



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



NANO KATKILI ARAMİD KOMPOZİT
PLAKA YAPININ MEKANİK
KARAKTERİZASYONU

Ahmet KARAVELİOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO KATKILI ARAMİD KOMPOZİT PLAKA YAPININ MEKANİK KARAKTERİZASYONU

Ahmet KARAVELİOĞLU

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2022, 114 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ

Üretimde yer almasının yeni yaygınlaştığını varsayarsak; kompozit malzemelerin özelliklerine her geçen gün yeni bir literatür çalışması eklenmektedir. Yeni malzemelerle farklı deneyler yapılarak mekanik/termal/elektriksel özelliklerinin daha idealize edilmesi ve maliyetin düşürülmesi temel amaçtır. Denenmemiş birçok malzeme kombinasyonu ve üretim parametreleri, kompozit malzemelerin konu içeriğini zenginleştirir ve malzemelerin en az ikili ilişkilerini daha iyi anlamada rol oynar. Bu sebeple, yeni akademik çalışmalara yer hazırlar. Bu hedeften yola çıkılarak 'Nano Katkılı Aramid Kompozit Plaka Yapının Mekanik Karakterizasyonu' adlı tez çalışması oluşturulmuştur.

Literatür araştırmaların sonucunda, zirkonya ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüp nano katkılarının polives 701 polimer reçine matrise ilave edilmesi öngörülüp, aramid takviyesi ile kompozit oluşturulmuştur. Nano katkı oranlarına göre darbe testi cihazından çıkan veri ve mikroskobik muayenelere göre, mekanik özelliklerinin kıyaslandığı bir çalışma içeriği oluşturulmuştur.

Bir yanıt yüzey metodu olan merkezi kompozit tasarım metodolojisi kullanılarak zirkonya ve nano katkılarının ayrı ayrı ve beraber kombinasyonları oranları üzerine yoğunlaşan çalışma, yedi ayrı katkı parametresi oluşturularak yapılmış ve bu parametrelerde tabakalı aramid kompozit yapıya sadece KNT, sadece Zirkonya ve KNT ve zirkonyanın çeşitli oranlarda karışım parametreleri uygulanarak malzemenin darbe kuvvetleri altında vereceği cevaplar irdelenmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak, sadece KNT katkısının darbe dayanımı artışı oluşturduğu sadece zirkonya katkısının malzemenin darbe enerjisi emilimini arttırdığı ve diğer kombinasyon katkı oranlarında malzemenin kısmen sünek, mekanik dayanımı kısmen düşmüştür ancak %0.5 KNT %0.5 Zirkonya nano kombinasyon parametresinde malzemenin diğer nano kombinasyonlarına göre daha kararlı mukavemeti yüksek hasar bölgesi alanı daha küçük olan bir sonuç elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aramid, Çok duvarlı karbon nanotüp, Kevlar 29, ÇDKNT, Merkezi kompozit tasarımı, Vinilester reçine, Nano zirkonya

ABSTRACT

MS THESIS

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF NANO REINFORCED ARAMID COMPOSITE PLATE STRUCTURE

Ahmet KARAVELİOĞLU

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2022, 114 Pages

Jury

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Asst. Prof. Dr. Mehmet KAYRICI

Asst. Prof. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

Assuming that its involvement in production has just become widespread; A new literature study is added to the properties of composite materials every day. The main objective is to optimize the mechanical/thermal/electrical properties and reduce the cost by conducting different experiments with new materials. Many untested material combinations and production parameters enrich the subject content of composite materials and play a role in better understanding bilateral relations of materials. For this reason, it prepares a place for new academic studies. Based on this goal, the thesis study named ' Characterizing The Low Speed Impact Behavior Of Hybrid Nano-Doupted Aramid Composite Plates' was created.

As a result of the literature research, it was predicted that zirconia and Multi-Walled Carbon Nanotube nano additives would be added to the polyves 701 polymer resin matrix, and a composite was formed with aramid reinforcement. A study content was created in which the mechanical properties were compared according to the data obtained from the impact test device according to the nano additive ratios and microscopic examinations.

The study, which focuses on the ratios of zirconia and nano additives individually and collectively, using the central composite design methodology, which is a response surface method, was carried out by creating seven different additive parameters and in these parameters, seperate CNT and zirconia also CNT and zirconia mixture parameters in various ratios were applied to the layered aramid composite structure. It has been tried to examine the responses of the material under impact forces.

As a result, only CNT additive increased the impact strength, only zirconia additive increased the impact energy absorption of the material, and in other combination additive ratios, the material was partially ductile and the mechanical strength was partially decreased. however, in 0.5% CNT 0.5% Zirconia nano combination parameter, a result with a more stable strength and a smaller damage area area was obtained compared to other nano combinations of the material.

Keywords: Aramid, Multi walled carbon nanotube, Kevlar 29, MWCNT, Central composite design, Vinylester resin, Nano zirconia

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca katkılarını esirgemeyen danışman hocam, Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN'a teşekkürlerimi iletirim. Tez dönemim boyunca; üretim ve tezin ilerleyişi hakkında desteğini her zaman sunan Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI'ya ve üretim aşamasında desteğini esirgemeyen meslektaşım Ahmet Faruk DOĞAN'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımnda bana maddi, manevi her türlü desteği sunan, meslektaşım babam; İbrahim KARAVELİOĞLU, annem; Dilek KARAVELİOĞLU ve ablam; Zeynep KARAVELİOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi iletirim.

Ahmet KARAVELİOĞLU
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	11
3.1. Matrislerine Göre Kompozitler.....	12
3.1.1. Polimer matrisli kompozitler	12
3.1.2. Metal matrisli kompozitler.....	21
3.1.3. Seramik matrisli kompozitler.....	22
3.2. Takviye Elemanlarına Göre Kompozitler	23
3.2.1. Kimyasal yapısına göre.....	23
3.2.2. Geometrik yapısına göre	25
3.3. Elyaf Takviyeli Kompozitler	26
3.3.1. Nano katkıları.....	26
3.3.2. Hibrit Nano Kompozitler	28
3.3.3. Hibrit Kompozitler.....	28
3.4. Kompozitlerin Kullanım Alanları	29
3.5. Tabakalı Kompozitlerde Üretim Metodolojileri	30
3.5.1. Yanıt yüzey metodolojisi	30
3.5.2. Genetik algoritma	35
3.5.3. Taguchi tekniği	35
4. MATERYAL VE METOT.....	36
4.1 Materyal	36
4.2. Üretim Metodu.....	39
4.3. Düşük Hızlı Darbe Testi	45
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	47

5.1. Düşük Hızlı Darbe Sonuçları	48
5.1.1 Kuvvet – zaman grafikleri	48
5.1.2. Kuvvet – deplasman grafikleri.....	58
5.1.3. Enerji – zaman grafikleri	70
5.1.4. Kuvvet-hız diyagramları	79
5.2. Dijital Mikroskop Görüntüleri	87
6. SONUÇLAR.....	97
7. KAYNAKLAR	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

β_0 : Regresyon sabiti

x_1, x_2, \dots, x_i : Merkezi kompozit tasarımındaki i sayıda değişken

\hat{y} : Merkezi kompozit tasarımı yanıt parametresi

Kısaltmalar

KNT: Karbon Nanotüp

RoHM: Hibrit Karışımların Lineer Kuralı

ÇDKNT: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp

TDKNT: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

TEM: Geçirimli Elektron Mikroskobu

XRD: X -Işını Kırınım Yöntemi

EDS: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

VARTM: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama

RTM: Reçine Transfer Kalıplama

RIM: Reaksiyonlu Enjeksiyon Kalıplama

PIM: Plastik Enjeksiyonlu Kalıplama

ASTM: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu

PAN: fPoliakrilonitril

PP: Polipropilen

PE: Polietilen

PVC: Polivinil Klorür

CFRP: Karbon Fiber Takviyeli Polimer

GFRP: Cam Elyaf Takviyeli Polimer

SMC: Hazır Kalıplama Bileşenli Levha

BMC: Toplu Kalıplama Bileşimi

RSM: Yanıt Yüzey Metodu

CCD: Merkezi Kompozit Tasarımı

CCC: Sınırlı Merkezi Kompozit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kompozitlerin sınıflandırılması (KALEMTAŞ, y.y.)(Metal Matrix Composites: Properties, Production, and Applications, y.y.)(Jacky, y.y.)(Green, y.y.).....	11
Şekil 2. Örnekteki sıcaklık ve konsantrasyonun kodlanmış halleri ile verilen iki boyutlu gösterimi	33
Şekil 3. El yatırma işleminin uygulanması.....	40
Şekil 4. Numunenin vakum torbalanması.....	41
Şekil 5. Nano oranlarına göre 10 J darbe altındaki kontur grafiği	42
Şekil 6. Nano oranlarına göre 10 J darbe altında absorbe enerji yüzey grafiği.....	42
Şekil 7. Nano oranlarına göre 15 J darbe altındaki kontur grafiği	43
Şekil 8. Nano oranlarına göre 15 J darbe altında absorbe enerji yüzey grafiği.....	44
Şekil 9. Bilgisayar kullanılarak signal express yazılımının darbe testi cihazının darbe testi çıktısı.....	45
Şekil 10. a) Konum sensörü b) Sinyal şartlandırıcı ve veri toplayıcı	46
Şekil 11. Numunelerin darbe testi cihazı üzerindeki konumları	47
Şekil 12. Numunelerin hasar bölgesini boylam ekseninde su jeti ile kesimi	47
Şekil 13. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0 KNT %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	48
Şekil 14. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0 KNT %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	49
Şekil 15. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	50
Şekil 16. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	51
Şekil 17. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	52
Şekil 18. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	52
Şekil 19. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	53
Şekil 20. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	54
Şekil 21. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	55
Şekil 22. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	55
Şekil 23. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	56
Şekil 24. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	57

Şekil 25. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	58
Şekil 26. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	59
Şekil 27. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	60
Şekil 28. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	61
Şekil 29. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	62
Şekil 30. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	63
Şekil 31. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	64
Şekil 32. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	65
Şekil 33. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	66
Şekil 34. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	67
Şekil 35. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	68
Şekil 36. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	69
Şekil 37. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	70
Şekil 38. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	71
Şekil 39. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	72
Şekil 40. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	72
Şekil 41. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	73
Şekil 42. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	74
Şekil 43. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	75
Şekil 44. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	75
Şekil 45. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	76
Şekil 46. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	77

Şekil 47. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	78
Şekil 48. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	78
Şekil 49. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	79
Şekil 50. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	80
Şekil 51. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	81
Şekil 52. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	81
Şekil 53. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	82
Şekil 54. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	82
Şekil 55. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	83
Şekil 56. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması	84
Şekil 57. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması	85
Şekil 58. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (15J) karşılaştırması	85
Şekil 59. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (10J) karşılaştırması	86
Şekil 60. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (15J) karşılaştırması	86
Şekil 61. %0 KNT ve %0 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları	87
Şekil 62. %0 KNT ve %0 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları	87
Şekil 63. %0.5 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları.....	88
Şekil 64. %0.5 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları.....	89
Şekil 65. %1.75 KNT ve %0 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları	89
Şekil 66. %1.75 KNT ve %0 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları	90
Şekil 67. %1.75 KNT ve %1.75 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları.....	91
Şekil 68. %1.75 KNT ve %1.75 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları.....	91
Şekil 69. %1.75 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları.....	92

Şekil 70. %1.75 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları.....	93
Şekil 71. %0.5 KNT ve %0 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları	93
Şekil 72. %0.5 KNT ve %0 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları	94
Şekil 73. %0 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları	95
Şekil 74. %0 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 1. Polimer malzemelerin karşılaştırılması (Töre, 2010)	13
Tablo 2. İki yöntemin birbirleriyle karşılaştırılması (INJECTION MOLDING VS REACTION INJECTION MOLDING (RIM), y.y.)	19
Tablo 3. Örnek deneyin kodlanmış değerleri	31
Tablo 4. Değişken sayısına göre bilinmeyen tablosu.....	32
Tablo 5. Merkezi kompozit tasarım tekniğini kimya endüstrisindeki örneği	32
Tablo 6. Kullanılan Kevlar 29 malzemenin yapı ve mekanik özellikleri	37
Tablo 7. Polives 701 reçinenin mekanik özellikleri.....	37
Tablo 8. Çok duvarlı karbon nanotüp'ün mekanik ve elektriksel özellikleri	38
Tablo 9. Çalışmada kullanılan zirkonya tozunun özellikleri	39
Tablo 10. 10 J darbe enerjisindeki malzeme oranlarına göre absorbe edilen enerjiler ..	41
Tablo 11. 15 J darbe enerjisindeki malzeme oranlarına göre absorbe edilen enerjiler ..	43

1. GİRİŞ

Ülkemizde; savunma sanayi ve havacılık olsun birçok sektörde ilgi odağı olan kompozit malzemelerin, birçok yönden monolitik malzemelere göre avantajları olduğu gibi bu doğrultuda kompozit malzemelere ihtiyaç duyulur (*TUSAŞ kompozitte liderliğini sürdürüyor*, 2020)(*HIZIR 4x4 Taktik Tekerlekli Zırhlı Araç*, y.y.). Çelikler, yüksek yoğunluğu nedeniyle hafiflik istenen uygulamalarda kullanılmaya uygun değildir. Bu problem, aynı veya daha iyi koruma seviyesini sağlayan daha hafif koruyucu malzemeler elde etmek için farklı araştırmalara yönelmiştir. Bu durum ayrıca dinamik halde aktif olarak kullanılan araçlar için ele alınır; ağırlık hafiflettikçe araç, hız ve manevra kabiliyetine sahip olur (Sorrentino vd., 2014). Kompozit malzemelerin kullanımı, çeşitli muharebe araçları ve koruma cihazları için gelişmiş beka kabiliyeti ile kütle verimliliği sağlar. Yeni koruyucu sistemleri hızlı bir şekilde geliştirmek için, bir dizi malzeme ve yapısal çözümü değerlendirmek için deneysel değerlendirme ile birlikte gelişmiş sayısal simülasyonlar kullanmak esastır. Ancak, sayısal simülasyonlar kullanarak koruyucu performansı doğru bir şekilde yakalamak için kompozit malzeme davranışının doğru bir şekilde modellenmesi gerekir.

Kompozitler; çeşitli darbe tehditlerine karşı koruma için personel ve araç koruyucu/yapısal uygulamalarda, üstün sertlik ve iyi mukavemet, düşük ağırlık özellikleri nedeniyle uzun süredir kullanılmaktadır (Yen, 2012)(T. J. Singh & Samanta, 2015). Darbe dayanımının yanı sıra koruyucu malzemelerde diğer önemli bir parametre ağırlıktır. Kompozit malzemeler; düşük ağırlık, yüksek mukavemet, uyarlanabilirlik (esnek kullanım) özellikleri nedeniyle geleneksel malzemelere göre önemli bir seçenektir (Ávila vd., 2011).

Günümüzde neredeyse gelenekselleşmiş karbon fiber veya cam fiber takviyeli polimerlerin kullanımı yaygın olsa da teknolojinin gelişmesiyle, aramid (Kevlar) gibi darbeye daha iyi korunma sağlayan fiberler geliştirilmiştir (Schiffer vd., 2015). Korozyon özelliği gösteren ortamlara göre yıllık bakım ve işletme maliyetleri çok yüksek olan korozyon faktörü de ayrıca malzeme seçiminde dikkate alınmalıdır (Nazeer vd., 2020).

Aromatik poliamid'in kısaltılmışı olan aramid, 1960 – 1970 aralarında ilk uygulamalarını bulmuştur. Özellikleri arasında, yüksek güç, aşınmaya karşı iyi direnç,

organik çözücülere karşı iyi direnç, iletken olmayan, erime noktası yok, düşük yanıcılık ve yüksek sıcaklıklarda iyi kumaş bütünlüğü sağlar (*What is Aramid*, y.y.). Günümüzde Kevlar malzemesinin genel kullanımı olan anti-balistik uygulamaları (Pereira & Revilock, 2008) dışında daha genelleştirilmiş koruyucu uygulamaları da ele alınabilir. Kevlar (Aramid), diğer sentetik elyaflara göre, çok daha düşük elyaf uzaması ve daha yüksek çekme mukavemeti ve modülüne sahiptir (Bunsell, 2009). Ayrıca kevlar ve nomex gibi aramid malzemeler, sertlik ve mukavemet ile birlikte, dikkate değer mekanik özellikler sağlar, böylece bunları yeni kompozitlerin geliştirilmesi için mükemmel adaylar haline getirir (X. Fu vd., 2010).

KNT molekülleri ilk 1991 yılında Iijima tarafından keşfedilerek, nano bilime atılımda öncü adımlardandır (*A History of Carbon Nanotubes*, y.y.). Karbon nanotüpleri karbonun bir allotropik formudur. Çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKN) ve tek duvarlı karbon nanotüp (TDKN) olmak üzere ikiye ayrılır. Karbon nanotüp takviyeleri gibi nano takviyelerin matris içine homojen dağılması istenerek; bazı mekanik, termal ve elektrik gibi bir takım diğer özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanır (Montazeri vd., 2010)(Balakrishnan & Saha, 2011)(Kong vd., 2015).

ZrO₂ nano parçacıkları, iyi korozyon koruma özellikleri, yüksek mukavemet ve termal direnç, iyi sertlik ve belirgin kimyasal direnç ile etkili bir anti bakteriyel etkiye sahiptir ve bu özelliklerini aynı zamanda yüksek sıcaklıkta da korumaktadır (Nabi vd., 2011) . Biyolojik yapı uyumluluğu ile birlikte alumina'nın yerini almaktadır. Doğa'da Zirkonya ancak oksitlenmiş şekilde bulunabilir. Üretimi, termal ayrışma, füzyon ile ayrıştırma, klorlama, karbürleme gibi işlemlerden daha çok çeşit yollarla yapılabilir (*Zirconia*, y.y.).

Kompozitlerin bileşiminin ana unsuru olan reçine, gerilme aktarımını, fiberleri bağlayıcı ve destekleyici görev görürler. Çalışmamızda kullanılacak vinilester reçine, teknik olarak epoksi reçinenin ve metakrilik asitin tepkimesinden oluşan bir polyester reçine türevidir. Mekanik ve darbe dayanımları normal kullanım reçinelerine göre çok daha yüksektir (Hodgkin, 2001). Bu kategoride kullanılan poliya-polives 701 reçinesi, termal gerilmelere çok daha fazla tepkisiz kalmaktadır. Polives 701, birçok kompozit üretim tekniğine uyumluluğuyla, alkali ve asidik malzemelerde oluşan sıcaklık

durumunda, diğer doymamış polyester reçinelere çok daha mukavemetli bir yapıdadır (*Poliya Polives 701 Vinilester Reçine*, y.y.).

Bir kompozit plaka üzerindeki düşük hızlı darbe testi önemli olabilir. Çünkü iç hasar (delaminasyon, matris çatlaması, fiber kırığı vs.), darbeli yüzeyde belirgin bir hasar olmaksızın malzemenin mukavemetinde önemli bir azalmaya neden olabilir (Freitas & Reis, 1998)(Sutherland & Guedes Soares, 2005)(de Moura & Gonçaves, 2004)(Hosur vd., 2005) . Kompozit laminatların düşük hız darbelerine karşı zayıf toleransı, birçok endüstriyel uygulamada kullanımı sınırlamaktadır (Reis vd., 2013). Görsel olarak kolay tespit edilemeyen bu durum; bu malzemelerin yapısal bütünlüğünü önemli ölçüde etkileyebilecekleri için çeşitli tehlikeli hasar türleri oluşabilir (Amaro vd., 2011)(Reis vd., 2009). Darbe testi sırasında, kompozitlerde hasar yayılmasının karakterizasyonu, delaminasyonlara, matris çatlamasına ve fiber kırılmasına sebebiyet veren zorlu bir süreçtir (Bulut vd., 2016). Bu yüzden bu zorlu süreci en aza indirmek için yarı-statik testler geliştirilmiştir (Fang vd., 2021). Çarpışmada kompozit yapı koruma sistemleri, kompozit kalınlığı boyunca aşırı dinamik sıkıştırma yüküne maruz kalır (Qian vd., 2016). Düşük hızlı darbe testinin temas süresi, yapının darbeye tepki vermesi için yeterince uzundur bu da daha fazla enerjinin elastik olarak emildiği anlamına gelir (Mohammad K. Hossain vd., 2014). Düşük ve yüksek hızda darbe sırasında, kompozit laminatlar; çekme, sıkıştırma, zımba kesme, ezilme yüklemesi arızası nedeniyle düzlem içi kesme ve kalınlık boyunca delaminasyon gibi liflerin fiber kırılma modları nedeniyle enerjiyi emer (Yen, 2012). Orta hızda darbe için genelde kullanılan parametreler; matris ve liflerin türü, hacim oranı, lif mimarisi ve matris içindeki yönü, darbe aralığı, hasar mekaniği ve enerji emilimidir (Mohan vd., 2015). Darbe yükü altında kompozit malzemelerin hata modellemesi çok sayıda çalışmanın konusu olmuştur.

Vakum torbalı kalıplama, lamine yapılar yapmak için birincil kompozit üretim sürecidir ve havacılık endüstrisinde çok yaygındır. Emek yoğun bir süreç olması ve uzun çevrim süreleri içermesi nedeniyle otomotiv endüstrisinde kullanımı sınırlıdır. Öncelikli olarak prototip otomotiv kompozit parçaları yapmak için kullanılmıştır, ancak gelecekte çatı panelleri ve döşeme tavanları gibi büyük bileşenlerin yapımında, özellikle bu bileşenler için lamine bir yapı kullanılıyorsa ve üretim hacmi nispeten küçükse kullanım alanı bulabilir. Vakum poşeti kalıplama işlemi için başlangıç malzemesi, kısmen kürlenmiş ısıyla sertleşen polimer, tipik olarak bir epoksi içinde tek yönlü sürekli lifler

veya çift yönlü bir kumaş içeren bir prepregdir. İstenen şekil, boyut ve elyaf yönlendirmesine sahip katlar, önceden prepreg rulodan kesilir ve tasarım gereksinimine göre ya elle ya da sayısal olarak kontrol edilen bir şerit döşeme makinesi kullanılarak istiflenir. Yığın kalıp yüzeyine yerleştirilir ve vakum torbası görevi gören esnek bir polimer film ile kaplanır. Vakum poşeti kenarlarından kapatıldıktan sonra, tertibat ya hava sirkülasyonlu bir fırına ya da sertleştirme için bir otoklava yerleştirilir. Vakum uygulaması, vakum torbasındaki havayı uzaklaştırır. Fırın veya otoklavdaki sıcaklık önceden ayarlanmış sertleştirme sıcaklığına ulaşılan kadar kontrollü bir oranda yükseltilir. Otoklavla kütleme kullanılıyorsa, yığındaki katları bir laminatta birleştirmek için tertibata pozitif bir basınç uygulanır. Fırında kütleme kullanılıyorsa, konsolidasyon bir atmosfer basıncında gerçekleşir. Kullanılan reçineye bağlı olarak, kütleme işlemi 30 dakikadan birkaç saate kadar sürebilir. Otoklavla kalıplama hem vakum hem de pozitif basınç kullandığından, kürlenmiş laminatta fırında külemeye göre daha iyi konsolidasyon ve daha düşük boşluk içeriği üretir ve genellikle kalın laminatların üretimi için önerilir. Ancak otoklavlar pahalıdır ve yüksek işletme maliyetleri içerir. Bu nedenle, sadece vakum poşeti prepregleri olarak bilinen yeni nesil prepregler, sıcak hava sirkülasyonlu bir fırında otoklav dışı kütleme veya ısıtılmış bir battaniye sarmalayıcı kullanarak bile otoklav kalitesinde parçalar üretebilen yeni nesil prepregler geliştirilmiştir (Mallick, 2021).

Sıcak pres kalıplama, basınç altında karışım oranlarını, formülasyonlara uygulayarak kompozit üretilebilir. Yüksek performanslı malzemeler içinde olan kompozitlerin üretiminde, sinterleme davranışı zayıf ise tercih edilebilir bir metoddur (*SMC ve BMC Sıcak Pres*, y.y.). Maliyeti yüksek olduğundan, toplu üretimlerde tercih edilmesi daha uygundur (Nas vd., 2013). Cam elyaf takviyeli bir polyester, malzeme kalıbına sıkıştırılarak oluşturulan ‘Tabaka kalıplama bileşikleri (SMC)’ ve enjeksiyon kalıplama ve sıkıştırma kalıplamada kullanılan, cam elyaf takviyeli bir polyester malzemedan mamul olan ‘dökme kalıplama bileşikleri (BMC)’ olmak üzere iki tipi vardır (*SMC - BMC - Sıcak Pres Kalıplama*, y.y.). Çalışmamızda; tabakalı kompozit malzeme üretmek için, aramid malzeme vinilester reçine ile ıslatılarak vakum poşeti içersine alınmış, ön vakumlamadan sonra sıcak pres altında 5 Bar basınca tabii tutularak 60 C sıcaklıkta iki saat boyunca ısıtılmış, ve doğal soğumaya bırakılarak presten çıkarılmıştır.

Reçine infüzyon metodu, açık kalıplama işlemidir. Rüzgâr pervaneleri ve yelken gövdeleri üretimleri bu işlemde kullanılan örnekleri olarak verilebilir. Film ve sıvı reçine infüzyonu olmak üzere iki metodu vardır (Töre, 2011).

Kompozit üretim yöntemlerinden püskürtme ile üretim metodu, elle yerleştirmeye benzerdir. Bir operatör kompozit malzemeyi kalıba tek taraflı olarak uygular ve kompozit atmosfer koşullarında kürlenir. Düşük maliyetlidir. Büyük malzemeler üretilebilir fakat uzun sürmesi bir dezavantajdır. Elle yatırmadan farklı olarak tabancadan kıyılmış elyaf reçine haznelere kalıba doğru püskürtülür. Basınçlı hava ile karışımı kalıba püskürür. Kıyılmış liflerden ve reçine bakımından yoğun olduğundan kompozit sınırlı mekanik özelliklere ve hafifliğe sahiptir. Karavan gövdeleri ve araç aerodinamik panelleri gibi düşük yüklemeli yapılar üretilebilir (Middleton, 2016).

Reçine geçişli kalıplama metodu ise, havacılıktaki orta büyüklükteki uygulamalarda (maksimum 3 m) kompozit bileşenler bu yöntemle üretilir. Kapalı bir kalıplama işlemidir. Kumaş, sırasıyla kalıplar arasına istiflenir, mühürlenir ve sıkıştırılır. Reçine pompa tarafından kalıba aktarılır. Kompoziti oluşturmanın son evresi olan polimer matrisi kürlenmek için kalıp ısıtılır ve kenarlar düzeltilir. Boşlukları ve yapı bozulmalarını önlemek için vakum destekli versiyonları da vardır. Bu sayede reçine kalıba vakum basıncı ile çekilir (Ghori vd., 2018)

Filament sarım metodu, silindirik boru ve kapalı tüplerin üretiminde sıklıkla kullanılır. Reçine emdirilmiş elyafların belirli bir germe altında istenilen açıda dönen bir mandrel üzerine sarılır ve daha sonra oda sıcaklığında veya ısıtılmış sıcaklıkta kürlenerek kompozit oluşur. Taşıyıcı ünite ve mandrel hareketi kontrol edilerek istenilen elyaf açısı oluşturulur. Sarım işlemi; ıslak (sıvı reçine), kuru (prepreg) veya yarı kuru gerçekleştirilebilir. Genel olarak sarım şekilleri; çember sarım, kutup sarım ve helis sarımdır. (R.-M. Wang vd., 2011)

Yanıt yüzey metodolojisi; temel olarak üretim verimliliğini sağlama amacıyla, Box ve Wilson tarafından geliştirilen bir deney tasarımının alt ve önemli bir koludur. İlk başta asıl amaçları kimyasal bileşimlerin oransal açıdan optimum düzeye getirilerek; düşük maliyetli, yüksek verimli kimyasal bileşimler elde etmektir. Yanıt yüzey metodolojisi'nin her seferinde bir değişkenin geleneksel zaman alıcı yaklaşımına göre ana avantajı, seçilen yanıt parametrelerinin değişkenleri ve modellenmesinin eşzamanlı

etkileşimi dahil olmak üzere işlem değişkenlerinin daha hızlı ve daha sistematik araştırılması için gereken deneysel çalıştırma sayısının azaltılmasıdır (Anderson-Cook vd., 2009).

Bir yanıt yüzey metodolojisi olan merkezi kompozit tasarımı, kesirli faktöriyel tasarımda en çok kullanılan ve temel amacı yüzey yanıt metodolojisiyle aynı olan bir optimizasyon yöntemidir. Üç seviyeli faktöriyel deneme yapmadan, yanıt değişkenine göre ikinci dereceden bir model oluşturulması, Yanıt yüzey metodolojisinde bu tasarımın kullanılmasındaki en büyük sebeptir (Asadi & Zilouei, 2017).

Bu çalışmada; üretimi yapılan malzemenin belirli katkı oranlarında mekanik karakterizasyonu belirlenmiş olup, merkezi kompozit tasarımı gibi bir yanıt yüzey metodu istatistiksel verilerle destek çıkmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kompozitler, birçok sanayi sektöründe kullanılırken, aynı zamanda kullanılan malzemenin, kullanıldığı yer ile de mümkün olduğunca ilgili olması gerekir. Bu sözden yola çıkıldığında, Mahesh V.P. vd. termal iletkenlik gerektiren, neme karşı koruma sağlaması ve aynı zamanda iyi mukavemet vermesi gibi özellikleri karşısında en iyi seçeneğin polimer matrisli kompozitler olduğundan bahsetmiştir (Mahesh vd., 2021; Williams, y.y.). Brabazon tarafından (Brabazon, 2021), polimer matrisli kompozitlerin; havacılık ve su arıtma sistemleri gibi malzemeye olumsuz yönde etkileyecek dış faktör içeren uygulamalarda kullanıldıklarından bahsedilmiştir. Liu vd. polimer matrisli kompozit malzemelerin tasarımında ‘çapraz bağ’ yöntemini kullanarak, tasarım farklılıklarından doğan yeni mekanik/termal/elektriksel özelliklerin oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Liu, 2021). Termoelektrik enerji üretimi; elektro manyetik kalkanlama ve titreşim azaltma gibi genel özellikleri olan akıllı kompozitler üretilmiştir (Chung, 2002). Lin C. vd. yaptığı çalışmada akıllı kompozitlerin polimer matrisli kompozitlerin şekillendirilebilirlik ve sertliği arttırdığı ama bazı elektrik özelliklerini olumsuz etkilediğini gözlemlemişlerdir (Lin & Liu, 2022). Tang. H. vd. kırılmış karbon fiber takviyeli tabaka kalıplama kompozit bileşimindeki fiberlerin diziliminin

değişmesinin yorulma performansı değerlendirmelerinde oluşan test sayılarını azaltarak sonuç verme açısından verimi arttıracığı fikrine varmışlardır (Tang vd., 2019).

Çok duvarlı karbon nanotüpler, malzemeye belli bir miktar eklendiklerinde malzemenin sertliği ve kırılma direncinin arttırıldığı gözlemlenmiştir ve belli miktarın fazlası konulduğu takdirde; sertlik ve birçok özellik, seramik ve metalik fazlar arasındaki bağlar, sinterleme durumları ve bağlayıcının oranı gibi ana unsurlara daha fazla odaklanılmaz ise mekanik özelliklere olumsuz yönde etkileyeceği sonucuna varmışlardır (Esmailzadeh vd., 2020). Echeberria ve ark (Bocanegra-Bernal vd., 2011) zirkonya ile toklaştırılmış alümina kompozitini, 1520 °C de bir saat sinterlenmiş bir şekilde deneylerinde, çift duvarlı karbon nanotüpleri eklediklerinde tek duvarlı karbon nanotüplere göre yüksek kırılma tokluğu ve kısa boyutlu çatlaklar görmüşlerdir. Shadakshari ve ark. çok duvarlı karbon nanotüplerin ağırlıkça arttırılması sonucu elektrik ve termal iletkenliğinin azaldığını görmüşler ve termal iletkenin azalmasını; sinterleme ve ısıl işlem doğrultusunda oluşan yüksek sıcaklıktan kaynaklı ‘nanotüpler arası bükülmelerden’ kaynaklandığı sonucuna vardıklarını SEM, XRD, EDS, ve TEM araçları ile gözlemlemişlerdir (Shadakshari vd., 2022).

Dişçilik uygulamalarında biyouyumluluğu ile bilinen Zirkonyanın, kompozit’e eklendiğinde kesme bağ kuvvetini arttırmasının sektörde bakım ve onarım aşamalarında oldukça faydalı olduğu sonucuna varmışlar, birleştirme ajanı olarak silanlama işlemi bu bağ kuvveti ve dayanıklılığını arttırmada önemli rol oynamıştır (Li vd., 2020).

Li ve arkadaşları, üç farklı aramidi üç farklı atış testine tabi tutmuş olup, bunların su geçirmezliğinin ve tabakalar arası sürtünmenin balistik performans üzerine etkilerini gözlemlemişlerdir ve sonuç olarak su emiş durumunun performansı; kötü, tabakalar arası sürtünmenin artması ise iyi etkilediği sonucuna varmışlardır (Li vd., 2016). Obaid ve ark (Abu Obaid vd., 2011). Belirli sıcaklıkta su altı testi işlemine tabi tutulan Kevlar, Twaron ve Armos aramid elyafların sırasıyla on yedi ve otuz dört gün suda farklı sıcaklıklarda bekletildiğinde Kevlar’ ın twaron ve armos çeşidine göre mekanik performansının düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Vinilester reçineler uygun maliyeti, özellikleri ve kolay elde edilebilirliği ile bu tip çalışmalarda kullanılan ve diğer polimer reçinelere göre daha iyi erozyon performansı gösteren ideal bir reçine türü olduğu görülmüştür (Muthusamy vd., 2022). Thooyan ve ark (Thooyavan vd., 2022). Vinilester matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak

bazalt elyafın kullanılmasının iyi yapışamama durumunu gösterdiğini ve bunun sonucu olarak düşük mekanik özellikler ortaya çıktığı için bu olumsuzluğu nano ve mikro düzeyde SiC bileşimi içeren dolgu katkısı ekleyerek önüne geçmeyi tartışmışlardır. Bonsu ve ark (Osei Bonsu vd., 2022). bir polimer matrisli kompoziti yapay olarak deniz suyu ortamında mekanik davranışlarını incelemek istediklerinde vinilester kullanmalarının başlıca sebebi; neme dayanıklılık ve fiyat konusunda, epoksi ve polyesterlerin ortasında kaldığı için bu reçineyi kullanmışlardır.

