



**GRAFEN KATKILI CAM/EPOKSİ NANOKOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Farnoud KHAKZAD

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2017

Farnoud KHAKZAD tarafından hazırlanan “GRAFEN KATKILI CAM/EPOKSİ NANOKOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Elmas SALAMCI
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan : Doç. Dr. Yusuf USTA
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye : Doç. Dr. Ferhat KADIOĞLU
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 15/08/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Farnoud KHAKZAD

15/08/2017

GRAFEN KATKILI CAM/EPOKSİ NANOKOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Farnoud KHAKZAD

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2017

ÖZET

Nano parçacıklar içeren hibrit kompozitler yeni nesil malzemeler üretiminde önemli bir role sahiptir. Düşük ağırlık ve yüksek mukavemete sahip olan hibrit nano kompozitlerin yeni yöntemler ile üretilmeleri araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu tez kapsamında vakum infüzyon yöntemiyle üretilen cam/ epoksi kompozite farklı oranlarda grafen nano parçacığı ilave edilmiştir. Grafen katkılı cam fiber takviyeli epoksi nanokompozitin mekanik özellikleri çekme deneyi, üç nokta eğme deneyi ve serbest ağırlık düşürme darbe testleri yapılarak incelenmiştir. Deney numuneleri vakum infüzyon yöntemi ile hazırlanan plakaların CNC cihazında standart ölçülerde kesilmesi ile hazırlanmıştır. %0,15; %0,25; %0,35; %0,45 ve %0,75 oranlarında grafen ilavesiyle hazırlanan numunelerin çekme, üç nokta eğme ve serbest ağırlık düşürme darbe deneylerinden elde edilen sonuçlar katkısız numuneyle karşılaştırılmış ve en yüksek çekme mukavemeti ve eğme mukavemeti ve ivme değerleri belirlenmiştir. Çekme testinde eksenel çekme yüküne maruz kalan numunelerde çekme mukavemeti değeri grafen oranının artmasıyla artmaktadır. En yüksek değer grafen oranı %0,45 olduğunda tespit edilmiştir. Bu oranda çekme mukavemeti katkısız numuneye kıyasla %31,29 artmaktadır. Ancak grafen oranının daha fazla artırılması malzemeyi olumsuz etkilemekte ve çekme mukavemetinin düşüşüne neden olmaktadır. Üç nokta eğme testinde grafen oranının artmasıyla eğme mukavemeti artmaktadır. En yüksek eğme mukavemeti grafen oranı %0,25 olduğunda görülmektedir. Bu oranda eğme mukavemeti katkısız numuneye göre %34,74 artmıştır. Nano parçacığın daha fazla ilave edilmesi eğme mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur. Serbest ağırlık düşürme darbe deneyinde en yüksek ivme değeri grafenin ağırlık oranı %0,25 olduğunda tespit edilmiştir. Bu oranda ivme değeri grafensiz numuneye kıyasla %44 artmıştır. Grafen oranının artmasıyla ivme değerinde düşme görülmektedir.

Bilim kodu : 91520

Anahtar kelimeler : Grafen, cam/epoksi, nano kompozit

Sayfa : 131

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Elmas SALAMCI

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS/EPOXY
NANOCOMPOSITES LAMINATES ENHANCED WITH GRAPHENE
(M. Sc.Thesis)

Farnoud KHAKZAD

GAZI UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
August 2017

ABSTRACT

Hybrid composites which contain nanoparticles play important role in the production of new generation materials. The production of low weight and high resistance hybrid nanocomposites with new methods attract attention of researchers. In this thesis, graphene nanoparticle at different ratios added to glass / epoxy multilayer composite which produced by the vacuum infusion method. Graphene's capability examined with tensile, three-point bending and drop weight impact experiments in order to improve mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy. Experimental samples prepared from cutting plate in the standard scale with CNC device. This plate produced by the vacuum infusion method. The result of tension, tree point bending and drop weight impact test in 0.15%, 0.25%, 0.35%, 0.45% and 0.75% graphene ratios of the prepared samples compared with pristine sample and the highest tensile strength, highest bending strength and highest acceleration were determined as optimum result. The value of tensile strength in samples which subjected to axial tensile load in a tensile test increases with increasing graphene ratio. When the ratio of the graphene was 45% the optimum value was determined. The tensile strength in this ratio increased to 31.29% in comparison to pristine sample. While, further increase in the ratio of graphene causes negative effects on the material and reduces the tensile strength. Increasing the graphene ratio in three point bending test increases bending strength. The highest bending strength is seen when the grafen ratio is 0.25%. In this ratio the bending strength increased to 34.74% in comparison to pristine sample. Adding more nano particle caused a drop in the bending strength. In the drop weight impact test, the highest acceleration value was determined when the weight ratio of the graphene was 0.25%. In the same ratio, the acceleration value of the pristine sample increased to 44%. with the increase of the graphene ratio, the acceleration value decreased.

Science Code : 91520
Key Words : Graphene, glass/epoxy, nano composite
Page Number : 131
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Elmas SALAMCI

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok kıymetli Atama Anama ve kız kardeşime, büyük emeği geçen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Elmas SALAMCI'ya, çalışmam boyunca ilgisini eksik etmeyen, desteklerinden ve değerli katkılarından dolayı Arş. Gör. Mehmet ÇAĞRI TÜZEMEN'e, serbest ağırlık düşürme darbe deneyinde büyük emeği geçen Prof. Dr. Özgür ANIL'a, çekme ve üç nokta eğme deneylerinde yardımcı olan Arş. Grv. Fatma Kübra ERBAY'a, mikro görüntülerin alınmasında yardımcı olan Gazi Üniversitesi Biyoloji Bölümüne ve numunelerin hazırlanmasında emeği geçen ODAK Kompozit Teknolojileri ve YM çelik kapı firmalarına ve tez sürecinde destekleri olan Yusuf BEDELİ, Nasrin MEHMANDOUST ve Zahra RAHİMİ arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1. Kompozit Malzeme Tanımı.....	3
2.2. Matris Türüne Göre Kompozitlerin Çeşitleri	3
2.3. Takviye Edici Faza Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	3
2.3.1. Tabaka yapılı kompozitler	3
2.3.2. Parçacık takviyeli kompozitler	4
2.3.3. Fiber esaslı kompozitler.....	4
2.3.4. Lamel esaslı kompozitler	6
2.3.5. Dolgu kompozitler	6
2.4. Nanokompozitler	6
2.4.1. Nanokompozitlerin avantajları ve dezavantajları	7
2.5. Nanokompozitlerin Sınıflandırılması	7
2.5.1. Polimer esaslı nanokompozitler.....	8
2.5.2. Seramik esaslı nanokompozitler	8
2.5.3. Metal esaslı nanokompozitler	8
2.6. Epoksi	9

	Sayfa
2.6.1. Çeşitli epoksi reçinelerin bazı özellikleri.....	9
2.6.2. Üretimde çeşitli epoksi reçinelerin bazı uygulamaları	10
2.7. Cam Elyaf	10
2.7.1. Cam elyafın avantajları	10
2.7.2. Cam elyafın dezavantajları	11
2.8. Karbon Türleri	12
2.9. Grafen (Graphene).....	13
2.10. Polimer Nanokompozitlerin Üretim Yöntemleri	15
2.10.1. Doğrudan karıştırma	15
2.10.2. Çözeltinin işlenmesi.....	16
2.10.3. in-situ polimerizasyon.....	16
2.10.4. Nano boyutlardaki kalıplarda monomerden polimer üretimi	16
2.11. Hibrit Malzemeler.....	16
2.12. Kompozit Üretim Yöntemleri.....	17
2.12.1. El yatırması	17
2.12.2. Hibrit el yatırması	18
2.12.3. Püskürtme yöntemi	18
2.12.4. Elyaf sarma yöntemi	19
2.12.5. Reçine transfer kalıplama	19
2.12.6. Vakum infüzyon yöntemi	20
2.12.7. Otoklavsız prepreg	20
2.12.8. Üretim yöntemlerinin karşılaştırılması	21
3. LİTERATÜR TARAMASI	23
3.1. Polimer-Grafen Nanokompozitlerin Mekaniksel Özellikleri	23
3.2. Polimer-Grafen Nanokompozitlerin Elektrik İletkenliği.....	26
3.3. Polimer-Grafen Nanokompozitlerin Isıl İletkenliği	27

	Sayfa
3.4. Polimer-Grafen Nanokompozitlerin Diğer Özellikleri.....	27
3.5. Polimer Grafen Nanokompozitlerin Kullanım Alanları	28
3.5.1. Polimer özelliklerin güçlendirilmesi.....	28
3.5.2. Sensörler	29
3.5.3. Elektromanyetik girişim dalgalar koruyucusu ve elektrostatik deşarj malzemeleri	29
3.5.4. Elektrotlar	30
3.6. Cam-Polimer Kompozitler Üzerinde Nano Parçacıkların Etkisi.....	30
3.7. Grafen Katkılı Hibrit Nano Kompozitler.....	32
4. MALZEME VE METOD.....	36
4.1. Malzeme	36
4.2. Hesaplamalar	38
4.2.1. Kompozit üretim hesaplaması	38
4.2.2. Reçine hesabı	39
4.2.3. Grafen hesabı	40
4.3. Kompozit Üretim Aşamaları	40
4.3.1. Levhaların üretimi için vakum infüzyon cihazının kullanımı	40
4.3.2. Grafen- epoksi karıştırılması	44
4.3.3. Grafen- epoksi karışımı cam elyafa emilmesi ve kürleşme işlemi	45
4.4. Üç Nokta Eğme Testi	47
4.5. Çekme Testi.....	50
4.6. Serbest Ağırlık Düşürme Darbe Testi	53
4.7. Serbest Ağırlık Düşürme Darbe Testi Deney Düzeneği ve Ölçüm Araçları.....	56
4.7.1. Deney düzeneği.....	56
4.7.2. İvmeölçerler	57
4.7.3. Veri toplayıcısı.....	62

	Sayfa
4.7.4. Fotoseller	63
4.7.5. Düşük gürültülü koaksiyal kablo	67
4.7.6. Deneylerde kullanılan halka kuvvet algılayıcı: 201B03 Model ICP	68
4.7.7. Doğrusal değişkenli fark transformatörler (LVDT).....	69
4.8. Yakma Deneyi	71
5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	71
5.1. Yakma Deneyi	72
5.2. Çekme Deneyi	74
5.3. Üç Nokta Eğme Deneyi	82
5.4. Serbest Ağırlık Düşürme Darbe Deneyi.....	89
5.5. Kırık Yüzey SEM İncelemesi.....	115
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	120
KAYNAKLAR	124
ÖZGEÇMİŞ	132

