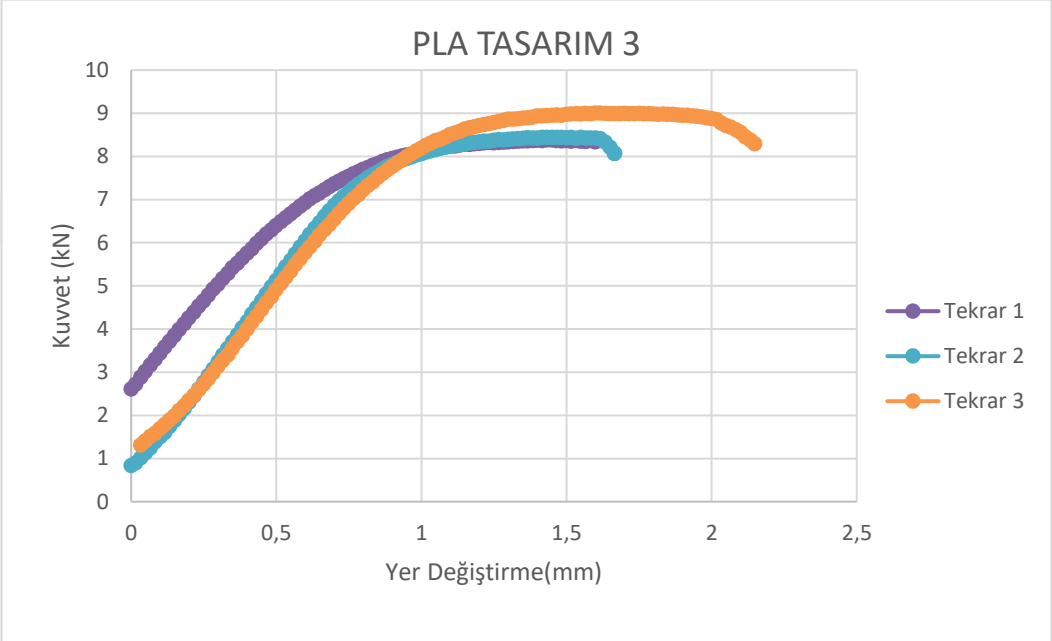
PLA Tasarım 2'de maksimum kuvvet şekil 4.36'a göre değerleri yaklaşık 13–15 kN olarak gerçekleşmiştir. Kuvvet artışı Tasarım 1'e kıyasla daha kademeli olup, maksimum kuvvet sonrası bölgede daha belirgin bir yumuşama davranışı gözlenmiştir. Bu durum, Tasarım 2 geometrisinde basma yükü altında hücre yapılarının daha erken stabilite kaybına uğradığını göstermektedir. Tekrarlar arasında maksimum kuvvet ve kırılma sonrası davranış açısından sınırlı farklar bulunmakla birlikte, genel eğilim korunmuştur.



Şekil 4.36 PLA tasarım 2 basınç testi grafiği

PLA Tasarım 3'e ait basma testi sonuçlarında ise şekil 4.37'e göre maksimum kuvvet değerlerinin yaklaşık 8–9 kN seviyelerinde kaldığı görülmektedir. Kuvvet artışı başlangıçta hızlı olmakla birlikte, maksimum kuvvet değerine daha düşük yer değiştirme seviyelerinde ulaşılmış ve ardından belirgin bir yük düşüşü meydana gelmiştir. Bu durum, Tasarım 3'ün basma yükleri altında daha düşük taşıma kapasitesine ve daha sınırlı bir deformasyon aralığına sahip olduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, basma yükü altında en yüksek taşıma kapasitesini PLA Tasarım 1 sergilerken, bunu sırasıyla Tasarım 2 ve Tasarım 3 izlemiştir. Tasarım geometrisinin auxetic davranış üzerindeki etkisi, özellikle maksimum kuvvet seviyeleri ve tepe noktası sonrası davranışta belirgin hâle gelmiştir. Tekrarlar arasında gözlenen farkların sınırlı olması, deneylerin tekrarlanabilirliğinin yüksek olduğunu ve elde edilen sonuçların güvenilirliğini desteklemektedir