Kompozitlerin düşük hızlı darbe etkisi karşısındaki mekanik davranışlarını araştıran çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Kompozitlerde ağırlık düşürmeli düşük hızlı darbe etkisinin yüksek hızlı darbe etkisine göre gerilme dalgasının etkisinin çok daha düşük olduğu ve işlemin yarı statik olduğu gözlemlenmiştir (Mantena vd., 2001). Matris hatası ile matris çatlaklarının açılması ve küçük orandaki kısmının kendiliğinden kapanması gibi hataları incelemek için, üç noktalı eğme test cihazı kullanarak çok düşük hızlı darbe deneyi gerçekleştirmişlerdir (Hongkarnjanakul vd., 2014). Bu çalışmada benzer darbe deneyinde kullanılması planlanan; akustik emisyon sensörlü ağırlık düşürme ile düşük hızlı darbe testi, hasarın daha gerçekçi ve tahribatsız bir şekilde incelenebileceği tartışılmıştır (Mahdian vd., 2017). Bu tip çalışmalar bilgisayar destekli simülasyon işlemi sağlayan ve sonlu elemanlar analiz yöntemini kullanarak veriler elde eden Chandekar ve ark. (2010) yaptığı çalışmalarında; LS-DYNA programıyla da düşük hızlı darbe testi analiziyle, Instron dynatup 8250 düşük hızlı darbe test cihazıyla gerçekçi sonuçlar elde edilebileceğini karşılaştırmalı bir şekilde göstermişlerdir (Kelkar vd., 2010). Micheli vd. (D. Micheli vd., 2016) 0.8 - 8.0 GHz frekans aralığında kompozitin, elektromanyetik koruma etkinliği ve yaklaşık 400 m/s ve 1000 m/s ' de gerçekleşen yüksek hızlı darbenin enerji soğurma/emme kapasitesini farklı parametreler ekleyerek incelemişler, itici kuvvete karşı direncin, istifleme sırasında ve lamine boyunca çatlak yolundan etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Diğer bir çalışmada farklı kat yönlerine sahip simetrik plakanın darbeye karşı en iyi direnci gösterdiği tespit edilmiştir (Sevkat vd., 2010). Laminat kalınlığının artmasıyla temas noktasındaki lokal deformasyondan kaynaklanan delaminasyon enerjisinin arttığı da gözlemlenmiştir (Caprino vd., 1999). Darbe esnasında, fiber kırılması, matris çatlama ve ezilmesi, delaminasyon gibi hasar modları aynı anda meydana gelebileceğinden dolayı darbenin simülasyonunu zorlaştırır (L. Yang vd., 2013). Hasarın başlangıcını tek bir parametreye bağlamak gerçekçi olmayıp

aynı zamanda simülasyonların hata payını arttırır. Mikroskobik hasarlar, iç durum değişkenleri açısından dağıtılmış kusurların etkilerini temsil ederken, sürekli hasar mekaniği ile bir şekilde makroskopik düzeyde hasar tespiti yapılır (Zhang & Cai, 2010). Sürekli hasar mekaniği'ni dünyada ilk kez tanıtan Kachanov (Kachanov, 1986), 'süreklilik hasar mekaniğine giriş' kitabında bu konuya yer vermiştir. Bu konu daha sonra birden fazla olumsuz faktörün etkisini, hasarların modellenmesi veya simülasyonlar üzerinde analiz edebilmek için birçok çalışmaya dahil olmuştur (Yokoyama vd., 2010)(Raimondo vd., 2012)(Batra vd., 2012)(Faggiani & Falzon, 2010). Çalışmalarda, düşük hızlı darbe testlerinde dokuma kompozitlerin, tek yönlü kompozitlere göre daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır (Evcı & Gülgeç, 2012). Sadighi vd. derleme çalışmasında; metal fiberli laminatlar incelendiği takdirde; Glare, Carall ve Arall arasında en iyi darbe performansını Glare malzemenin verdiği ve darbe etkisi sonucu oluşan hasarda sıcaklığın etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu bilgisine ulaşılmıştır (Sadighi vd., 2012). Bhatnagar vd. darbe çıktısı sonuçlarını kullanarak kütle/yay mekanizması yaparak, enerji korunumu yarasından oluşan kuvveti buldurmuş ve bu kuvvetin daha sonra temas süresini hesaplamada kullanabileceğini ortaya koymuşlardır (Bhatnagar vd., 2021).

Hanif vd. matrisi epoksi olan ana takviyesi twaron/aramid olan bir kompozite sonikasyonla homojenize bir dağılım istedikleri için çok duvarlı karbon nanotüp takviyesinin farklı kuvvetler altında ASTM D5045 standardına göre bükme testleri gerçekleştirmişlerdir (Hanif vd., 2015). Evcı vd. darbe yanıtının belirlenmesi ile hasar kriterlerinin ortaya çıkabileceğini savunmuş olup (Evcı & Gülgeç, 2012), bu bağlamda dinamik yapıyı statik yapıyla karşılaştırmak için üç noktalı eğme testleri yapmışlardır.

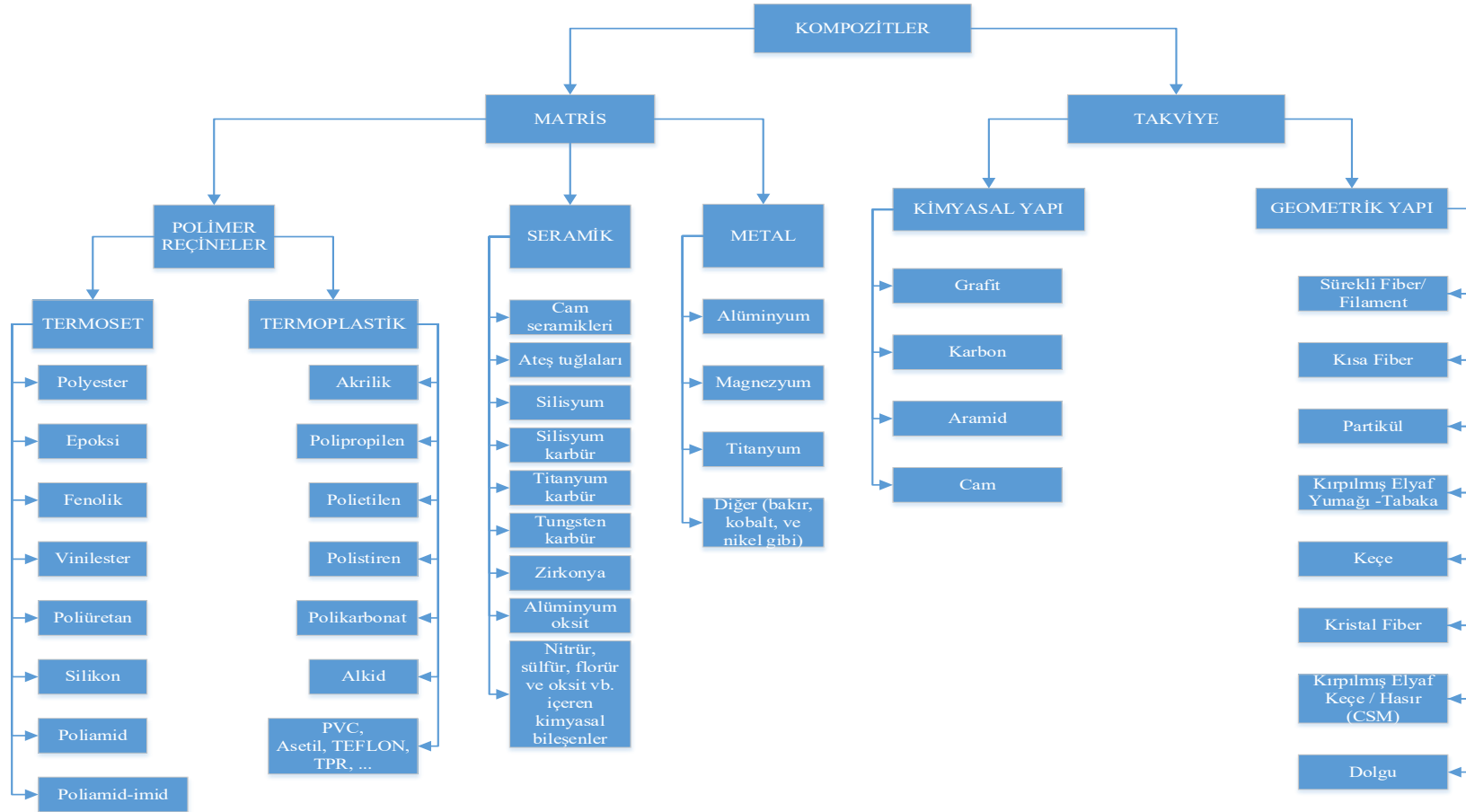
Wang ve arkadaşları (D. Wang vd., 2019), reçine transfer kalıplama işlemi ile üretilen bambu takviyeli epoksi reçine matrisli kompozitlere ek olarak NaOH solüsyonu ile işlemler yaparak matris – fiber arayüz yapışmasını iyileştirmişlerdir. Artan üretim sıcaklığının da kompozit matris-fiber arayüzü yapışmasında rolü vardır (Dai vd., 2011). Wu ve arkadaşları (Wu vd., 2020), katmanlar arası kimyasal bağların dizilimini değiştirerek, bağlara göre katkılar eklendiğinde farklı yapışma arayüzleri elde etmişlerdir. Dokuma, cam ve aramid kompozitler gibi bazı koruyucu malzemelerin önemli oranda gerinim hızı hassasiyeti sergilediği gösterilmiştir (Harding, 1979)(Welsh & Harding, 1985). Kevlar hibridizasyonun değiştirilmesinin; düz laminatlar arasında kıyılmış liflerin

kullanılması gibi, kompozitlerin delaminasyon mukavemetini de iyileştirdiğini tespit etmişlerdir (T. J. Singh & Samanta, 2015).

Jaipal vd (Gupta vd., 2020). tabakalı kompozitlerde matrisin epoksi veya vinilester olmasını sağlayarak bu bileşim sonucu absorbe edilen enerjiyi, en verimli şekilde kullanan matrisin epoksi reçine olduğu kanısına varmıştır. Meyer N. vd (Meyer vd., 2020). yüksek hızlarda yapılan presleme işleminin istiflerin konumunu bozduğu, fakat malzeme akışının gerçekleşemediği kanısına vardıldıktan sonra kalıplama boşluğunu azaltarak bunun önüne geçmeyi planlamışlardır. Lee L.J. vd (Lee, 1982). temel serbest radikal polimerizasyon mekanizmasını kullanarak, kalıplanmış tabakalı kompoziti kürlerken gerekli performansı sağlamak için bir ısı transferi modeli oluşturmuşlardır. Palmer J. vd (Palmer vd., 2010). geri dönüştürülmüş karbon fiberi takviye olarak kullanarak tabakalı kompoziti kalıplama yoluyla üretmişlerdir ve mekanik özelliklerin geleneksel üretimlerle karşılaştırılabilmesi için hacim fraksiyon parametresinin önemli olduğunu vurgulamışlardır. Literatürde geri dönüştürülmüş karbon fiberin darbe enerjisine karşı direncinde, tabakalı kompozit ile dökme kalıplama kompoziti arasında önemli bir fark olmadığı gözlemlenmiştir (Saburow vd., 2017).

Kaur M. vd (Kaur vd., 2022). çinko ve pirinç kabuğu adsorpsiyon oranlarına göre sulu çözeltilerdeki çinkoyu uzaklaştırarak; pH ve metal iyon konsantrasyonu gibi yanıt parametreleri ile bir optimizasyon tekniği oluşturmuştur. Balogun O.A. vd (Abiodun Balogun vd., 2022). yanıt parametrelerine göre merkezi kompozit tasarımını kullanarak $mTiO_2/p/Al$ 7075 kompozitinin üretiminde optimum sonuçları vermesi için 643 °C, 423 rpm devrinde 30 dk boyunca karıştırması gerektiği sonucuna ulaşmıştır. Singh J.P. vd (J. P. Singh vd., 2021). daha sonraki deneylerde farklı oranlara göre karıştırma parametrelerini belirlemede kolaylık sağlaması için; Uçucu kül, aktivatör çözeltisi ve karıştırma süresi olmak üzere üç farklı giriş parametresi ile sıkıştırma dayanımı yanıt parametresini kullanarak ikinci dereceden üç bilinmeyenli merkezi kompozit tasarım denklemini çıkartmışlardır.

3. KOMPOZİT MALZEMELER



Şekil 1. Kompozitlerin sınıflandırılması (KALEMTAŞ, y.y.)(*Metal Matrix Composites: Properties, Production, and Applications*, y.y.)(Jacky, y.y.)(Green, y.y.)

3.1. Matrislerine Göre Kompozitler

Matris; elyaf takviyesini bağlayarak bir arada tutar, elyaflara kuvvet/yükleri aktarır ve yüzey kalitesini belirleyici rol oynar (*Materials & Processes: Resin matrices for composites*, 2016). Matris malzemeleri olarak metal, seramik veya polimer kullanılabilir. Bunların arasından; matriste en yaygın olarak kullanılan malzemeler, polimer ve metallerdir (Callister & Rethwisch, 2015). Matrisler: lifleri ayırır, yükü liflere eşit dağıtarak, çatlakların lifler arası yayılımını engeller (*Matrix Materials*, y.y.)("Scientific Principles of Composites", y.y.).

Fiber, kompozitte enerji emici malzeme olmasına rağmen, matrisin rolü de azımsanmayacak kadar önemlidir (Reddy vd., 2016).

3.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Epoksi, fenolik, polyester ve poliüre gibi termoset reçineler ve polipropilen (PP) ve polietilen (PE) gibi termoplastik reçineler, koruyucu görevdeki kompozit malzemeleri üretmek için çoğunlukla matris olarak kullanılmaktadırlar (Potluri vd., 2018). Polimer matrisler; termoset, termoplastik ve elastomerler olmak üzere üç gruba ayrılır. Tablo 1’de elastomerler dışarıda tutulmak üzere detaylı bir şekilde verilmiştir.

Kompozitlerin birçok metal alaşımına göre düşük yoğunluk, iyi yorulma dayanımı, mükemmel korozyon direnci, ısı yalıtımı ve bazılarında düşük ısıl genleşme özellikleri vardır (Shams vd., 2013). Khalil ve arkadaşları (Abdul Khalil vd., 2013), yüksek dolgu yükleme yüzdesi ile porozitenin ve çekme dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir. Çalışma sıcaklıklarının düşük olması, termal genleşme ve nem katsayılarının yüksek olması bazı sınırlamalardan dolayıdır (Kaw, 2014).

Dolgulu polimer bir kompozitin özellikleri çoğunlukla dolgunun boyutu, şekli, bileşimi ve aglomerasyon durumundan ve ayrıca matris-dolgu yapışmasının derecesinden etkilenir ve yeterli miktarda eklendiği takdirde malzemenin iyileştirilmesi ile sonuçlanabilecek daha büyük bir ara yüzey yapışma bölgesi sağlar (Seshanandan vd., 2016).

Tablo 1. Polimer malzemelerin karşılaştırılması (Töre, 2010)

Termosetler	Termoplastikler
Raf ömrü vardır.	Raf ömrü bilinmiyor
Yeniden işlenemez	Yeniden işlenebilir
Isıtmayla ayrılmazlar	Yumuşayabildiği için tamir edilebilir.
Yapışkan	Yapışkan değil
Düşük üretim sıcaklığı	Yüksek üretim sıcaklığı
Çözücü direnci düşük	Çözücü direnci yüksek

Reçinelerin olmazsa olmazları; Yavaşlatıcı (inhibitor), katalizör (catalyst), hızlandırıcı (promoter), katkı maddeleri (additives) ve stiren (styrene) gibi elemanları vardır.

3.1.1.1. Termoset matrisler

a) Polyester reçineler

Reçineler arasında en uygun fiyatlarda satın alınabilen fakat diğer termoset matrislere göre daha kötü mekanik özellikler gösteren bir reçinedir (Maxineasa & Taranu, 2018). Bir diğer adı olan doymamış polyesterler kürlenebilse de, doymuş olanları kürlenememektedir (Loos, 2015). İzofталik ve nispeten daha iyi mekanik özellikler veren ortoftalik olmak üzere kompozit endüstrisinde kullanılan iki tipi vardır (Ouarhim vd., 2019).

b) Epoksi reçineler

Aminler, fenolik reçineler, anhidritler ve tiyoller dahil olmak üzere çeşitli sertleştiriciler kullanılır ve sertleştirici olmadan asidik bir katalizör ile kürlenebilirler. Sertleştiriciye göre 0°C'den >200°C'ye kadar kür sıcaklığı vardır.

Çoğu sertleştirici ile kür sırasında hidroksil gruplarının oluşumu sayesinde, takviyelere iyi yapışır. Vinilester gibi diğer termosetlere göre çok daha az gevrektiler. Rüzgar türbin kanatları, baskılı devre kartları, basınçlı kaplar, havacılık ve otomotiv de kompozit matrisi olarak kullanılırlar. Maliyeti sınırlayıcı bir faktördür (Mullins vd., 2018)

c) Vinilester reçineler

Robertson F. Tarafından 1933 yılında keşfedilen bu polimer reçine, 16-95 MPa çekme dayanımı ve %1.65 küçülme gibi mekanik özellikler göstermiştir (Wypych, 2016). Epoksiye göre daha düşük mekanik özellikler gösterse de maliyet ve toplu üretim açısından düşünüldüğünde, kompozit sektöründe yaygın kullanıma sahip bir reçinedir (Komus & Beley, 2018). Tabakalı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan vinilester reçine, büzülme kontrolünü sağlayan katkı reçinesi ile sertleşme esnasında yeteri kadar uyumsuzluk sağlandığı takdirde daha iyi sonuçlar elde edilir (Kandelbauer vd., 2014).

d) Fenolik reçineler

Kürlendikten sonra suya karşı iyi bir dirence sahiptir. Fenolik reçineler, cam ve mineral yün lifleri ile bağlayıcı olarak kullanılır. Düşük maliyetleri, iyi termal dirençleri, nispeten takviyeye iyi yapışma özellikleri nedeniyle seçilir (Mullins vd., 2018)

e) Poliüretan reçineler

Poliüretan kompozit platformun gelişimi, kırılmış liflerin kullanıldığı üretim prosesleri için uygun formülasyonların geliştirilmesiyle başlamıştır. Biyomedikal uygulamalarda çokça kullanımı vardır (Haponiuk & Formela, 2017).

Polimer matrislerin avantajları ve dezavantajları

Avantajları

- Sıvı hale geçmeden bozunabilirlikleri,
- Sürünme özelliği iyi, makro moleküllerin kendileri aralarında yer değiştirmelerini sınırlandıran zincirler arası bağlantılar (Biron, 2014)

Dezavantajları

- Kimyasal reaksiyon, üretim döngülerini uzatan ve genellikle ısıtma gibi zaman ve maliyet gerektiren bir işlem gerekebilir.
- İşlemin izlenmesi zordur.
- Bazıları sertleşme sırasında özellikle su buharı gibi gaz salınımları yapmaktadır.
- Sertleşme (Kür) reaksiyonu sebebiyle yeniden kullanılamaz. Ancak bazen, taşlamadan sonra dolgu maddesi olarak kullanılabilir.
- Ergiyik olmayışı kaynak yöntemleri ile üretimini engeller.

Özellikle epoksi ve fenolik reçineler; bulunabilirlikleri, düşük maliyeti ve üretim kolaylığı sayesinde koruma amaçlı geliştirilen kompozit yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılır (Reddy vd., 2016). Epoksi gibi termosetlerde özellikle nemli ortamlarda nem emilmesi mukavemeti olumsuz yönde etkiler (H. Park vd., 2020). Reçinenin nem bariyerini geliştirmesinin nano parçacıklarla sağlanabildiği gözlemlenmiş ve bu şekilde malzemenin mekanik/termal/elektrik özelliklerinin artırıldığı (M. K. Hossain vd., 2011) gibi makaleler de belirtilmiştir (Mohammad K. Hossain vd., 2014).

3.1.1.2. Termoplastik matrisler

Akrilik, polipropilen, polietilen, polistiren, polikarbonat, alkid, PVC ve asetil gibi malzemeler örnek olarak verilebilir. Üretim aşamasında; ısıtılarak, yumuşatılır veya eritilir, daha sonra şekillendirilir, kaynak yapılır ve soğutulduğunda katılaşır. Geri

kazandırma sağlanarak, birden fazla ısıtılabilir veya soğutulabilir (Biron, 2014).
Avantajları ise;

- Bazı özellikler eklenmesi için ek olarak dolgu verilir.
- Kurutulma aşaması doğru yapılırsa gaz veya su buharı salmazlar.
- Isı ve basınç altında eriyik hale geçer.
- Geri dönüştürülebilir.
- Nem emmeye karşı direnç
- Termal kararlılığı yüksek
- Takviye malzemesine sıvı veya film olarak uygulanır.

Dezavantajları

- İlk reçine sistemi sıvı haldeyken termoplastik kompozitlerin termosetler'e göre daha yüksek ısı ve basınç uygulanarak işlenebilmesi bir dezavantajdır (Dogan & Arıkan, 2017).
- Termoplastik kompozitler yeniden şekillendirilebilir fakat termoset kompozit parçalar kürlendikten ve katılaştıktan geri dönüştürülemez (Dogan & Arıkan, 2017).
- Yapıştırma özelliği düşüktür.
- Mekanik özellikler, sıcaklık ve yükleme hızına bağlıdır.
- Sürünme dayanımı düşük,
- Sıcaklık arttığında kimyasal bağlar zayıflar.
- Aynı nedenle, sürünme ve gevşeme davranışları termosetlerdeki kadar iyi değildir.

3.1.1.3. Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri

Hand lay-up (El serimi)

Kumaşların üst üste serme işleminin elle yapılmasıdır (Töre, 2011). Elle serim işleminde lazer şablonlama kullanılmasına karşın, lamina kenar yerleşiminin çok kritik olmadığı durumda yapılabilir (Raji vd., 2019).

İlk olarak, polimerin yüzeye yapışmasını önlemek için; kalıp ayırıcı madde uygulanır (Kornmann vd., 2005). Daha sonra, ürünün pürüzsüz bir yüzeyini elde etmek için kalıp plakasının üstüne ve altına ince bir plastik levha koyulur. Dokuma takviye katmanları istenilen şekillerde kesilir ve kalıbın yüzeyine yerleştirilir. Reçine diğer bileşenlerle karıştırılır ve kalıba yerleştirilmiş olan takviye yüzeyine emdirilir ve fırça ile eşit bir şekilde yaydırılır (Kornmann vd., 2005). Daha sonra diğer keçeler önceki polimer tabakasının üzerine yerleştirilir ve sıkışmış hava kabarcıklarını ve fazla polimeri çıkarmak için bir merdane kullanılarak basınç uygulanır. Daha sonra kalıp kapatılır ve tek bir keçe elde etmek için basınca maruz bırakılır. Oda sıcaklığında kürlendikten sonra kalıp açılır ve dokuma kompozit kalıp yüzeyinden çıkarılır (Sreekumar vd., 2007).

Reçine karıştırma, laminat reçine içeriği ve laminatın kalitesi gibi takviye ve matrisi laminatlama becerileri çok önemlidir. Aşırı miktarda boşluk eklenerek laminatlar elde edilebilir. Reçinelerin daha düşük viskozitesi ayrıca yüzeye nüfuz etme eğilimlerinin arttığını gösterir. Elle çalışılabilmesi için reçinelerin viskozitesinin düşük olması gerekir. Yüksek olması durumunda seyrelticiler kullanılabilir fakat bununla doğan düşük mekanik/termal özellikler göz önüne alınmalıdır (Jamir vd., 2018).

Sıkıştırma kalıplama

Sıkıştırma kalıplama, termoset reçinenin yüksek basınç etkisi ve kimyasal reaksiyonla sertleşene kadar ısıtılmasından oluşur. Basınç altında reçine akarak, kalıp boşluğunun şeklini alır ve ardından istenen parça veya üründe sertleşir. Soğuma sonrası

istenen fiziksel duruma ve mukavemete ulaştığında kalıptan çıkarılır ve daha sonra oda koşullarında soğutulur. Fenolik (fenol-formaldehit), epoksi, polyester, vinilester, silikon ve alkidler yaygın kullanımına sahip reçinelerdir.

Sıkıştırma ve geçişli kalıplama genellikle termoset reçinelerle kullanılırlar. Termosetlerin enjeksiyon kalıplaması zordur ve yakın kontrol gerektirir. Herhangi bir erken polimerizasyon, enjeksiyon vidasını dondurabilir ve buna bağlı maliyetler artabilir. Enjeksiyon kalıplama, sıkıştırmadan çok daha karmaşık kalıplara uygulanabilir. Geçişli kalıplama yöntemine göre uzun döngü süreleri vardır. Kalıp büzülme durumu ise enjeksiyon kalıplamaya göre çok daha azdır (Tatara, 2017). Park vd. bu kompozit üretim tekniğini kullanmalarının, üretimin yararına olduğu; işçilik maliyetinin düşük, alev direnci ve elektrik akışının verimli olması, karmaşık şekil ve yapıların üretimi gibi birçok neden göstermişlerdir. Bunun yanında aynı zamanda, elle yatırmaya göre yüksek maliyetli kalıp ve daha fazla araç-gereç gerektirmesi, yüzey kusurları ve termosetlerdeki raf ömrünün kısa olması gibi bazı dezavantajlarından da söz etmişlerdir (C. H. Park & Lee, 2012). Lautenschläger vd. tabaka kalıplama ile üretimin, dökme kalıp bileşeni ile üretimine göre daha az yüzey kavitasyonları içerdiğini, çekme dayanımı ve kayma modülünün nispeten daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir (Lautenschläger vd., 2018). Sıkıştırma kalıplamada; zaman, sıcaklık ve basınç, üretimin kalitesini belirleyen üç önemli ana üretim parametreleri olduğu gözlemlenmiştir (Greene, 2021).

Enjeksiyon kalıplama – Reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama

Ürün geliştirme sürecinde karmaşık geometriler gerektiğinde tasarımcılar enjeksiyon kalıplamayı düşünme eğilimindedir. Enjeksiyon kalıplama oldukça basit bir prosedürdür, ancak reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama ve plastik enjeksiyon kalıplama dahil olmak üzere farklı kalıplama türleri vardır. İki yöntem birbirine çok benzese de belli farklılıkları vardır. Ana fark; reaksiyonlu enjeksiyon kalıplamanın, enjeksiyon işleminde, sertleşmek için kalıbın içinde bir kürlenme reaksiyonunun gerçekleşmesini gerektiren bir ısıyla sertleşen polimer kullanmasıdır. Bu eklenmezse, enjekte edilen malzeme sertleşmeyecek ve işlemi işe yaramaz hale getirecektir. Plastik enjeksiyon ise, kalıba

sıcak bir plastik enjekte edilir, daha sonra hızla soğutulur ve plastiğin bir kütleme maddesi olmadan sertleşmesine neden olur (*Reaction Injection Molding (RIM) Vs Plastic Injection Molding (PIM)*, 2015).

Reaksiyon enjeksiyon işleminin ilk aşamasında, polimerin iki elemanı birleştirilir ve ardından kalıba enjekte edilir. Daha sonra kalıbın sertleşmesi için oturmasına izin verilir. Fiberglas ve mika, bu kalıplama işleminde kullanılan en yaygın malzemelerden ikisidir. Bu yöntemle enjekte edilen malzemenin sıcak olması gerekmez. Bunun yerine, malzeme genellikle oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta yüksek basınçlı bir enjektör kullanılarak kalıba enjekte edilir. Daha sonra ürünü sertleştirmek için ısı gerektirir. Plastik enjeksiyon kalıplama, tam tersi yaklaşımı kullanır. Plastik topraklar, plastiği ısıtan ve sıvılaşmasına neden olan bir enjektöre düşürülür. Sıvı plastiğin oturmasını ve yapışmasını önlemek için sıvı plastik, hareketli, spiral (büyük boyutlu bir vidaya benzer) boyunca enjeksiyon tüpünden itilir. Sıcak, erimiş plastik, memeden kalıba zorlanır. Plastiği sertleştirmek için kalıba girdikten sonra hızla soğutulur. Malzeme sertleştikten sonra kalıptan çıkarılır ve işlem tekrarlanır.

Reaksiyonla kalıplama işleminin kullanılması, güçlü, ancak esnek bir malzeme üretir, ancak genellikle reaksiyonu kullanmak plastiğe göre daha maliyetlidir, çünkü başlangıç malzemesi plastiğin maliyetinden daha pahalıdır.

Tablo 2. İki yöntemin birbirleriyle karşılaştırılması (*INJECTION MOLDING VS REACTION INJECTION MOLDING (RIM)*, y.y.)

Enjeksiyon kalıplama	Reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama
Önemli ölçüde yüksek takım maliyetlerini karşılamak için genellikle yüksek üretim hacimleri gerekir	Hacim ve tasarım gereksinimlerine bağlı olarak çelik dışında daha ucuz kalıp malzemeleri kullanılabilir.
Daha yüksek çıktılarını sürdürmek için daha otomatikleştirilmiş bir süreç sağlar, daha düşük işçilik maliyetlerine yol açar	Hızlı prototipler veya küçük ve büyük üretim çalışmaları için ekonomik kurulum sağlanabilir
Termoplastikler eritilebilir ve yeniden kullanılabilir	Termosetler, daha hafif ağırlıkta bile daha yüksek sağlam fiziksel özellikler sunar
Tutarlı kalıplanmış parçalar elde etmek için tek tip duvar kalınlıkları korunmalıdır	Farklı duvar kalınlıklarına sahip son derece detaylı, karmaşık parçalar aynı kalıplanmış parçada tasarlanabilir

Pultrüzyon yöntemi

Genel olarak polimer matrisli kompozit yapılarda sabit bir kesit profili üretmek için kullanılır.

İşlemin öncüsü olarak görülen, 1950'lerin başında ABD'de W. Brandt Goldsworthy'nin polyester reçineleri'dir (Starr & Ketel, 2000). Diğer yöntemlere göre yine de üstünlüğünü korusa da, son yıllarda genel üretim seviyesi düşmüştür (Witten & Mathes, 2020).

Otoklav ile üretim

Vakum torbalamaya benzerdir. Kürleme esnasında, istenilen ısı ve basınç otoklav tarafından sağlanır. Bu işlem, belirli bir sırayı izleyerek prepreglerin bir kalıpta sıkıca istiflenmesini içerir. Polimer ile kalıp yüzeyi arasında yapışmayı önlemek için kalıbın yüzeyine bir ayırma jeli uygulanır. Sonrasında, katmanlar arasında olası tüm sıkışmış havayı çıkarmak için vakumlu torbalama yapılarak otoklava gönderilir. Bu ısı ve basınç içeren otoklav işlemi, homojenize dağılım ve iyi arayüzey yapışmasında yani kürlemede görev alır. Son olarak düzenek soğutulur ve kompozit bileşen kalıptan çıkarılır. Mühendislik parçaları, havacılık, askeri, deniz ve uzay araçları ile füzelerin imalatında yoğun şekilde kullanılmaktadır (Dhakal & Ismail, 2021)

Avantajları:

- Hem elyaf takviyeli termoset ve termoplastik polimer kompozitlere uygulanır.
- İyi arayüzey yapışması
- Reçinenin ve elyafın kontrolünün iyi olması
- Uygun ve yeterli elyaf ıslatma

- Katı homojen dağılımı iyi
- Yüksek mukavemet/ağırlık oranı vardır.
- Vakum torbalama ile birlikte boşluğun olmaması ve iyi arayüz bağlantısı

Dezavantajları

- Düşük üretim hızları
- Otoklavın boyutlarına göre işlem görülecek parçanın boyutları geçerli olabilir
- Kalifiye operatör gereklidir.
- Kompozit için pahalı bir yöntemdir.

3.1.2. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, polimer kompozitler gibi yanıcı değildir. Alüminyum ve alaşımları; düşük yoğunluk, iyi termal iletkenlik ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı matris olarak yaygın kullanımdadır. Alüminyumun yüksek termal genişleme katsayısı ve tribolojik yetersizlikleri, kompozit kullanımlarında takviyelerle bu yetersiz özellikleri iyileştirilebilir. Alüminyum dışında; magnezyum, titanyum ve bakır – çinko matrisli kompozitlerde geniş kullanımdadır (Wythers, 2017).

Elektrik devlerinden istenen yüksek termal iletkenlik ve düşük termal genişleme katsayısı sağlayan metal matrisli kompozitler, monolitik metal malzemelerin yeterli olmadığı yüksek genişleme katsayıları ve ağırlık gibi özellikler olduğu için tercih edilir. Bu uygulama için ayrıca seramiklerin (elmas, SiC ve BeO), yüksek termal iletkenliği ne kadar uygun görülse de; toksisite oranı yüksek olduğu gibi işlemesi de sertliklerinden dolayı zordur. Bu yüzden elektronik devre uygulamalarında en ideal seçim metal matrisli kompozitler olacaktır (Davim, 2014)

. Avantajları

- Alüminyum ve titanyum gibi düşük yoğunluklu metalleri güçlendirir, daha yüksek özgül mukavemet ve modülü verir.
- Grafit gibi düşük termal genleşme katsayılarına sahip liflerle takviye ederek daha düşük termal genleşme katsayıları ve yüksek sıcaklıklarda mukavemet gibi özelliklerin korunması.
- Polimer matrislilere göre daha yüksek elastik özellik, daha yüksek servis sıcaklığı, neme karşı duyarsızlık, daha yüksek elektrik ve termal iletkenlikler ve daha iyi aşınma, yorulma ve kusur dirençleri sağlar

Dezavantajları

- Polimer matrislilere göre daha yüksek işlem sıcaklıkları vardır ve daha yüksek yoğunlukludur.

3.1.3. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler, yüksek kırılma tokluğu, aşırı büyük hasarlara karşı direnç, yüksek mukavemet, hafif ağırlık ve düşük termal genleşme potansiyeline sahiptir ve yüksek korozyon direnci ile yüksek sıcaklığa dayanırlar. Gelenekselleşmiş mühendislik malzemelerine göre yüksek sıcaklıklara ve kararsız ortamlara karşı direnci yüksektir. Kendini tamir etme/iyileştirme yeteneği de çarpıcı özelliklerinden biridir (Low, 2014).

Seramikler, iyonik ve kovalent bağların ayrı ayrı veya ikisi ile bağlanmış şekilde oluşan metalik özellik göstermeyen inorganik malzeme tipidir. Yüksek ısının hakim olabildiği , içten yanmalı motorlar, havacılık, yüksek sıcaklıklı ön kenarlar ve kaplama yapımı, uçak motorları, karasal türbinler, roketler ve hipersonik füzeler gibi uygulamalarda kullanılan yaygın malzemelerdir.

Arayüzde, düşük mukavemetli olan mekanik veya kimyasal bağlama gerçekleşir. Mekanik bağlanma, fiberin matris tarafından kavranmasına yol açan artık gerilmelerden kaynaklanır (Lino Alves vd., 2016).

Avantajları

-Yüksek mukavemet, sertlik, seramikler için yüksek servis sıcaklığı limitleri

-Kimyasal inertlik ve düşük yoğunluk.

-Seramikler kendi içinde düşük kırılma tokluğu verdiği için, çekme veya darbe yüklemelerine karşı olumsuz sonuçlar verir. Bu yüzden seramiklerin silisyum karbür veya karbon gibi fiberlerle güçlendirilmesi, kompoziti; kademeli olarak bozarak, kırılma tokluklarını arttırır. Bu kombinasyon ile iyi mekanik özelliklerin ve aşırı servis sıcaklıklarının istendiği uygulamalar için idealdir.