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Cam elyaf çeşitlerinin karşılaştırması.....	12
Çizelge 2.2. Bazı kompozit üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları	21
Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan cam elyafın teknik özellikleri	36
Çizelge 4.2. Kullanılan reçinenin özellikleri	37
Çizelge 4.3. Kullanılan sertleştiricinin özellikleri	37
Çizelge 4.4. Nano grafenin özellikleri	38
Çizelge 4.5. Üretilen kompozit plakalarda matris ve takviye edici fazın ağırlıkları	40
Çizelge 4.6. Nano kompozitin üretiminde ilave edilmiş grafen ağırlığı ve kodlandırılması	40
Çizelge 4.7. Model 353B02 İvmeölçerin teknik özellikleri.....	62
Çizelge 4.8. 201B03 model ICP halka algılayıcısı teknik özellikleri	69
Çizelge 5.1. Numunelerin hacim oranları	72
Çizelge 5.2. Çekme deneyi sonuçları.....	74
Çizelge 5.3. Çekme deneyi nanopartikül etkisi	74
Çizelge 5.4. Üç nokta eğme testinden elde edilen sonuçlar.....	82
Çizelge 5.5. Üç nokta eğme deneyi nanoparçacık etkisi	82
Çizelge 5.6. Katkısız numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları	90
Çizelge 5.7. NG15 numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları ..	93
Çizelge 5.8. NG25 numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları ..	96
Çizelge 5.9. NG35 numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları ..	99
Çizelge 5.10. NG45 numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları	102
Çizelge 5.11. NG75 numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları	105
Çizelge 5.12. Ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları	108
Çizelge 5.13. Ağırlık düşürme darbe deneyi nanopartikül etkisi.....	109

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Değişik tipte fiber kompozitler.....	5
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin takviye elemanları çeşitleri	5
Şekil 2.3. Açılı tabakaların ayrı gösterimi	6
Şekil 2.4. Çeşitli karbon formları.....	12
Şekil 2.5. Grafen yaprağının atom yapısı.....	13
Şekil 2.6. El yatırması yöntemi.....	18
Şekil 2.7. Püskürtme yöntemi	18
Şekil 2.8. Sarma yöntemi	19
Şekil 2.9. Reçine transfer kalıplama yöntemi	19
Şekil 2.10. Vakum infüzyon yöntemi	20
Şekil 3.1. Grafen, tek cidarlı ve çok cidarlı karbon nanotüpler ile takviye edilmiş epoksi reçinelerin mekaniksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	24
Şekil 3.2. İşlem türüne göre grafen-polimer nanokompozitlerin elektriksel geçirgenlik eşiği	26
Şekil 3.3. Numunelerin maksimum eğme mukavemeti	33
Şekil 3.4. Numunelerin kırılma tokluğu	33
Şekil 4.1. Hazırlanan cam elyafın boyutu	38
Şekil 4.2. Eğilme halindeki çubuk üzerindeki gerilme dağılımı.....	47
Şekil 4.3. Numuneye uygulanan kuvvet	48
Şekil 4.4. Üç nokta eğme test numunesinin boyutları	49
Şekil 4.5. Kompozit ile onu oluşturan fiber ve matrisin tipik bir gerilme-gerinim eğrisi	51
Şekil 4.6. Çekme test numunesinin boyutları	51
Şekil 4.7. Darbe testinde kullanılan test numunesinin boyutları	53
Şekil 4.8. Çalışmada kullanılan deney düzeneği	56
Şekil 4.9. İvmeölçerin yapısı	58

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. Üç eksenli ivmeölçer	59
Şekil 4.11. İvmeölçerlerin montaj şekilleri ve yüksek frekansa etkileri 1. Vida ile 2. Yapıştırıcı ile 3. Montaj pedi ile 4. Düz mıknatıs ile 5. Çift taraflı mıknatıs ile 6. El çubuğu ile(Manual).....	61
Şekil 4.12. Karşılıklı fotosel	64
Şekil 4.13. Cisimden yansımali fotosel.....	65
Şekil 4.14. Reflektörlü fotosel	66
Şekil 4.15. 003A20 Model düşük gürültülü koaksiyal kablo ve içyapısı	67
Şekil 4.16. Halka kuvvet algılayıcısı montaj sekli.....	69
Şekil 4.17. Doğrusal değişkenli fark transformatörün yapısı	70
Şekil 5.1. Çekme deneyi eğrileri.....	76
Şekil 5.2. Numunelerin çekme deneyi çekme mukavemeti grafiği	76
Şekil 5.3. Numunelerin çekme deneyi şekil değiştirme grafiği	77
Şekil 5.4. Numunelerin çekme deneyi elastiklik modülü grafiği.....	78
Şekil 5.5. Numunelerin çekme deneyi tokluk grafiği	78
Şekil 5.6. Üç nokta eğme testi gerilme – gerinme eğrisi	84
Şekil 5.7. Numunelerin üç nokta deneyi eğme mukavemeti grafiği.....	84
Şekil 5.8. Numunelerin üç nokta eğme deneyi şekil değiştirme grafiği	85
Şekil 5.9. Numunelerin üç nokta eğme deneyi eğme elastiklik modülü.....	86
Şekil 5.10. Numunelerin üç nokta eğme deneyi tokluk grafiği	86
Şekil 5.11. Katkısız numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği	91
Şekil 5.12. Katkısız numunesinde yer değişim (displacements) - zaman grafiği	92
Şekil 5.13. Katkısız numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği	92
Şekil 5.14. Katkısız numunesinde çarpma yük (impact load) - zaman grafiği	93
Şekil 5.15. NG15 numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme(acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği	94

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. NG15 numunesinde yer değişim (displacements) - zaman grafiği.....	95
Şekil 5.17. NG15 numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği	95
Şekil 5.18. NG15 numunesinde çarpma yük (impact load) - zaman grafiği.....	96
Şekil 5.19. NG25 numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği.....	97
Şekil 5.20. NG25 numunesinde yer değişim (strain) - zaman grafiği	98
Şekil 5.21. NG25 numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği	98
Şekil 5.22. NG25 numunesinde çarpma yük (impact load) - zaman grafiği.....	99
Şekil 5.23. NG35 numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği.....	100
Şekil 5.24. NG35 numunesinde yer değişim (strain) - zaman grafiği	101
Şekil 5.25. NG35 numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği.....	101
Şekil 5.26. NG35 numunesinde çarpma yük (impact load)- zaman grafiği.....	102
Şekil 5.27. NG45 numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği.....	103
Şekil 5.28. NG45 numunesinde yer değişim (strain) - zaman grafiği	104
Şekil 5.29. NG45 numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği	104
Şekil 5.30. NG45 numunesinde çarpma yük (impact load) - zaman grafiği.....	105
Şekil 5.31. NG75 numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği.....	106
Şekil 5.32. NG75 numunesinde yer değişim (strain) - zaman grafiği	107
Şekil 5.33. NG75 numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği	107
Şekil 5.34. NG75 numunesinde çarpma yük (impact load) - zaman grafiği.....	108
Şekil 5.35. Numunelerin ağırlık düşürme darbe deneyi grafiği.....	110
Şekil 5.36. Numunelerin ağırlık düşürme darbe deneyi grafiği.....	111
Şekil 5.37. Numunelerin ağırlık düşürme darbe deneyi grafiği.....	112

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Plakaların üretiminde kullanılan cam elyaf kumaş.....	36
Resim 4.2. Üretimde kullanılan cam elyaf kumaşın kesilmiş hali.....	37
Resim 4.3. Grafenin SEM görüntüsü	38
Resim 4.4. Ayırıcı filmin serilmesi.....	41
Resim 4.5. Sızdırmaz bantların yapıştırılması	41
Resim 4.6. Kumaşların (cam) ayırıcı filme serilmesi	42
Resim 4.7. Peel ply kumaşın serilmesi	42
Resim 4.8. Ayıraç filmi ve hortumların yerleşimi	43
Resim 4.9. Manyetik karıştırıcıda nano grafen – epoksi karıştırılması	44
Resim 4.10. Ultra sonik cihazında grafen-epoksi karıştırılması	45
Resim 4.11. Nano grafen-reçine karışımın kalıp içine emdirilmesi	46
Resim 4.12. Üç nokta eğme test numunesinin boyu.....	49
Resim 4.13. Üç nokta eğme deneyi	50
Resim 4.14. Çekme test numunesinin boyu.....	52
Resim 4.15. Çekme deneyi esnasında kırılan numune	52
Resim 4.16. Darbe testinde kullanılan test numunesinin boyutları	54
Resim 4.17. a) ve b) Kullanılan cihaz ve test numunesinin yerleşimi	55
Resim 4.18. Deney düzeneğinde bulunan çekiç ve düzeneği	57
Resim 4.19. ICP Model 353B02 Piezoelektrik ivmeölçer	60
Resim 4.20. Montaj yeri ve aparatı.....	61
Resim 4.21. NI 9233-USB-9162 veri toplayıcı	63
Resim 4.22. Deneyde kullanılan fotoseller	66
Resim 4.23. 003A20 Model numaralı kablo.....	67
Resim 4.24. 201B03 Model ICP kuvars halka kuvvet algılayıcısı	68
Resim 4.25. Fırına koymadan önce hazırlanan yakma deney numuneler.....	71

Resim	Sayfa
Resim 5.1. grafen katkılı numunenin yüzey alan.....	73
Resim 5.2. Grafen katkılı numunenin yan tarafı.....	73
Resim 5.3. Çekme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi arka taraftan enine kesit yönde.....	79
Resim 5.4. Çekme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi ön taraftan enine kesit yönde.....	80
Resim 5.5. Çekme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi boyuna kesit yönde optik mikroskop görüntüsü.....	81
Resim 5.6. Çekme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi optik mikroskop görüntüsü	81
Resim 5.7. Üç nokta eğme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi arka taraftan enine kesit yönde.....	87
Resim 5.8. Üç nokta eğme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi ön taraftan enine kesit yönde	88
Resim 5.9. Üç nokta eğme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi boyuna kesit yönde.....	89
Resim 5.10. Ağırlık düşürme darbe deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi arka taraftan	113
Resim 5.11. Ağırlık düşürme darbe deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi arka taraftan	114
Resim 5.12. Ağırlık düşürme darbe deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi enine kesit yönde optik mikroskop görüntüsü	115
Resim 5.13. Çekme deneyi numunelerinde kırık yüzeye dik yönden düşük büyütme alınan SEM görüntüleri.....	116
Resim 5.14. Çekme deneyi numunelerinde kırık yüzeye dik yönden yüksek büyütme alınan SEM görüntüleri.....	117
Resim 5.15. Çekme deneyi numunelerinde kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüleri.....	118
Resim 5.16. Çekme deneyi numunelerin kırık yüzeyde oluşan hasar bölgelerine dikey yönden alınan SEM görüntüleri	119

1. GİRİŞ

İnsanların her gün artan ihtiyaçları karşısında, toplumun ihtiyaçlarını karşılayan teknolojilere ulaşım daha da önem kazanıyor. Nano parçacık teknolojisi, kendilerine has özellikleri nedeniyle, araştırmacıların oldukça dikkatini çekmiştir. Bu arada polimer nanokompozitler, iyileştirilmiş mekanik, kimyasal, aşınma ve dinamik özellikleri ile yaygın olarak çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu tür nanokompozitler, nano katkısı olmayan polimer kompozitlere göre daha üstün özelliklere sahipler. Bu avantajları sayesinde, farklı matris malzemeleri ve katkı elemanlarıyla çeşitli nanokompozitlerin hazırlanması ve incelenmesi, son yirmi yılda araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Mühendislik uygulamalarında kullanılan en önemli polimerden biri olan epoksi reçinelerini sayabiliriz ki herhangi bir katkı maddesi gerekmeksizin birçok uygulamada uygun özellikler sergilemektedir. Ancak, bir kompozitin dinamik ve mekaniksel yüklere dayanabilmesi gerektiğinden, katkı maddeleriyle takviye edilmesi zorunludur [1].