Şekil 4.37 PLA tasarım 3 basınç testi grafiği

4.5.1 Tasarım Temelinde Basma Testleri

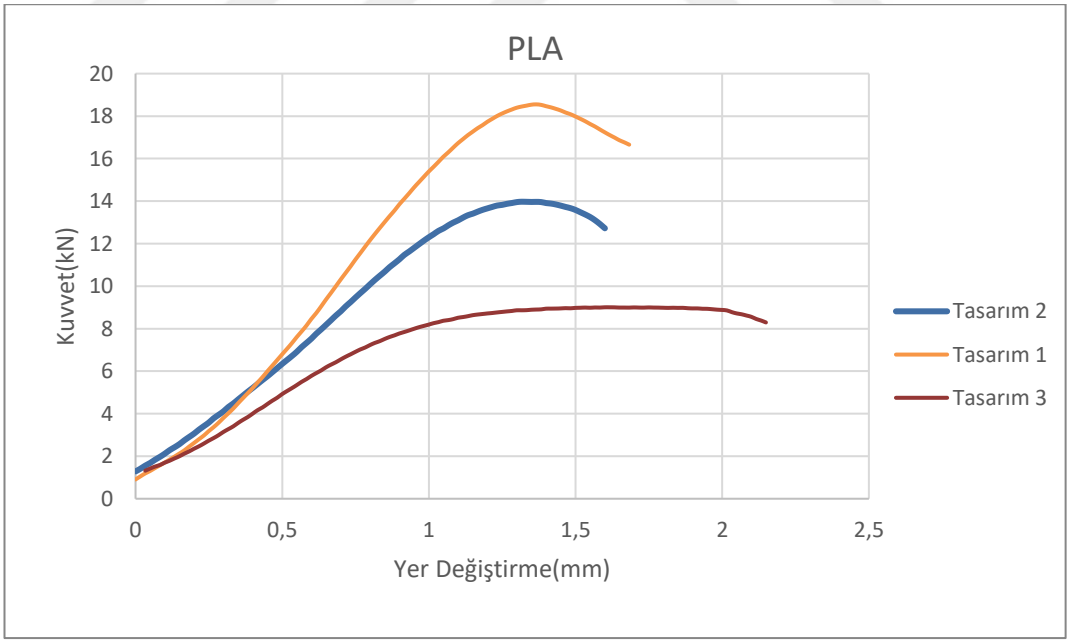
Şekil 4.38'de Tasarım 1, Tasarım 2 ve Tasarım 3'e ait kuvvet–yer değiştirme (Force–Displacement) eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde, tüm tasarımlar için yer değiştirme arttıkça kuvvetin başlangıçta artış gösterdiği görülmektedir.

Tasarım 1, yaklaşık 1,3–1,4 mm yer değiştirme seviyesinde yaklaşık 18–19 kN ile en yüksek maksimum kuvvet değerine ulaşmıştır. Bu noktadan sonra kuvvette bir miktar düşüş gözlenmiş olup, bu durum yapının plastik deformasyona veya hasar başlangıcına geçtiğini göstermektedir. Tasarım 1'in diğer tasarımlara kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğu söylenebilir.

Tasarım 2, kuvvet artışını yaklaşık 1,4 mm yer değiştirmeye kadar sürdürmüş ve yaklaşık 14 kN maksimum kuvvet değerine ulaşmıştır. Maksimum noktadan sonra kuvvette düşüş meydana gelmiştir. Bu sonuç, Tasarım 2'nin taşıma kapasitesinin Tasarım 1'e göre daha düşük, ancak Tasarım 3'e göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Tasarım 3 ise daha uzun bir yer değiştirme aralığında davranış sergilemiş, yaklaşık 2,0 mm civarına kadar kuvvet artışı devam etmiştir. Maksimum kuvvet değeri yaklaşık 9 kN olup diğer tasarımlara göre daha düşük seviyededir. Ancak daha düşük rijitlik ve daha yüksek yer değiştirme kapasitesi sayesinde Tasarım 3'ün daha sünek bir davranış gösterdiği söylenebilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Tasarım 1 yüksek taşıma kapasitesi, Tasarım 2 orta seviyede taşıma kapasitesi, Tasarım 3 ise daha düşük taşıma kapasitesine karşılık daha yüksek deformasyon kabiliyeti sunmaktadır. Bu sonuçlar, tasarım seçiminde taşıma kapasitesi ve süneklik gereksinimlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.38 Basma testine göre tasarımların kıyaslanması

5- SONUÇ

Bu tez çalışmasında, CNT, SiC ve TiO_2 nanoparçacıkları ile takviye edilmiş PLA esaslı kompozit filamentlerin mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiş ve nanoparçacık türü ile katkı oranının çekme performansı üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Saf PLA numuneleri referans alınarak yapılan karşılaştırmalar, nanoparçacık takviyesinin uygun seviyelerde mekanik performansı iyileştirebildiğini; ancak katkı oranının belirli bir sınırın üzerine çıkması durumunda aglomerasyon, ara yüzey ayrılması ve mikro çatlak oluşumu gibi mekanizmalar nedeniyle mekanik özelliklerde kayıplar meydana geldiğini göstermiştir.