3.2. Takviye Elemanlarına Göre Kompozitler

Bu bölümde sürekli fiber, kısa fiber, kırılmış hariç bazı takviyeler diğer bölümlerle kompozit yapı olarak olarak ele alınmıştır. Bu hariç kısımlarda genel bilgiler verilmiştir.

3.2.1. Kimyasal yapısına göre

A) Cam elyaf

Korozyon direnci, elektrik yalıtımı ve silika (yüksek sıcaklığa dayanım) özelliklerini ayrı ayrı taşıyan ve literatüre bunların İngilizce karşılığının baş harfleri ile kodlanmış bir şekilde tanıtılmışlardır (Chawla, 2001). 16 ve 17. Yüzyıllarda Venedik’li cam sanatkarları tarafından bilinçli bir şekilde üretilmiştir (Martynova & Cebulla, 2018).

Çok eski yıllardan beridir kullanılan bu elyaf, çarpılma, düşük kaynak mukavemeti, düşük yüzey kalitesi ve kolay aşınabilirliği dezavantajlarındandır (Shrivastava, 2018).

B) Karbon elyaf

Takviyesi ile malzemeye yüksek mukavemet sağlamasıyla, düşük ağırlık ve düşük termal genleşme özellik göstermesi başlıca üstün özelliklerindedir (Chaudhary vd., 2021). Isıl işlem ve kristalit yönelimine göre, çekme dayanımı 3500 MPa ve üzerine çıkabilen ve 2010 yılında PAN tipi karbon elyafların 21000 ton üretim kapasitesine çıktığı rapor edilmiştir (F. K. Wang, 2017).

C) Aramid elyaf

Aramid lifleri, 1960'larda geliştirilen ve ilk olarak 1970'lerde DuPont tarafından Kevlar® ticari adı altında pazarlanan gelişmiş kompozit takviyedir. Yüksek derecede toklukları ve hasar toleransları vardır ve lifleri kırıldığında, cam veya karbon liflerinde olduğu gibi gevrek çatlama ile bozulmazlar (Reis vd., 2012). Kevlar lifleri darbeye dayanım amaçlı yaygın şekilde üretilen bir takviyedir (Reis vd., 2012).

Aramidlerin mukavemeti, polimer zincirler, molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağlarından kaynaklanmaktadır (Shebanov vd., 2020).

Kevlar kompozitlerin ayrıca ticari endüstrilerde geniş bir uygulama alanı vardır. Bu uygulamalarda yegane amaç mukavemetiyle birlikte kompozit malzemeye hafiflik kazandırmaktır (Manero vd., 2015). Araştırmalara göre, aramid elyafların elektrostatik kuvvetlere karşı bazı dezavantajları gözlemlenmiştir. (Shebanov vd., 2020).

3.2.2. Geometrik yapısına göre

A) Fiber yapılı takviyeler

Darbe etkisine karşı dışlilerdeki korumayı sağlayan fiberlerin üretimi üç veya iki boyutlu düzeneklerle üretilir. Bu tip fiberler, normal fiberlere göre daha yüksek gerilme mukavemetine, gerilme modülüne ve daha düşük uzamaya sahiptir. Bu liflerin darbe etkisi sonucu enine yüklemeye dayanabilmesi için esnek olması gerekir (Chen, 2016).

B) Kısa fiber takviyeler

Bu tip lifler süreksizdir ve birkaç milimetreden daha kısadır. Kompozitlerde polimer matrislerle birlikte kullanımı yaygındır. İşleme kolaylıkları, düşük maliyet ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle otomobillerde ve iş makineleri gibi birçok farklı sektörde kullanımları vardır. Polimer matrisle yapılan kompozitleri genelde ekstrüzyonla birleştirme ve enjeksiyonla kalıplama ile yapılır. Sürekli elyaflarla üretilen kompozitlere göre üretimi daha kolay olduğundan toplu üretimleri çok ucuz ve hızlıdır. Kırpılmış fiberler de bu kategoriye girer (S. Fu vd., 2019).

C) Partikül

Takviye elemanı olan fiberin çeşitli nano boyutlarda kullanma şeklidir. Mukavemet bakımından fiber takviyelere göre daha az etki gösterse de, öncelikli olarak homojenizasyondan dolayı sertliğe katkı sağlar. Mukavemet ve toklukta da artışlar sağlayabilirler. Fiberlere göre avantajlı yönü kolay şekillendirilebilir ve az maliyetli olmalarıdır (Tanzi vd., 2019). Muhannad Al-Waily vd. Polimer matrisli kompozite, cam tozu katkısının elastisite modülünün ve plakanın doğal frekansının artmasına neden olduğunu gözlemlenmiştir (Alhumdany vd., 2015).

Parçacıkların sadece eklenmesi yeterli olmayıp enerji aktarımının iyi olması için arayüzde iyi bir yapışma/bağlanma gereklidir (Zare, 2015). Mantar tozunun termal özellik, akustik performans ve çatı elemanları için ısı yalıtımında iyi derecede etkinlik sağlanır (Merabti vd., 2021) Ferreira vd. yaptığı çalışmada dolgulu kompozitler, dolgunsuz matrislerden %12 daha çekme yorulma dayanımı yüksek, üç noktalı eğilme testinde ise daha düşük olmuştur (Ferreira vd., 2012).

D) Kırpılmış elyaf keçe/hasır

Deniz uygulamaları için bir polivinil asetat emülsiyonu veya bir toz bağlayıcı ile bir arada tutulan rastgele yönlendirilmiş kırpılmış cam keçelerden oluşan dokuma yapısını oluşturmayan bir malzemedir (*Other Fabrics*, 2019).

3.3. Elyaf Takviyeli Kompozitler

İleri kompozit uygulamaları ve otomobil endüstrileri gibi diğer uygulama alanlarında yüksek performanslı polimer lifler; hafiflik, esneklik, yüksek elastisite modülü ve iyi darbe direnci gibi özellikler gösterir (Qian vd., 2016). Örgüler, dokuma tekstiller gibi diğer yapılara kıyasla daha az elastik dirençle önemli ölçüde daha fazla tersine çevrilebilir uzama sağlar ve bu durum giyilebilir koruma elemanları için en idealidir (Dwivedi vd., 2016).

3.3.1. Nano katkılar

Nano kompozitlerin üretimi, nanokompoziti nano lif ile takviye ederek veya matrise nano malzeme eklenerek gerçekleştirilebilir. Nanofiberler, süreklilikleri ve ikili nano makro rolleri nedeniyle diğer nano takviyelere göre çeşitli avantajlar sunabilir.

Organik, seramik, oksit ve metalik nano lifler çeşitli nanolif örnekleridir (Nguyen vd., 2020).

Nano katkıları, en yaygın kullanımı olan karbon nanotüpler (KNT), ikiye ayrılır. Tek duvarlı karbon nanotüpler silindirik bir tüpe sarılmış tek bir grafen yüzeyinden oluşur. Karbon nanotüplerin tek boyutluluğu; iyi elektrik iletkenliği (bakır'a yaklaşık), iyi termal iletkenlik (elmas kadar) ve çeliğe göre 100 kat daha iyi mukavemet sağlaması anlamına gelir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin yapısı, yapının boyutsal özelliklere bağlı mukavemet ve iletiminde önemli rol oynayan eşmerkezli olarak iç içe tek duvarlı karbon nanotüpler olarak düşünülebilir. Çok duvarlı KNT'ler, takviyeleri çeşitli olabileceğinden özellikle sıkıştırma kuvvetlerinde tek duvarlı KNT'lere göre daha yüksek sertlik sunar (Karbhari & Love, 2012).

1991'de keşfedilen (Iijima, 1991) karbon nanotüpler (KNT'ler), Dünya çapında birçok bilim insanı tarafından performansları değerlendirilip, daha fazla geliştirebilme misyonunu başlatmışlardır (Soliman vd., 2012).

Nanotüplerin homojen bir dağılımının zorluğunu azaltan Cox modeli, takviye en-boy oranının etkisini 'Karışım Yasası' ile birleştirmiştir (Montazeri vd., 2010). Karbon nanotüpler 600 GPa çekme mukavemeti ve TPa'dan fazla özgül modülü ile en mukavemetli malzemelerden biridir (Lourie vd., 1998). Karbon nanotüp gibi nano katkıları matris ve fiber arayüzünü iyileştirdiği de gözlemlenir (Manero vd., 2015).

Ağırlıkça %0.5'lik çok duvarlı karbon nanotüpleri eklenmesiyle charpy testi sonrası, polimerin tokluğunu arttırdığı gözlemlenmiştir (Laurenzi vd., 2013). Karbon nanotüplerin karakterizasyonu yapıldığında mevcut çalışmalar bu nano takviyenin kompozite birçok özellik kazandırdığını veya olağan özellikleri daha fazla tetiklediğini göstermiştir (Warrier vd., 2010)(Davide Micheli vd., 2011)(Sadeghi vd., 2021). Yakın zamanda yapılan çalışmalar ile KNT takviyesi, tokluk ve hasar direnci gibi mekanik özellikleri iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Song vd., 2021). Mohan ve arkadaşları (Mohan vd., 2015), nano takviyenin homojen dağılmasına bağlı darbe mukavemetini etkilediğini gözlemlenmişlerdir.

Nano kaplamalar, nano kristal faz ve bir amorf fazdan oluşur ve hazırlanmasında en çok kullanılan teknik, reaktif magnetron püskürtme uygulamasıdır (Makhlouf, 2011). Ayrıca bu tip kaplama, film tabakası ilerlemesi esnasında termal bozunmadan kaynaklanan iki veya daha fazla fazda olabilen tek katmanlı kaplamalardır. Yüksek sertlik verir, çatlak büyümesi ve yayılmasına dirençlidir (Murty vd., 2019). Bazı çalışmalarda nanokompozitlerin büyük interfaz hacmi, darbe enerjisinin daha fazla dağılmasını sağladığını da göstermiştir (Hanif vd., 2015).

Dolguların önemi; mekanik, termal özellikleri geliştirmek ve buna bağlı enerji soğurma/emme performansını geliştirmektir. Dolgular da aynı şekilde karbon bazlı organik ve inorganik (sentetik) olarak ikiye ayrılır (Mrlik & AlMaadeed, 2015).

3.3.2. Hibrit Nano Kompozitler

Günümüzün teknolojilerinde bazı elektronik, biyoteknoloji ve optik sektörlerinde vazgeçilmez hale gelen 1-100 nm boyutlarıyla çalışılan malzemelerdir (Palanisamy vd., 2020). Üretimi; katı faz, sulu/termal solüsyon, jel solüsyonu, buhar kimyasal biriktirme ve mikrodalga etkili ıslak kimyasal gibi çeşitli sentez teknikleri ile olur. Sınıflandırılırsa; bir nano malzeme içeren iki kompozitten oluşan ikili, bir nano içeren üç kompozitten oluşan üçlü ve son olarak en az bir tane nano içeren çoklu kompozit, çoklu hibrit nano kompozit olmak üzere üçe ayrılır. Üretimi maliyetli olması en büyük dezavantajları olduğu tartışılmaz bir gerçektir. Başarılı sayılabilecek numune kompozit kombinasyonlarının toplu üretiminin ucuz yollarını aramak, kompozit alanında gelişmenin büyük adımları sayılabilir (Godara & Mahato, 2019).

3.3.3. Hibrit Kompozitler

Yüksek özgül mukavemet nedeniyle, karbon fiberler endüstri uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. Fakat karbon fiberlerin düşük tokluğu gibi bir dezavantaj, darbe yükü konusunda uygulama aralığını sınırlandırmıştır (J. Wang vd., 2019). Hibrit kompozitler bu durumda devreye girerek iki veya daha fazla farklı fiberin ortak bir

matriste birleştirilmesiyle elde edilir. Diğer takviyenin özelliklerini de içerir. Hibritleştirme işlemi, yapının istenen ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde oluşturulmasını sağlayabilir (B. Yang vd., 2015). Karbon ve Kevlar gibi yüksek mukavemetli lifleri kullanarak hibridizasyon (hibritleştirme işlemi) sürecinde; nüfuziyet direnci ve enerji emme kapasitesini artırabilir ve ekonomik lifler kullanmak maliyeti düşürebilir (Bulut vd., 2016).

Dehkordi ve arkadaşları, hibridizasyon yaklaşımını uygulayarak uygulamanın önemini belirtecek darbe testleri gerçekleştirmiştir (Tehrani Dehkordi vd., 2013). İki tip fiber içermesi maliyeti düşürüp, kullanılabilirliğini artırır. Pahalı olmayan cam elyaflar, nispeten pahalı karbon/grafit elyaflarla karışmak için kullanılabilir (Sevkat vd., 2010). Bu bağlamda hibrit olmayan grafit takviyeli kompozitte hasarın hibridizasyon ile yavaşlatılabileceği kanıtlanmıştır. Hibridizasyon sonucu oluşan yapının mekanik özelliğinde Hibrit Karışımların Lineer Kuralından (RoHM) sapmasına neden olan sinerjik bir etki gösterir (Carvalho vd., 2020).

3.4. Kompozitlerin Kullanım Alanları

Daha önce de bahsedildiği üzere mekanik özellik yönünden birçok malzemeye göre üstünlük sağlamasından dolayı üretim maliyetini karşılayabilecek birçok sektörde kullanım alanı bulunur. Bu alanları genişletip sıralarsak; havacılık, günümüzde kullandığımız birçok araç, otomotiv, transportasyon, çiftlik, inşaat, elektrik, denizcilik işlerinde ve korozif ortamlarda kullanılan ekipman ve sistematik konstrüksiyonlarda karşımıza çıkmaktadır (*Where are Composites Used*, y.y.). Detaylı olarak belirtilirse aşağıda;

Korozif ortamda: Oksijen gibi elementlerle temas halinde oluşabilecek ızgara, tanklar, fan, davlumbaz, pompalar ve yardımcı araçları gibi korozyona direnç gösteren konstrüksiyonların malzemesi olarak kullanılabilirler.

Rüzgar türbinlerinde bulunan döner kanatlar, jeneratör ekipmanı ve kapak gibi elektrik güvenlik elemanlarına kullanılırlar.

Otomobillerde: Tahrik mili, göstergeler, otomobil gövdesi, çamurluğu, tamponu ve şasisi örnek olabilir (Atira, y.y.).

3.5. Tabakalı Kompozitlerde Üretim Metodolojileri

3.5.1. Yanıt yüzey metodolojisi

Bir diğer deney tasarımı yöntemi olan, yanıt yüzey metodu kendi içinde birkaç teknikle optimizasyon işlemi yapılabilir. Bunlardan, merkezi kompozit tasarımı ve Box-Behnken tasarımı iki büyük faktöriyel tasarım teknikleridir (Kumari & Gupta, 2019).

Matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir harmanı olan deney tasarımı (Design of Experiment); istenen yanıtların, girdi değişkenleri veya faktörleri tarafından optimize edildiği bir problemin istatistiksel modellenmesi ve sistematik analizidir (Roncaglia vd., 2021). Ampirik model oluşturma için sayısız deney tasarımından (Design of Experiment) biri, öncü süreçlerin geliştirilmesi, yeni ürünlerin tasarım ve formülasyonunun iyileştirilmesi ve performanslarının optimize edilmesi için, yanıt yüzeyi metodolojisi belirleyici bir tekniktir (Ghelich vd., 2019). Olayların etkisinde olan parametreler bağımsız değişkenler, yanıtları ise bağımlı değişkenler olarak nitelendirilir (Koç & Kaymak Ertekin, 2010).

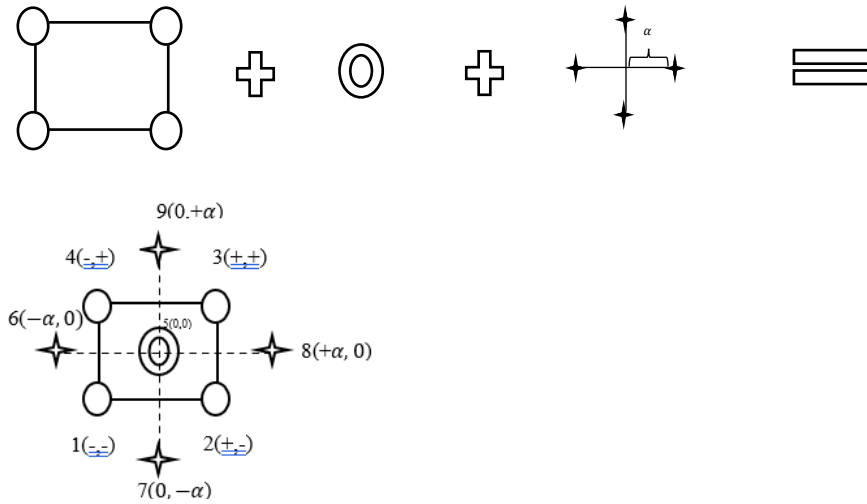
Yanıt yüzey metodolojisinin çeşitli hesap yöntemlerini birçok araştırmacı kullanarak bazı analiz (mekanik ve termal vs.) sonuçlarına varmışlardır (Hussain & Rangadu, 2011). Optimizasyon teknikleri, istatistiksel anlamda birçok farklı yöntemle oluşturulabilir. Fakat tez konusu gereği makine mühendisliğinde en çok kullanılan optimizasyon tekniği olarak yanıt yüzey metodolojisi açıklanmaya değer olarak belirlenmiştir.

3.5.1.1. Merkezi kompozit tasarımı

Box-Wilson ikinci dereceden merkezi kompozit tasarımı (Central Composite Design) ve sınırlı merkezi kompozit (Circumscribed Central Composite)

(NIST/SEMATECH *e-Handbook of Statistical Methods*, y.y.), Yanıt yüzey metodolojisinin etkili ve yaygın olarak kullanılan tasarımıdır.

Merkezi kompozit tasarımının 3 bileşeni sırasıyla; faktöriyel noktalar (+, -), merkez nokta (0) ve aksel noktalar veya yıldız noktalar ($+\alpha$ ve $-\alpha$) dır. α değeri, eksen ve merkez arası uzaklığı belirtir.



Tablo 3. Örnek deneyin kodlanmış değerleri

Deney numarası	1. Değişken (x_1)	2. Değişken (x_2)
1	-	-
2	+	-
3	+	+
4	-	+
5	0	0
6	$-\alpha$	0
7	0	$-\alpha$
8	$+\alpha$	0
9	0	$+\alpha$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2$$

y: yanıt; β_0 : Regresyon sabiti; x_1, x_2 : Değişkenler

Yukarda verilen denklem doğrusal olmayan bir regresyon denklemidir. Değişkenler, belirli genel aralık değeri kümesinden oluşturulur. Yukarıda gösterildiği gibi

2 bilinmeyenli 2. dereceden polinom meydana gelir ve sonunda aslında hata oranını (ϵ) belirten ekstra bir terim daha vardır

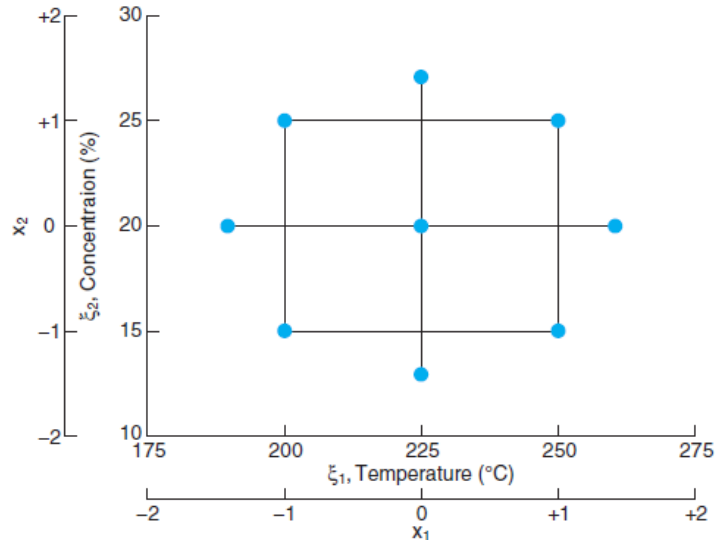
Tablo 4. Değişken sayısına göre bilinmeyen tablosu

Değişken sayısı n	2	3	4	5	6
Faktöriyel noktalar n_f	4	8	16	32	64
Eksenel noktalar n_e	4	6	8	10	12
Merkez deneyleri n_0	5	6	7	10	15
Toplam deney N	13	20	31	52	91
Merkeze uzaklık $\alpha = n_f^{0.25}$	1.414	1.682	2.000	2.378	2.828

Tablo 5. Merkezi kompozit tasarım tekniğini kimya endüstrisindeki örneği

Gözlem	Sıcaklık	Konsantrasyon	x_1	x_2	y
1	200	15	-1	-1	43
2	250	15	1	-1	78
3	200	25	-1	1	69
4	250	25	1	1	73
5	189.65	20	-1.414	0	48
6	260.35	20	1.414	0	78
7	225	12.93	0	-1.414	65
8	225	27.07	0	1.414	74
9	225	20	0	0	76
10	225	20	0	0	79
11	225	20	0	0	83
12	225	20	0	0	81

Değişken değerlerinin (sıcaklık ve konsantrasyon) belli bir aralıkta alındığı daha önceden belirtilmişti. İki bilinmeyenli ikinci dereceden bu polinom için bu belirtilen değerlere göre tasarım uzayının blok yapısı oluşturularak kodlanmış şekilde bir ara değer dizisi (-1,0,1,+ α ,- α) daha çıkartılarak koordinat sisteminde ilişkilendirildikten sonra tabloya eklenir. Standart olarak minitab da 13 gözlem yapılması uygun gözükten yöntem üstteki alınmış örnekte 12 gözlem için belirtilmiştir. Eksik olan yanıt verisi (y) hazır olarak sunulmuştur. Bu yanıtları laboratuvar koşullarında gerçekleştirmek mümkündür.



Şekil 2. Örnekteki sıcaklık ve konsantrasyonun kodlanmış halleri ile verilen iki boyutlu gösterimi

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \epsilon$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_1^2 & x_2^2 & x_1 * x_2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1.414 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1.414 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1.414 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 1.414 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} y = \begin{bmatrix} 43 \\ 78 \\ 69 \\ 73 \\ 48 \\ 76 \\ 65 \\ 74 \\ 76 \\ 79 \\ 83 \\ 81 \end{bmatrix}$$

Üstte belirtilen matrisin sadeleşmiş matris denklemi hali $X*b=y$ olur. b değerini çekmek için matriste çarpım veya bölüm kurallarına göre denklemin düzenlenmesi gerekir. Bu yüzden, X matrisinin transpozunu (X') alınarak eşitliği iki tarafına çarpım halinde verilir. Daha sonra b değeri yalnız bırakılarak yani eşitliği sol tarafındaki X ve X' matrisinin çarpımının tersi alınarak eşitliği sağ tarafında konumunu alır. Bu değer matriste çarpmanın yer değişme etkisi göz önüne alınarak; eşitliğin solundan sağına geçirilen 1. matris, Y VE X' matrisinin çarpımıyla oluşan 2. matris ile çarpılarak b için

denklem ($b = (X' * X)^{-1} * X' * y$) oluşturulur. İstenen b değeri yani beta katsayılarını sağlayarak polinomal regresyon denklemini bize verecektir.

$$X'X = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 & 8 & 8 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 12 & 4 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 4 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad X'y = \begin{bmatrix} 845 \\ 78.592 \\ 33.726 \\ 511 \\ 541 \\ -31 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 79.75 \\ 10.18 \\ 4.22 \\ -8.5 \\ -5.25 \\ -7.75 \end{bmatrix}$$

Kodlanmış değerle oluşan hata payı eklenmemiş denklem (\hat{y}) yukarıdaki sonuçlardan;

$$\hat{y} = 79.75 + 10.18x_1 + 4.22x_2 - 8.5x_1^2 - 5.25x_2^2 - 7.75x_1x_2$$

Doğal değişkenlerle oluşturulmuş denklemi oluşturmak için; x_1 ve x_2 kodlanmış değerleri yerine sırasıyla sıcaklık (T) ve konsantrasyon (K) gerçek değişkenleri matriste yerini alarak yeniden yukardaki işlemler tekrarlanır.

Doğal değişkenlerle oluşturulmuş denklem:

$$\hat{y} = -1080.22 + 7.7671 * T + 23.1932K - 0.0136T^2 - 0.2100K^2 - 0.0620T * K$$

Box – Wilson'dan sonra istatistikçiler merkezi kompozit tasarımın ideal yapısı için kriterleri, özellikle blok başına merkez nokta sayısı ve eksenel seviyelerin (yıldız noktaları) ne kadar uzağa gitmesi gerektiğini araştırmışlardır.

Merkezi kompozit tasarımı, uyumsuzluk testinde yeterli miktarda bilgi elde etmek için güvenilir bir eğrilik tahmini ile birlikte rasyonelleştirilmiş tasarım noktaları sayısı kullanılarak bir dizi değerlendirmeye, özel değişkenlerini atamak için iyi bir seçenektir (Kattamuri & Sung, 2003). Gopalakannan ve arkadaşları (Gopalakannan & Senthilvelan, 2013), metal matrisli bir kompoziti geleneksel olmayan elektro erozyonla talaş kaldırma yöntemi kullanarak bu yöntemle (CCD) 4 faktör için 3 seviyede 30 deney gerçekleştirmişlerdir.

Raja ve diğeri (Satheesh Raja & Manisekar, 2016), merkezi kompozit tasarımı ile dolgu maddesi ve matris arasındaki ara yüzey bağlarının optimizasyonunun yapılması, tabakalar arası kesme mukavemeti, yorulma ve korozyon direnci gibi özelliklerin iyileştirilmesini amaçlamışlardır.

Merkezi kompozit tasarımını kullanan örnek bir çalışmada, kompozit üretiminin belli bir aşamasındaki bir kimyasal bileşimde karışıklığı önlemek için karışım konsantrasyonunu optimize etmeye de yardımcıdır (H. Wang vd., 2019). Diler vd. yüzdelik olarak hacim oranı, mikrometre biriminden matris parçacık boyutu ve takviye parçacık boyutu olan üç faktörü kullanarak 20 adet numune üretmeyi planlamıştır ve çıkan sonuçların tahmin edilmiş sonuçlara çok yakın olduğu gözlemlenmiştir (Diler & Ipek, 2013).

3.5.2. Genetik algoritma

Makine mühendisliği alanında malzeme bilimi ve üretim uygulamalarında çoklu problemleri çözmek için tasarlanmış genetik algoritmalar kullanılabilir. Genetik algoritma, birçok tepe noktasını paralel olarak araştıran, buna bağlı yerel minimum yakalama olasılığını azaltan çok yönlü bir algoritmadır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözer (Bhoskar vd., 2015)

3.5.3. Taguchi tekniği

Deney tasarımı yöntemlerinden biri olan (Elsanabary vd., 2015), Taguchi Metodu'nda optimizasyon; kontrol faktörlerinin en ideal seviyelerinin bulunmasıdır. En iyi seviyelerini belirlemek için yapılan deneyler, Ortogonal Diziler'e dayalıdır. Temel amacı, kaynakların (malzeme ve süre) deneyler'de kullanılması gereken miktarının minimuma yaklaştırılmasıdır (*INTRODUCTION TO TAGUCHI METHOD*, y.y.).

Taguchi yöntemi, işleme kalitesini iyileştirebildiği, deney sayısını azaltabildiği ve kalite artırıcı optimizasyon ihtiyacı doğan endüstrilerde yaygın olarak kullanılır.

Taguchi yöntemi, diğer optimizasyon yaklaşımlarına entegre edilmesiyle verimliliği arttırılabilir (Fei vd., 2013).

4. MATERYAL VE METOT

4.1 Materyal

Aramid Fiber Kumaş

Aromatik poliamidin kısaltılması şeklinde yazılan fiber kumaş; düşük yoğunluk, yüksek mukavemet gibi avantajlarının yanında; yüksek maliyet ve yapışma yetersizlikleri dezavantajları olarak sayılabilir (Nunes & Silva, 2016). Kişisel ve balistik korunma, spor endüstrisi, ulaşım, iletişim ve gündelik hayatta birçok uygulamada karşımıza çıkmaktadır.

Çalışmada; Kevlar 29 CT736 ürün kodlu ve balistik para-aramid olan, 410 gr/m² bölgesel yoğunluklu, basket tipi 2x2 örgülü, 0.62 mm kalınlıklı ve 127 şer tane çözü ve atkı iplik sayısı vardır. Ağırlığı, 140g/m² genişliği, 150cm dir. Kuru halde ultraviyole direnci düşüktür, uzun vadede neme karşı hassastır. Bu nedenle uzun süreli depolama için kuru ve karanlık bir ortam sağlanmalıdır. Sıradan makaslarla kesilmesi zor olduğu için özel üretim makasların kullanılması gerekir. Kumaş, reçineler ile kullanıldıklarında kurşun geçirmez kapak ve levha imalatında standart üretimi olan bir malzeme haline gelmiştir. Bu ürünlerin yanı sıra kuru koruyucu giysi takviyelerinin imalatında kullanılır. Aramid kumaş, dost kimya Ltd. Şti. den temin edilmiştir.

Tablo 6. Kullanılan Kevlar 29 malzemenin yapı ve mekanik özellikleri

Nesne	Özellikleri	Standart
Malzeme	Twaron® 1680 dtex Type 2040	UNI 9275:1988
Kumaş yapısı	12,7 x 12,7 ± 0,3	UNI EN 1049- 2:1996
Bölgesel ağırlık	410 g/m ² ± 4 %	UNI EN 12127:1999
Kumaş kalınlığı	620 µm ± 15 %	UNI EN ISO 5084:1998
Örgü	Düz Sepet 2/2	UNI 8099:1980
Çekme dayanımı	Atkı> 3100 N/cm Örgü> 3320 N/cm	UNI EN ISO 13934- 1:2000

Vinilester Polives 701

Polyester ve epoksi reçinelerin iyi yönlerini alan bir reçine olarak görülür. Yakıt ve buhar içeren kimyasallara karşı korozyon direnci için üretilip, geliştirilmiştir. (Wypych, 2016). Yapı olarak Bisfenol – A epoksi bazlı bir reçinedir. Hem poliesterin hem de epoksinin iyi özelliklerini almış olan bu reçine; poliesterden kolay işlenebilmeyi, epoksiden yüksek mukavemet özelliklerini almıştır. Suyu az geçirme özelliği olarak poliester reçinelere göre daha üstündür. Vinilester reçine, Poliya A.Ş'den temin edilmiştir.

Tablo 7. Polives 701 reçinenin mekanik özellikleri

Özellik	Değer
Vizkozite	400-500 cps
Çekme dayanımı	80 MPa
Kopma - uzama	%5
Eğilme dayanımı	160 MPa
Sertlik	35 Barcol

Karbon nanotüp

Çok duvarlı ve tek duvarlı nanotüp olmak üzere ikiye ayrılır. Çapları 3 ila 30 nm arasında değişen, birkaç cm uzayabilen silindir görünümlü nano nesnelere benzetilen yapısı, dış çapının daha küçük olması ve rijitliği ile tek duvarlıya göre ayırt edici özelliklerindedir (Kukovecz vd., 2013). Çok duvarlı karbon nanotüpler: Tek duvarlılara göre çok daha karmaşık yapıları vardır. İkidene, sınırsız üst limite kadar oluşturulabilen bir dizi duvardır (Abdallah vd., 2020). Nanotüplerin sayısı en az 3 ve 20 nin üzerinde olabilir. Tek duvarlı karbon nanotüpler; olağanüstü elektriksel, termal ve mekanik özelliklere sahiptir. Karbon nanotüp, EGE Nanotek Ltd. Şti' den temin edilmiştir.

Tablo 8. Çok duvarlı karbon nanotüp'ün mekanik ve elektriksel özellikleri

Özellikler	Değer
Safılık	%92
Yoğunluk	2.4 g/cm ³
Dış çap	8-10 nm
İç çap	5-15 nm
Elektrik iletkenliği	98 S/cm

Zirkonya

Zirkonyum elementinin oksijen ile tepkimeye girmesi sonucu oluşur. Biyoyumumluluğu yüksek, termal iletkenliği düşük, çatlak direnci ve seramik malzemeler arasında oda sıcaklığında en iyi dayanıma sahip olan kimyasal bileşiktir (*Zirconium Dioxide (Zirconia): Properties, Production and Applications*, y.y.). Zirkonya nano tozu, EGE Nanotek Ltd. Şti' den temin edilmiştir.

Tablo 9. Çalışmada kullanılan zirkonya tozunun özellikleri

Özellikler	Değer
Boyutu	20 nm
Safılık	%99.8
Morfoloji	Küresel
Yüzey alanı	20-60 m ² /g
Yoğunluk	5.89 g/cm ³

4.2. Üretim Metodu

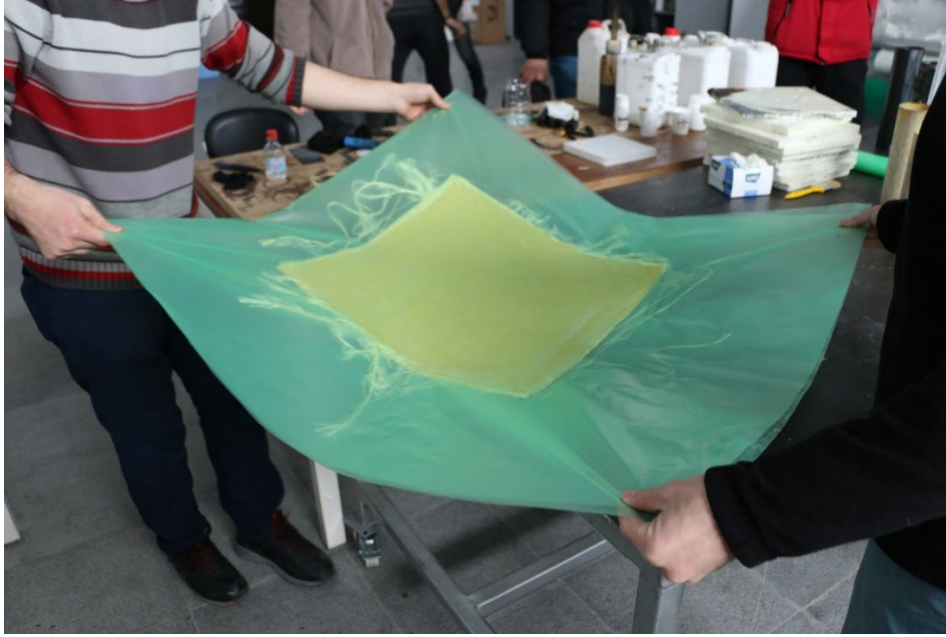
Aramid kumaş, 400 mm x 400 mm ebatlarında özel makasla kesilmiştir. Yeni üretim vinilester reçine sertleştirici ve hızlandırıcısı hazırlanmış el yatırma için hazırlanmıştır. Sertleştirici ağırlıkça %0.2 miktarında hızlandırıcı olan %6 kobalt ağırlıkça %0.02 miktarlarında hazırlanmıştır. Vakum naylonu üzerine altı kat gelecek şekilde nano katkısız olarak kumaş serilmiş ve her kat arasına sertleştirici ve hızlandırıcı katılmış olan kobalt, rulo fırça ile uygulanarak emdirilmiştir. Daha önce ön deneme yapılarak altı kat kumaş için, kumaşlar tam olarak ıslatacak şekilde reçine ile çalışma yapılmış ve kumaşları tam ıslatan miktar 280 g olarak tespit edilmiştir. Rulo fırça ile sertleştiricili ve hızlandırıcılı yapılan işlem sırasında; vinilester reçinenin herhangi bir şekilde jelleşmesini önlemek için, atölyedeki hava akımları kapatılmış ve 20 °C de (ortam sıcaklığı) çalışma yapılmıştır. Uygulama bittikten sonra, malzeme bir vakum torbası içine alınıp, -0.6 Bar vakum altında sıcak pres altına alınmış, daha önceden 30 °C a ısıtılan pres, malzeme konulduktan sonra 70 °C ye çıkarılmış ve üzerine 5 Bar basınç uygulanarak 2 saat 70 °C sıcaklıkta külemeye bırakılmış daha sonra pres kapatılarak 24 saat doğal soğumaya bırakılmıştır. Presten çıkarılan numune temizlenerek su jeti ile ASTM D-7136 standardına göre 100 mm x 150 mm boyutlarında kesilerek deneye hazırlanmıştır. Katkısız numune böyle üretilmiştir.