Polimerin çeşitli özelliklerini etkileyen katkı maddelerinden biri, nanoparçacıklardır. Araştırmalar şunu göstermektedir ki nanoparçacıklar, matrisin dayanım ve elastisite modülünü etkileyebilmektedir. Ancak eğer uygun bir şekilde seçilmezlerse, darbe karşısında mukavemetin azalmasına ve ayrıca nano kompozit malzemelerin daha kırılgan davranmalarına sebep olmaktadır [2].

Kompozit ve nanokompozitler üzerinde yapılan araştırmalar, araştırmacıların karşısına yeni ufuklar açmıştır. Örneğin hibrit nanokompozitler önceki nesile göre daha iyi performanslı yeni nesil kompozitlerdir. Bu kompozitlerin üretiminde matris olarak polimer ve elyaf birleşimi, takviye edici olarak nano parçacıkları kullanılmaktadır. Hibrit nanokompozitler, geleneksel fiber veya nanoparçacık takviyeli polimer kompozitlere kıyasla daha gelişmiş kompozitler olarak tanımlanmaktadır.

Fiber takviyeli veya nanoparçacık takviyeli kompozitler sadece bir matristen ve bir takviye fazından oluşmaktadır. Ancak yeni nesil hibrit kompozitler bir matris fazı ve birden fazla takviye fazından oluşmaktadır. Hafif hibrit kompozit malzemeler, yüksek mukavemet, sertlik ve nispeten iyi enerji absorbe eden özellikler gibi yüksek mekanik özellikler sunmaktadır. Yüksek performanslı kompozitler uçak, rüzgar türbini, otomotiv, gemi ve

köprü yapımında kullanılır. . Genelde hibrit kompozitler, yapay veya organik (doğal) elyaf ve mikro ve nano boyutta parçacıklardan oluşmaktadır.

Doğal elyaflar yüksek sertlik, dayanım ve elastisite modülü olmak gibi üstün mekanik özelliklere sahiptir. Örneğin sisal, jüt, kenevir, kaba yem, bambu ve diğer lifli malzemeler bunlara örnek olarak verilebilir. Doğal elyaflar düşük maliyet, hafiflik, kolay üretim ve çevreye zarar vermemeleri gibi önemli özelliklere sahiptir.

En yaygın sentetik(yapay) elyaflar aramid, cam, polietilen ve karbondur. Polimerin düşük sertliği ve mukavemeti, sert ve mukavemetli elyafların ilavesiyle geliştirilebilir.

Ayrıca nano parçacıklar genel olarak malzemenin mekanik özellikleri ve mukavemetini arttırmak için eklenir. Dolayısıyla kompozitlerin özellikleri nanodolgu malzemelerin ilavesi ile geliştirilmektedir [3].

Kompozitlerin üretiminde kullanılan nano parçacıklar arasında grafen parçacığı, araştırmacıların ve sanayicilerin dikkatini çekmiştir. Zira grafen, karbon atomlarından oluşan iki boyutlu yapıya sahiptir ve benzersiz termal, elektriksel ve mekaniksel özelliklere sahiptir. Az miktarda dolgu maddesi olarak kullanılması, nanokompozitlerin özelliklerinin önemli ölçüde artmasına sebep olmaktadır. Grafen ile güçlendirilmiş polimer nanokompozitlerin üretimi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır ve bu yöntemler polimer matriste grafen dağılımını ve kompozitin nihai özelliklerini etkilemektedir [4,5].

Bu tez çalışmasında, farklı takviye oranlarında grafenle güçlendirilmiş cam elyaf takviyeli polimer matrisli nanokompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Matris olarak epoksi reçine, takviye edici olarak cam elyaf ve güçlendirici olarak ağırlıkça %0.15, %0.25, %0.35, %0.45 ve %0.75 oranlarında nanografen kullanılmıştır. Numunelerin üretiminde vakum infüzyon yöntemi kullanılmış ve mekanik özelliklerinin incelenmesi için çekme, üç nokta eğme ve darbe testleri yapılmıştır. Nanografenin epoksi-cam kompozitleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve ayrıca üretilen numunelerde yüksek mekanik özellikleri elde etmek için gerekli grafenin optimum yüzdesi tespit edilmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Kompozit Malzeme Tanımı

Kompozit malzeme, iki veya birkaç malzemeden oluşan makroskopik ölçekteki fiziki bir karışımdır. Bileşenler fiziksel ve kimyasal özelliklerini korumaktadırlar. Ancak genel olarak karışım, bileşenlerinden daha iyi özelliklere sahiptir.

Genel olarak kompozit bir malzeme, matriste (polimer, metal ya da seramik) yer alan takviye edicilerin (elyaf, parçacık, kabuksal plaka veya dolgu maddeleri) birleşiminden oluşur. Matris, gerekli formun oluşması için takviye edicileri bir arada tutmaktadır. Aynı zamanda takviye ediciler, matrisin genel mekanik özelliklerini de geliştirmektedir. Eğer tasarım uygun ise yeni oluşturulan kompozit malzeme, kendisini oluşturan bileşenlerinden daha iyi özellikler ortaya koyacaktır [6-8].

Kompozit bir malzemenin birleşimi, fiziksel ve makroskopik düzeydedir ve kompozitin bileşenleri kimyasal olarak birleşmemektedir. Böylece, bileşenler kimyasal ve doğal özelliklerini tamamen korumaktadır.

2.2. Matris Türüne Göre Kompozitlerin Çeşitleri

Kompozitler, matris türüne göre metal, seramik ve polimer olmak üzere üç gruba sınıflandırılmıştır. Polimer matrisler, termoplastik ve termoset olarak ikiye ayrılmaktadır [6, 7].

2.3. Takviye Edici Faza Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Kompozitler, takviye edicinin türüne göre 5 gruba ayrılmaktadır.

2.3.1. Tabaka yapılı kompozitler

Farklı malzeme tabakaların üst üste dizilmesi ile üretilmektedir. Bu katmanlar genelde art arda dizilen polimerler, seramikler ve metallere oluşmaktadır. Katmanlı yapı, karmaşık süreçlere gerek kalmadan hazırlanabilir.

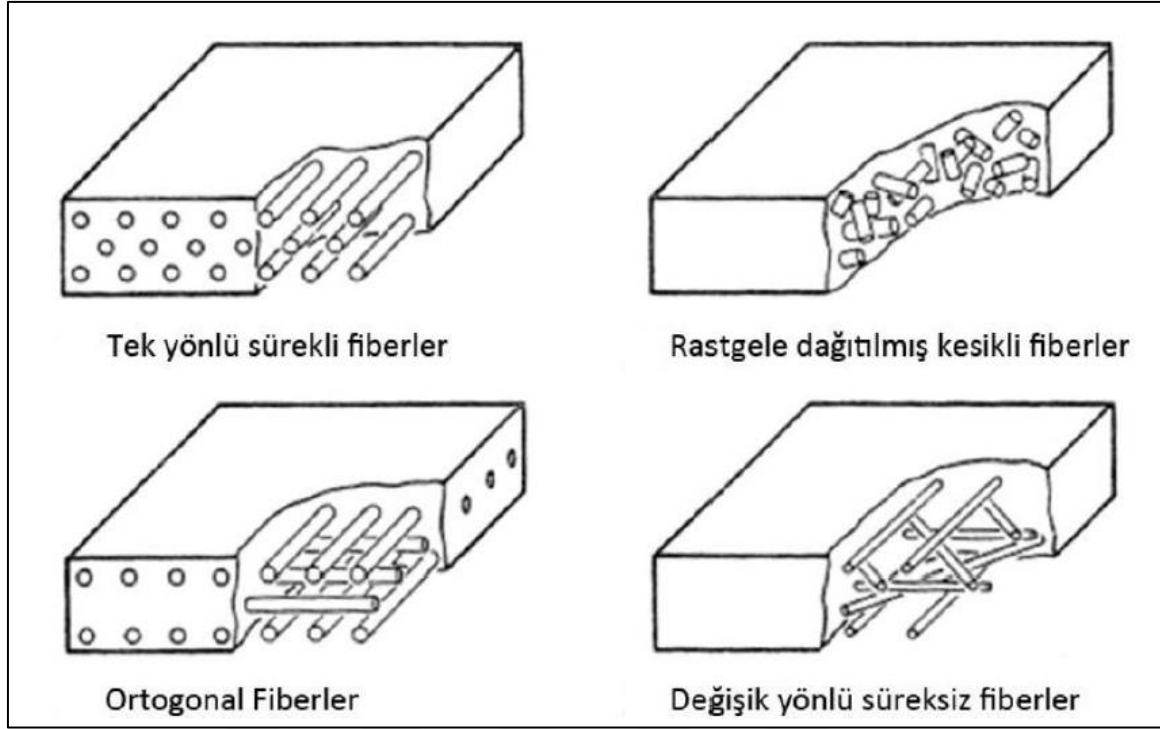
Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlenmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Örneğin tankların imalatında katmanlı yapılar kullanılmaktadır [6,7].