CNT takviyeli PLA numunelerinde en dengeli ve en yüksek performans %1 CNT oranında elde edilmiştir. Bu seviyede maksimum gerilme 52,71 MPa'a yükselerek CNT grupları içerisinde en yüksek dayanımı sağlamış, elastisite modülü ise 1044,98 MPa ile saf PLA seviyesine oldukça yakın bir değer göstermiştir. Bu davranış, CNT'lerin bu oranda matris içinde etkin bir perkolasyon ağı oluşturarak yük transferini iyileştirdiğini göstermektedir. SEM görüntüleri, CNT'lerin çatlak ilerlemesini saptırdığı, mikroboşluk ve çekilme izleri (pull-out) üzerinden enerji sönümleme kapasitesini artırdığını doğrulamaktadır. Ancak CNT oranı %1.5'e çıkarıldığında elastisite modülünde düşüş (926.01 MPa) ve dayanımda sınırlı bir gerileme gözlenmiş; bu sonuç yüksek CNT oranında görülen aglomerasyon ve ara yüzey zayıflıklarıyla uyumlu bulunmuştur.

SiC takviyeli PLA numunelerinde ise mekanik özelliklerde iki farklı optimum nokta dikkat çekmektedir. %0,5 SiC oranında elastisite modülü 1285,10 MPa ile tüm numuneler arasında en yüksek değere ulaşmış, bu da SiC'nin yüksek rijitlik kazandıran seramik karakteri ile uyumlu bir sonuçtur. Buna karşın maksimum gerilme açısından en yüksek değer %1 SiC numunesinde ölçülmüş (55,76 MPa) ve bu sonuç, çalışmadaki tüm malzemeler içerisinde elde edilen en yüksek dayanım değeri olmuştur. SEM analizleri, SiC parçacıklarının çatlak sapmasına neden olarak dayanımı artırdığını; ancak %1,5 seviyesinde parçacık kümelenmesinin belirginleşmesiyle ara yüzey ayrılması ve gevrek kırılma bölgelerinin oluştuğunu göstermiştir. Bu nedenle SiC takviyesi için elastisite modülü açısından optimum katkı %0.5, çekme dayanımı açısından ise optimum %1 olarak değerlendirilebilir.

TiO_2 takviyeli numunelerde mekanik iyileşme daha sınırlı olmakla birlikte belirgin eğilimler gözlenmiştir. %0,5 TiO_2 oranında elastisite modülü 1082,34 MPa ile saf PLA'ya göre hafif bir artış göstermiş, maksimum gerilme 44,28 MPa ile saf PLA seviyesine yakın bir değer elde edilmiştir. %1 TiO_2'de dayanım orta seviyede korunmuş ancak belirgin bir üstünlük sağlanamamıştır. %1,5 TiO_2'de ise elastisite modülü (841,11 MPa) ve maksimum gerilme (42,75 MPa) her iki açıdan da düşerek saf PLA'nın dahi altına inmiş; bu durum, yüksek TiO_2 oranında gözlenen tabakalar arası ayrılma, mikro boşluk oluşumu ve heterojen iç yapı ile açıklanabilir. Dolayısıyla TiO_2 için optimum katkı seviyesi %0,5–1 aralığı olup, %1,5 katkı mekanik performansı olumsuz etkilemektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, nanoparçacık türü ve katkı oranının PLA'nın çekme performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı; aşırı nanoparçacık oranlarının tüm gruplarda aglomerasyon ve ara yüzey uyumsuzluğu nedeniyle performans kaybına yol açtığı görülmektedir. CNT takviyesi süneklik ve dayanım açısından en dengeli gelişimi %1 oranında sağlamış; SiC takviyesi rijitlik ve dayanım artışı açısından en etkili katkıyı vermiş; TiO_2 ise daha sınırlı ancak düşük oranlarda istikrarlı bir modül–dayanım dengesi oluşturmuştur. SEM analizleri ile mekanik test sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi, her üç nanoparçacık türü için de optimum katkı seviyesinin aşılmaması gerektiğini açıkça ortaya koymakta; çalışma, PLA tabanlı kompozitlerin mekanik yönden iyileştirilmesi için pratik tasarım kriterleri sunarak katkılı üretim uygulamalarında önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.

KAYNAKÇA

Asgari, M., et al. (2017). **Mechanical enhancement of PLA by silica nanoparticles.** *Materials Research Express, 4*(3), 035301.