Katkılı numunelere gelince, aynı işlemler yapılmakla beraber nano katkıları olan çok duvarlı karbon nanotüp ve Zirkonya malzemeleri ayrı ayrı mekanik ve ultrasonik karıştırma işlemlerinden geçirilmiştir. Önce karbon nanotüp çalışmada belirtilen oranlarda ve 15 dk mekanik karıştırıcı altında ve 10'ar dk lık iki periyot halinde ultrasonik

karıştırıcıda karıştırılmıştır. Ultrasonik karıştırıcıda malzemenin soğutulması gerekmiş ve malzeme 40 °C a kadar soğutulmuştur. Bu şekilde karbon nanotüp ün reçine içeresine homojen dağılması sağlanmıştır. Aynı işlemler karbon nanotüplü vinilester üstüne Zirkonya çalışmada belirtilen parametrelerde ilave edilerek önce yine mekanik karıştırıcıda 15 dk ve ultrasonik karıştırıcıda 2 periyot halinde 10'ar dk toplam 20 dk karıştırılarak ve soğutularak hazırlanmıştır. Daha sonra içine sertleştirici ve hızlandırıcı belli oranlarda ilave edilerek aramid kumaşı üzerine uygulanmıştır. Sıcak presleme işlemleri yukarda belirtildiği şekilde her nano parametreleri için numunelere ayrı ayrı uygulanmıştır. Su jeti işlemleri yapılarak nano katkılı numuneler elde edilmiş ve deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3. El yatırma işleminin uygulanması



Şekil 4. Numunenin vakum torbalanması

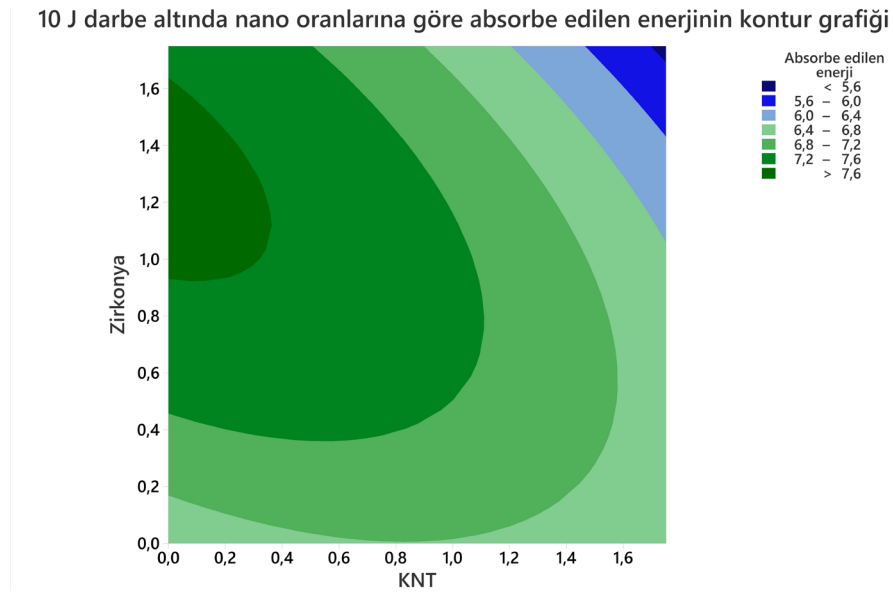
İlgi çalışma süresi boyunca numunelerin üretilmesi Merkezi Kompozit Tasarımı metodu ile Yanıt Yüzey Metodolojisi kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 10. 10 J darbe enerjisindeki malzeme oranlarına göre absorbe edilen enerjiler

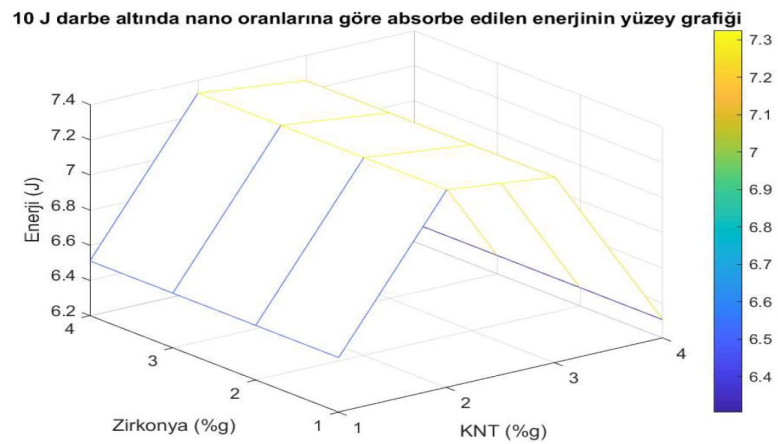
Numune No	Karbon Nanotüp Kütlece % Ağırlık	Zirkonya Kütlece % Ağırlık	Absorbe edilen enerji (J)
1	0,5	0,5	7,156
2	0	0	6,39
3	1,75	0	6,405
4	1,75	1,75	5,5
5	1,75	0,5	6,676
6	0,5	0	6,917
7	0	0,5	7,371

Tablo 10 üzerinde görüldüğü üzere yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak 7 adet numunenin 10 J darbe etkisi altındaki absorbe edilen enerji verisi tablo üzerinde kayıt altına alınmıştır.

$$\text{Absorbe edilen enerji} = 6.511 + (0.676 * \text{KNT}) + (1.835 * \text{Zirkonya}) - (0.405 * \text{KNT} * \text{KNT}) - (0.715 * \text{Zirkonya} * \text{Zirkonya}) - (0.646 * \text{KNT} * \text{Zirkonya})$$



Şekil 5. Nano oranlarına göre 10 J darbe altındaki kontur grafiği



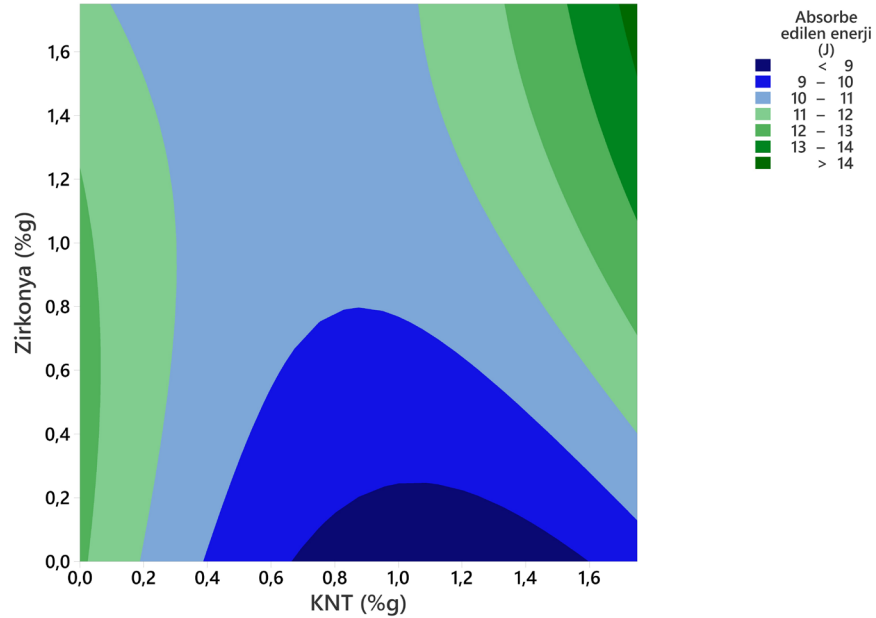
Şekil 6. Nano oranlarına göre 10 J darbe altında absorbe enerji yüzey grafiği

Tablo 11. 15 J darbe enerjisindeki malzeme oranlarına göre absorbe edilen enerjiler

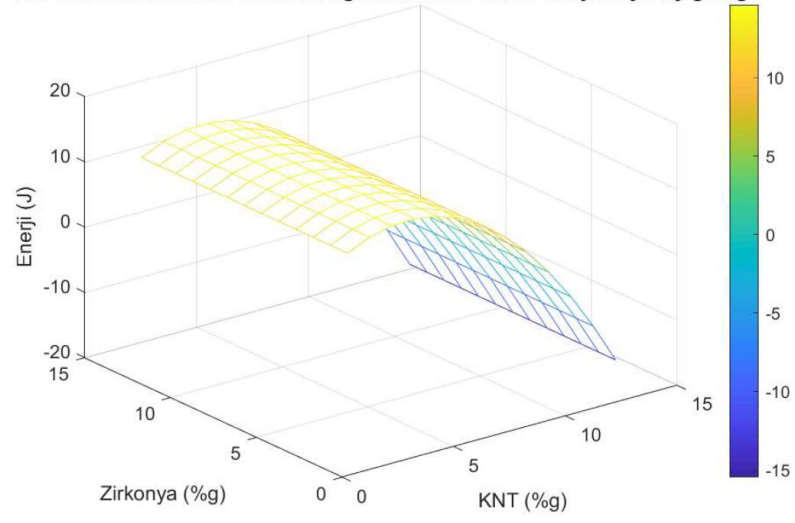
Numune No	Karbon Nanotüp Kütlece % Ağırlık	Zirkonya Kütlece % Ağırlık	Absorbe edilen enerji (J)
1	0,5	0,5	11,375
2	0	0	13,001
3	1,75	0	9,827
4	1,75	1,75	14,395
5	1,75	0,5	10,997
6	0,5	0	8,361
7	0	0,5	11,517

Bir diğer 7 adet aynı içerikli numunenin 15 J darbe etkisi altındaki absorbe edilen enerji verisi tablo üzerinde kayıt altına alınmıştır.

Absorbe edilen enerji (J)=12.16 – (6.74*KNT) + (0.74*Zirkonya) + (2.98*KNT*KNT) – (0.70 Zirkonya*Zirkonya) + (1.88*KNT*Zirkonya)

15 J darbe altında nano oranlarına göre absorbe edilen enerjinin kontur grafiği**Şekil 7.** Nano oranlarına göre 15 J darbe altındaki kontur grafiği

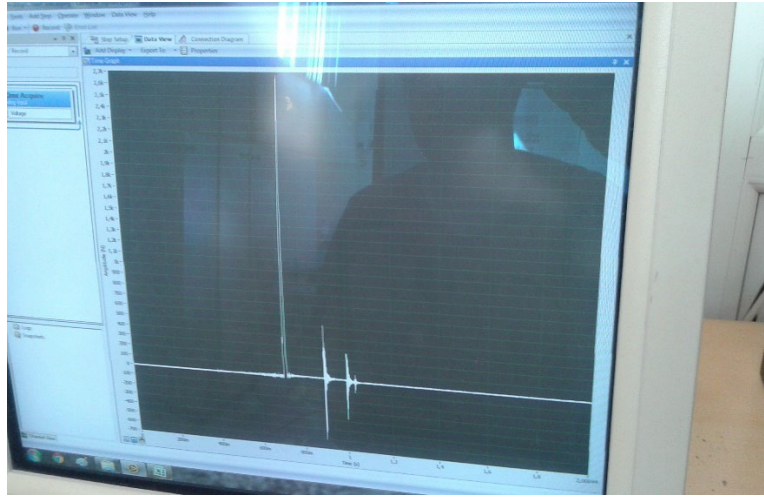
15 J darbe altında nano oranlarına göre absorbe edilen enerjinin yüzey grafiği



Şekil 8. Nano oranlarına göre 15 J darbe altında absorbe enerji yüzey grafiği

4.3. Düşük Hızlı Darbe Testi

Darbe testleri, yerçekimine karşı ağırlık düşürmeli bir şekilde, yatak sürtünmelerinin ihmal edilecek düzeyde olduğu bir düzenekte yapılmıştır. Çarpma tertibatı alt kesiti 12 mm çapında 5.6 kg kütleyle sahip bir yarım küre şeklindedir. Kuvvet değişimleri, milivolt birimi ile okuyan bir sensör ile algılanır. Daha sonra sinyaller bir PC'ye monte edilmiş veri toplama kartına iletilir. Çarpma tertibatı ile numuneler arasındaki etkileşim kuvvetinin zamana göre değişimleri, NI Labview Signal Express (Şekil 9.) yazılımı ile elde edilmiştir.

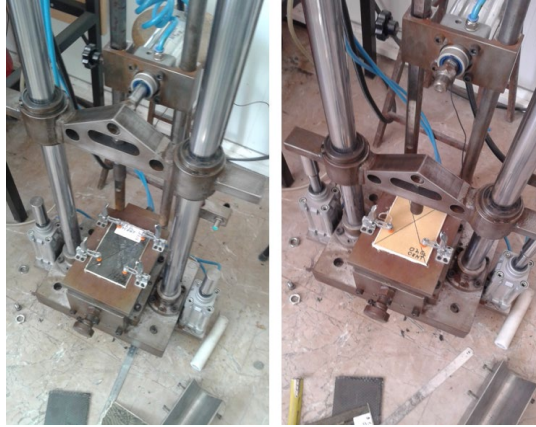


Şekil 9. Bilgisayar kullanılarak signal express yazılımının darbe testi cihazının darbe testi çıktısı



Şekil 10. a) Konum sensörü b) Sinyal şartlandırıcı ve veri toplayıcı

Veri toplama sisteminin örnekleme hızı 25 kHz dir. Testler, aynı içerikli üç numuneden ayrı ayrı olarak, 10 ve 15 m/s olmak üzere iki farklı hızda yedi katkı parametrelili numunelere uygulanarak toplamda 21 sonuç elde edilmiştir. Alınan kuvvet verileri ASTM D-7136 standardında açıklandığı gibi hesaplanmıştır. Hızlanmanın zamanın bir fonksiyonu olarak ilk entegrasyonu ile hız ve ikinci entegrasyon işlemi ile yer değiştirme değerleri elde edilmiştir (Gemi vd., 2018). Çarpma tertibatı numunelere çarptığında, çarpma tertibatının kinetik enerjisi kısmen malzemeye aktarılır ve çarpma tertibatının kalan kinetik enerjisi geri tepme enerjisi olarak geri alınır. Darbe test ünitesi ayrıca, ilk darbenin tamamlanmasından sonra çarpma tertibatını yakalamak için rebound mekanizmasına sahiptir.



Şekil 11. Numunelerin darbe testi cihazı üzerindeki konumları

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Üretilen hibrit nano takviyeli polimer matrisli aramid tabakalı kompozit malzeme düşük hızlı darbe testine tabi tutulmuştur. Hasar bölgeleri, gibi su jeti ile kesilerek (Şekil 12) eksenel ve radyal yönden incelenmiştir.

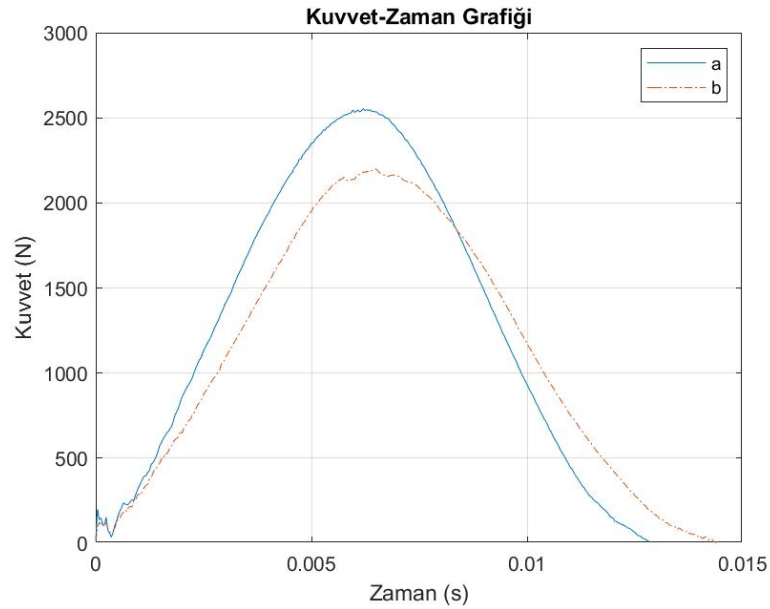


Şekil 12. Numunelerin hasar bölgesini boylam ekseninde su jeti ile kesimi

5.1. Düşük Hızlı Darbe Sonuçları

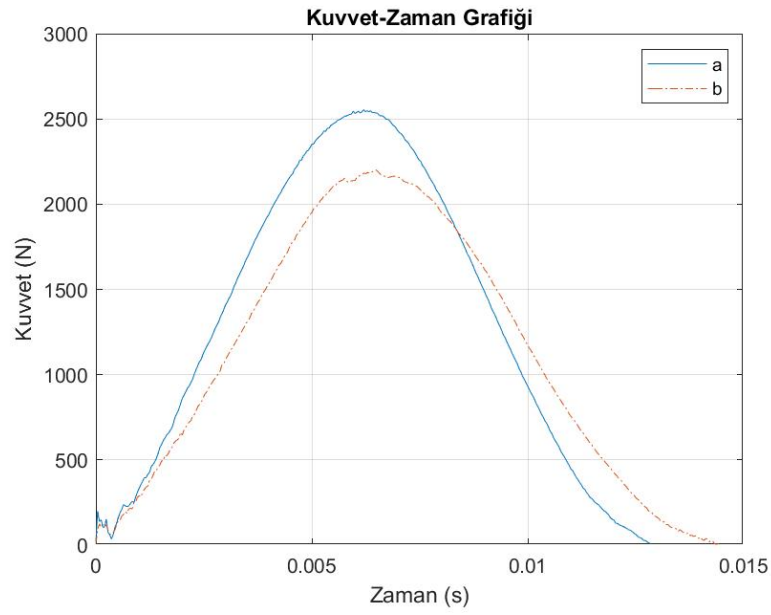
Bu bölümde, üretimi yapılan numuneleri daha iyi karşılaştırabilmek için KNT ve Zirkonya miktar parametreleri ile darbe enerjisi olarak üç farklı parametreye göre kategorilere ayırıp, daha sonra bir parametreyi sabit tutup diğer kombinasyonlar karşılaştırılmalı ve yorumlamalı bir şekilde sunulmuştur.

5.1.1 Kuvvet – zaman grafikleri



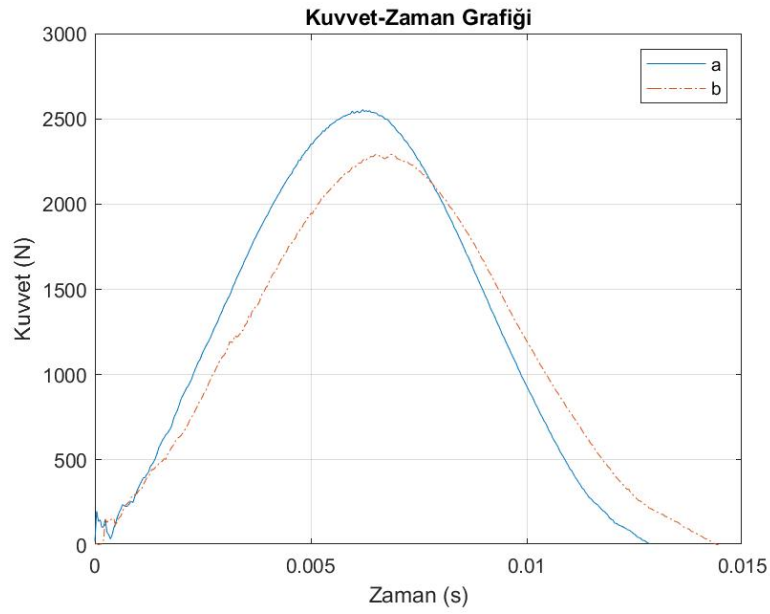
Şekil 13. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0 KNT %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

Zirkonya takviyesi malzemede kuvvetin temas süresini çok az miktarda arttırmıştır. Referans malzeme olan vinilester reçine matrisli, tabakalı aramid kompozit malzeme, yapısı gereği stabil, kuvvet uygulama esnasında herhangi bir matris ve fiber hasarlarına ani olarak uğramamış ancak %0.5 Zirkonya katkısıyla muhtemelen matris çatlaması şeklinde bir kuvvet sönümlemesini çok az miktarda gerçekleştirmiştir.



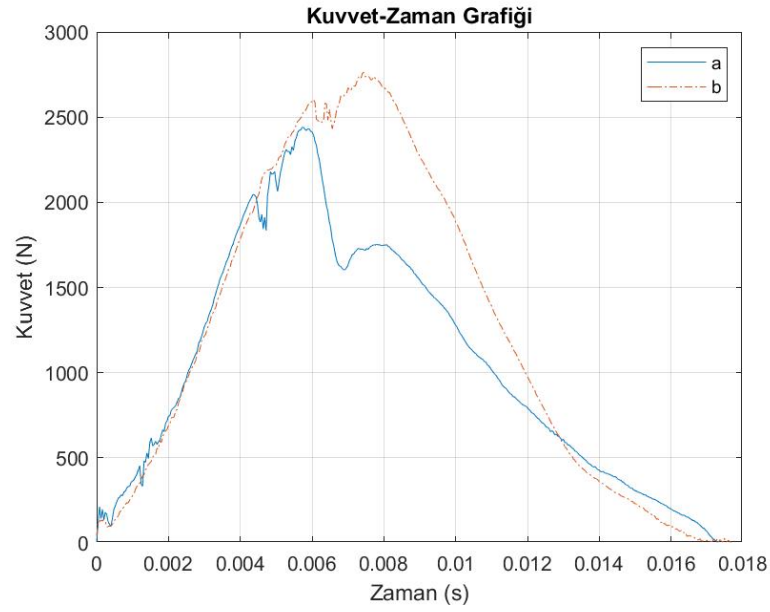
Şekil 14. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0 KNT %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

Enerji seviyesi 15 J a çıkartıldığında referans malzeme ani matris çatlaklarıyla kuvvet sönülemeye başlamış ve yüksek kuvvet değerlerinde malzemede fiber kırıkları oluşmuştur. %0.5 Zirkonya katkısı ile bu enerji seviyesinde malzeme daha stabil bir görünüm sergilemiş ve matris çatlakları ve matris ezilmesi yoluyla referans malzemeye göre daha yüksek kuvvetlerde hasara uğramıştır.



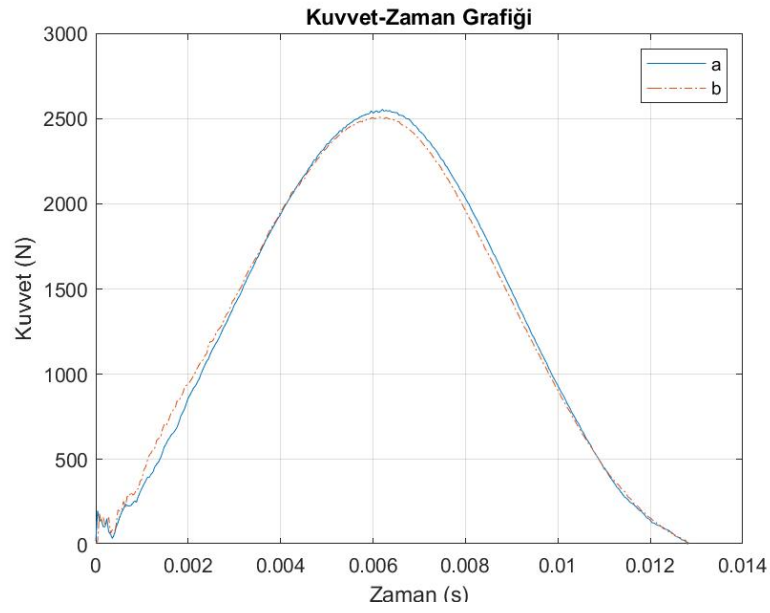
Şekil 15. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyesinde referans malzeme, stabil bir şekilde çok yüksek kuvvetlere dayanmış 0.5 KNT ilavesiyle kuvvet artışı gerçekleşmemiş ancak malzemede kısmi matris çatlakları yoluyla hasar gerçekleşmiştir.



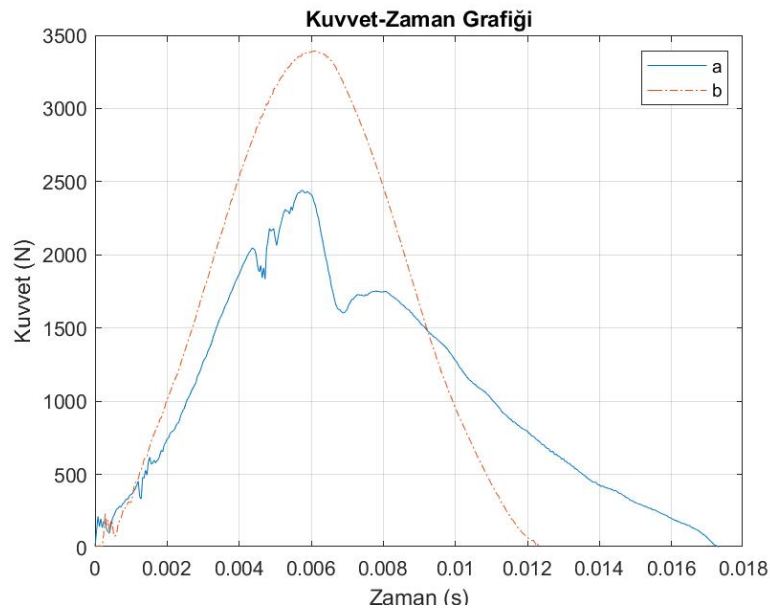
Şekil 16. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

Enerji seviyesi 15 J a çıkartıldığında referans malzeme, matris ve fiber kırıklarıyla birlikte hasara uğramamış ancak KNT ilavesiyle, hasar matris ezilmesi ve matris kırığı seviyesinde yüksek kuvvetlere dayanmış ve daha sonra hasar uğramıştır. Bu durumda %0.5 ilaveli KNT nin malzemenin kuvvet dayanımını arttırdığı görülmektedir.



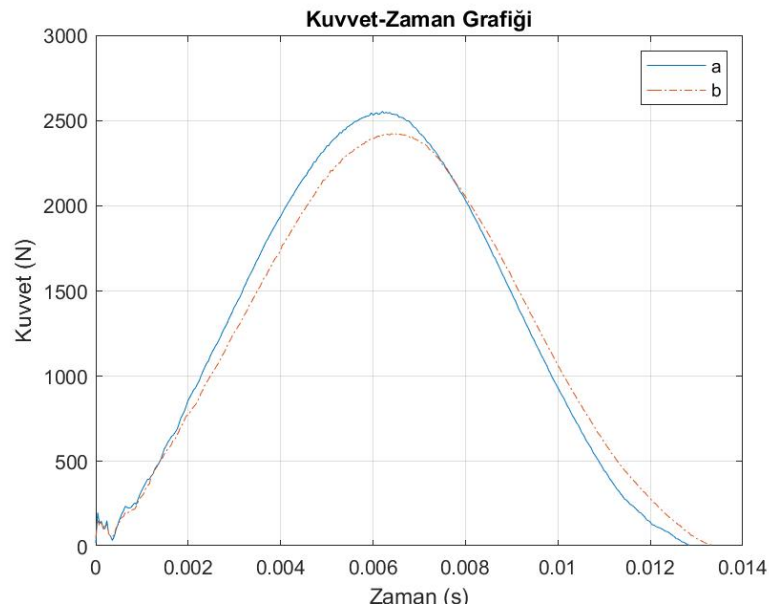
Şekil 17. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

Katkısız malzemedeki kuvvet dayanımı veya sönümlenmesi %1.75 KNT takviyeli malzemede düşük seviyelerde herhangi bir dayanım artışı göstermemektedir.



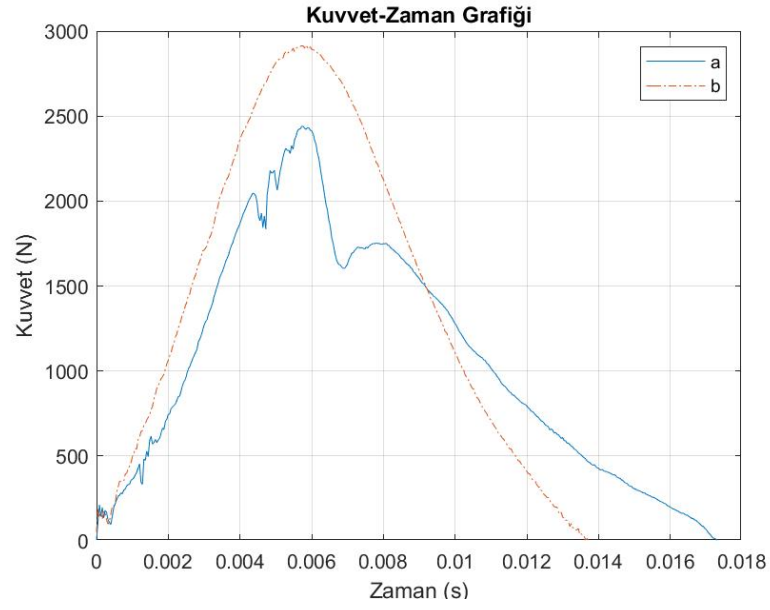
Şekil 18. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

KNT oranının %1.75 e çıkarılması durumunda ise katkısız malzemede matris ve fiber kırıklarının çok daha az ve geç olduğu ve malzeme mukavemetinin %30 civarında arttığı görülmektedir. Yükselen enerji seviyelerinde KNT oranlarının artışının malzeme mukavemetine olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır. KNT nin hangi oranda malzeme mukavemetini yükselteceği ayrı bir çalışma konusu olabilir.



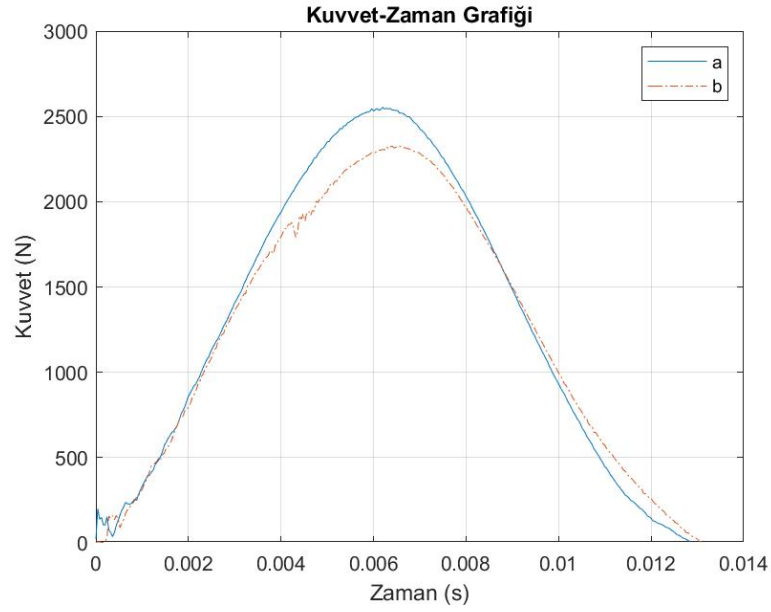
Şekil 19. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

Katkısız malzemenin 10 J enerji seviyesinde 2500 N luk bir kuvvet artışına dayanmış olmasına karşın ve %1.75 KNT oranının malzeme dayanımını %30 arttırdığı tespit edildiği halde malzemeye hibrit nano yani %0.5 Zirkonya katkısının malzeme mukavemetini düşürdüğü yukardaki grafiklerden anlaşılmıştır. Ancak enerji seviyesinin düşük olduğu burada göz önüne alınmalıdır.



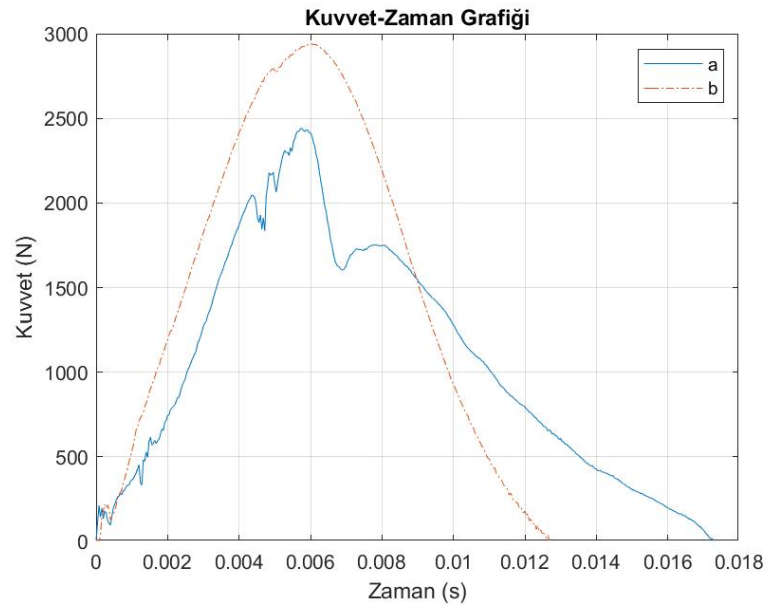
Şekil 20. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

Katkısız malzeme 15 J darbe enerjisinde kısmi matris çatlakları ve kırıklarıyla beraber ciddi fiber kırığıyla ani hasara uğramıştır. %1.75 KNT seviyesinde malzeme dayanımının yükseldiği ancak %0.5 Zirkonya katkısıyla malzemenin daha kısa sürede tahrip olduğu ve kısmen gevrekleştiği ve dayanımın katkısız malzemeye oranla yükseldiği fakat Zirkonya katkısı ile bir miktar düştüğü görülmektedir.