2.3.2. Parçacık takviyeli kompozitler

Bu tür kompozitte, dağılmış faz ince parçacıklardan oluşmaktadır. Kompozitlerde kullanılmak üzere çok sayıda parçacık bulunmaktadır ancak kompozitlerde kullanılan parçacıkların çoğu, başta Al_2O_3 olmak üzere oksit parçacıkları ve SiC, TiC, B gibi oksit olmayan parçacıklardan oluşmaktadır. Bu parçacıklar, elyaflardan daha ucuzdur ve yapının elastiklik modülü ve mukavemetinin artmasına neden olurlar. Bunların metal ve polimer kompozitlerde kullanılması, mukavemetin yükselmesine ve tokluğun azalmasına sebep olmaktadır [6,7].

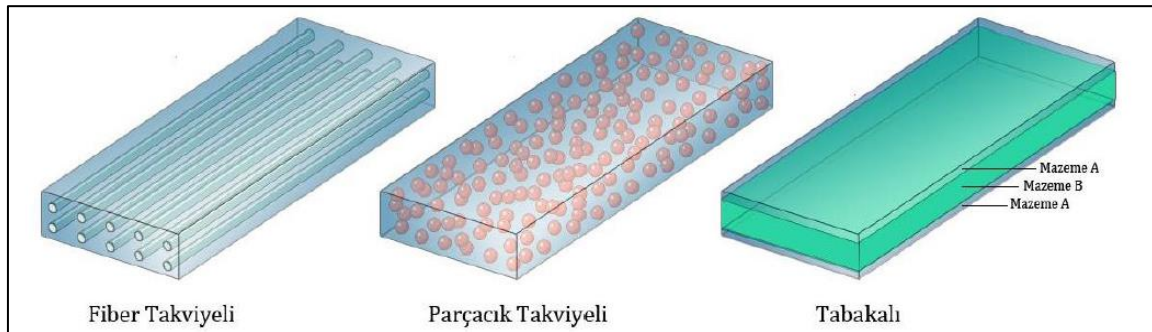
2.3.3. Fiber esash kompozitler

Birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan fiberlerin ilavesiyle elde edilir. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeki değerlerinden çok üst düzeyde olabilmektedir. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliğinin fark edilmesiyle fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır. Günümüzde düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına değin kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır. Fiberler yapı içerisinde kesintisiz uzayan sürekli fiberler veya uzun fiberlerin kesilmesiyle elde edilen süreksiz fiberler veya elyaflar şeklinde olabilirler.



Şekil 2.1. Değişik tipte fiber kompozitler

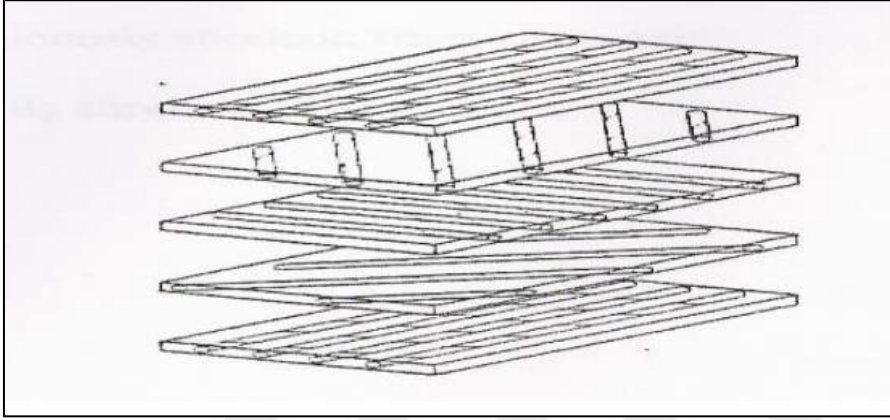
Fiber - matris kompozitlerinin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matrisin mekanik özellikleri ve fiber - matris ara yüzey özellikleridir. Fiberler dairesel olduğu gibi daha nadiren dikdörtgen, hegzagonal, poligonal ve içi boş dairesel kesitli olabilir. Bu kesitlerin bazı artı özellikleri olmakla birlikte (paketleme, yüksek mukavemet vs.) dairesel kesitler maliyeti ve kullanım kolaylığı ile üstünlük sağlar. Sürekli fiberlerle çalışmak genelde daha kolay olmakla beraber tasarım serbestliği süreksizlere göre çok daha sınırlıdır. Sürekli fiberler süreksizlerden daha iyi yönlenme göstermelerine karşılık, süreksiz fiberlerin kullanılması daha pratik sonuçlar vermektedir [6,7].



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin takviye elemanları çeşitleri

2.3.4. Lamel esaslı kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan büyük uzunluk / çap oranında dolgu malzemesi ilave edilerek üretilirler. Matris içinde yer alan pulların (lamellerin) konsantrasyonu düşük olabileceği gibi birbiri ile temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde olabilirler. Düzlemsel yapıya sahip pullarla sıkı paketlenme ile elde edilir. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla, ancak mukavemet özellikleri iyidir [6,7].



Şekil 2.3. Açılı tabakaların ayrı gösterimi

2.3.5. Dolgu kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması ile oluşan malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekillere sahip bir iskelet veya şebeke yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip kompozitlerin üretimi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir [6,7].

2.4. Nanokompozitler

Nanokompozit, normal kompozitler gibidir ancak bir veya birkaç bileşeni, 100 nanometreden daha küçük boyutlara sahiptir. Nanokompozitler iki fazdan oluşmaktadır. Birinci faz matris fazıdır, ve kristal bir yapıdadır ve polimer, metal veya seramik cinsinden oluşmaktadır. İkinci faz ise dayanıklılık, elektrik iletkenliği, manyetik özellikleri iyileştirmek için özel amaçlar için kullanılan takviye edici ve dolgu maddeleri olarak matris

fazında dağıtılan nanometre ölçeğindeki parçacıklardır. Nanomalzemeler konusunda nanokompozitler, büyük bir önem arz etmektedir. Nanokompozitlerin yapısında elyaf ve parçacıkların bulunması genelde matriste dayanıklılığa sebep olmaktadır. Aslında elyaf ve parçacıklar matriste dağıtıldığında, kompozite uygulanan yükler düzenli bir şekilde elyaf ve parçacıklara aktarılır. Matriste takviye edici parçacıkların dağıtılmasıyla dayanıklılık, sertlik ve gözeneklilik gibi özellikler değişebilmekte ve oluşan bir çatlağın büyümesi geciktirilebilmektedir. Ayrıca nanokompozitler, matris ve takviye ediciler arasındaki yüzeysel etkileşim neticesinde daha iyi özelliklere sahip olmaktadır [9].

2.4.1. Nanokompozitlerin avantajları ve dezavantajları

Nanokompozitlerin ortaya çıkması, mekanik ve ısı özelliklerde temel değişikliğe yol açmıştır. Nanokompozit tozların yüzey alanı/hacim oranı yüksektir. Bahsi geçen bu özellik sayesinde, nanokompozit tozların, sinter kapasitesinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Nanokompozitler, dayanıklılık, sertlik ve geniş bir sıcaklık aralığında yüksek ısı direnci gibi üstün fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir

Nanokompozit malzemelerin kendine has bu üstün özelliklerine karşı, nanokompozitlerin üretiminde ikinci fazın homojen şekilde matriste dağılmaması gibi mekanik özellikler üzerinde önemli rol oynayan ciddi süreç sorunları bulunmaktadır. Ayrıca nanokompozitlerin üretimi için pahalı kimyasalların kullanılması da ekonomiklik açısından dezavantaj yaratmaktadır [9].

2.5. Nanokompozitlerin Sınıflandırılması

Nanokompozitler, matrise göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

1. Polimer Esaslı Nanokompozitler
2. Seramik Esaslı Nanokompozitler
3. Metal Esaslı Nanokompozitler

2.5.1. Polimer esaslı nanokompozitler

Nanokompozitlerin arasında en çok polimer esaslı nanokompozitler dikkat çekmiştir. Polimer nanokompozitlerin yaygınlaşmasının nedeni, benzersiz mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleridir. Polimer nanokompozitler genelde yüksek dayanıklılık, hafiflik, yüksek ısıl dayanıklılık, yüksek elektrik iletkenlik ve yüksek kimyasal dayanıklılığa sahiptirler. Polimerlerin, organik ve mineral maddeler ile güçlendirilmesi oldukça yaygındır. Mikron ölçekte olan yaygın güçlendiricilerin aksine, nanokompozitlerde güçlendiriciler nanometre boyutlarda olan parçacıklardır. Saf bir polimere çok az miktarda nano parçacıklar eklemekle, çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve elastisite modülünde anlamlı artış görülmektedir [10].

2.5.2. Seramik esaslı nanokompozitler

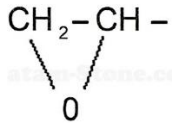
Önemli ölçüde metal ve inorganiklerden oluşan maddelere seramik denir. Seramikler, yüksek termal dayanıklılık, iyi kimyasal kararlılık ve yüksek mukavemet gibi çok iyi özelliklere sahiptir, ancak seramikte bulunan iyonik ve kovalent bağlar nedeniyle, kırılma tokluğu düşüktür, dolayısıyla bu maddelerin plastik deformasyonu sınırlıdır. Bu sorunu çözmek için uygun parçacık ve elyafların eklenmesi ile kırılma tokluğu artırılabilir. Eğer bu güçlendiriciler, nanometre boyutlarda olursa en yüksek kırılma tokluğu elde edilir [10].

2.5.3. Metal esaslı nanokompozitler

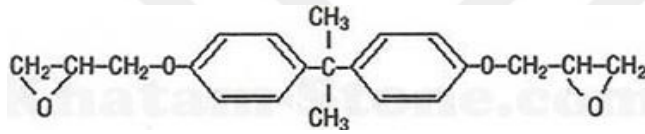
Metal esaslı nanokompozitler, hafiftir ve yüksek dayanıklılık ve sertlik nedeniyle otomobil ve havacılık sektöründe büyük ölçüde kullanılmaktadır. Ancak bu uygulamalar, bu kompozitlerdeki düşük çekme kabiliyeti yüzünden sınırlı kalmıştır. Kompozitlerin nanokompozitlere dönüştürülmesi, dayanıklılığın artmasına ve yukarıda bahsi geçen sınırlamaların giderilmesine sebep olmaktadır. Metal esaslı nanokompozitler, esasen toz metalurji tekniklerinde olduğu gibi üretilmektedir. Bu nanokompozitlerin farklı uygulamaları bulunmaktadır, özellikle son yıllarda düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, ve iyi termal dayanıklılık nedeniyle önemli ölçüde yaygınlaşan magnezyum esaslı nanokompozitler dikkat çekmektedir [10].