Cavenagh, R., Hazell, P. J., Weerasinghe, D., Wang, H., Wang, J., Mohotti, D., ... & Escobedo, J. P. (2024). **Influence of the cover plate thickness on the ballistic penetration of re-entrant auxetic structures.** *International Journal of Impact Engineering, 186*, 104890.

Chen, H., et al. (2015). **UV resistance of PLA-TiO_2 nanocomposites.** *Journal of Applied Polymer Science, 132*(15).

Cui, W., et al. (2018). **Silica nanoparticle reinforced PLA for FDM printing.** *Materials Today: Proceedings, 5*(13), 27527–27532.

Ercan, N. (2019). **3B eklemeli üretim yöntemiyle üretilmiş hücresel kafes yapılı sandviç panellerin mekanik davranışlarının incelenmesi** *(Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü)*.

Evans, K. E. (1991). **Auxetic polymers: a new range of materials.** *Endeavour, 15*(4), 170–174.

Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). **Physical and mechanical properties of PLA.** *Advanced Drug Delivery Reviews, 107*, 367–392.

Grima, J. N., & Evans, K. E. (2000). **Auxetic behavior from rotating squares.** *Journal of Materials Science Letters, 19*, 1563–1565.

Hanifpour, M., Petersen, C., Alava, M., & Zapperi, S. (2017, January). **Experimental investigation of fracture resistance of auxetic structures.** In *International Conference on Fracture*.

Joseph, A., Mahesh, V., & Harursampath, D. (2021). **On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review.** *Advances in Manufacturing, 9*(3), 342–368.

Kushwaha, Y. S., Hemanth, N. S., Badgayan, N. D., & Sahu, S. K. (2022). **Free vibration analysis of PLA based auxetic metamaterial structural composite using finite element analysis.** *Materials Today: Proceedings, 56*, 1063–1067.

Liu, Q. (2006). **Literature review: materials with negative Poisson's ratios and potential applications to aerospace and defence (p. 47).** *Victoria, Australia: DSTO*.

Luo, C., Han, C. Z., Zhang, X. Y., Zhang, X. G., Ren, X., & Xie, Y. M. (2021). **Design, manufacturing and applications of auxetic tubular structures: A review.** *Thin-Walled Structures, 163*, 107682.

Lvov, V. A., Senatov, F. S., Korsunsky, A. M., & Salimon, A. I. (2020). **Design and mechanical properties of 3D-printed auxetic honeycomb structure.** *Materials Today Communications, 24*, 101173.

Masters, I. G., & Evans, K. E. (1996). **Models for the elastic deformation of honeycombs.** *Composite Structures, 35*(4), 403–422.

Ngo, T. D., et al. (2018). **Additive manufacturing (3D printing): A review.** *Composites Part B, 143*, 172–196.

Novak, N., Starčevič, L., Vesenjak, M., & Ren, Z. (2019). **Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core.** *Composite Structures, 210*, 167–178.

Prall, D., & Lakes, R. S. (1997). **Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of—1.** *International Journal of Mechanical Sciences, 39*(3), 305–314.

Rafiee, M. A., et al. (2009). **Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low CNT loading.** *ACS Nano, 3*(12), 3884–3890.

Shruti, M., Hemanth, N. S., Badgayan, N. D., & Sahu, S. K. (2021). **Compressive behavior of auxetic structural metamaterial for lightweight construction using ANSYS static structural analysis.** *Materials Today: Proceedings, 38*, 12–17.

Strong, A. B. (2006). **Plastics: Materials and Processing.** *Prentice Hall.*

Sun, G., Chen, D., Wang, H., Hazell, P. J., & Li, Q. (2018). **High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations.** *International Journal of Impact Engineering, 122*, 119–136.

Sürmen, H. K. (2019). *Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar*. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2). https://doi.org/10.17482/uumfd.519147

Türkoğlu, İ. K. (2020). **3 Boyutlu Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Termoplastik Esaslı Ökzetik Çekirdek Geometrili Sandviç Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Davranışının Incelenmesi** *(Doctoral dissertation, Bursa Uludag University, Turkey).*

Wang, J., Luo, X., Wang, K., Yao, S., & Peng, Y. (2022). **On impact behaviors of 3D concave structures with negative Poisson's ratio.** *Composite Structures, 298*, 115999.

Wang, S., et al. (2014). **Effects of TiO_2 nanoparticles on the mechanical properties of PLA nanocomposites.** *Polymer Testing, 36*, 132–138.

Zhai, X., Gao, J., Liao, H., Kirk, C. D., Balogun, Y. A., & Chen, W. W. (2019). **Mechanical behaviors of auxetic polyurethane foam at quasi-static, intermediate and high strain rates.** *International Journal of Impact Engineering, 129*, 112–118**.**