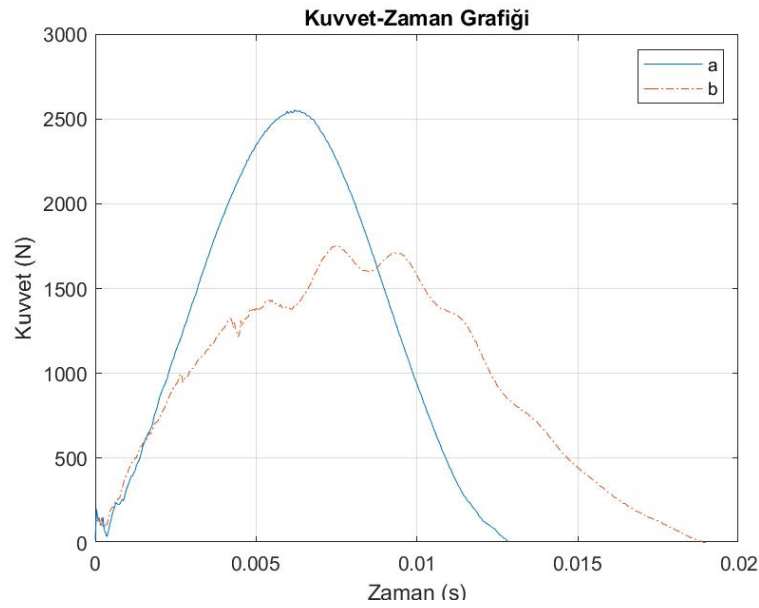
Şekil 21. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyesinde %0.5 KNT ve %0.5 Zirkonya katkısının malzemede daha az matris çatlaklarını oluşturduğu ve malzemeye kararlılık kattığı söylenebilir.



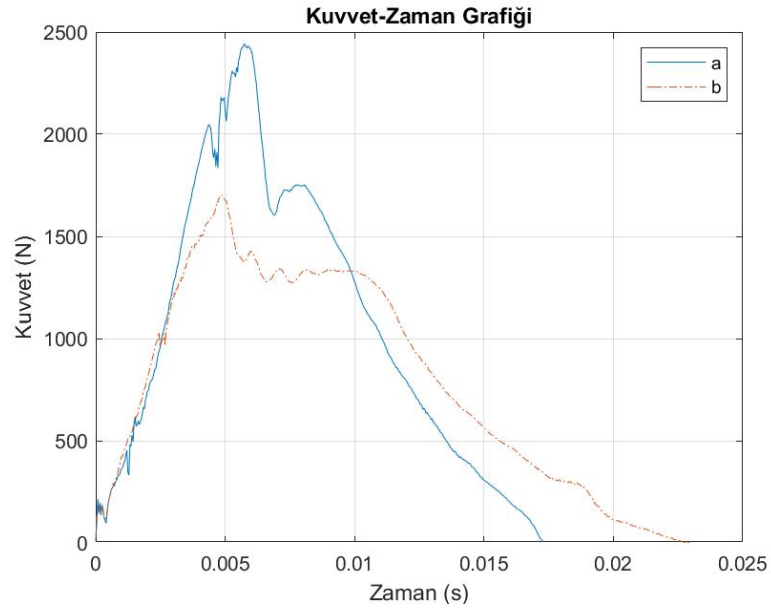
Şekil 22. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J enerji seviyesinde ise; %0.5 KNT katkısıyla malzeme mukavemetinin yükseldiği, 0.5 Zirkonya ile de malzemede matris ezilmesi ve çatlaklarının miktarca azaldığı ve daha stabil bir malzeme olduğu görülmektedir. Bu durumun daha yüksek enerji seviyelerinde devam edip etmeyeceği konusu belirsizdir.



Şekil 23. a) %0 KNT %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

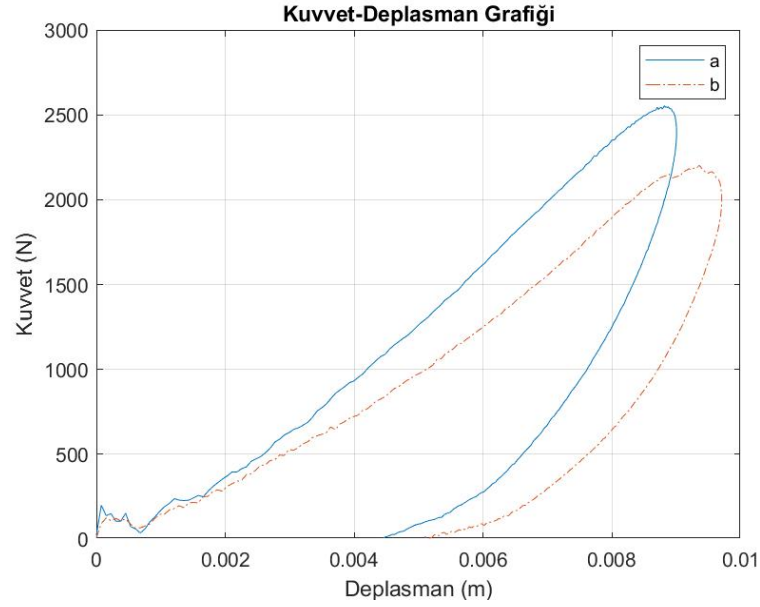
10 J enerji seviyesinde katkısız malzeme, daha stabil bir durum sergilerken %1.75 KNT %1.75 Zirkonya ilavesiyle malzemenin hem mukavemeti hem stabilitesi bozulmuş, malzemede matris çatlakları miktarca ve boyca artmış fakat malzeme kısmen sünekleşmiştir.



Şekil 24. a) %0 KNT %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

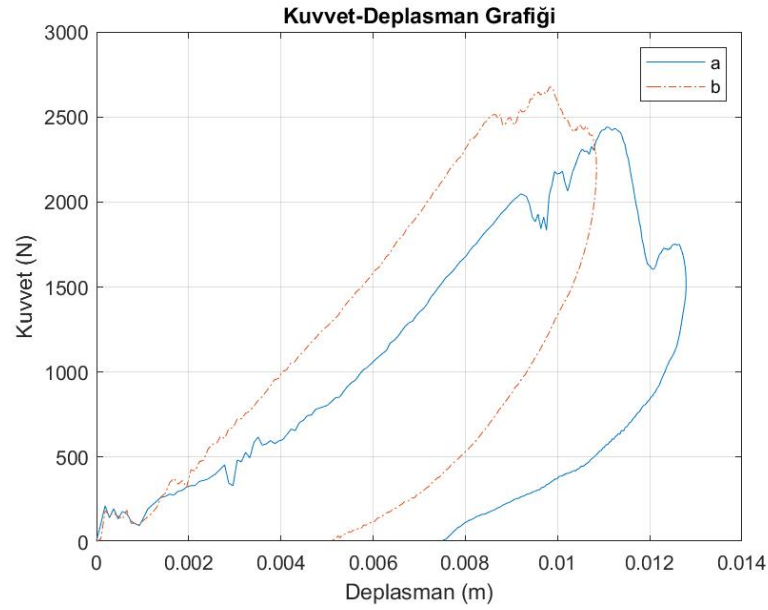
15 J enerji seviyesinde ise; katkısız malzemeye göre %1.75 KNT %1.75 Zirkonya katkılı malzeme matris çatlağı ve ezilmesi açısından daha stabil bir durum sergilemiş, mukavemeti artmamasına rağmen sünek yapı dolayısıyla malzeme; kuvvet sönümlenmesi daha geç zamanda oluşmuştur.

5.1.2. Kuvvet – deplasman grafikleri



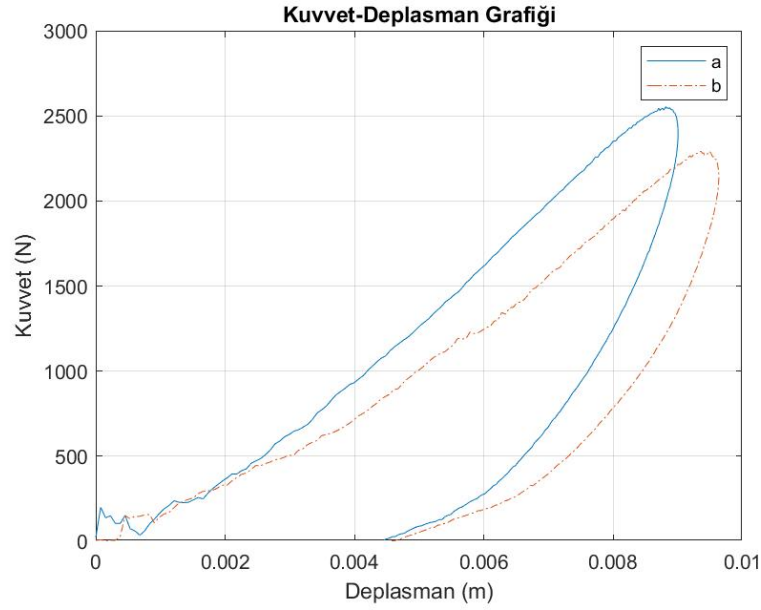
Şekil 25. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

Katkısız kompozit malzeme, 2500 N kuvvetlerinde muhtemelen matris kırık ve çatlakları olmaksızın fiber kırığı ile gevrek durum sergileyerek hasara uğramıştır. %0.5 Zirkonya ilavesi malzemede herhangi bir dayanım artışı meydana getirmeksizin sünek bir şekilde kısmi matris kırıkları başlangıcı, devamında fiber kırığı ile hasara uğramıştır. Zirkonyanın bu seviyedeki katkısı malzemede hafif bir şekilde süneklilik oluşturmuştur.



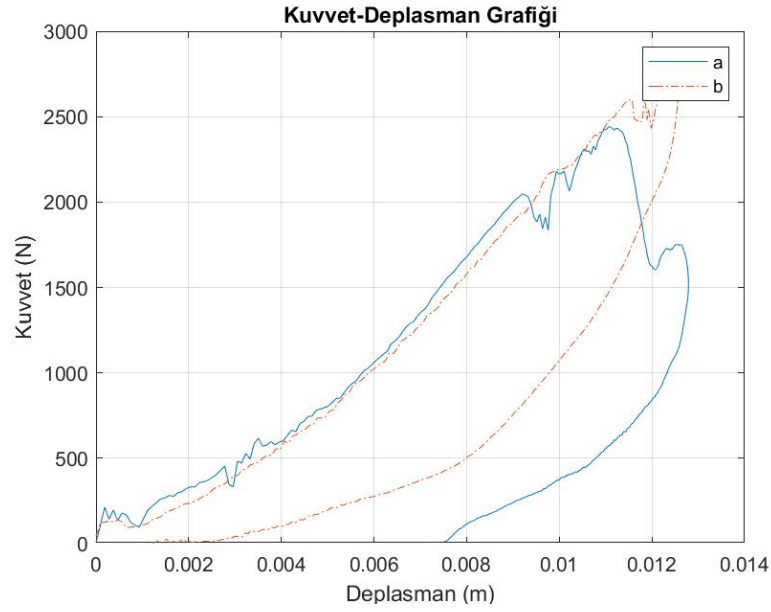
Şekil 26. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J seviyesinde ise; katkısız malzeme, ciddi matris ve matris kırılmaları kısmi fiber kırılmaları ile 2500 N kuvvete dayanmış ve ani fiber kırılmaları ile hasara uğramıştır. Bu durum katkısız malzemenin bu enerji seviyesinde, gevrek durum sergilediği sonucunu doğurmuştur. %0.5 Zirkonya katkısı ile malzemenin yüksek darbe enerjisine daha stabil cevap verdiği, fiber kırıklarının oluşmadığı, matris kırık periyodunun azalması dolayısıyla malzemenin mukavemetinde kısmi artış, ancak deplasmanının daha geç oluşması ve geri tepme enerjisinin daha erken oluştuğunu göstermektedir.



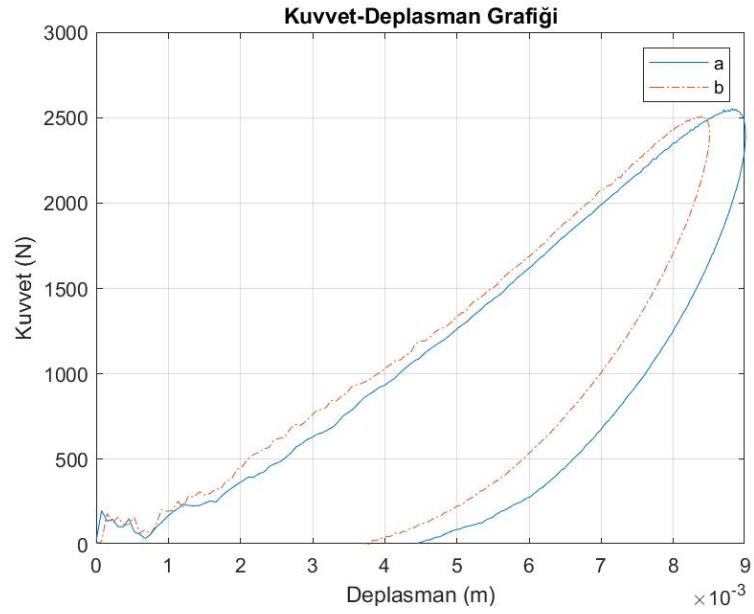
Şekil 27. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyesinde katkısız malzeme, stabil bir şekilde 2500 N luk kuvvetlerde 0.015 m deplasman oranlarına ulaşmış ve ani fiber kırıklarıyla hasara uğramıştır. Bu durum, gevrek bir yapı ile izah edilebilir. %0.5 KNT katkısıyla bu enerji seviyelerinde aynı deplasman oranlarında yüzeysel matris çatlakları oluşmuş ve malzemede kısmi mukavemet düşüşü meydana gelmiştir.



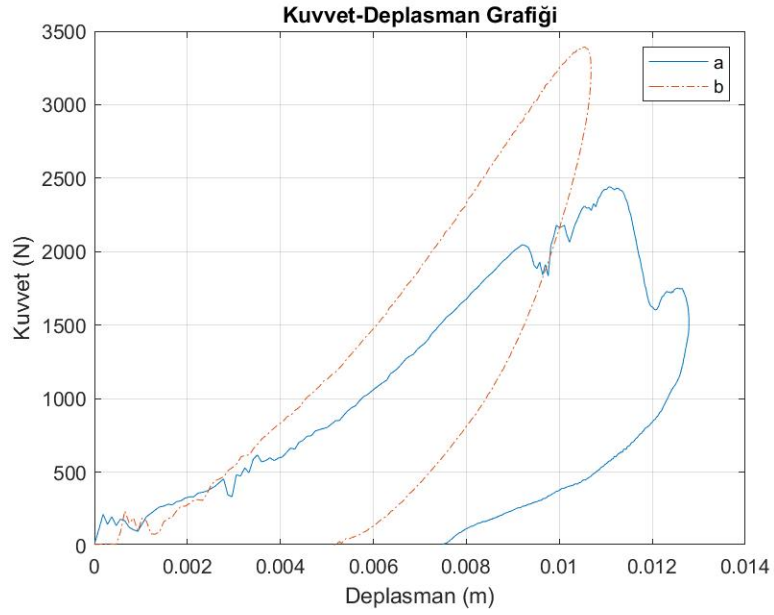
Şekil 28. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J enerji seviyesinde, malzeme mukavemeti katkısız ve katkılı malzemede artmış ancak katkısız malzemede ciddi matris ve fiber kırıkları oluşmuştur. %0.5 KNT ilavesi hem malzeme mukavemetini hem malzeme stabilizasyonunu arttırmış ve kalıcı deplasman düşük seviyelerde seyretmiştir. Bu durum gevrek yapı ile izah edilebilir.



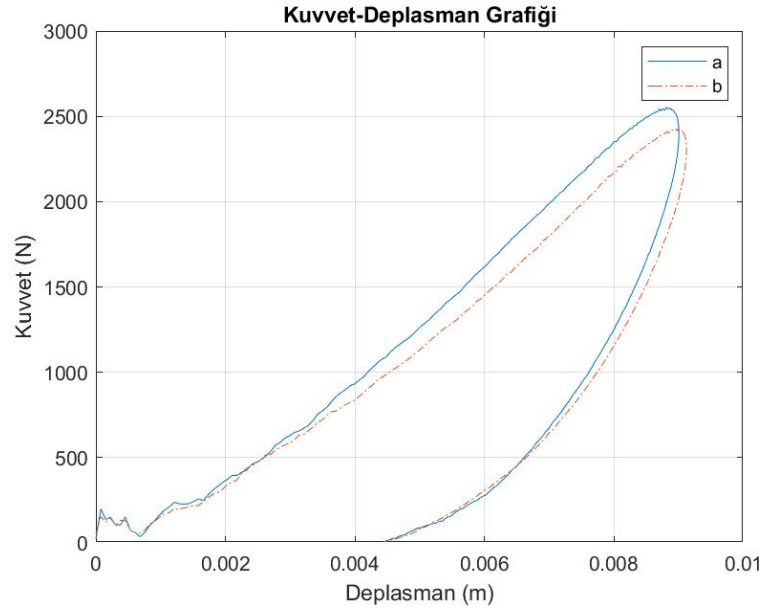
Şekil 29. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyelerinde, katkısız malzemeye göre %1.75 KNT ilavesi malzeme mukavemetinde belirgin bir mukavemet artışına ve kalıcı deplasman oranına yol açmamıştır.



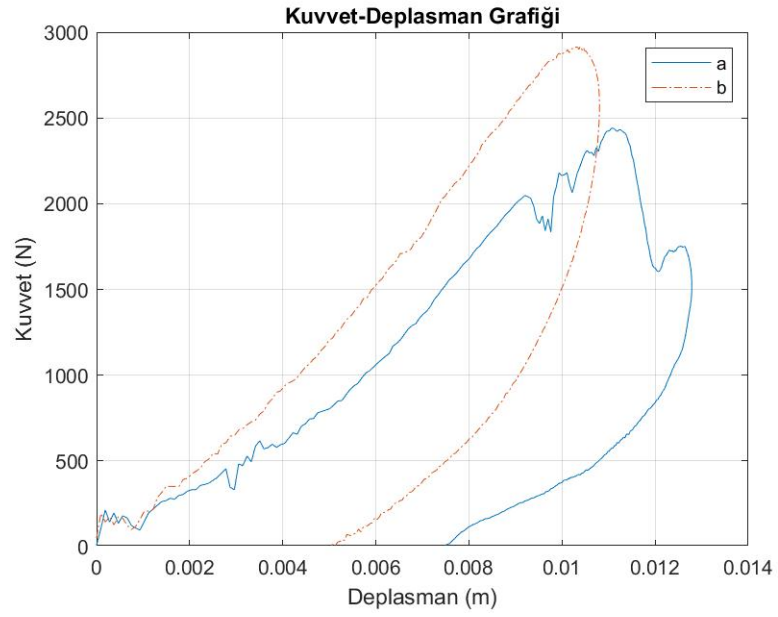
Şekil 30. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J enerji seviyelerinde ise; katkısız malzemede ciddi matris ve fiber kırıklarına rastlanmasına rağmen, %1.75 KNT katkılı malzemede dayanım oranları artmış ve malzeme gevrek bir yapı sergileyerek matris ve fiber kırığı olmaksızın hasara uğramış ve yüksek oranda kalıcı deplasman meydana gelmiştir.



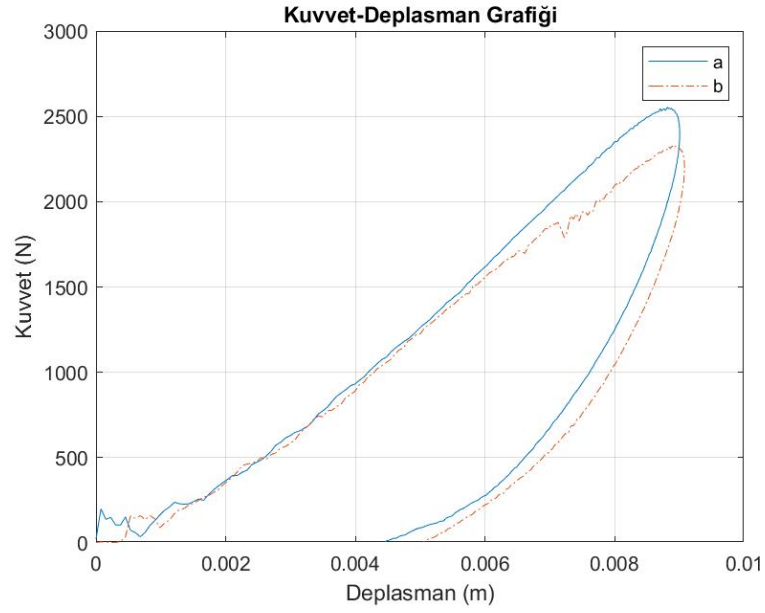
Şekil 31. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyesinde, katkısız malzemeye göre %1.75 KNT ve %0.5 Zirkonya katkılı malzeme, herhangi bir mukavemet ve deplasman artışı sergilememiş, gevrek kırılmaya maruz kalmıştır.



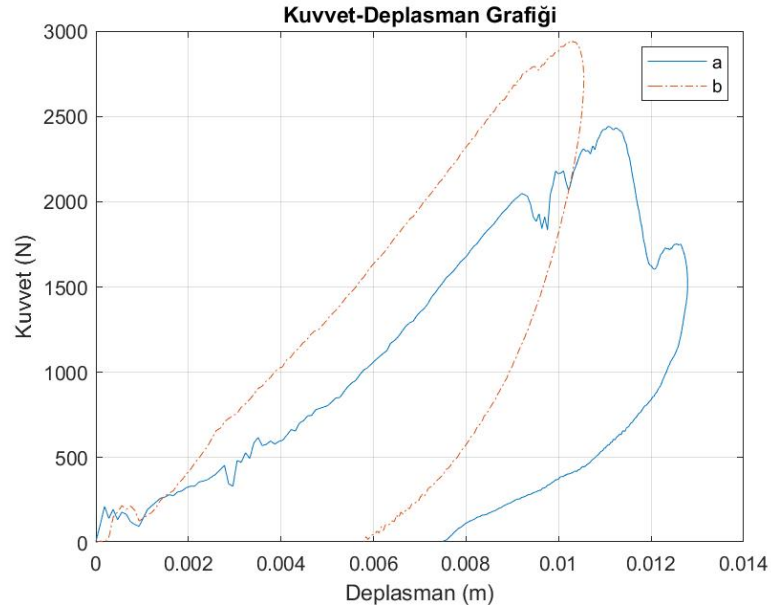
Şekil 32. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J enerji seviyesinde, malzeme ciddi oranda bir matris -fiber kırılmasına maruz kalmadan dayanım artışı ile beraber kalıcı deplasman oranı meydana getirerek, hasara uğramıştır.



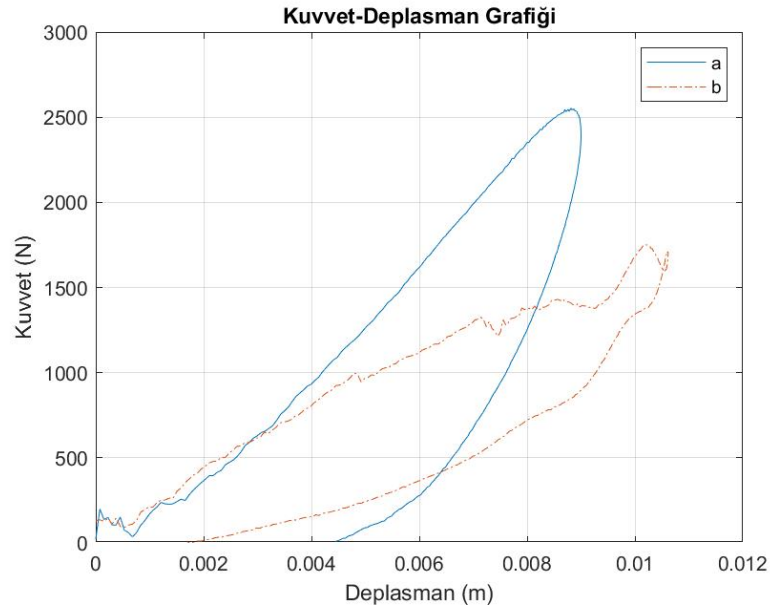
Şekil 33. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyesinde %0.5 KNT %0.5 Zirkonya katkılı malzeme, katkısız malzemeye göre herhangi bir mukavemet artışı ve kalıcı deplasman sergilememiştir. Bu enerji seviyelerinde malzemenin güçlü yapısından dolayı herhangi bir yoruma yapılamamıştır.



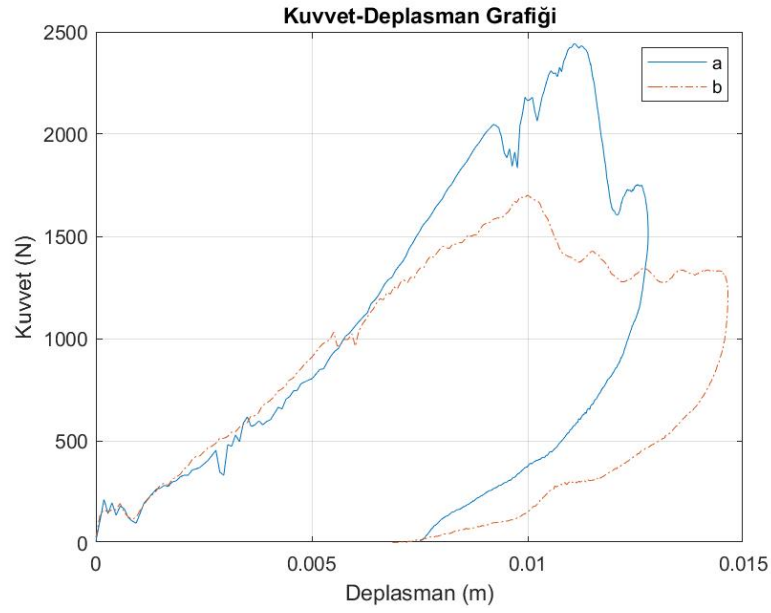
Şekil 34. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J enerji seviyesinde ise; Eşit orandaki nano katkıların malzemeyi daha stabil, daha gevrek ve daha mukavemetli hale getirdiği ve yüksek kalıcı deplasman oluşturduğu görölmektedir.



Şekil 35. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

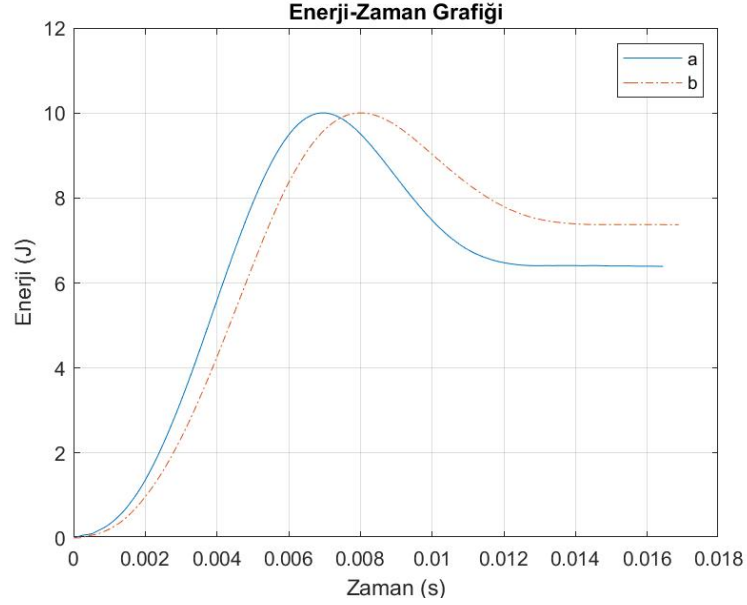
Bu enerji seviyelerinde, %1.75 KNT %1.75 Zirkonya katkısının, malzemede sünek bir yapı meydana getirdiği kuvvet artışlarıyla beraber ciddi matris ve fiber kırıklarının daha düşük kuvvetlerde gerçekleştiği görülmektedir. Malzemenin güçlü yapısından dolayı kalıcı deplasman oranı bu seviyedeki nano katkılarda daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir.



Şekil 36. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

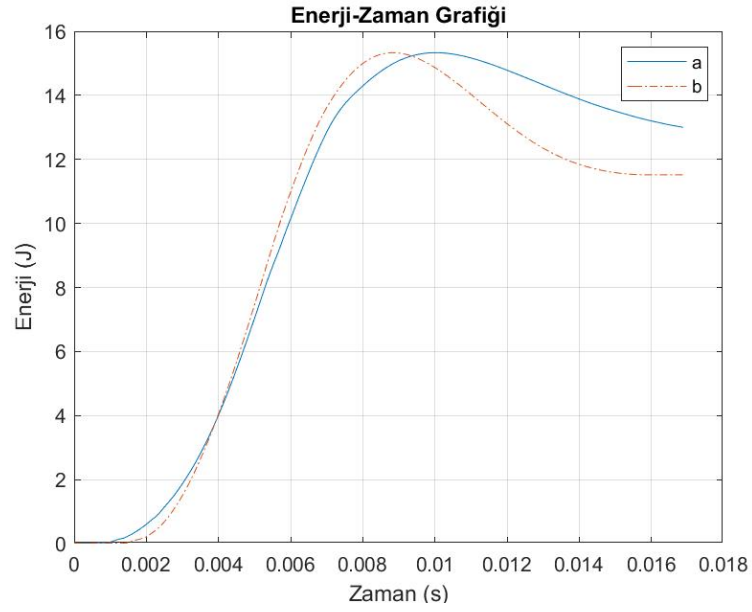
15 J enerji seviyesinde ise; %1.75 KNT %1.75 Zirkonya katkı oranlarında, malzemede kısmen yüzey matris ezilmesi ile herhangi bir mukavemet artışı olmaksızın malzeme, daha geniş deplasman periyodunda hasara uğramış ve kalıcı hasar, daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Buradan malzemenin sünek bir yapıya sahip olduğu sonucu çıkarılabilir.

5.1.3. Enerji – zaman grafikleri



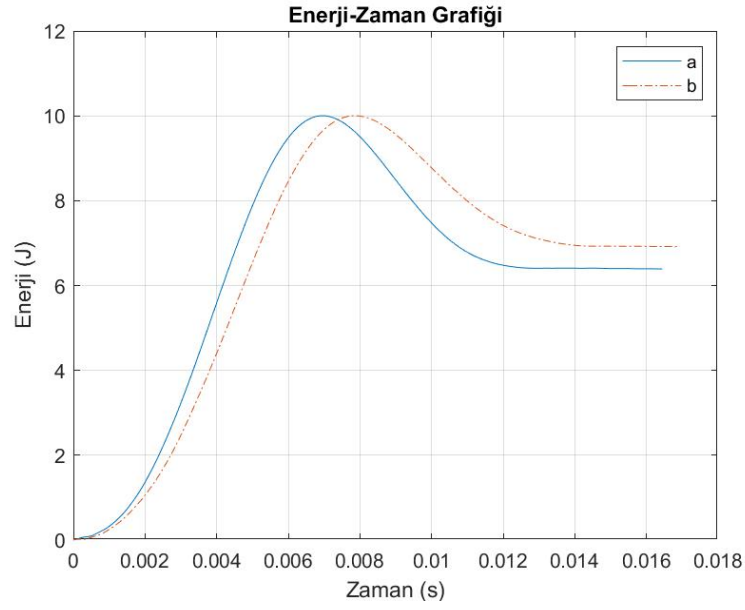
Şekil 37. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyesinde katkısız malzeme, enerjinin daha az bir kısmını aynı zaman diliminde sönmülemiş ve yaklaşık enerjinin %60 ını geri tepme enerjisi olarak geri vermiştir. %0.5 Zirkonya katkılı malzemede ise geri tepme enerjisi yine aynı zaman diliminde yükselmiştir. Buradan çıkarılan sonuç, malzemenin daha az hasara uğradığı ve Zirkonya katkısının malzemenin enerji sönmülemesini azaltmış olduğudur.



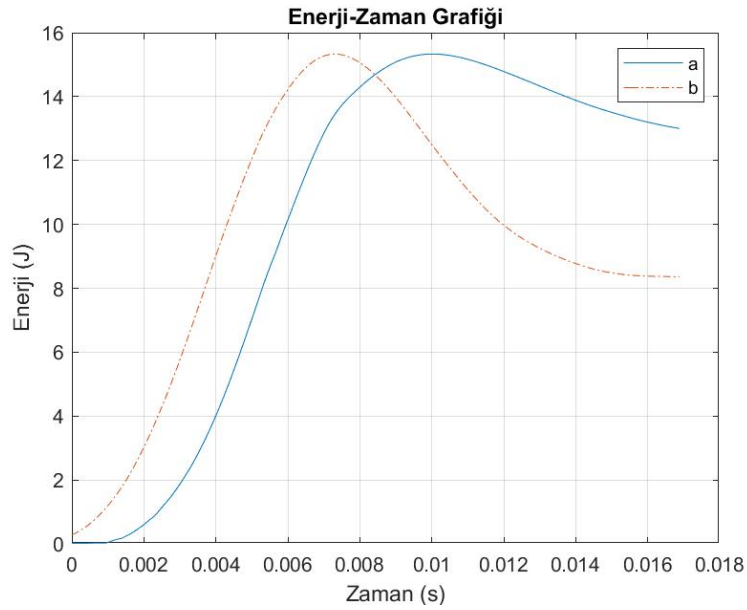
Şekil 38. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J enerji seviyesinde ise; enerji artışının etkisi açıkça görülmektedir. Katkısız malzemedeki geri dönüş enerji seviyesi yükselmiş, %0.5 Zirkonya katkılı malzemedeki geri dönüş enerjisi düşmüştür. Bu durum %0.5 Zirkonya katkısının enerji seviyesi arttıkça malzemenin enerji absorbe etme kabiliyetini arttırmasıyla izah edilebilir.



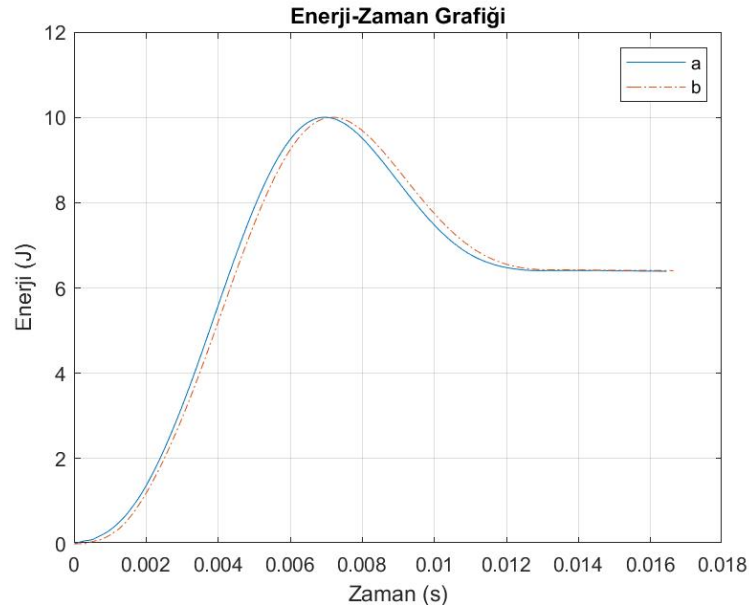
Şekil 39. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyesinde, %0.5 KNT katkısının geri tepme enerjisini arttırdığı, malzemeye güçlendirdiği sonucuna varılmaktadır.