2.6. Epoksi

Epoksi terimi, içinde bir oksijen atomu, birbiri ile birleşen iki karbon atomuna bağlanan bir kimyasal gruba denir. En basit epoksinin, üç üyeli bir halkalı yapısı bulunmaktadır ki bunlara "Epoksi 1 ve 2" veya "Alfa epoksi" denilir. Aşağıdaki resim, bir epoksinin ideal kimyasal yapısını göstermektedir ki her epoksinin karmaşık molekülünün en basit özelliği olarak tespit edilmiştir [11].



Basit epoksinin ideal kimyasal yapısı (Etilen Oksit - Ethylene Oxide)



Bir tür epoksinin ideal kimyasal yapısı (Bisfenol A'nın Diglisidil Eteri - Diglycidyl ether of bisphenol A).

Kimyada eğer elde edilen epoksi, ağaç sakızı gibi bir görünüşe (Natural Plant Resin) (yapışkan ve kalın bir sıvı) sahip ise, sentetik reçine (Synthetic Resin) olarak bilinir.

Epoksi reçinelerin çoğu, Epichlorohydrin (Epichlorohydrin) ve Bisfenol A (Bisphenol A) arasındaki reaksiyondan elde edilir ve genelde kahverengi, sarı veya renksiz olarak üretilmektedir [11].

2.6.1. Çeşitli epoksi reçinelerin bazı özellikleri

- Elektrik yalıtım
- Kimyasallara karşı yüksek dayanıklılık (asitler, alkaliler, yağlar)
- Su ve neme karşı oldukça yüksek dayanıklılık
- Polyester reçinelere göre pişirme aşamalarında daha az hacimsel büzülme
- Pişirme aşamasında çevre sıcaklığına karşı düşük hassasiyet (Epoksi reçineler, çeşidine göre 5 ile 150 °C arasında kürleştirilirler)

- Epoksi reçinelerin moleküler yapısı nedeniyle ısı gerilmeye karşı dayanıklılık.

Günümüzde sanayide kullanılan reçineler arasında, epoksi reçineler yaygınca kullanılmaktadır [11].

2.6.2. Üretimde çeşitli epoksi reçinelerin bazı uygulamaları

- Dayanıklı kalıpların imalatı (Vakum şekillendirme kalıpları gibi)
- Mücevherat ve yapay takı üretimi
- Elektrikli parçaların yalıtımı
- Fiberglas ve kompozit endüstrisinde el yatırması
- Zemin Kaplaması (epoksi reçinelerin en yaygın kullanımı, salon, fabrika, oyun alanları, sağlık ve tıbbi malzemelerin üretim tesislerinin zemin kaplamasında)
- Boya, yapıştırıcılar ve sızdırmaz maddelerin hammaddesi olarak (renkli ve şeffaf Sealer veya Keeler) [11].

2.7. Cam Elyaf

Cam elyaf, kompozit sektöründe kullanılan en yaygın ve en kullanışlı liflerdir. Cam elyafın fiyatı, karbon ve aramid liflere göre daha düşüktür ve bu nedenle son yıllarda cam elyafların kullanılması artmaktadır.

Cam elyaf, yaklaşık 10 mikron kalınlığındadır. Cam elyafın yüksek çekme mukavemeti ve kimyasal direnci nedeniyle, havacılık, otomobil ve inşaat sektörlerindeki parçalarda, mobilya teçhizatlarında ve spor teçhizatlarının imalatında kullanılması her geçen gün daha da yaygınlaşmaktadır. Ayrıca cam elyaf inşaat sektöründe çeşitli yapıların güçlendirilmesi ve iyileştirilmesinde en yaygın kullanılan üründür. Ayrıca bu malzeme, çeşitli parçaların kimyasal ve korozyon ortamlardan korunması içinde (metal boru izolasyonu) yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

2.7.1. Cam elyafın avantajları

- Fiyatları, diğer liflere göre daha uygundur.
- Yüksek oranda satışı, çeşitlerinin her yerde bulunurluğuna yol açmıştır.

- Çekme dayanımı yüksektir.
- İyi bir elektrik yalıtımı sağlar.
- Kimyasal direnci yüksektir ve korozyon ortamlar için uygundur.
- Isıl direnci yüksektir [12].

2.7.2. Cam elyafın dezavantajları

Cam elyaf, karbon elyafa göre daha düşük elastisite modülüne sahiptir ve bu nedenle yapı mühendisleri tarafından binaların güçlendirilmesinde karbon elyafı, cam elyafa göre daha çok tercih edilmektedir.

- Cam elyafın yoğunluğu, kevlar ve karbon elyafa göre daha yüksektir.
- Cam elyaflar taşıma sırasında oluşan aşınmaya karşı hassastır.
- Cam elyafın yorulma direnci oldukça düşüktür.
- Cam elyaflar nispeten kırılgandır.
- Cam elyafların sertliği yüksektir ve bu nedenle kompozit işlemede kalıpların aşınmasına ve kesim aletlerinin yavaşlamasına sebep olur [12].

Cam elyaflar, tek yönlü, çift yönlü, örgülü ve çok yönlü dokularda çeşitli ağırlıklar ve dayanıklılıklarda sunulmaktadır. Cam elyaflar, doymuş polyester, vinil ester, fenolik reçineler ya da epoksi reçineler gibi reçine sistemlerinin çoğu ile uyumludur ve oldukça uygun kompozit sistemleri oluşturur. Cam elyaflar, içeriklerinde kullanılan malzemelere göre çeşitli türlere ayrılmaktadır. Bu özelliğe göre sınıflandırılan cam elyafların türleri, aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- a. E-Camı: Cam elyafın bu türü, piyasada bulunan en yaygın türdür ve cam takviyeli polimer matrisli kompozit üretiminin yüzde 80 ile 90'ını oluşturmaktadır. Bunların üretiminde alkaliler pek az kullanılmaktadır. Bu elyaflar, yapıların güçlendirmesinde ve yanı sıra elektrik sektöründe de yüksek elektrik direnci özelliğinden dolayı kullanılmaktadır. E cam elyafların fiyatı düşüktür ve satışı oldukça yüksek orandadır [12].
- b. C-Camı: Bu tür cam elyaflar, kireç ile bor ve silikat içermektedir ve korozyif ortamlarda oldukça kullanışlıdır. C-Camı, betonarme yapılar için kullanılmaktadır. Bu tür elyaflar, asit korozyonuna karşı çok iyi bir direnç göstermektedir ve esas kullanımı, boru hatlarının ve tankların yüzey kaplamasındadır.

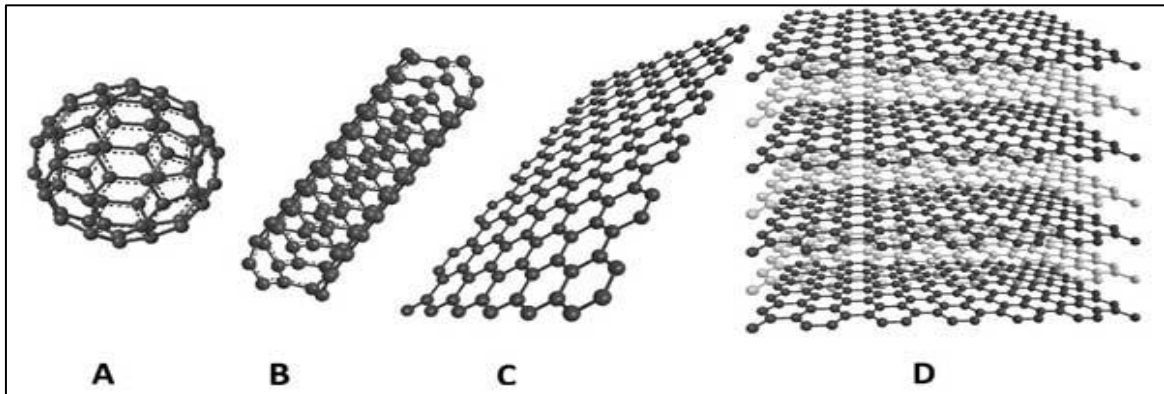
- c. A-Camı: İçinde alkalilerin oranı oldukça yüksek olan bu elyaf, günümüzde üretim döngüsünden çıkmıştır.
- d. S-Camı: Bu tip cam elyafların, elastiklik modülü ve dayanıklılıkları çok yüksektir ve daha çok havacılık sektöründe, havacılık ve uzay araştırmalarında uçakların parçaları ve füzelerin kaplanması için kullanılmaktadır. Bu elyaflar iyi ısı performansa sahiptirler ve üretim sırasında özel kalite kontrolüne tabi tutulmalıdır. S-Camı elyafların fiyatları çok yüksektir ve cam elyafların en pahalı türüdür. Dolayısıyla bu tip camın satışı düşüktür [12].

Çizelge 2.1. Cam elyaf çeşitlerinin karşılaştırması

Cam elyafın Türü	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)	% Uzama
E – Camı	2,6	3445	72,4	4,8
S – Camı	2,49	4558	86,9	5,4
C – Camı	2,56	3310	68,9	4,8
AR – Camı	2,7	3241	73,1	4,4

2.8. Karbon Türleri

Karbon, farklı mikroskobik türleri bulunmaktadır. Grafit, elmas, şekilsiz karbon (amorf), fulleren (Fullerene), karbon nanofiberler (Carbon Nanofibers, CNFs) karbon nanotüpleri (Carbon Nanotubes, CNTs) ve grafen (Graphene) gibi türler bu kategoride yer almaktadır. Grafen, çok boyutlu grafit karbon malzeme ailesinin en yeni üyesidir. Fulleren, sıfır boyutlu (D-0) bir nano malzeme olarak, karbon nanotüpleri, bir boyutlu (D-1) nano malzeme olarak ve Grafit, üç boyutlu (D-3) nano malzeme olarak ele alınmaktadır (Şekil 2.4). Aşağıda karbonun çeşitli formlarının özelliklerinden bahsedilmiştir [14,15]:

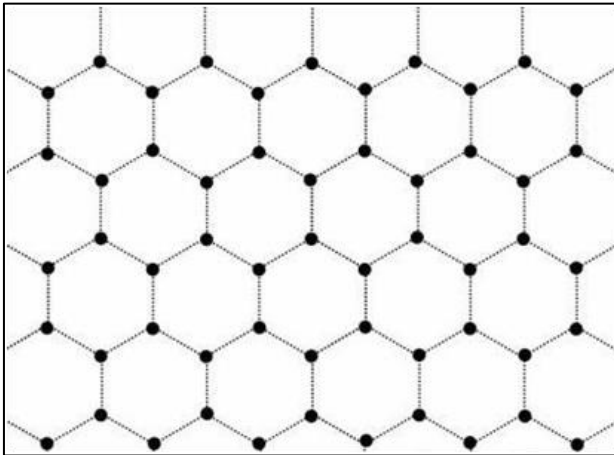


Şekil 2.4. Çeşitli karbon formları A) fulleren, B) karbon nanotüpleri, C) grafen ve D) Grafit

2.9. Grafen (Graphene)

İki boyutlu (D-2) grafen plakaları altıgen konfigürasyonda bulunan karbon atomlarından oluşmaktadır. bu atomlar SP^2 hibrit ile birbirine bağlanmıştır. [16,17]. Grafen plakaları, karbon atomlarının birbirinin yanına dizilmesi ile oluşmaktadır. Bir grafen plakasında, her bir karbon atomu, diğer 3 karbon atomuna bağlanmıştır. Bu üç bağlantı, bir plakada yer almışlardır ve aralarındaki açı, 120° olarak eşit düzeydedir. Bu durumda karbon atomları, düzenli altıgenlerden bir ağ oluştururlar. Bu da bir grafen plakasının en ideal durumudur. Bazı durumlarda bu plakaların şekli, beşgen ve yedigen oluşturacak derecede değişmektedir. Karbon-karbon bağlantısının mesafesi yaklaşık 0,142 nanometredir [18,19]. Tek katmanlı grafen, karbon yapıların yapılması için bir alt yapı oluşturmaktadır ki eğer birbirinin üzerine dizilirse üç boyutlu grafit oluşturur. Bu yapraklar arasındaki etkileşim Vanderwaals türündendir ve yapraklar arasındaki mesafe 0,335 nanometredir. Eğer tek grafen katmanı bir eksen etrafında sarılırsa, tek boyutlu karbon nanotüp ve eğer küre şeklinde sarılırsa sıfır boyutlu fulleren oluşturur [18].