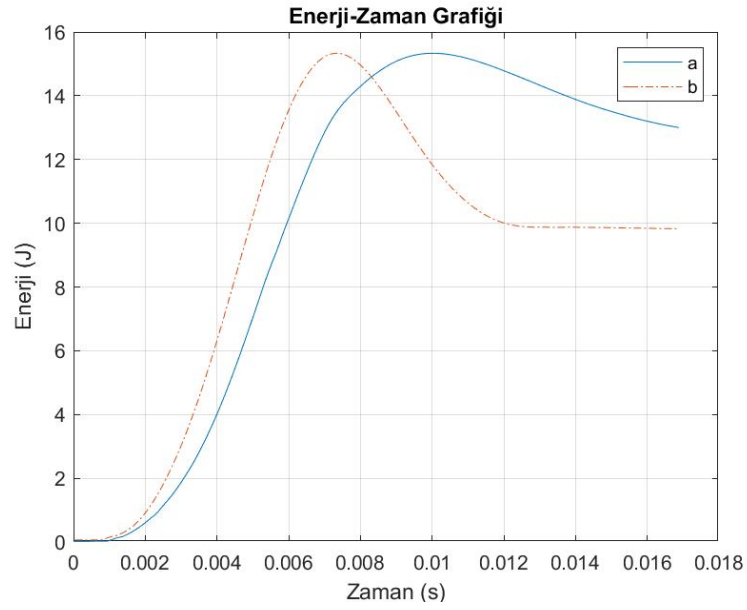
Şekil 40. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J enerji seviyesinde ise malzemenin %0.5 KNT katkısı etkisi ile geri tepme enerjisinin düştüğü ve daha yüksek oranda enerji sönümlendiği ve darbe dayanımının arttığı sonucuna varılabilir.



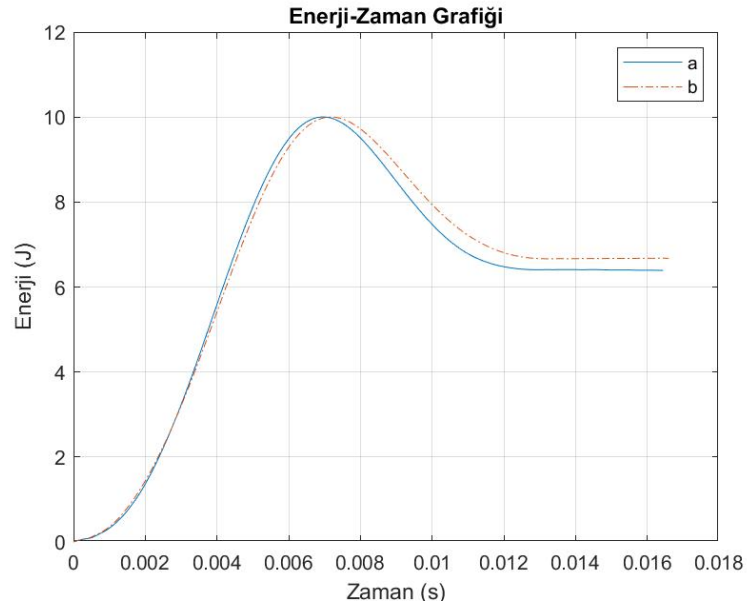
Şekil 41. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyesinde, %1.75 KNT oranının katkısız malzemeye göre herhangi bir enerji sönümleme kabiliyetinde bir değişim meydana getirmedeği görülmektedir. Bu durum 10 J enerji seviyesinin yetersizliğiyle açıklanabilir.



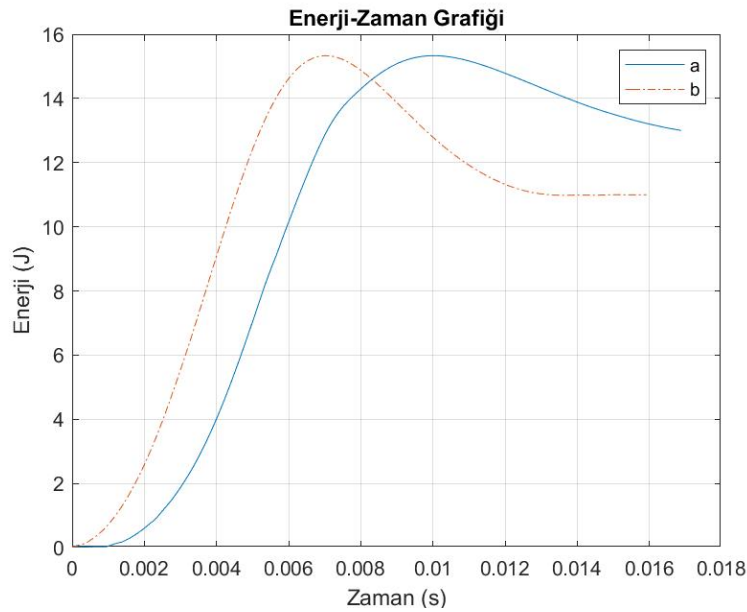
Şekil 42. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J enerji seviyesinde ise; %1.75 KNT oranının, malzemenin enerji sönümleme kabiliyetini arttırdığı ve gevrek yapıdan dolayı yüksek enerji geri dönüş seviyesini meydana getirdiği görülmektedir.



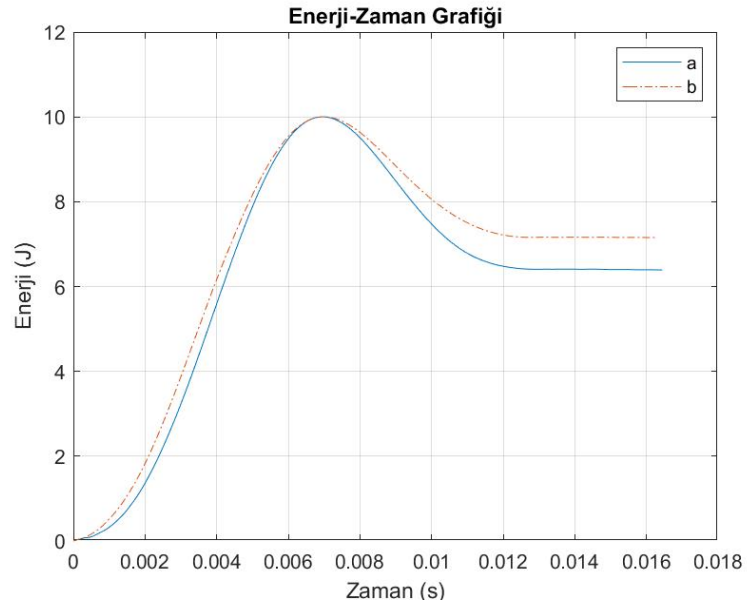
Şekil 43. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyesinde, %0.5 Zirkonya ilavesi ve %1.75 KNT oranının malzemenin enerji sönmleme kabiliyetinde ciddi bir değişiklik meydana getirmediği sonucuna varılmaktadır.



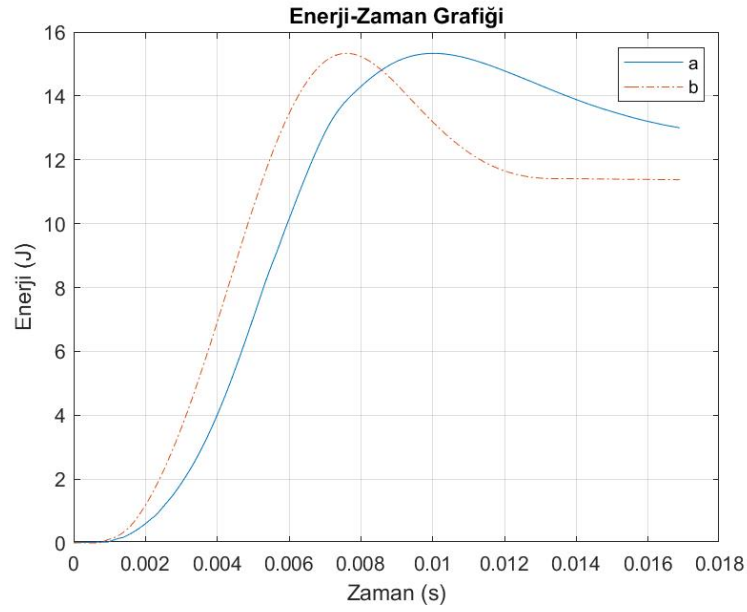
Şekil 44. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J enerji seviyesinde ise, %1.75 KNT %0.5 Zirkonya katkısının malzemenin darbe sönümlene kabiliyetini arttırdığı sonucuna varılmıştır.



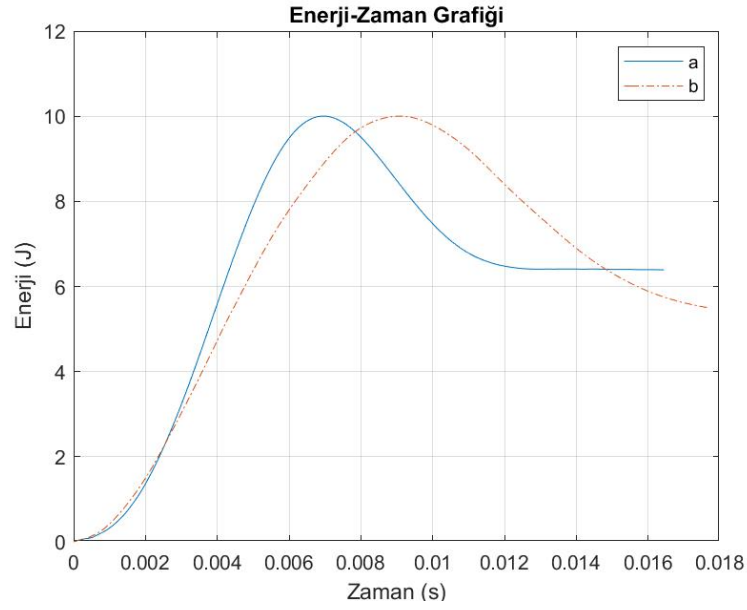
Şekil 45. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

10 J enerji seviyesinde %0.5 KNT %0.5 Zirkonya katkısı malzemede enerji sönümlene kabiliyetinde herhangi bir artışa yol açmamıştır. Kısmen düşüşe yol açmıştır.



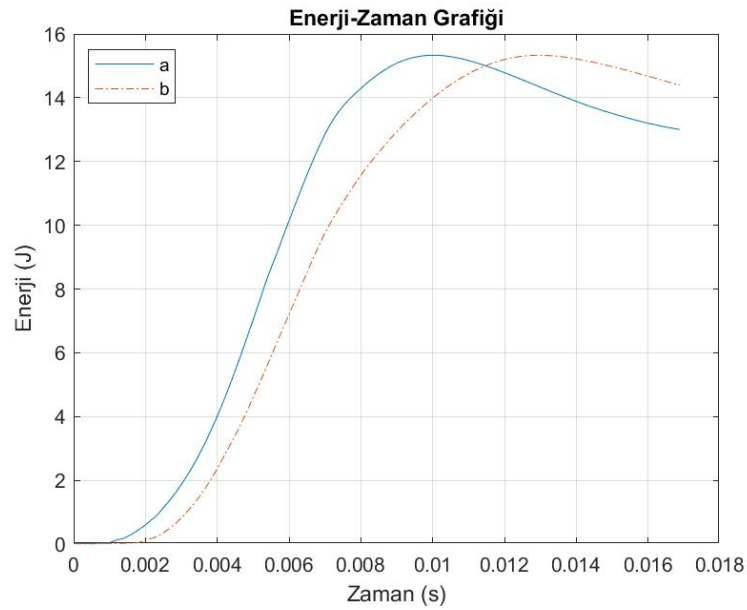
Şekil 46. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J seviyesinde ise; %0.5 KNT %0.5 Zirkonya katkısının malzemenin enerji sönümlene kabiliyetinde çok az bir artış sağladığı görülmektedir. Bu durum nano katkıların oranlarının düşüklüğü konusunda bir fikir vermektedir.



Şekil 47. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

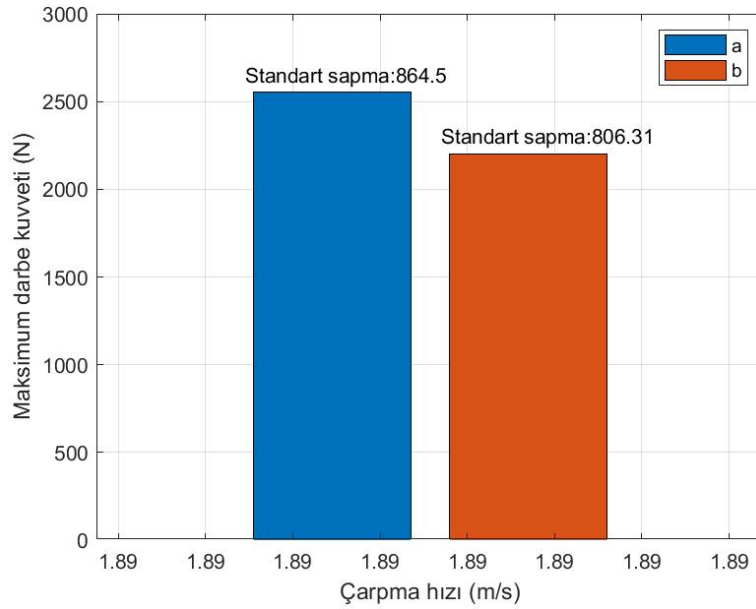
10 J enerji seviyesinde, %1.75 KNT %1.75 nano katkı oranının, malzemenin enerji sönümlene kabiliyetinde kısmi bir artışa yol açtığı sonucuna varılmaktadır.



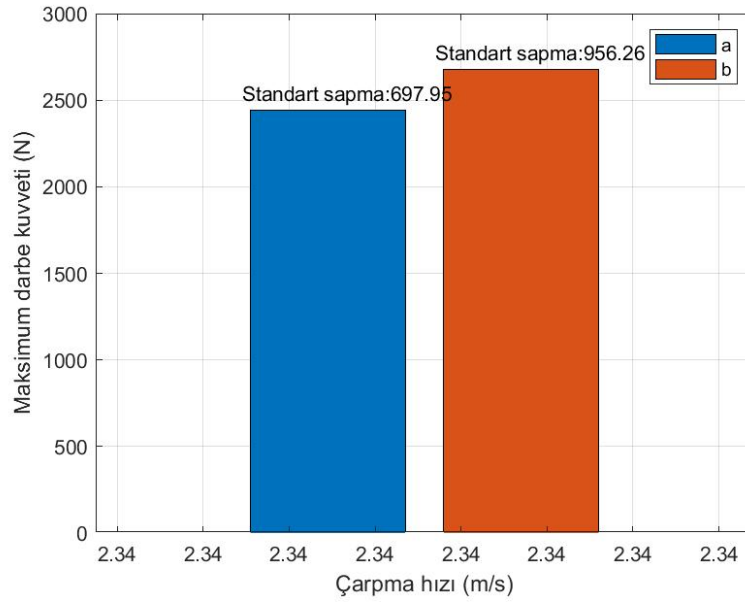
Şekil 48. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

15 J enerji seviyesinde, %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya katkısının malzemenin darbe sönümlene enerjisini arttırmadığı ve geri dönüş enerjisinin yüksek gerçekleştiği görülmektedir. Bu da, bu orandaki nano katkıların malzemenin yapısını daha fazla gevrekletirmesi ile açıklanabilir.

5.1.4. Kuvvet-hız diyagramları

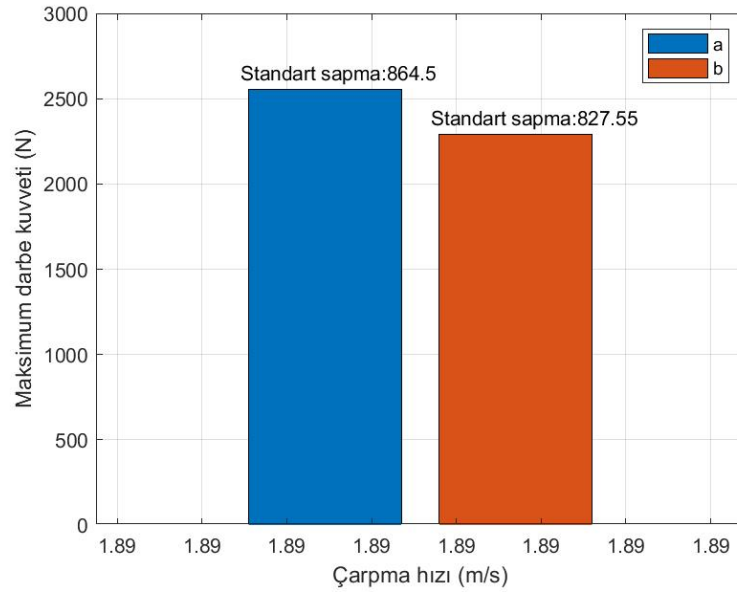


Şekil 49. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

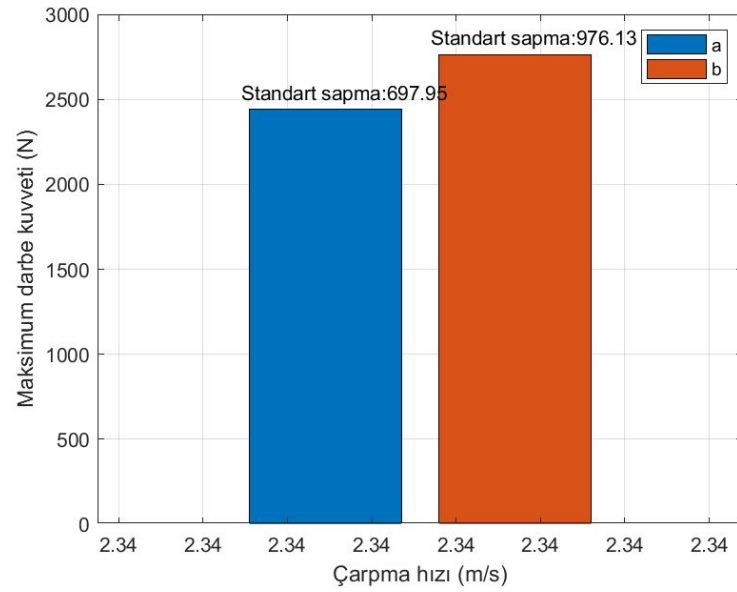


Şekil 50. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

10 J ve 15 J enerji seviyeleri incelendiğinde, enerji seviyeleri arttıkça maksimum darbe kuvvetinin %0.5 Zirkonya katkılı malzemede katkısız malzemeye göre beklendiği şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Darbe enerjisi daha da artırıldığında bu artışın daha belirgin olacağı açıktır.



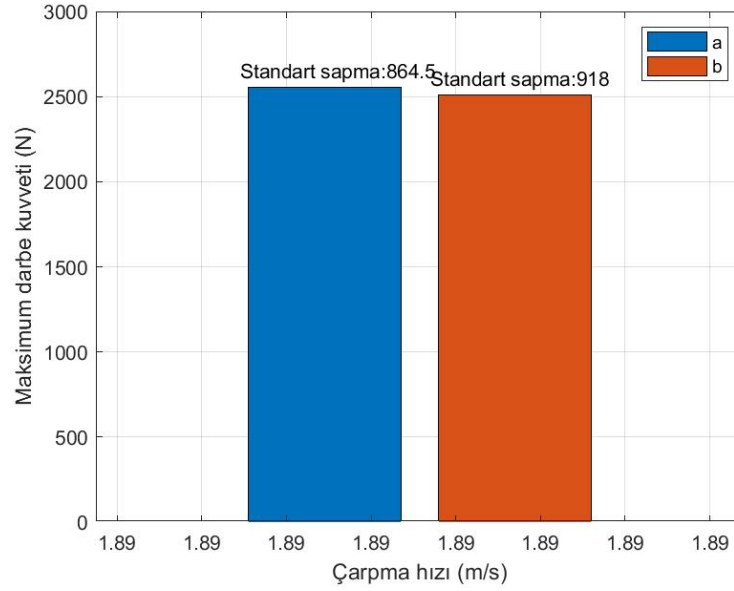
Şekil 51. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması



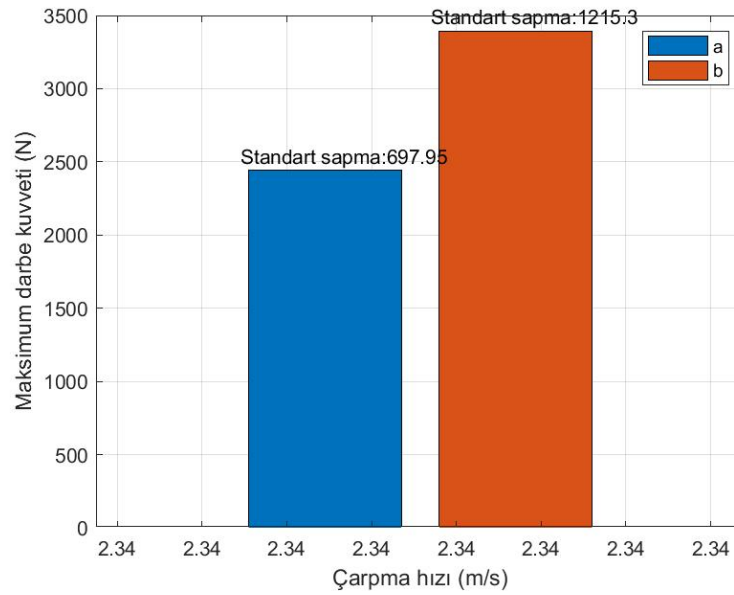
Şekil 52. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

10 J ve 15 J enerji seviyeleri incelendiğinde, enerji seviyeleri arttıkça maksimum darbe kuvvetinin %0.5 Zirkonya katkılı malzemede olduğu gibi %0.5 KNT katkılı malzemede de katkısız malzemeye göre beklendiği şekilde arttığı gözlemlenmektedir.

KNT katkısı, malzemenin mukavemet direncini artıracaktır. Darbe enerjisi daha da artırıldığında bu artışın daha belirgin olacağı açıktır.

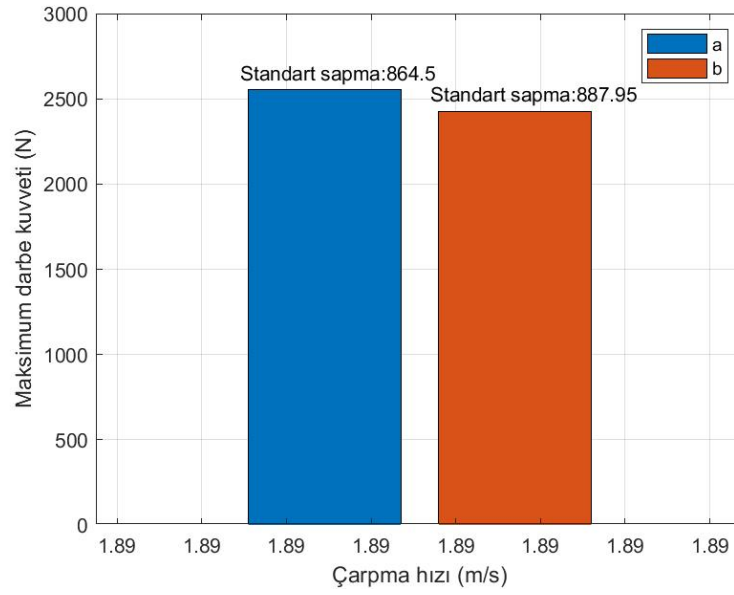


Şekil 53. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

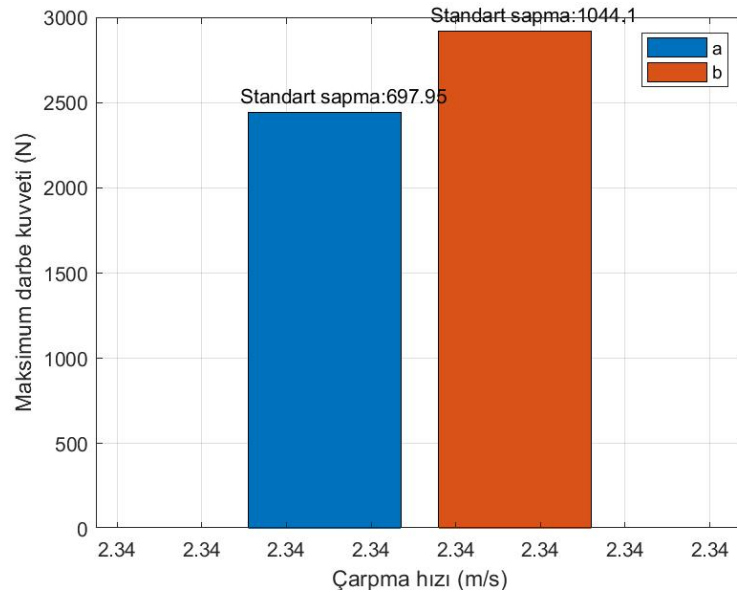


Şekil 54. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

10 J ve 15 J luk enerji seviyelerinde KNT katkısının %1.75 çıkarılması, malzemenin maksimum darbe kuvvetini belirgin şekilde her iki enerji seviyesinde beklendiği şekilde artırmıştır. Buradan 0.5 KNT katkısının daha düşük darbe kuvveti artışı sağladığı görülmüştür. KNT katkı oranı arttıkça maksimum darbe kuvvetinin ne kadar artacağı konusu ayrı bir çalışma konusudur.

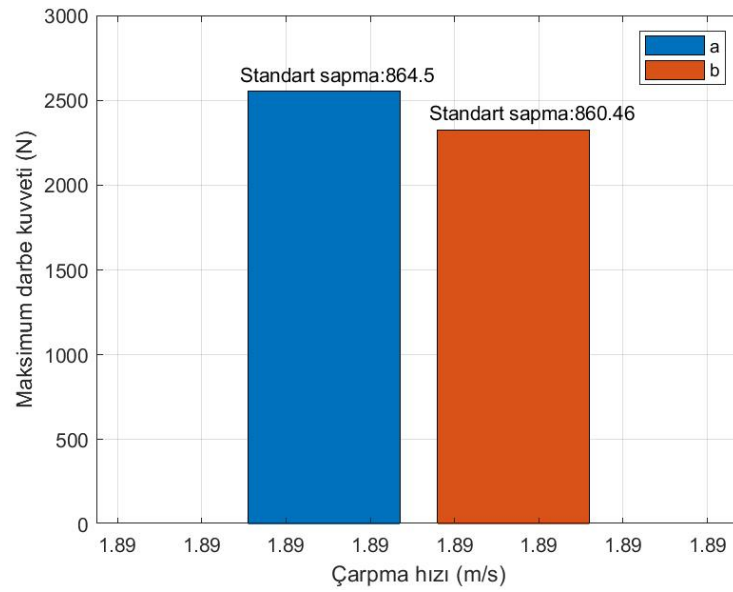


Şekil 55. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

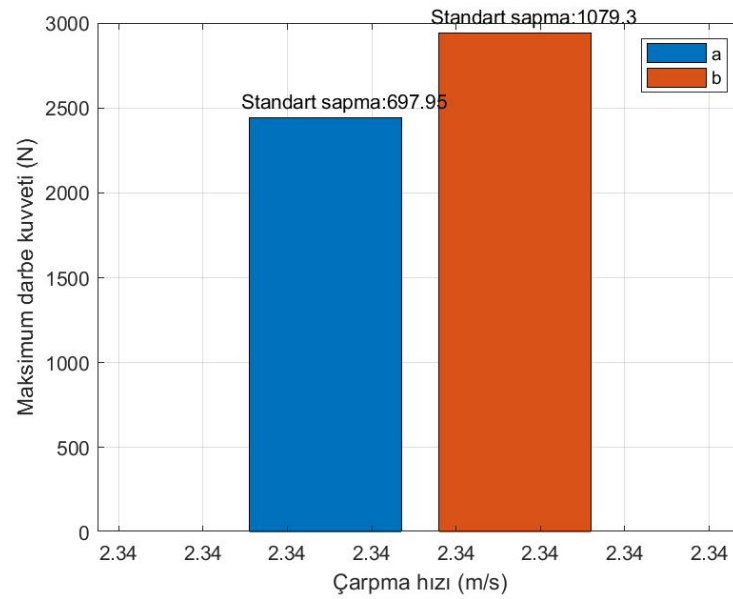


Şekil 56. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %0.5 Zirkonya (15 J) karşılaştırması

10 J ve 15 J enerji seviyelerinde darbe kuvveti incelendiğinde, %1.75 KNT katkısının sağladığı darbe kuvvetine karşın %0.5 Zirkonya katkısı darbe kuvvetini olumsuz etkilemiştir. Ancak katkısız malzemeye oranla bu oranlardaki hibrit nano katkılarının maksimum darbe kuvvetini olumlu yönde etkilediği bir gerçektir.

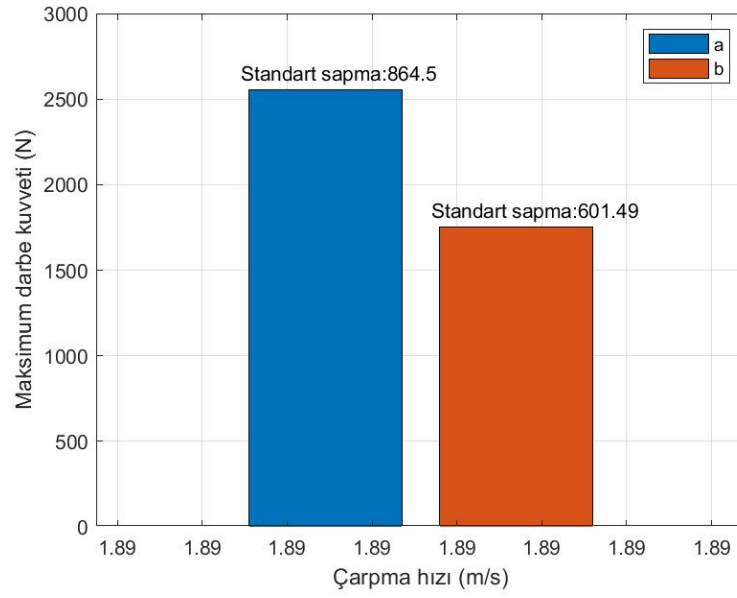


Şekil 57. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (10 J) karşılaştırması

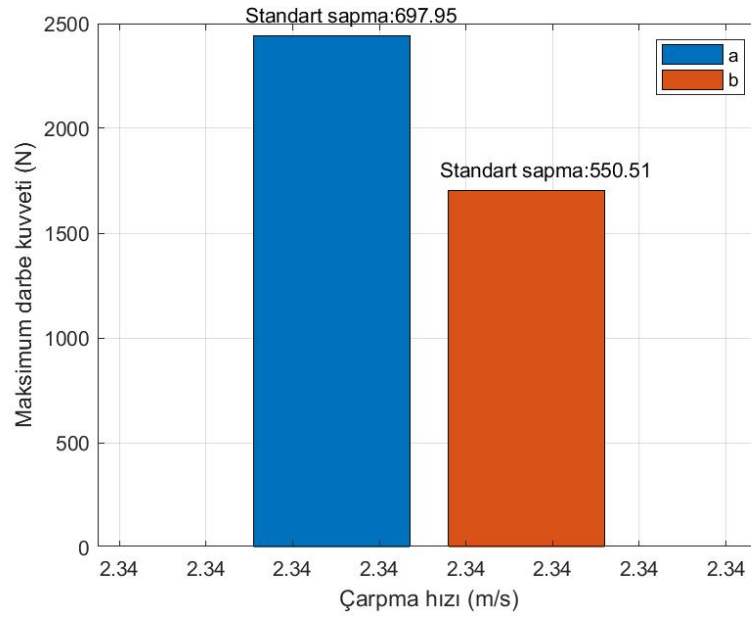


Şekil 58. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %0.5 KNT - %0.5 Zirkonya (15J) karşılaştırması

10 J ve 15 J luk enerji seviyeleri incelendiğinde darbe hızı arttıkça, KNT katkısının düşürülmesi ile darbe kuvveti olumlu yönde etkilenmiştir.



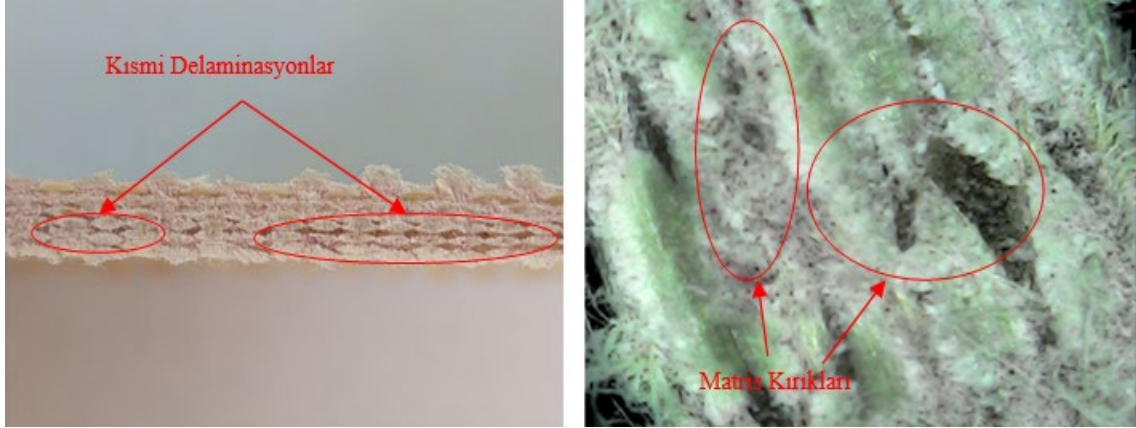
Şekil 59. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (10 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (10J) karşılaştırması



Şekil 60. a) %0 KNT - %0 Zirkonya (15 J) ve b) %1.75 KNT - %1.75 Zirkonya (15J) karşılaştırması

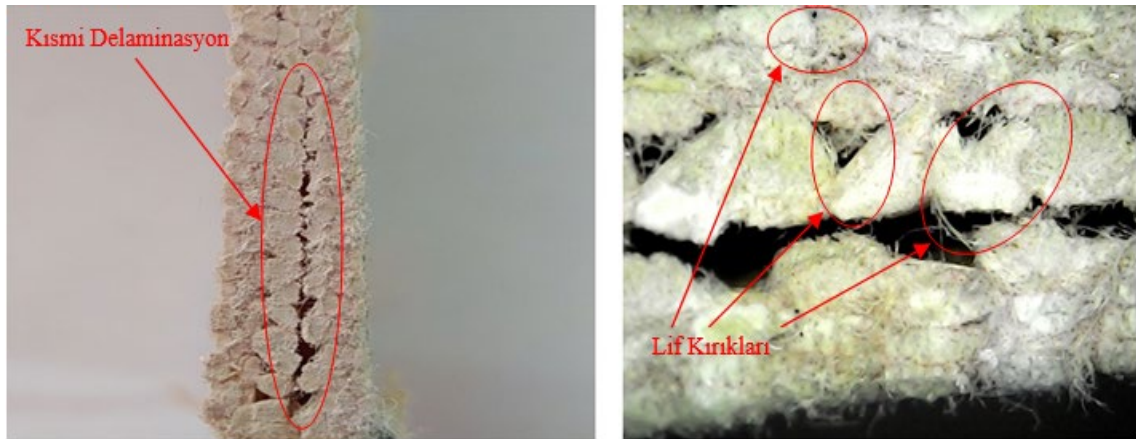
Çarpma hızı arttıkça katkısız malzemenin maksimum darbe kuvvetinde kısmi düşüşler meydana gelmektedir. Zirkonya oranının %1.75 e çıkarılması maksimum darbe kuvvetini ciddi oranda olumsuz etkilemiştir.

5.2. Dijital Mikroskop Görüntüleri



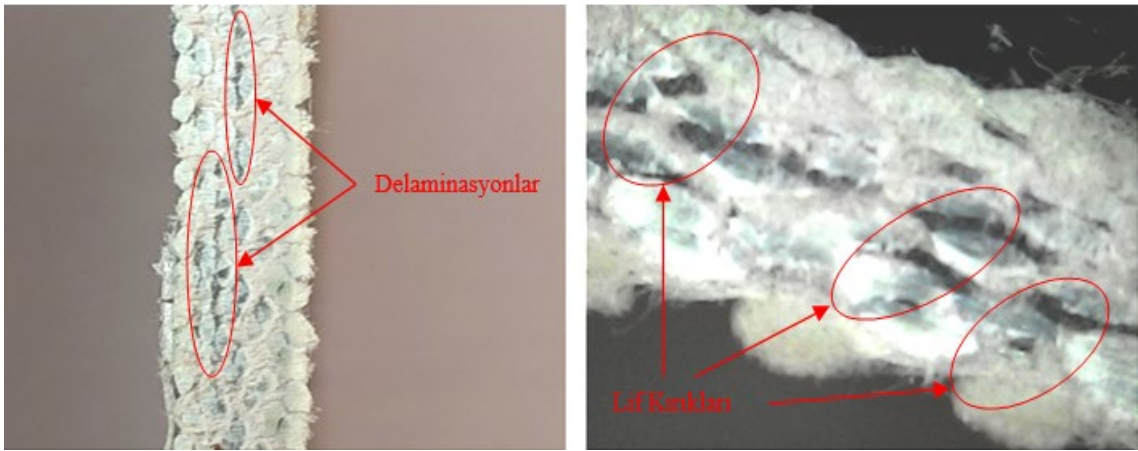
Şekil 61. %0 KNT ve %0 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

Vinilester reçine matrisli, tabakalı aramid kompozit malzeme, yapısı gereği stabil, 10 J 'deki tüm hasar görüntülerinde kısmi delaminasyonlar ve ilk tabakada fiber kırıkları gözükmemektedir.



Şekil 62. %0 KNT ve %0 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

Enerji seviyesi 15 J a çıkartıldığında matris çatlaklarıyla başlayan yüksek oranlı fiber kırıklarıyla kuvvet sönümlenmeye başlamış ve yüksek kuvvet değerlerinde malzeme hasara uğramıştır. Bu durum katkısız malzemenin bu enerji seviyesinde, gevrek durum sergilediği şeklinde yorumlanabilir. 10 J e göre delaminasyon miktarının arttığı ve fiber kırıklarının daha geniş bölgede olduğu görülmektedir. Enerji seviyesi arttıkça bu hasarların seviyesinin artması da beklenmelidir.



Şekil 63. %0.5 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

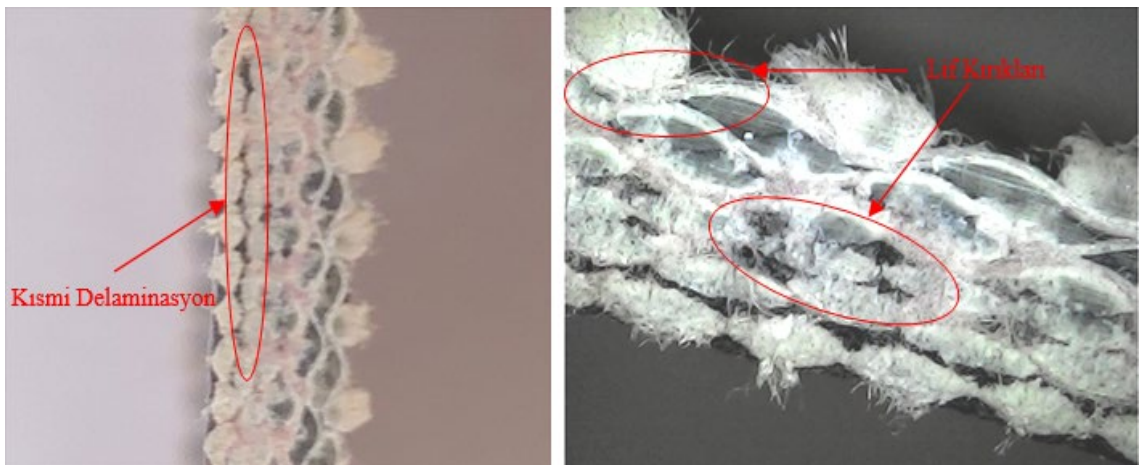
%0.5 KNT ve %0.5 Zirkonya katkılı numunede delaminasyonların 10 J'de tabaka ayrılması ile sonuçlanacağı, fiber kırıklarının tabaka derinliğine doğru artmış olduğu görülmektedir.



Şekil 64. %0.5 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

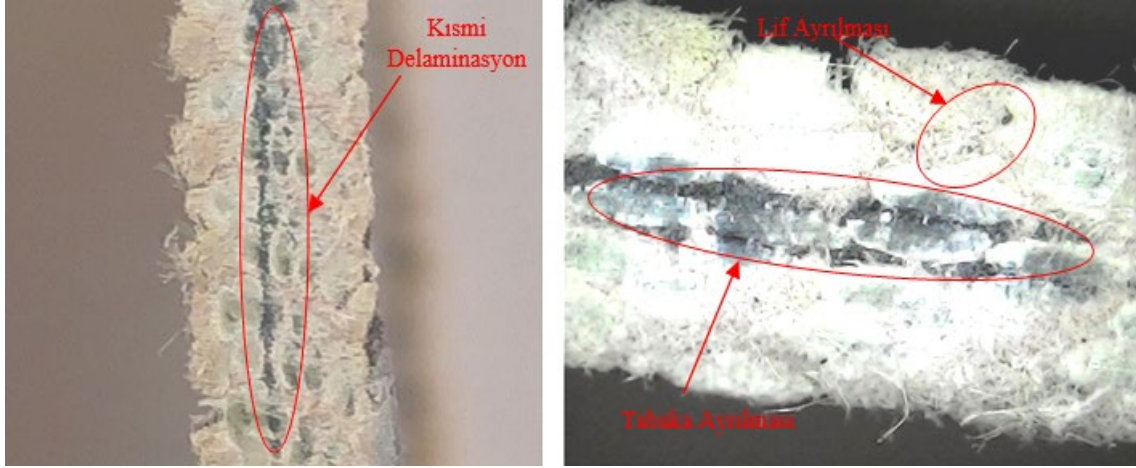
15 J 'de delaminasyonlar orta tabakanın ayrılması ve orta tabakada fiber kırıklarının yoğunlaşmasıyla hasar gerçekleşmiştir. KNT ve Zirkonya'nın bu seviyelerde takviyesinin malzemeyi gevreklettiği sonucuna varılabilir.

%0.5 KNT katkısıyla malzeme mukavemetinin yükseldiği, %0.5 Zirkonya ile de malzemede matris ezilmesi ve çatlaklarının miktarca azaldığı, yükselen enerji seviyelerinde ise; eşit orandaki nano katkıların malzemeyi daha stabil, daha gevrek ve daha mukavemetli hale getirdiği ve yüksek kalıcı deplasman oluşturduğu; darbe hızı arttıkça, KNT katkısının düşürülmesi ile darbe kuvveti olumlu yönde etkilendiği görülmektedir.



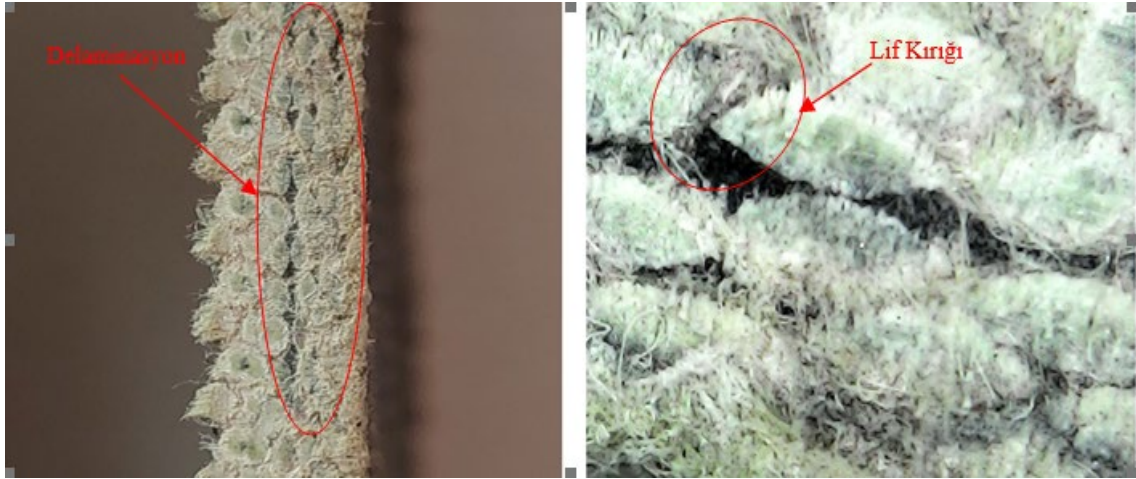
Şekil 65. %1.75 KNT ve %0 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

%1.75 KNT ve %0 Zirkonya katkılı numunede 10 J'de kısmi delaminasyon ve düşük seviyede fiber kırıkları görülmüştür.



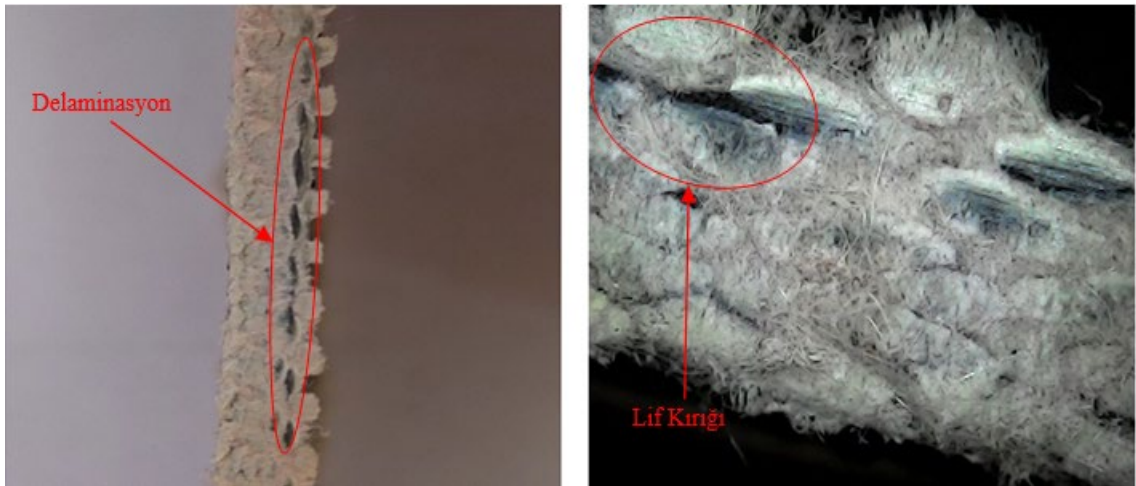
Şekil 66. %1.75 KNT ve %0 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

Yükselen enerji seviyelerinde KNT oranlarının artışının malzeme mukavemetini olumlu yönde etkilediği anlaşılmıştır. Enerji seviyesi arttıkça, ciddi matris ve fiber kırıklarına rastlanması malzemenin gevrek bir yapıda olduğunu, enerji sönümlene kabiliyetini arttırdığını ve yüksek enerji geri dönüş seviyesini oluşturduğunu göstermektedir. Enerji seviyesi yükselirken delaminasyonların tabaka ayrılmasına doğru gittiği, fiber kırıklarının darbe bölgesinde yoğunlaştığı sonucuna varılmıştır. 15 J enerji seviyesinde delaminasyonların tabaka ayrılmasına doğru gittiği, fiber kırıklarının darbe bölgesinde yoğunlaştığı sonucuna varılabilir.



Şekil 67. %1.75 KNT ve %1.75 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

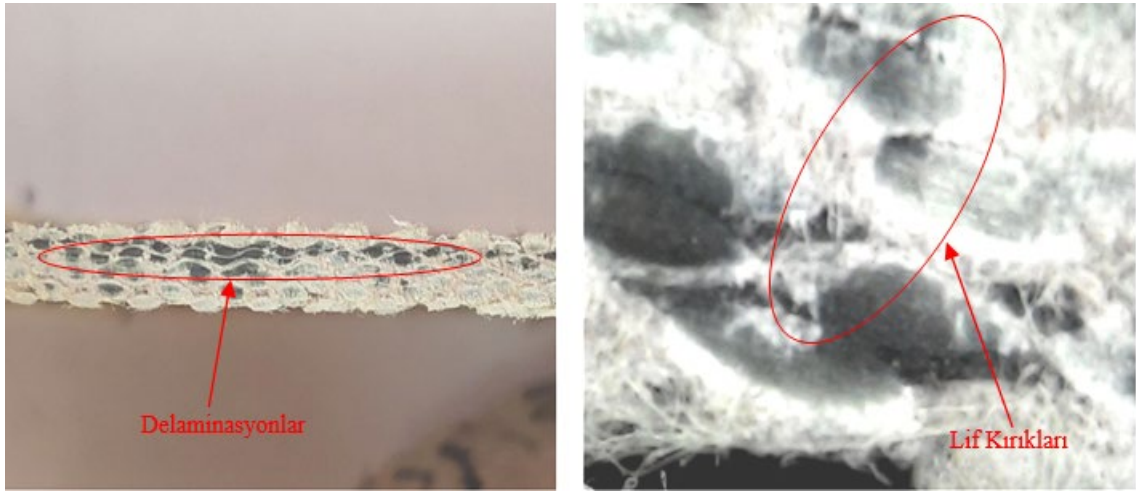
%1.75 KNT ve %1.75 Zirkonya katkılı numunede ise, 10 J'de delaminasyonlar e fiber kırıkları tabaka derinliğinde gerçekleşmiştir.



Şekil 68. %1.75 KNT ve %1.75 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

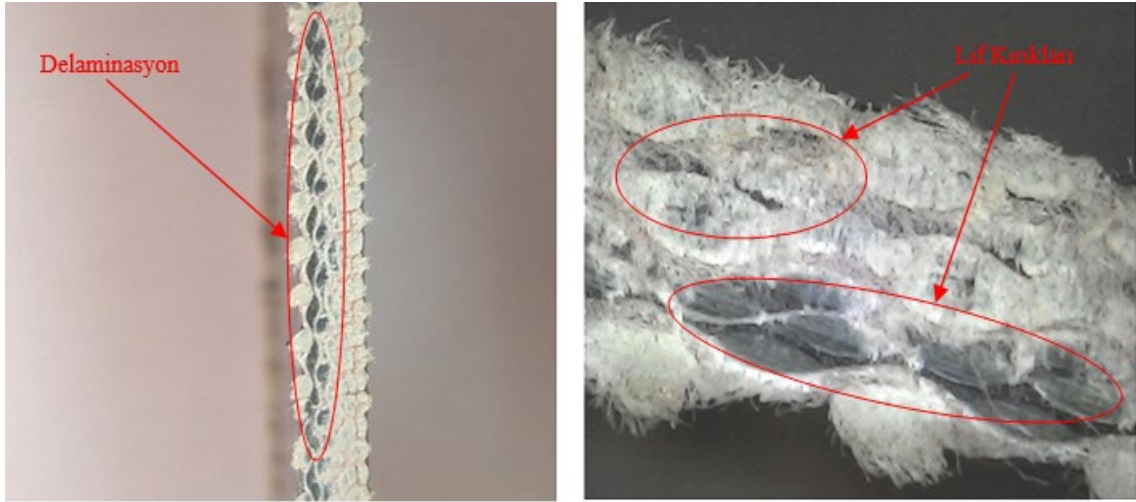
15 J'de lif kırıklarının aksel seviyelere kaydığı, delaminasyonların darbe bölgesinde yoğun şekilde dağıldığı görülmektedir.

Enerji seviyesi yükseldikçe malzeme; matris çatlağı ve ezilmesi açısından daha stabil bir durum sergilemiş, mukavemeti artmamasına rağmen sünek yapı dolayısıyla; kuvvet sönümlenmesi daha geç zamanda oluşmuş ve kuvvet artışlarıyla beraber ciddi matris ve fiber kırıklarının daha düşük kuvvetlerde gerçekleştiği görülmüştür. Malzemenin güçlü yapısından dolayı kalıcı deplasman oranı bu seviyedeki nano katkılarda daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Yükselen enerji seviyelerinde ayrıca; fiber kırıklarının aksel seviyelere kaydığı, delaminasyonların darbe bölgesinde yoğun şekilde dağıldığı görülmektedir.



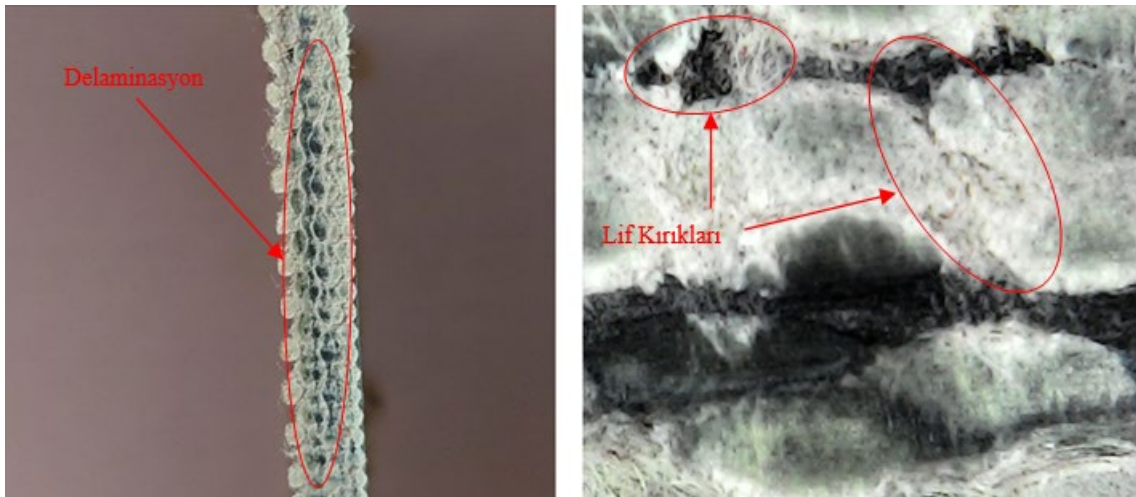
Şekil 69. %1.75 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

%1.75 KNT ilavesinin malzeme dayanımını bir miktar arttırdığı gözlemlenmiştir. Kısmi delaminasyonlar ve lif kırıkları fotoğrafta belirtilmiştir.



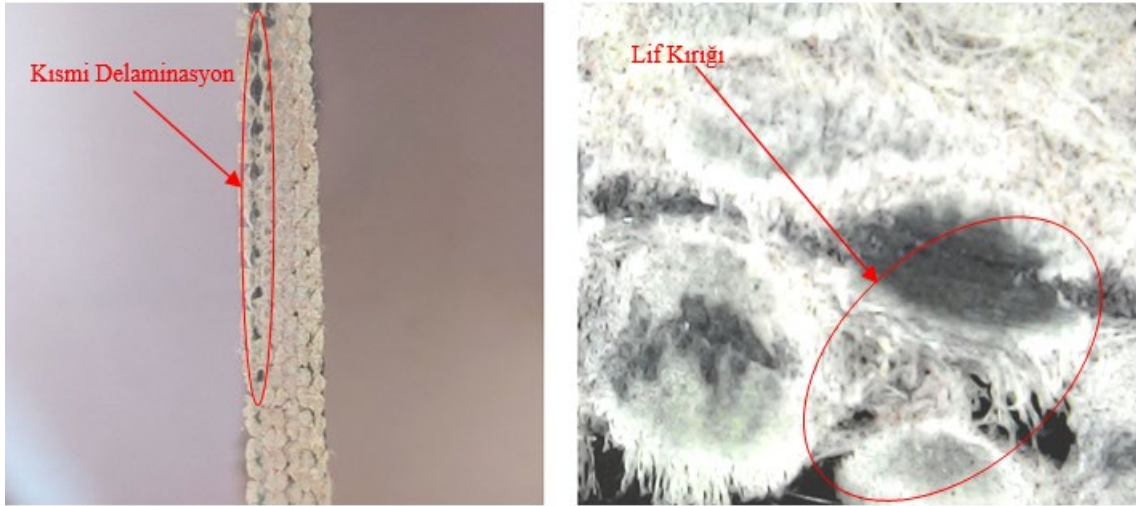
Şekil 70. %1.75 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

15 J enerji seviyesinde %1.75 KNT ilavesiyle malzeme dayanımının yükseldiği ancak %0.5 Zirkonya katkısıyla malzemenin daha kısa sürede tahrip olduğu ve kısmen gevrekleştiği görülmektedir. Hasar görüntüleri incelendiğinde; darbe yönünde delaminasyonların ve fiber kırıklarının ilk tabakalarda yoğunlaştığı, Darbe enerjisi arttıkça; bu hasarların tabaka kalınlığına yayıldığı malzemeyi delinmeye doğru götüreceği ön görülebilir.



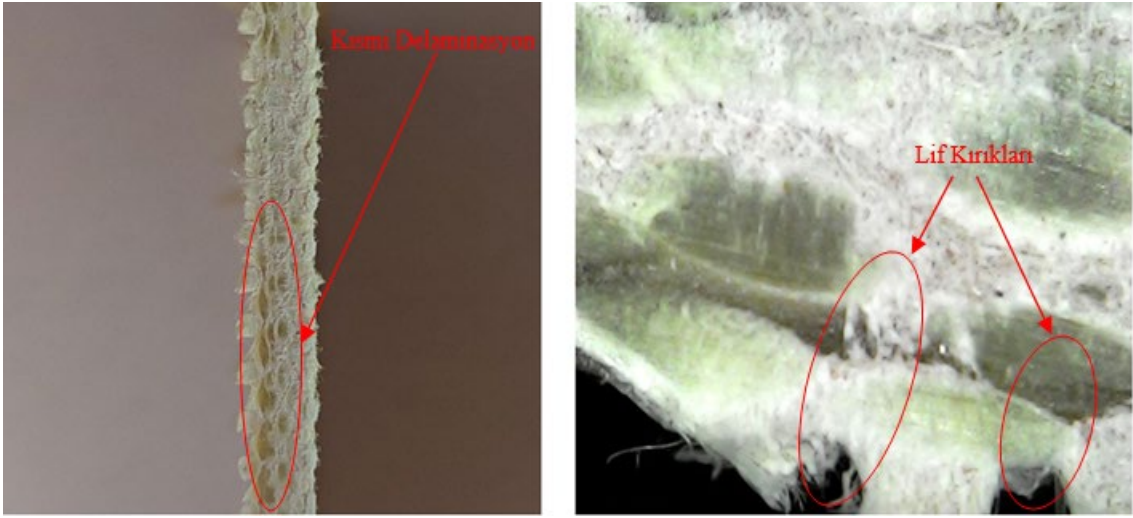
Şekil 71. %0.5 KNT ve %0 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

Hasar görüntüleri incelendiğinde; %0.5 KNT ve %0 Zirkonya katkılı numunenin 10 J'de darbe kuvvetinin ters yönünde delaminasyonların tabaka ayrılmasına doğru geliştiği ve malzeme hasarının malzeme kalınlığı yönünde oluştuğu görülmektedir.



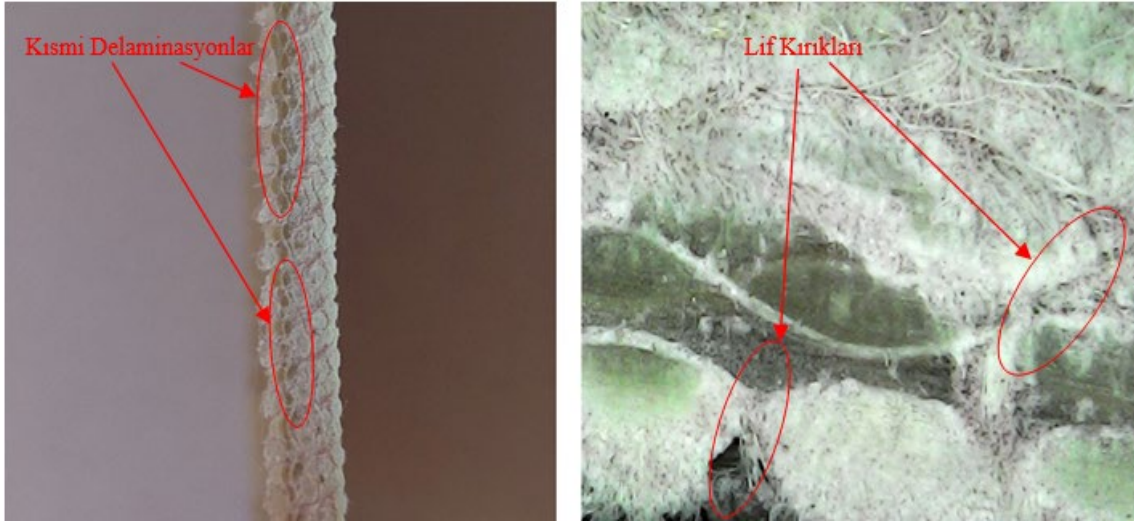
Şekil 72. %0.5 KNT ve %0 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

Bu oranda %0.5 KNT ilavesiyle; hasar, matris ezilmesi ve matris kırığı seviyesinde daha yüksek kuvvetlere dayanmış ve daha sonra hasara uğramıştır. Enerji seviyesi yükseldikçe hem malzeme mukavemetini hem de malzeme stabilizasyonunu arttırmış ve kalıcı deplasman düşük seviyelerde seyretmiştir. Bu durum gevrek yapı ile izah edilebilir. Aynı zamanda darbe dayanımının arttığı sonucuna da varılabilir. Enerji seviyesi 15 J'e çıkarıldığında hasarlar ilk tabakalarda daha yoğun gerçekleşmiştir.



Şekil 73. %0 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 10 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

10 J de malzemede herhangi bir dayanım artışı meydana getirmeksizin sünek bir şekilde kısmi matris kırıkları başlangıcı, devamında fiber kırığı ile hasara uğramıştır. Az sayıda kısmi delaminasyon ve fiber kırığı oluşmasına rağmen, Zirkonyanın gevreklik etkisinden dolayı hasarlar; artarak, yoğunlaşmıştır.



Şekil 74. %0 KNT ve %0.5 Zirkonya'nın 15 J darbe enerjisindeki hasar mekanizmaları

15 J'de malzemenin darbeye daha stabil cevap verdiği, fiber kırıklarının oluşmadığı, matris kırık periyodunun azalması dolayısıyla malzemenin mukavemetinde kısmi artış, ancak deplasmanının daha geç oluşması ve geri tepme enerjisinin daha erken oluştuğu ve malzemenin enerji absorbe etme kabiliyetinin arttığını göstermektedir. Zirkonyanın bu seviyedeki katkısı malzemede hafif bir şekilde süneklilik oluşturmuştur. Darbe enerjisi daha da artırıldığında bu artışın daha belirgin olacağı açıktır.

6. SONUÇLAR

%0 KNT %0 Zirkonya (katkısız) malzeme

10 J enerji seviyesinde, enerjinin daha az bir kısmını aynı zaman diliminde sönümlenmiş ve yaklaşık enerjinin %60 ını geri tepme enerjisi olarak geri vermiştir. 15 J enerji seviyesinde ise; enerji artışının etkisi açıkça görülmektedir ve geri dönüş enerji seviyesi yükselmiştir. Enerji seviyesi arttıkça, fiber kırığı ve delaminasyon gibi hasarların seviyesinin artması da beklenmelidir.

%0.5 KNT katkısı ile;

Hasar görüntüleri incelendiğinde, 10 J'de darbe kuvvetinin ters yönünde delaminasyonların tabaka ayrılmasına doğru geliştiği ve malzeme hasarının malzeme kalınlığı yönünde olduğu görülmektedir. Enerji seviyesi 15 J'e çıkarıldığında hasarlar ilk tabakalarda daha yoğun gerçekleşmiştir.

%1.75 KNT katkısı ile;

KNT katkı oranı arttıkça, darbe kuvvet artışının devam ettiği görülmüştür. KNT katkı oranı arttıkça maksimum darbe kuvvetinin ne kadar artacağı ayrı bir çalışma konusudur.

%0.5 Zirkonya katkısı ile;

Hasar görüntüleri incelendiğinde; 10 J 'de az sayıda kısmi delaminasyon ve fiber kırığı oluşmasına rağmen, Zirkonyanın gevreklik etkisinden dolayı hasarlar; artarak, yoğunlaşmıştır. %0.5 Zirkonya katkılı numune malzemede kısmi süneklilik meydana getirerek, malzemenin enerji sönümleme kabiliyetini arttırmıştır.

%1.75 KNT - %0.5 Zirkonya katkısı ile;

10 J enerji seviyesinde %1.75 KNT oranının malzeme dayanımını %30 arttırdığı tespit edildiği halde malzemeye %0.5 Zirkonya katkısının malzeme mukavemetini bir miktar düşürdüğü anlaşılmıştır. Yükselen enerji seviyelerinde, malzeme ani bir matris-fiber kırılmasına maruz kalmadan dayanım artışı ile kalıcı deplasman oranı meydana getirerek darbe sönümleme kabiliyetini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

%0.5 KNT - %0.5 Zirkonya katkısı ile;

KNT ve Zirkonya nın bu oranlardaki takviyesinin malzemeyi kısmen gevreklettiği sonucuna varılabilir.

%1.75 KNT - %1.75 Zirkonya katkısı ile;

Yükselen enerji seviyesinde; daha geniş deplasman periyodunda hasara uğramış ve kalıcı hasar, daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Buradan malzemenin sünek bir yapıya sahip olduğu sonucu çıkarılabilir. Çarpma hızı arttıkça maksimum darbe kuvvetinde kısmi düşüşler meydana gelmektedir. Zirkonya oranının %1.75 e çıkarılması maksimum darbe kuvvetini ciddi oranda olumsuz etkilemiştir.

Sonuç olarak;

Malzemede kararlılık, kısmen yüksek mukavemetle ile beraber enerji sönümleme kabiliyetinin artışı %0.5 KNT %0.5 Zr katkılı aramid tabaka yapılı kompozit malzemede elde edilmiştir. Bu kombinasyonun daha geniş şekilde araştırılmasıyla daha net sonuçlara verilebilecektir.