Şekil 2.5’de grafen yaprağının atom yapısı gösterilmiştir. Bu resimde karbon atomları siyah noktalar ile gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Grafen yaprağının atom yapısı

Şimdiye kadar, çeşitli alanlarda polimer özelliklerinin geliştirilmesi ve uygulanabilirliğinin artması amacıyla polimer nanokompozitlerin üretimi ve uygulamalarına yönelik geniş çapta akademik ve endüstriyel araştırmalar yapılmıştır [20]. Bu doğrultuda, karbon temelli nano parçacıklar, karbon nanotüpleri [21-24] ve grafen gibi polimer nanokompozitlerin [25-30]

hazırlanmasında önemli bir rol oynamaktadırlar. Belirtilmelidir ki, bu nano parçacıkların her birinin kendine özgü mekanik mukavemeti, elektriksel iletkenlik, ısıl kararlılık gibi özellikleri bulunmaktadır.

Karbon nanotüplerin kullanımına yönelik gerçekleşen ilerlemelere rağmen, işlem sırasında nanotüplerin birbirine yapışmaya eğilimli olmaları, yüksek miktarda kaliteli karbon nanotüplerine erişim kısıtlamaları ve ayrıca yüksek fiyatları gibi hususlar, karbon nanotüpleri ile takviyelendirilmiş polimer nanokompozitlerin üretimini sınırlandırmıştır. Bu nedenle grafen nano parçacıklar, mekanik ve elektriksel özellikleri ve ayrıca üretiminde kullanılan esas malzemenin yani grafitin doğada bolluğu nedeniyle, polimer nanokompozitlerin üretimi için karbon nanotüplerin yerine geçmektedir [31]. Diğer yandan elektriksel, ısıl, elektrokimyasal ve yüksek yüzey alanı gibi grafenin kendine has özelliklerine göre, sensörler, katalizörler, enerji depolama kaynakları ve çeşitli kompozitler gibi birçok alanda kullanımı ciddi oranda yükselmektedir [32].

Belirtildiği gibi, grafen yaklaşık bir karbon atomu kadar kalınlığı olan, iki boyutlu, düzlemsel yapıya sahip bir nano parçacıktır. Bu plakalarda karbon atomları, altıgen bir ağda birbiri ile bağlanmışlardır. Bu malzemenin yapısı tamamen kusursuzdur, bu nedenle grafen elektriksel iletkenlik, ısıl iletkenlik ve yüksek mukavemet, yaklaşık %98 şeffaflık ve yüksek yüzey alanı gibi uygun fiziksel özelliklere sahiptir [33,34].

Grafen hazırlama yöntemleri, üç farklı yöntemle yapılmaktadır:

- 1- Yapışkan bant kullanılarak grafit mikromekanik bölünmesi (Soyma yöntemi)
- 2- Kimyasal buhar biriktirme
- 3- Silikon karbit yüzeyinden iç içe büyüme[35-38].

Bu yöntemlerle grafen üretimi oldukça verimsizdir. Örneğin mikromekanik bölünme, çok uzun süren bir yöntemdir. Bu husus, bu yöntemin uygulamasında ciddi sorunlar meydana getirmektedir. Grafen ve ayrıca modifiye grafen üretimi için uygun ve verimli bir yöntem, doğal grafit oksidasyonunu içermektedir ve bu yöntem Hummer yöntemi olarak bilinmektedir [39,40]. Yapılan araştırmaların sonucu şunu göstermektedir ki şimdiye kadar kimyasal unsurlarla grafitin katmanlara bölünmesi ve grafen ve modifiye grafene

dönüştürülmesi için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler, grafenin üretiminde kullanılan hammaddelere göre iki gruba ayrılır:

1-Doğal grafitten grafen üretimi yöntemi

2-Grafit oksitten grafen üretimi yöntemi

Bu arada grafit oksit, araştırmacılar tarafından daha çok kullanılmaktadır. Grafit oksit plakalarının yüzeyinde polar grupların bulunması nedeniyle, ultrason dalgaları ile kolayca su gibi bir polar çözeltide dağıtılabilir. Grafit oksit, elektriksel yalıtkandır. Dolayısıyla iletken bir malzeme elde etmek için, elektrik iletkenlik özelliğini tekrar kazanılması için oranının düşürülmesi gerekmektedir [41- 43]. Grafit oksidin azalması ve grafen üretimi veya her ikisinden modifiye grafen azaltma yöntemi hidrazin gibi kimyasal unsurlarla veya sıcaklığın düşürmesi ile yapılabilir[39].

2.10. Polimer Nanokompozitlerin Üretim Yöntemleri

Genel olarak, polimer nanokompozitlerin üretimi için dört yöntem bulunmaktadır:

2.10.1. Doğrudan karıştırma

Bu yöntemde ilk başta süspansiyon olarak hazırlanmış nano parçacıklar bir çözücü içinde çözülüp ardından polimer çözeltisine eklenir ve elde edilen karışım bir hidrolik pres ile ekstrüzyona tabi tutulur ve en son ince plakalar elde edilir. Bu yöntemde, polimer seçimi, parçacık türünün seçimi ve bu ikisinin uyması ve ayrıca parçacıkların dağılım şekli önemli rol oynamaktadır. Genelde karbon nanolifler içeren polimer nanokompozitlerin üretimi için bu yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemin kısıtlaması, takviye edici fazı miktarıdır. Örneğin silika nanokompozit (polipropilen) üretimi için silika nano parçacıklar en fazla ağırlığın yüzde 20'sini oluşturabilir. Parçacıkların aglomerasyonu (birbirine yapışması) da bu yöntemin diğer kısıtlamalarından biridir [9].

2.10.2. Çözeltinin işlenmesi

Bu yöntemle, doğrudan karıştırma tekniğinin bazı kısıtlamalarını ortadan kaldırabilmektedir, ayrıca polimer malzemede nano parçacıkların aglomerasyon ve birbirine yapışma oranı düşürülmüştür. Bu yöntemle iki şekilde polimer nanokompozitler üretilebilir. Eğer polimer malzeme ve takviye edici nano parçalar birbirinin içinde çözülürse, elde edilen çözeltiyi döküm kalıplarına doldurup nanokompozit üretilebilir. Aksi takdirde nanokompozit malzemenin karışımı, bir çözeltide çözülüp ve en sonda çözeltinin buharlaşması ile istenilen nanokompozit elde edilir [9].

2.10.3. in-situ polimerizasyon

Bu yöntemde, polimer polimerizasyonu, nano parçacıkların yanında yapılmaktadır ve büyümekte olan monomer, dağılmış parçacıkları toplamaktadır. Bu yöntemde önemli husus, monomerde nano parçacıkların dağılımıdır. Nanoparçacıklar ile alan malzemesi arasındaki bağlantıyı kontrol ederek, istenilen dağılım elde edilebilir. Birçok polimer nanokompozitleri, bu yöntem ile üretilebilir. Örneğin yüksek elektrik iletkenliği ve düşük geçirgenliğe sahip olan grafit nano katmanları içeren nanokompozitler, bu yöntemle üretilmektedir. Bu nanokompozitlerin üretimi için, ilk önce ultrason dalgaları ile grafit katmanları monomerde homojen olarak dağılır ve sonunda in-situ polimerizasyon ile nanokompozit elde edilir. Polimer nanokompozitlerin üretim yöntemlerinde önemli ve ayırt edici olan husus, takviye edici fazın uygun bir şekilde dağılmasıdır. Yüzey modifikasyonu ile bu dağılımı homojen hale getirilir, bu durumda takviye edici nanometre bileşenlerinin aglomerasyonu engellenir ve takviye edici fazın uygun bir şekilde dağılması sağlanır [9].

2.10.4. Nano boyutlardaki kalıplarda monomerden polimer üretimi

Bu yöntemde monomerler, nano boyutlardaki kalıplara doldurulup ardından polimerizasyon işlemi kalıplar içinde gerçekleşir. Sonuç olarak alanın sınırlı olması (nanometre seviyede) nedeniyle, üretilen polimerler nano boyutlarda oluşacaktır [9].

2.11. Hibrit Malzemeler

Hibrit malzemeler, nanometre veya moleküler seviyede iki ya da daha fazla malzemeden oluşan kompozitlerdir. Genellikle bu bileşiklerin biri inorganik, diğeri doğada organikdir. Bu

nedenle, bileşenler makroskopik (mikrometreden milimetreye) seviyede olduğu geleneksel bileşiklerden farklıdır. mikroskopik ölçekte karıştırma ya da iki orijinal fazları veya hatta yeni özellikler arasında karakteristiklerini gösteren daha homojen bir malzemeye neden olur [44].