7. KAYNAKLAR

- A History of Carbon Nanotubes*. (y.y.). Tarihinde 23 Haziran 2022, adresinden erişildi <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4843>
- Abdallah, B., Elhissi, A. M. A., Ahmed, W., & Najlah, M. (2020). Carbon nanotubes drug delivery system for cancer treatment. *Advances in Medical and Surgical Engineering*, 313–332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819712-7.00016-4>
- Abdul Khalil, H. P. S., Fizree, H. M., Bhat, A. H., Jawaid, M., & Abdullah, C. K. (2013). Development and characterization of epoxy nanocomposites based on nano-structured oil palm ash. *Composites Part B: Engineering*, 53, 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.013>
- Abiodun Balogun, O., Adewale Akinwande, A., Adebayo Ogunsanya, O., Oladele Ademati, A., Adesoji Adediran, A., John Erinle, T., & Titilayo Akinlabi, E. (2022). Central composite design and optimization of selected stir casting parameters on flexural strength and fracture toughness mTiO₂/Al 7075 composites. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4574–4583. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.05.315>
- Abu Obaid, A., Deitzel, J. M., Gillespie, J. W., & Zheng, J. Q. (2011). The effects of environmental conditioning on tensile properties of high performance aramid fibers at near-ambient temperatures. *Journal of Composite Materials*, 45(11), 1217–1231. <https://doi.org/10.1177/0021998310381436>
- Alhumdany, A., Al-Waily, M., & Kadhim, M. (2015). Experimental investigation for powder reinforcement effect on mechanical properties and natural frequency of isotropic hyper composite plate with various boundary conditions. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, 6(5), 499–516. https://www.researchgate.net/publication/281407777_Experimental_investigation_for_powder_reinforcement_effect_on_mechanical_properties_and_natural_frequency_of_isotropic_hyper_composite_plate_with_various_boundary_conditions/link/55e5ba6708aecb1a7ccd44ec/
- Amaro, A. M., Reis, P. N. B., & De Moura, M. F. S. F. (2011). Delamination effect on bending behaviour in carbon-epoxy composites. *Strain*, 47(2), 203–208. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00520.x>
- Anderson-Cook, C. M., Borrer, C. M., & Montgomery, D. C. (2009). Response surface design evaluation and comparison. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 139(2), 629–641. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2008.04.004>
- Asadi, N., & Zilouei, H. (2017). Optimization of organosolv pretreatment of rice straw for enhanced biohydrogen production using *Enterobacter aerogenes*. *Bioresource Technology*, 227, 335–344. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.12.073>
- Atira. (y.y.). *Composite materials guide*. Atira.in. Tarihinde 18 Haziran 2022, adresinden erişildi <https://atira.in/composite-materials-guide/>

- Ávila, A. F., Neto, A. S., & Nascimento Junior, H. (2011). Hybrid nanocomposites for mid-range ballistic protection. *International Journal of Impact Engineering*, 38(8–9), 669–676. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.03.002>
- Balakrishnan, A., & Saha, M. C. (2011). Tensile fracture and thermal conductivity characterization of toughened epoxy/CNT nanocomposites. *Materials Science and Engineering A*, 528(3), 906–913. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.064>
- Batra, R. C., Gopinath, G., & Zheng, J. Q. (2012). Damage and failure in low energy impact of fiber-reinforced polymeric composite laminates. *Composite Structures*, 94(2), 540–547. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.08.015>
- Bhatnagar, A. S., Gupta, A., Arora, G., Padmanabhan, S., & Burela, R. G. (2021). Mean-field homogenization coupled low-velocity impact analysis of nano fibre reinforced composites. *Materials Today Communications*, 26(February), 102089. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102089>
- Bhoskar, T., Kulkarni, O. K., Kulkarni, N. K., Patekar, S. L., Kakandikar, G. M., & Nandedkar, V. M. (2015). Genetic Algorithm and its Applications to Mechanical Engineering: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 2624–2630. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.219>
- Biron, M. (Ed.). (2014). 1 - Outline of the Actual Situation of Plastics Compared to Conventional Materials. İçinde *Thermosets and Composites* (2. baskı, ss. 1–24). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3124-4.00001-8>
- Bocanegra-Bernal, M. H., Echeberria, J., Ollo, J., Garcia-Reyes, A., Domínguez-Rios, C., Reyes-Rojas, A., & Aguilar-Elguezabal, A. (2011). A comparison of the effects of multi-wall and single-wall carbon nanotube additions on the properties of zirconia toughened alumina composites. *Carbon*, 49(5), 1599–1607. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2010.12.042>
- Brabazon, D. (2021). Introduction: Polymer Matrix Composite Materials. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 563–564. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00109-9>
- Bulut, M., Erkliğ, A., & Yeter, E. (2016). Hybridization effects on quasi-static penetration resistance in fiber reinforced hybrid composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, 98, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.025>
- Bunsell, A. R. (Ed.). (2009). *Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres*. Woodhead Publishing. www.sciencedirect.com/book/9781845693879/handbook-of-tensile-properties-of-textile-and-technical-fibres
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2015). Kompozitler. İçinde K. Genel (Ed.), *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği* (Sekizinci). Nobel.
- Caprino, G., Lopresto, V., Scarponi, C., & Briotti, G. (1999). Influence of material thickness on the response of carbon-fabric/epoxy panels to low velocity impact. *Composites Science and Technology*, 59(15), 2279–2286. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00079-2)

- Carvalho, G. B., Canevarolo, S. V., & Sousa, J. A. (2020). Influence of interfacial interactions on the mechanical behavior of hybrid composites of polypropylene / short glass fibers / hollow glass beads. *Polymer Testing*, 85(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106418>
- Chaudhary, A., Gupta, V., Teotia, S., Nimanpure, S., & Rajak, D. K. (2021). Electromagnetic Shielding Capabilities of Metal Matrix Composites. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 428–441. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11828-4>
- Chawla, K. K. (2001). Glass Fibers. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 3541–3545. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00630-6>
- Chen, X. (2016). Introduction. *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-461-1.00001-7>
- Chung, D. D. L. (2002). Composites get smart. *Materials Today*, 5(1), 30–35. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(02\)05140-4](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(02)05140-4)
- Dai, Z., Zhang, B., Shi, F., Li, M., Zhang, Z., & Gu, Y. (2011). Effect of heat treatment on carbon fiber surface properties and fibers/epoxy interfacial adhesion. *Applied Surface Science*, 257(20), 8457–8461. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.04.129>
- Davim, J. P. (2014). *Metal matrix composites: materials, manufacturing and engineering*. 216.
- de Moura, M. F. S. F., & Gonçalves, J. P. M. (2004). Modelling the interaction between matrix cracking and delamination in carbon-epoxy laminates under low velocity impact. *Composites Science and Technology*, 64(7–8), 1021–1027. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2003.08.008>
- Dhakal, H. N., & Ismail, S. O. (2021). Design, manufacturing processes and their effects on bio-composite properties. *Sustainable Composites for Lightweight Applications*, 121–177. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818316-8.00005-0>
- Diler, E. A., & Ipek, R. (2013). Main and interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on wear characteristics of Al–SiCp composites using central composite design. *Composites Part B: Engineering*, 50, 371–380. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.02.001>
- Dogan, A., & Arıkan, V. (2017). Low-velocity impact response of E-glass reinforced thermoset and thermoplastic based sandwich composites. *Composites Part B: Engineering*, 127, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.027>
- Dwivedi, A. K., Dalzell, M. W., Fossey, S. A., Slusarski, K. A., Long, L. R., & Wetzel, E. D. (2016). Low velocity ballistic behavior of continuous filament knit aramid. *International Journal of Impact Engineering*, 96, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.05.009>

- Gemi, L., Kayrıçı, M., Uludağ, M., Gemi, D. S., & Şahin, Ö. S. (2018). Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes. *Composites Part B: Engineering*, *149*, 38–48. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.05.006>
- Ghelich, R., Jahannama, M. R., Abdizadeh, H., Torknik, F. S., & Vaezi, M. R. (2019). Central composite design (CCD)-Response surface methodology (RSM) of effective electrospinning parameters on PVP-B-Hf hybrid nanofibrous composites for synthesis of HfB₂-based composite nanofibers. *Composites Part B: Engineering*, *166*(February), 527–541. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.094>
- Ghori, S. W., Siakeng, R., Rasheed, M., Saba, N., & Jawaid, M. (2018). The role of advanced polymer materials in aerospace. *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, 19–34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102131-6.00002-5>
- Godara, S. S., & Mahato, P. K. (2019). Potential Applications of Hybrid Nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, *18*, 5327–5331. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.07.557>
- Gopalakannan, S., & Senthilvelan, T. (2013). Application of response surface method on machining of Al-SiC nano-composites. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *46*(8), 2705–2715. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.036>
- Green, J. (y.y.). *Types and Applications of All Kinds of Ceramic Materials*. www.preciseceramic.com. Tarihiinde 10 Eylül 2021, adresinden erişildi <https://www.preciseceramic.com/blog/types-and-applications-of-all-kinds-of-ceramic-materials/>
- Greene, J. P. (2021). Compression Molding. *Automotive Plastics and Composites*, 265–278. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818008-2.00015-5>
- Gupta, J., Reynolds, N., Chiciudean, T., & Kendall, K. (2020). A comparative study between epoxy and vinyl ester CF-SMC for high volume automotive composite crash structures. *Composite Structures*, *244*, 112299. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2020.112299>
- Hanif, W. Y. W., Risby, M. S., & Noor, M. M. (2015). Influence of Carbon Nanotube Inclusion on the Fracture Toughness and Ballistic Resistance of Twaron/Epoxy Composite Panels. *Procedia Engineering*, *114*, 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.049>
- Haponiuk, J. T., & Formela, K. (2017). PU Polymers, Their Composites, and Nanocomposites: State of the Art and New Challenges. *Polyurethane Polymers: Composites and Nanocomposites*, 1–20. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804065-2.00001-2>
- Harding, J. (1979). *The high-Speed punching of woven-Roving glass reinforced composites*.

- HIZIR 4x4 Taktik Tekerlekli Zirhli Araç.* (y.y.). katmerciler.com.tr. Tarihinde 23 Ağustos 2021, adresinden erişildi
<http://www.katmerciler.com.tr/L/TR/mid/343/g/343/c/31/id/61/HIZIR-4x4-Taktik-Tekerlekli-Zirhli-Arac.htm>
- Hodgkin, J. (2001). Thermosets: Epoxies and Polyesters. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 9215–9221. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01660-0>
- Hongkarnjanakul, N., Rivallant, S., Bouvet, C., & Miranda, A. (2014). Permanent indentation characterization for low-velocity impact modelling using three-point bending test. *Journal of Composite Materials*, 48(20), 2441–2454. <https://doi.org/10.1177/0021998313499197>
- Hossain, M. K., Hossain, M. E., Hosur, M. V., & Jeelani, S. (2011). Flexural and compression response of woven E-glass/polyester-CNF nanophased composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(11), 1774–1782. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.07.033>
- Hossain, Mohammad K., Chowdhury, M. M. R., Imran, K. A., Salam, M. B., Tauhid, A., Hosur, M., & Jeelani, S. (2014). Effect of low velocity impact responses on durability of conventional and nanophased CFRP composites exposed to seawater. *Polymer Degradation and Stability*, 99(1), 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.11.008>
- Hosur, M. V., Abdullah, M., & Jeelani, S. (2005). Manufacturing and low-velocity impact characterization of foam filled 3-D integrated core sandwich composites with hybrid face sheets. *Composite Structures*, 69(2), 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.06.008>
- Hussain, S. A., & Rangadu, V. P. (2011). *Mechanical Properties of Green Coconut Fiber Reinforced Hdpe Polymer Composite*. 3(November 2011), 7942–7952.
- Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- INJECTION MOLDING VS REACTION INJECTION MOLDING (RIM).* (y.y.). Tarihinde 30 Ağustos 2021, adresinden erişildi
<http://knowledgecenter.mearthane.com/injectionmoldingvsreactioninjectionmolding>
- INTRODUCTION TO TAGUCHI METHOD.* (y.y.). Tarihinde 10 Eylül 2021, adresinden erişildi https://www.ee.iitb.ac.in/~apte/CV_PRA_TAGUCHI_INTRO.htm
- Jacky. (y.y.). *Types of Ceramics*. laurelandwolf.com. Tarihinde 10 Eylül 2021, adresinden erişildi <https://www.laurelandwolf.com/blogs/types-of-ceramics>
- Jamir, M. R. M., Majid, M. S. A., & Khasri, A. (2018). Natural lightweight hybrid composites for aircraft structural applications. *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, 155–170. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102131-6.00008-6>

- Kachanov, L. M. (1986). *Introduction to continuum damage mechanics*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nag.1610110509>
- KALEMTAŞ, A. (y.y.). *COMPOSITE MATERIALS*. <http://ce.mu.edu.tr/>. Tarihinde 10 Eylül 2021, adresinden erişildi http://ce.mu.edu.tr/Icerik/metalurji.mu.edu.tr/Sayfa/Composite_Materials_5.pdf
- Kandelbauer, A., Tondi, G., Zaske, O. C., & Goodman, S. H. (2014). Unsaturated Polyesters and Vinyl Esters. *Handbook of Thermoset Plastics*, 111–172. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3107-7.00006-3>
- Karbhari, V. M., & Love, C. T. (2012). Processing of nanotube-based nanocomposites. *Advances in Polymer Nanocomposites: Types and Applications*, 3–32. <https://doi.org/10.1533/9780857096241.1.3>
- Kattamuri, N., & Sung, C. (2003). NANOTECH 2003: Technical Proceedings of the 2003 Nanotechnology Conference and Trade Show - Volume 3. *2003 Nanotechnology Conference and Trade Show - Nanotech 2003*, 3, 425–428.
- Kaur, M., Kumari, S., & Sharma, P. (2022). Response surface methodology adhering central composite design for the optimization of Zn (II) adsorption using rice husk nanoadsorbent. *Chemical Physics Letters*, 801, 139684. <https://doi.org/10.1016/J.CPLETT.2022.139684>
- Kaw, A. K. (2014). Kompozit Malzemelere Giriş. İçinde B. O. Baba & R. Karakuzu (Ed.), *Kompozit Malzeme Mekaniği* (s. 496). Efil Yayınevi.
- Kelkar, A. D., Chandekar, G. S., & Thatte, B. S. (2010). On the behavior of fiberglass epoxy composites under low velocity impact loading. *Advances in Mechanical Engineering, 2010*. <https://doi.org/10.1155/2010/621406>
- Koç, B., & Kaymak Ertekin, F. (2010). Yanıt yüzey yöntemi ve gıda işleme uygulamaları. *Gıda Teknolojisi Derneği*, 35(1), 63–70.
- Komus, A., & Beley, N. (2018). 3.15 Composite Applications for Ground Transportation. *Comprehensive Composite Materials II*, 420–438. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09950-1>
- Kong, L., Yin, X., Han, M., Zhang, L., & Cheng, L. (2015). Carbon nanotubes modified with ZnO nanoparticles: High-efficiency electromagnetic wave absorption at high-temperatures. *Ceramics International*, 41(3), 4906–4915. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.052>
- Kornmann, X., Rees, M., Thomann, Y., Necola, A., Barbezat, M., & Thomann, R. (2005). Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 65(14), 2259–2268. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2005.02.006>
- Kukovecz, Á., Kozma, G., & Kónya, Z. (2013). *Multi-Walled Carbon Nanotubes BT - Springer Handbook of Nanomaterials* (R. Vajtai (Ed.); ss. 147–188). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20595-8_5

- Kumari, M., & Gupta, S. K. (2019). Response surface methodological (RSM) approach for optimizing the removal of trihalomethanes (THMs) and its precursor's by surfactant modified magnetic nanoadsorbents (sMNP) - An endeavor to diminish probable cancer risk. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54902-8>
- Laurenzi, S., Pastore, R., Giannini, G., & Marchetti, M. (2013). Experimental study of impact resistance in multi-walled carbon nanotube reinforced epoxy. *Composite Structures*, 99, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.12.002>
- Lautenschläger, M. I., Mayer, L., Gebauer, J., Weidenmann, K. A., Henning, F., & Elsner, P. (2018). Comparison of filler-dependent mechanical properties of jute fiber reinforced sheet and bulk molding compound. *Composite Structures*, 203, 960–967. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.09.100>
- Lee, L. J. (1982). Curing of Compression Molded Polyester Sheet Molding Compound. *National Technical Conference - Society of Plastics Engineers*, 8, 13–17.
- li, R., Wang, C., Ma, S. Q., Liu, Z. H., Zang, C. C., Zhang, W. Y., & Sun, Y. C. (2020). High bonding strength between zirconia and composite resin based on combined surface treatment for dental restorations. *Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials*, 18. <https://doi.org/10.1177/2280800020928655>
- Li, Y., Li, C., Zheng, J., Zhou, H., Luo, Y., & Huang, X. (2016). Effects of water on the ballistic performance of para-aramid fabrics: three different projectiles. *Textile Research Journal*, 86(13), 1372–1384. <https://doi.org/10.1177/0040517515612355>
- Lin, C. hong, & Liu, F. Y. (2022). Effective time-dependent behavior of three-phase polymer matrix smart composites. *Composite Structures*, 289, 115457. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.115457>
- Lino Alves, F. J., Baptista, A. M., & Marques, A. T. (2016). Metal and ceramic matrix composites in aerospace engineering. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, 59–99. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100037-3.00003-1>
- Liu, P. (2021). New Design Consideration of Polymer Matrix Composite Materials. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 1029–1037. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00026-4>
- Loos, M. (2015). Composites. *Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNR Polymer Science and Technology*, 37–72. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3195-4.00002-3>
- Lourie, O., Cox, D. M., & Wagner, H. D. (1998). Buckling and collapse of embedded carbon nanotubes. *Physical Review Letters*, 81(8), 1638–1641. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1638>
- Low, M. (2014). Advances in ceramic matrix composites: an introduction. İçinde *Advances in Ceramic Matrix Composites* (ss. 1–6). Woodhead Publishing.

- Mahdian, A., Yousefi, J., Nazmdar, M., Zarif Karimi, N., Ahmadi, M., & Minak, G. (2017). Damage evaluation of laminated composites under low-velocity impact tests using acoustic emission method. *Journal of Composite Materials*, 51(4), 479–490. <https://doi.org/10.1177/0021998316648228>
- Mahesh, V. P., Patel, S., Gumaste, A., & Arora, A. (2021). Joining of Polymer Matrix Composites Through Friction Stir Processes. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 352–379. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00063-X>
- Makhlouf, A. S. H. (2011). Current and advanced coating technologies for industrial applications. *Nanocoatings and Ultra-Thin Films*, 3–23. <https://doi.org/10.1533/9780857094902.1.3>
- Mallick, P. K. (2021). Thermoset matrix composites for lightweight automotive structures. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, 229–263. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818712-8.00006-9>
- Manero, A., Gibson, J., Freihofer, G., Gou, J., & Raghavan, S. (2015). Evaluating the effect of nano-particle additives in Kevlar® 29 impact resistant composites. *Composites Science and Technology*, 116, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.05.007>
- Mantena, P. R., Mann, R., & Nori, C. (2001). Low-velocity impact response and dynamic characteristics of glass-resin composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 20(6), 513–533. <https://doi.org/10.1106/11F6-HPBW-H3N4-QXUG>
- Martynova, E., & Cebulla, H. (2018). Glass Fibers. *Inorganic and Composite Fibers: Production, Properties, and Applications*, 131–163. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102228-3.00007-4>
- Materials & Processes: Resin matrices for composites*. (2016). [compositesworld.com](https://www.compositesworld.com). <https://www.compositesworld.com/articles/the-matrix>
- Matrix Materials*. (y.y.). <https://www.materials.unsw.edu.au/>. Tarihinde 27 Ağustos 2021, adresinden erişildi <https://www.materials.unsw.edu.au/study-us/high-school-students-and-teachers/online-tutorials/composites/structure/matrix-materials>
- Maxineasa, S. G., & Taranu, N. (2018). Life cycle analysis of strengthening concrete beams with FRP. *Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*, 673–721. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00024-1>
- Merabti, S., Kenai, S., Belarbi, R., & Khatib, J. (2021). Thermo-mechanical and physical properties of waste granular cork composite with slag cement. *Construction and Building Materials*, 272, 121923. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121923>
- Metal Matrix Composites: Properties, Production, and Applications*. (y.y.). matmatch.com. Tarihinde 10 Eylül 2021, adresinden erişildi <https://matmatch.com/learn/material/metal-matrix-composites>

- Meyer, N., Schöttl, L., Bretz, L., Hrymak, A. N., & Kärger, L. (2020). Direct Bundle Simulation approach for the compression molding process of Sheet Molding Compound. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *132*, 105809. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2020.105809>
- Micheli, D., Vricella, A., Pastore, R., Delfini, A., Giusti, A., Albano, M., Marchetti, M., Moglie, F., & Primiani, V. M. (2016). Ballistic and electromagnetic shielding behaviour of multifunctional Kevlar fiber reinforced epoxy composites modified by carbon nanotubes. *Carbon*, *104*, 141–156. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.03.059>
- Micheli, Davide, Apollo, C., Pastore, R., Morles, R. B., Laurenzi, S., & Marchetti, M. (2011). Nanostructured composite materials for electromagnetic interference shielding applications. *Acta Astronautica*, *69*(9–10), 747–757. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.06.004>
- Middleton, B. (2016). Composites: Manufacture and Application. *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality: Structural Composites, Injection Molding, and 3D Printing*, 53–101. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-34061-8.00003-X>
- Mohan, T. P., Velmurugan, R., & Kanny, K. (2015). Damping characteristics of nanoclay filled hybrid laminates during medium velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, *82*, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.016>
- Montazeri, A., Javadpour, J., Khavandi, A., Tcharkhtchi, A., & Mohajeri, A. (2010). Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites. *Materials and Design*, *31*(9), 4202–4208. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.018>
- Mrlik, M., & AlMaadeed, M. A. S. (2015). Fillers in advanced nanocomposites for energy harvesting. *Fillers and Reinforcements for Advanced Nanocomposites*, 401–424. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100079-3.00016-8>
- Mullins, M. J., Liu, D., & Sue, H. J. (2018). Mechanical properties of thermosets. İçinde Q. Guo (Ed.), *Thermosets* (2. baskı, ss. 35–68). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101021-1.00002-2>
- Murty, B. S., Yeh, J. W., Ranganathan, S., & Bhattacharjee, P. P. (2019). High-entropy alloy coatings. *High-Entropy Alloys*, 177–193. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816067-1.00010-2>
- Muthusamy, A. R., Thiagamani, S. M. K., Krishnaswamy, S., Muthukumar, C., Pulikkalparambil, H., Subramanian, J., & Madasamy, N. (2022). Erosion performance of natural fiber reinforced vinyl ester hybrid composites: Effect of layering sequences. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.04.365>

- Nabi, S. A., Shahadat, M., Bushra, R., Oves, M., & Ahmed, F. (2011). Synthesis and characterization of polyanilineZr(IV)sulphosalicylate composite and its applications (1) electrical conductivity, and (2) antimicrobial activity studies. *Chemical Engineering Journal*, 173(3), 706–714. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.07.081>
- Nas, E., Gökkaya, H., & Sur, G. (2013). Sıcak Presleme Yöntemi Kullanılarak Kompozit Malzemelerin Üretilebilirliği Üzerine Bir Değerlendirme. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 3(2), 56–65. <https://doi.org/10.7212/zkufbd.v3i2.108>
- Nazeer, A. A., Al Sagheer, F., & Bumajdad, A. (2020). Aramid-Zirconia Nanocomposite Coating With Excellent Corrosion Protection of Stainless Steel in Saline Media. *Frontiers in Chemistry*, 8(May), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00391>
- Nguyen, T. A., Han, B., Sharma, S., Longbiao, L., & Bhat, K. S. (2020). Fiber-reinforced nanocomposites: an introduction. *Fiber-Reinforced Nanocomposites: Fundamentals and Applications*, 3–6. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819904-6.00001-3>
- NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. (y.y.). <https://www.itl.nist.gov/>. <https://doi.org/10.18434/M32189>
- Nunes, J. P., & Silva, J. F. (2016). Sandwiched composites in aerospace engineering. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, 129–174. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100037-3.00005-5>
- Osei Bonsu, A., Liang, W., Mensah, C., & Yang, B. (2022). Assessing the mechanical behavior of glass and basalt reinforced vinyl ester composite under artificial seawater environment. *Structures*, 38, 961–978. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2022.02.053>
- Other Fabrics*. (2019). <https://netcomposites.com/>. <https://netcomposites.com/guide/reinforcements/other-fabrics/>
- Ouarhim, W., Zari, N., Bouhfid, R., & Qaiss, A. E. K. (2019). Mechanical performance of natural fibers–based thermosetting composites. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 43–60. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00003-5>
- Palanisamy, P., Chavali, M., Kumar, E. M., & Etika, K. C. (2020). Hybrid nanocomposites and their potential applications in the field of nanosensors/gas and biosensors. *Nanofabrication for Smart Nanosensor Applications*, 253–280. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820702-4.00011-8>
- Palmer, J., Savage, L., Ghita, O. R., & Evans, K. E. (2010). Sheet moulding compound (SMC) from carbon fibre recyclate. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(9), 1232–1237. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2010.05.005>
- Park, C. H., & Lee, W. I. (2012). Compression molding in polymer matrix composites. *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, 47–94. <https://doi.org/10.1533/9780857096258.1.47>

- Park, H., Yang, S., Han, J., & Cho, M. (2020). Prediction of quasistatic constitutive equations of moisture-absorbed epoxy polymers using atomistic simulations. *Extreme Mechanics Letters*, 41, 100983. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100983>
- Pereira, J. M., & Revilock, D. M. (2008). Ballistic impact response of Kevlar 49 and zylon under conditions representing jet engine fan containment. *Earth and Space Conference 2008: Proceedings of the 11th Aerospace Division International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, 323. [https://doi.org/10.1061/40988\(323\)86](https://doi.org/10.1061/40988(323)86)
- Poliya Polives 701 Vinilester Reçine.* (y.y.). Tarihinde 23 Haziran 2022, adresinden erişildi <https://www.baranboya.com/poliya-polives-701-vinilester-recine>
- Potluri, R., Supriya, K., & Vittal, G. V. V. N. G. (2018). Effect of boron carbide particles inclusion on the mechanical behaviour of S2-Glass fiber based polyester composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 20257–20267. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.397>
- Qian, X., Wang, H., Zhang, D., & Wen, G. (2016). High strain rate out-of-plane compression properties of aramid fabric reinforced polyamide composite. *Polymer Testing*, 53, 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.06.006>
- Raimondo, L., Iannucci, L., Robinson, P., & Curtis, P. T. (2012). A progressive failure model for mesh-size-independent FE analysis of composite laminates subject to low-velocity impact damage. *Composites Science and Technology*, 72(5), 624–632. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.01.007>
- Raji, M., Abdellaoui, H., Essabir, H., Kakou, C. A., Bouhfid, R., & El Kacem Quais, A. (2019). Prediction of the cyclic durability of woven-hybrid composites. *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 27–62. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102290-0.00003-9>
- Reaction Injection Molding (RIM) Vs Plastic Injection Molding (PIM).* (2015). protoplastics.com. <https://protoplastics.com/reaction-injection-molding-rim-vs-plastic-injection-molding-pim/>
- Reddy, P. R. S., Reddy, T. S., Srikanth, I., Madhu, V., Gogia, A. K., & Rao, K. V. (2016). Effect of viscoelastic behaviour of glass laminates on their energy absorption subjected to high velocity impact. *Materials and Design*, 98, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.038>
- Reis, P. N. B., Ferreira, J. A. M., Antunes, F. V., & Richardson, M. O. W. (2009). Effect of interlayer delamination on mechanical behavior of carbon/epoxy laminates. *Journal of Composite Materials*, 43(22), 2609–2621. <https://doi.org/10.1177/0021998309344649>
- Reis, P. N. B., Ferreira, J. A. M., Santos, P., Richardson, M. O. W., & Santos, J. B. (2012). Impact response of Kevlar composites with filled epoxy matrix. *Composite Structures*, 94(12), 3520–3528. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.05.025>

- Reis, P. N. B., ZhangFerreira, J. A. M., Zhang, Z. Y., Benameur, T., & Richardson, M. O. W. (2013). Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix. *Composites Part B: Engineering*, 46, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.10.028>
- Roncaglia, F., Romagnoli, M., Incudini, S., Santini, E., Imperato, M., Spinelli, L., di Bona, A., Biagi, R., & Mucci, A. (2021). Graphite-epoxy composites for fuel-cell bipolar plates: Wet vs dry mixing and role of the design of experiment in the optimization of molding parameters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(5), 4407–4416. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.272>
- Saburow, O., Huether, J., Maertens, R., Trauth, A., Kechaou, Y., Henning, F., & Weidenmann, K. A. (2017). A Direct Process to Reuse Dry Fiber Production Waste for Recycled Carbon Fiber Bulk Molding Compounds. *Procedia CIRP*, 66, 265–270. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.03.280>
- Sadeghi, B., Tan, Z., Qi, J., Li, Z., Min, X., Yue, Z., & Fan, G. (2021). Enhanced mechanical properties of CNT/Al composite through tailoring grain interior/grain boundary affected zones. *Composites Part B: Engineering*, 223(May), 109133. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109133>
- Sadighi, M., Alderliesten, R. C., & Benedictus, R. (2012). Impact resistance of fiber-metal laminates: A review. *International Journal of Impact Engineering*, 49, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.05.006>
- Satheesh Raja, R., & Manisekar, K. (2016). Experimental and statistical analysis on mechanical properties of nano flyash impregnated GFRP composites using central composite design method. *Materials and Design*, 89, 884–892. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.043>
- Schiffer, A., Cantwell, W. J., & Tagarielli, V. L. (2015). An analytical model of the dynamic response of circular composite plates to high-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 85, 67–82. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.06.010>
- Scientific Principles of Composites. (y.y.). *ASM International*. <https://www.asminternational.org/documents/10192/1942084/composite.pdf/0eb5cca8-4613-482c-811c-993c58b42e92>
- Seshanandan, G., Ravindran, D., & Sornakumar, T. (2016). Mechanical properties of nano titanium oxide particles - hybrid jute-glass FRP composites. *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 1383–1388. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.019>
- Sevkat, E., Liaw, B., Delale, F., & Raju, B. B. (2010). Effect of repeated impacts on the response of plain-woven hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 41(5), 403–413. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.01.001>
- Shadakshari, R., Niranjana, H. B., & Pakkirappa, H. (2022). Investigation of mechanical properties, thermal and electrical conductivity of multi-walled carbon nanotubes reinforced with Al₂O₃ nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 56, 135–142. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.12.567>

- Shams, H. R., Ghanbari, D., Salavati-Niasari, M., & Jamshidi, P. (2013). Solvothermal synthesis of carbon nanostructure and its influence on thermal stability of poly styrene. *Composites Part B: Engineering*, 55, 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.018>
- Shebanov, S. M., Kalinina, I. G., Ivanov, V. B., Bova, V. G., Novikov, I. K., Pavlikov, A. V., & Shebanov, M. S. (2020). Improved Strength of Aramid Thread Fibers After Surface Treatment with Carbon Nanotubes. *Fibre Chemistry*, 52(1), 63–64. <https://doi.org/10.1007/s10692-020-10152-3>
- Shrivastava, A. (2018). Additives for Plastics. *Introduction to Plastics Engineering*, 111–141. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39500-7.00004-6>
- Singh, J. P., Jain, M. K., Singh, A. K., Mandal, A., & Kumar, A. (2021). Prediction of compressive strength of geopolymer products using central composite design. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4483–4489. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.989>
- Singh, T. J., & Samanta, S. (2015). Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 1381–1387. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.057>
- SMC - BMC - Sıcak Pres Kalıplama. (y.y.). Tarihinde 23 Haziran 2022, adresinden erişildi <https://www.akpakimya.com/uygulama-alani/SMC-BMC>
- SMC ve BMC Sıcak Pres. (y.y.). Tarihinde 23 Haziran 2022, adresinden erişildi <https://www.poliya.com/tr/smc-ve-bmc-sicak-pres>
- Soliman, E. M., Sheyka, M. P., & Taha, M. R. (2012). Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes. *International Journal of Impact Engineering*, 47, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.03.002>
- Song, B., Liu, Z., Wang, T., & Wang, L. (2021). Grafting of CNTs onto the surface of PBO fibers at high-density for enhancing interfacial adhesion, mechanical properties and stability of composites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 598, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.04.021>
- Sorrentino, L., Bellini, C., Corrado, A., Polini, W., & Aricò, R. (2014). Ballistic performance evaluation of composite laminates in kevlar 29. *Procedia Engineering*, 88, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.048>
- Sreekumar, P. A., Joseph, K., Unnikrishnan, G., & Thomas, S. (2007). A comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques. *Composites Science and Technology*, 67(3–4), 453–461. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2006.08.025>
- Starr, T. F., & Ketel, J. (2000). Composites and pultrusion. *Pultrusion for Engineers*, 1–18. <https://doi.org/10.1533/9781855738881.1>

- Sutherland, L. S., & Guedes Soares, C. (2005). Impact on low fibre-volume, glass/polyester rectangular plates. *Composite Structures*, 68(1), 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.02.010>
- Tang, H., Chen, Z., Zhou, G., Sun, X., Li, Y., Huang, L., Guo, H., Kang, H., Zeng, D., Engler-Pinto, C., & Su, X. (2019). Effect of fiber orientation distribution on constant fatigue life diagram of chopped carbon fiber chip-reinforced Sheet Molding Compound (SMC) composite. *International Journal of Fatigue*, 125, 394–405. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2019.04.016>
- Tanzi, M. C., Farè, S., & Candiani, G. (2019). Organization, Structure, and Properties of Materials. *Foundations of Biomaterials Engineering*, 3–103. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101034-1.00001-3>
- Tatara, R. A. (2017). Compression Molding. *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications: Second Edition*, 291–320. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00014-6>
- Tehrani Dehkordi, M., Nosrati, H., Shokrieh, M. M., Minak, G., & Ghelli, D. (2013). The influence of hybridization on impact damage behavior and residual compression strength of intraply basalt/nylon hybrid composites. *Materials and Design*, 43, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.005>
- Thooyavan, Y., Kumaraswamidhas, L. A., Edwin Raj, R., Binoj, J. S., & Brailson Mansingh, B. (2022). Failure analysis of basalt bidirectional mat reinforced micro/nano Sic particle filled vinyl ester polymer composites. *Engineering Failure Analysis*, 136, 106227. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2022.106227>
- Töre, C. (2010). *Kompozit malzeme temelleri*. Makine Mühendisleri Odası.
- Töre, C. (2011). Kompozit Üretimi. İçinde *Kompozit Malzeme Temelleri - Polimer Matrisli* (1. baskı, ss. 277–319). Makine Mühendisleri Odası.
- TUSAŞ kompozitte liderliğini sürdürüyor*. (2020). www.savunmasanayist.com
- Wang, D., Bai, T., Cheng, W., Xu, C., Wang, G., Cheng, H., & Han, G. (2019). Surface modification of bamboo fibers to enhance the interfacial adhesion of epoxy resin-based composites prepared by resin transfer molding. *Polymers*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/polym11122107>
- Wang, F. K. (2017). Carbon Fibers and Their Thermal Transporting Properties. *Thermal Transport in Carbon-Based Nanomaterials*, 135–184. <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-346240-2.00006-6>
- Wang, H., Chao, L., Wei, X., Li, J., Ji, C., Wang, B., Qi, X., Hu, P., Ying, Y., & Tian, M. (2019). Design of SiO₂-TiO₂-PAM composite flocculant with self-degrading characteristics and optimization of the flocculation process using a combination of central composite design and response surface methodology. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 583, 123982. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2019.123982>

- Wang, J., Pozegic, T. R., Xu, Z., Nigmatullin, R., Harniman, R. L., & Eichhorn, S. J. (2019). Cellulose nanocrystal-polyetherimide hybrid nanofibrous interleaves for enhanced interlaminar fracture toughness of carbon fibre/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 182(May), 107744. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107744>
- Wang, R.-M., Zheng, S.-R., & Zheng, Y.-P. (2011). Forming technology of polymer matrix composites. *Polymer Matrix Composites and Technology*, 253–548. <https://doi.org/10.1533/9780857092229.2.253>
- Warrier, A., Godara, A., Rochez, O., Mezzo, L., Luizi, F., Gorbatiikh, L., Lomov, S. V., VanVuure, A. W., & Verpoest, I. (2010). The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(4), 532–538. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.001>
- Welsh, L. M., & Harding, J. (1985). Effect of Strain Rate on the Tensile Failure of Woven Reinforced Polyester Resin Composites. *Journal de Physique (Paris), Colloque*, 46(8), 405–414. <https://doi.org/10.1051/jphyscol:1985551>
- What is Aramid.* (y.y.). tejinaramid.com. Tarihinde 23 Haziran 2022, adresinden erişildi <https://www.tejinaramid.com/en/technology/what-is-aramid/>
- Where are Composites Used.* (y.y.). Tarihinde 18 Haziran 2022, adresinden erişildi <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/composites/>
- Williams, J. (y.y.). *The science and technology of composite materials*. science.org.au. Tarihinde 02 Temmuz 2022, adresinden erişildi <https://www.science.org.au/curious/technology-future/composite-materials>
- Witten, E., & Mathes, V. (2020). *The Market for Glass Fibre Reinforced Plastics (GRP) in 2020*. November, 29. www.avk-tv.de
- Wu, Q., He, J., Wang, F., Yang, X., & Zhu, J. (2020). Comparative study on effects of covalent-covalent, covalent-ionic and ionic-ionic bonding of carbon fibers with polyether amine/GO on the interfacial adhesion of epoxy composites. *Applied Surface Science*, 532(August), 147359. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147359>
- Wypych, G. (2016). VE vinyl ester resin. *Handbook of Polymers*, 702–703. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-92-8.50214-7>
- Wythers, M. C. (2017). METAL MATRIX COMPOSITES. İçinde *Advances in Materials Science Research* (ss. 94–98). Nova Science Publishers.
- Yang, B., Wang, Z., Zhou, L., Zhang, J., & Liang, W. (2015). Experimental and numerical investigation of interply hybrid composites based on woven fabrics and PCBT resin subjected to low-velocity impact. *Composite Structures*, 132, 464–476. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.05.069>
- Yang, L., Yan, Y., & Kuang, N. (2013). Experimental and numerical investigation of aramid fibre reinforced laminates subjected to low velocity impact. *Polymer Testing*, 32(7), 1163–1173. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.07.010>

- Yen, C. F. (2012). A ballistic material model for continuous-fiber reinforced composites. *International Journal of Impact Engineering*, 46, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.12.007>
- Yokoyama, N. O., Donadon, M. V., & de Almeida, S. F. M. (2010). A numerical study on the impact resistance of composite shells using an energy based failure model. *Composite Structures*, 93(1), 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.06.006>
- Zare, Y. (2015). New models for yield strength of polymer/clay nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 73, 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.026>
- Zhang, W., & Cai, Y. (2010). *Continuum Damage Mechanics and Numerical Applications*. Springer Berlin Heidelberg.
- Zirconia. (y.y.). Tarihinde 23 Haziran 2022, adresinden erişildi <https://www.zircon-association.org/zirconia.html>
- Zirconium Dioxide (Zirconia): *Properties, Production and Applications*. (y.y.). Tarihinde 04 Temmuz 2022, adresinden erişildi <https://matmatch.com/learn/material/zirconium-dioxide-zirconia>