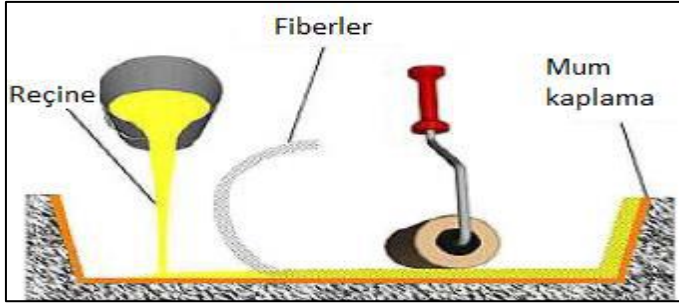
İki ya da daha fazla malzemedan meydana gelen kompozit malzemelere verilen hibritler geleneksel kompozit malzemelere göre daha iyi özelliklere sahiptir. Örneğin kevlar ve grafit gibi iki farklı malzeme çeşidini karşılaştıracak olursa; cam fiber ucuz ve tok olmasına rağmen basma mukavemetinin düşük olduğunu görebiliriz. Grafit ise tam tersi özelliklerde basma mukavemetinin yüksek olmasına rağmen pahalı ve düşük tokluğa sahip bir fiberdir. Cam ve grafit ikilisinden oluşan hibrit kompozit yapılarda ise her ikisinin olumlu özelliklerini alan, yani yeterince tok, ucuz ve basma mukavemetinin iyi olduğu yeni bir yapının ortaya çıktığı görülmüştür [45].

2.12. Kompozit Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler oluşturularak daha yüksek mukavemet, daha iyi rijitlik, daha iyi korozyon ve aşınma direnci, hafiflik, yüksek yorulma ömrü, ve ısıya dayanıklılık gibi özellikler kazanılabilir. Gerçekte tüm bu özellikler aynı anda sağlanamaz. Kullanım alanlarına göre ihtiyaç duyulan özellik artırılır. Böylece; uygun kompozit malzemeler kullanılan matris ve elyafın özelliklerini taşıyacak şekilde elde edilebilir. Çok sayıda kompozit üretim yöntemi mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılanları aşağıda anlatılanlardır.

2.12.1. El yatırması

En eski ve geleneksel yöntemdir. İlk önce kalıbın içine jelkot sürülür. Daha sonra fiberler kalıp içine elle yatırılıp reçine bir rulo ya da fırça yardımıyla fiberlere emdirilir. Bu yöntemin avantajları olarak düşük başlangıç maliyeti, kolay üretim, yüksek beceri gerektirmemesi ve büyük parçaların üretilmesine olanak sağlaması gösterilebilir. Dezavantajlı yönleri ise düşük tekrarlanabilirlik ve kimyasal reaksiyonlardan ortaya çıkan gazların insan sağlığına zararları olarak gösterilebilir [46] . Bu yöntem özellikle denizcilik endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



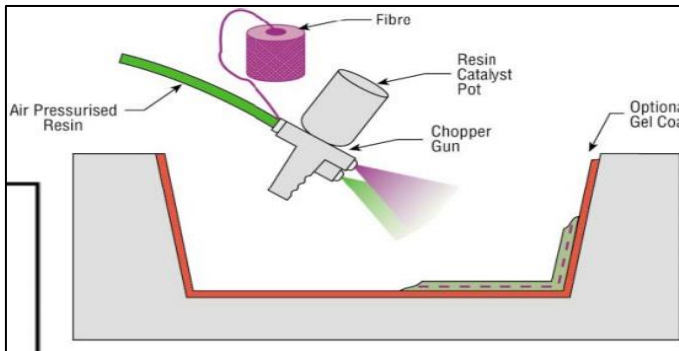
Şekil 2.6. El yatırması yöntemi

2.12.2. Hibrit el yatırması

Bu yöntem el yatırması yöntemine çok benzemektedir ancak bir farklılık vardır. Bu fark hazırlanan kalıbın üstüne vakum torbasının geçirilmesi ve fazla reçinenin vakumlanmasıdır. Bu yöntemle üretilen kompozit malzemelerin el yatırması yöntemine göre fiber/hacim oranları daha yüksek boşluk oranı ise daha düşük olmaktadır. Bunun sebebi vakumun elle sürülen reçinenin fazlasını ve boşlukları vakum etkisiyle doldurmasıdır. Bu yöntemin dezavantajı ise malzeme ve iş gücü maliyetini arttırmasıdır [47,48] .

2.12.3. Püskürtme yöntemi

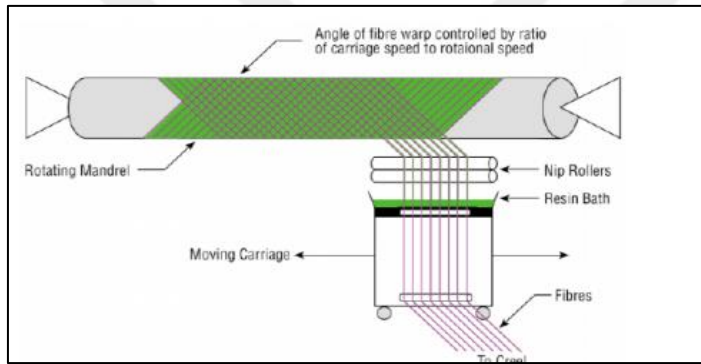
El yatırma yönteminin makinalaşmış halidir. Daha fazla ürün elde etmek için kullanılır. Bir püskürtme tabancası ile kırılmış elyaf ve reçine karışımı kalıba püskürtülerek kalıbın şeklini alması sağlanır. Püskürtme işlemi yüzeye dik olarak yapılmalı ve böylece malzeme israfı önlenmelidir. Püskürtme sonrası reçine içindeki havayı çıkarmak ve yüzeyi düzgünleştirmek amacıyla rulolama uygulanır. Oto kaportası, kayık, küvet, yüzme havuzlarının iç yüzeyi bu yöntemle kaplanır [46].



Şekil 2.7. Püskürtme yöntemi

2.12.4. Elyaf sarma yöntemi

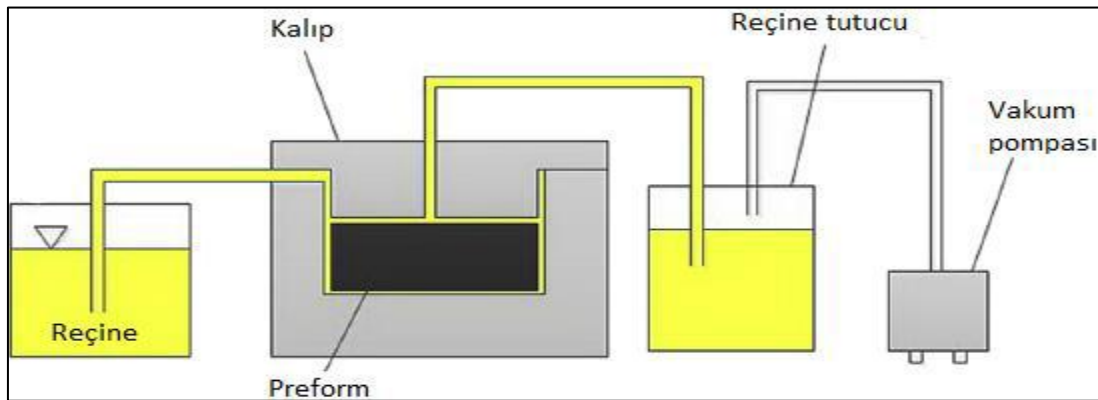
Elyaf reçine banyosuna daldırıldıktan sonra iki punta arasında dönmekte olan ve üzerine ayırıcı sürülmüş kalıp üzerine sarılmasından ibarettir. Genellikle; silindirik kaplar, silolar, basınçlı kaplar, güç iletim şaftları ve roket motor kasaları bu yöntemle üretilirler. Bu metotla daha yüksek kalite ve mukavemette ürün elde etmek mümkündür. Üretim bir mandrel üzerine elyaf sarılması şeklinde olduğundan iç yüzeyi pürüzsüz parçalar imal edilebilir. Polyester, epoksi ve silikon gibi reçineler kullanılabilir. Kuru sarma ve yaş sarma gibi iki çeşit imalat çeşidi vardır. Ayrıca sürekli lifler kalıp üzerine düzlemsel veya helisel sarılabilirler [46].



Şekil 2.8. Sarma yöntemi

2.12.5. Reçine transfer kalıplama

Reçine transfer kalıplama (RTK) yöntemi büyük miktardaki kompozit parçaları kısa sürede üretmek için en etkili ve hızlı yöntemdir [49].

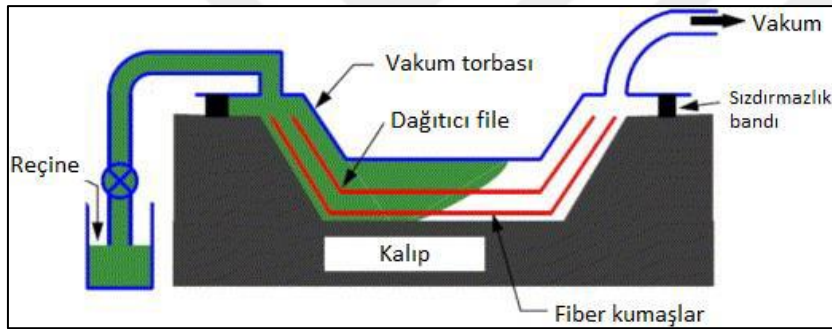


Şekil 2.9. Reçine transfer kalıplama yöntemi

Bu yöntemde iki rijit kalıp kullanılır ki bu da maliyeti arttıran bir faktördür. Bu rijit kalıplar açıkta kalan bütün yüzeylerde iyi yüzey pürüzlülüğü verir. Ayrıca düşük boşluk oranı ve iyi bir boyutsal kesinlik verir. RTK yöntemi yüksek basınçlı pres sistemi ve ısıtılmış kalıplara ihtiyaç duymaktadır ki bu da yüksek ilk kurulum maliyeti demektir [48] .

2.12.6. Vakum infüzyon yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi RTK yönteminden türetilmiştir. RTK yöntemine göre takım maliyetleri düşük, yüksek basınca gerek duymayan ve uçucu emisyonları azaltan veya bitiren bir yöntemdir. Takım maliyeti üst kalıp yerine torba kalıp kullanılmasından dolayı düşmektedir. Aynı zamanda bu torba zararlı emisyonların da sızmasını engellemektedir. Yüksek basıncı da vakum pompası sayesinde devre dışı bırakmaktadır [50].



Şekil 2.10. Vakum infüzyon yöntemi [51]

Bu yöntemin iki problemi vardır. Bunlar kötü infüzyon teknikleri nedeniyle oluşan boşluklar ve ıslanmama. El yatırması yöntemine göre avantajı üretim için daha az beceri gerektirmesidir. Ancak üretici kişi, girişteki ve çıkıştaki spiral borularını doğru konumlamalıdır. Aynı zamanda el yatırmasına göre tekrarlanabilirlik de önemli derecede gelişmiştir [47].

2.12.7. Otoklavsız prepreg

Bu yöntemin avantajları üretim kolaylığı ve tekrarlanabilirliğidir. Fiber hacim oranı açısından da daha önce bahsedilen yöntemlerden daha yüksektir. En önemli dezavantajı ek maliyetlere sebep olan fırına ve buzdolabına ihtiyaç duyulmasıdır. Bir diğer dezavantajı ise prepreg malzemeler farklı üreticilerden alınmak zorunda kalınmasıdır. Ayrıca prepreglerin

bir yıl ya da daha az raf ömrüne sahip olması da başka bir dezavantajdır. Dolayısıyla bu yöntem el yatırması, hibrit el yatırması ve VİY yöntemlerine göre daha pahalıdır [46].

2.12.8. Üretim yöntemlerinin karşılaştırılması

Çeşitli düşük maliyetli kompozit üretim yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bazı kompozit üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları [46]

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
El Yatırması	- Basit - Düşük sabit maliyetler - Tek taraflı kalıp	- Düşük tekrarlanabilirlik - Zararlı emisyonlar - Emek yoğun - Kirletici
Hibrit El Yatırması	- El yatırmasına göre daha iyi fiber hacim oranı - Düşürülmüş zararlı emisyonlar	- Emek yoğun - İlave malzeme/insan gücü maliyeti
Reçine Transfer Kalıplama	- Çift taraflı tolerans - Hızlı üretim - Tekrarlanabilirlik - Boyutsal kesinlik	- Yüksek yatırım giderleri - Preform deformasyonu - Büyük ve karmaşık parçaların üretim zorluğu
Vakum İnfüzyon Yöntemi	- Tek taraflı kalıp - Tekrarlanabilirlik - Düşük basınç enjeksiyonu	- Akış öngörüsü - Akış komplikasyonları, boşluklar ve ıslanmama
Otoklavsız Prepreg	- İyi malzeme özellikleri - Tekrarlanabilirlik - En iyi fiber hacim oranı	- Malzeme maliyeti - Sabit maliyetler - Yüksek yatırım giderleri

Üretim yöntemleriyle ilgili yapılan çalışmada üretim yöntemlerini, maliyet (ilk yatırım, malzeme, iş gücü maliyeti), üretim (üretim kolaylığı, yetenek gerekliliği, tekrarlanabilirlik, karmaşık parçalar, toleranslar, büyük parçalar), malzeme (malzeme özellikleri, yüzey pürüzlülüğü, boşluk oranı, fiber hacim oranı) ve sağlık-güvenlik olmak üzere 4 ana kategoride değerlendirmiştir. Bu çalışmaya göre en başarılı yöntem VİY yöntemi olmuştur. Bu yöntemi ise hibrit el yatırması yöntemi takip etmektedir [46].



3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Polimer-Grafen Nanokompozitlerin Mekaniksel Özellikleri

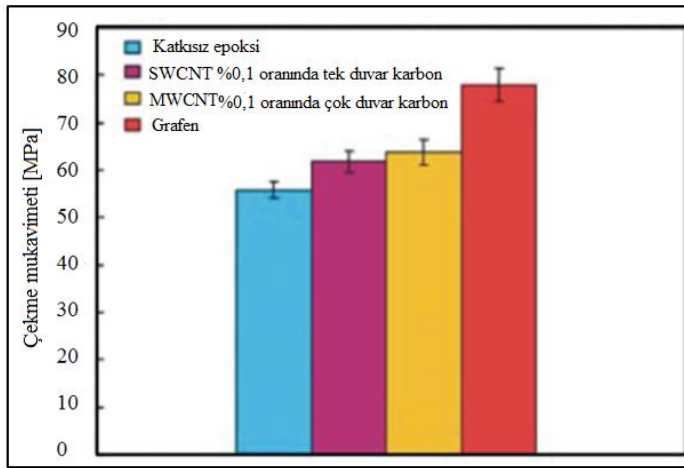
Karbon nanotüpleri ve polimer matrisinden üretilmiş nanokompozitler üzerinde yapılan araştırmaların çoğu, nanotüplerin benzersiz mekaniksel özellikleri ve bu nano parçacığın yüksek elektrik iletkenliği ve termal dayanıklılığı gibi özelliklerinden faydalanmak amacı ile yapılmıştır [52]. Polimer-karbon nanotüplerden üretilen nanokompozitler üzerine yapılan araştırmalara rağmen, hala bu malzemelerin üretiminde sorunlar bulunmaktadır. Dolayısıyla uygulama alanlarını çoğaltmak için bu kusurların giderilmesi gerekmektedir. Karşımıza çıkan sorunlardan biri, bu malzemenin yüksek fiyatıdır. Bu da grafenin tercih edilmesine ve uygun özelliklere sahip olan nanokompozitlerin üretimine sebep olmaktadır. Ayrıca, grafen plakaları üzerinde nanokompozit üretmek için fonksiyonel grupların oluşturulması, grafen plakalarının yüksek yüzey alanı ile matris ortak yüzeylerinin yapışkanlığını artırıp nanokompozitlerin nihai özelliklerini geliştirmektedir [53]. (Atomik kuvvet mikroskopi) AFM deneyi ile yapılan tespit şunu göstermektedir ki grafen plakalarının elastiklik modülü 1 Tp ve kopma mukavemeti 130 MPa'dır [54].

Grafen ile takviye edilmiş polimer nanokompozitlerin mekaniksel özellikleri üzerinde yapılan değerlendirmelerde, grafen oranının artmasıyla kompozitin özellikleri iyileşmektedir (% 3 oranına kadar) [55,56].

Araştırmacılar tarafından, termal yöntem ile katmanlaşmış %1 ağılık oranında grafen içeren nanokompozitler için elastiklik modülünün %31 artışı, kimyasal yöntem ile indirilmiş %1 ağılık oranında grafen içeren termoplastik poliüretanın kırılması için gerekli enerjinin %120 artışı, termal yöntem ile katmanlaştırılmış %2,5 ağırlık oranında grafen içeren silikon süngerler için kırılma enerjisinin %200 artışı raporlanmıştır [57-59].

Diğer polimerlere kıyasla elastomerik matrisin elastiklik modülü daha düşük olduğundan bu nanokompozitler hakkında daha fazla araştırma yapılmıştır. Örnek olarak polivinil asetata % 7 ağırlığında indirgenmemiş grafen oksit eklenmesi ile elastiklik modülünün %75 artışı görülmüştür [57- 61].

Araştırmaların sonuçlarına göre, epoksi matrisinde grafen plakalar ve grafit nano plakalarının bulunması, çatlakların ilerlemesini önlemiştir [62, 63]. Rafiee ve diğerlerinin [62, 57] ve Steurer ve diğerlerinin [64] karbon nanotüpler ve modifiye grafen ile takviye edilmiş polimer nanokompozitler üzerine yaptıkları araştırmalar şunu göstermektedir ki modifiye grafen ile takviye edilmiş nanokompozitlerin özelliklerinin gelişimi karbon nanotüplere göre daha iyidir. Şekil 3,1’de grafen, tek cidarlı ve çok cidarlı karbon nanotüpler ile takviye edilmiş epoksi reçinelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.1. Grafen, tek cidarlı ve çok cidarlı karbon nanotüpler ile takviye edilmiş epoksi reçinelerin mekaniksel özelliklerinin karşılaştırılması [64]

Adı geçen araştırmacılar elde edilen sonuçları, grafen plakalarının karbon nanotüplere göre daha fazla temas yüzeyi ve en-boy oranının yüksek olmasına bağlamışlardır [57, 62, 64]. Ayrıca söz konusu araştırmacılar, termal yöntem ile üretilmiş, grafen plakalarındaki kırışıklıkların mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkisi olmadığını raporlamışlardır.

Ayrıca Ramansan ve diğerleri [65], kırışıklıkların bulunmasının, nanometre ölçüde yüzeyin kabalaşmasına sebep olabileceğini, bunda büyük ihtimalle grafenin polimer zincirler ile yapışkanlığının artmasına yol açarak mekanik özelliklerinin iyileşmesine neden olacağını söylemişlerdir.

Şükriye ve diğerleri [66] iki farklı çap ve kalınlıkta grafen nanoplakanın epoksiye takviyesi ile üretilen nanokompozitlerin kırılma tokluğu üzerinde inceleme yapılmıştır. Adı geçen araştırmacıların vardıkları sonuçlara göre, daha ince ve büyük çaplı olan grafen plakaları, nanokompozitlerin kırılma tokluğu ve çekme mukavemetini daha fazla etkilemiştir. Sadece

%0.5 ağırlıkta grafenin ilave edilmesi, %39 çekme mukavemetinin artmasına sebep olmuştur. Bu araştırmacıların yaptığı diğer bir araştırmada [67] polipropilene grafenin farklı %0.5 %1 ve %2 ağırlık oranlarında ilavesinin mekanik özellikler üzerinde etkisini incelemiş, deneysel ve teorik (modelleme) karşılaştırmasını yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada çok düşük miktarlarda grafenin kullanılması elastiklik modülü ve akma gerilmesini iyileştirdiği raporlanmıştır.

Ayrıca Şükriye ve diğerleri [68] %0,1 ağırlık oranında grafen ve karbon fiberlerden oluşan hibritlerin epoksiye takviyesi ile üretilen nanokompozitlerin eğme davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Adı geçen araştırmacılar; bu tür hibritlerin, nanokompozitlerin statik ve dinamik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Söz konusu hibritlerin, nanokompozitlerin tokluğunun iyileşmesine sebep olduğunu ve çatlağın ilerlemesini engellediği raporlamışlardır.

Başka bir araştırmada Şükriye ve diğerleri [69,70] grafit ve grafen nano plakalarının, epoksi nanokompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde olan etkisini değerlendirip birbiriyle karşılaştırmışlardır. Bu araştırmacılar, grafitte göre daha ince ve daha büyük çaplı grafen plakalarının, nanokompozitlerin mekaniksel özelliklerinin gelişmesinde daha etkili olduğunu görmüşlerdir. Bu araştırmada %1 ağırlık oranında grafen eklenmesi, nanokompozitlerin çekme dayanıklılığını %15,7 artışına sebep olmuştur. Ancak %1 grafit eklenmesi, çekme dayanıklılığını %14 artışına sebep olmuştur. Bu nano parçacıkların artması ile elastiklik modülünün arttığı raporlanmıştır. Bu sonuçlara göre grafen nano parçacıkları, grafit nano parçacıklarına göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca onların diğer bir araştırmasında [71] grafen nano parçacıklardan az miktarda (%0,5'den daha az) ultrason ve mekanik karıştırıcı ile polimer matrise dağıtmışlar ve nanokompozitlerin sertlik ve elastisite modülünün az miktarda grafen eklenmesi ile de iyileştiğini bulmuşlardır.

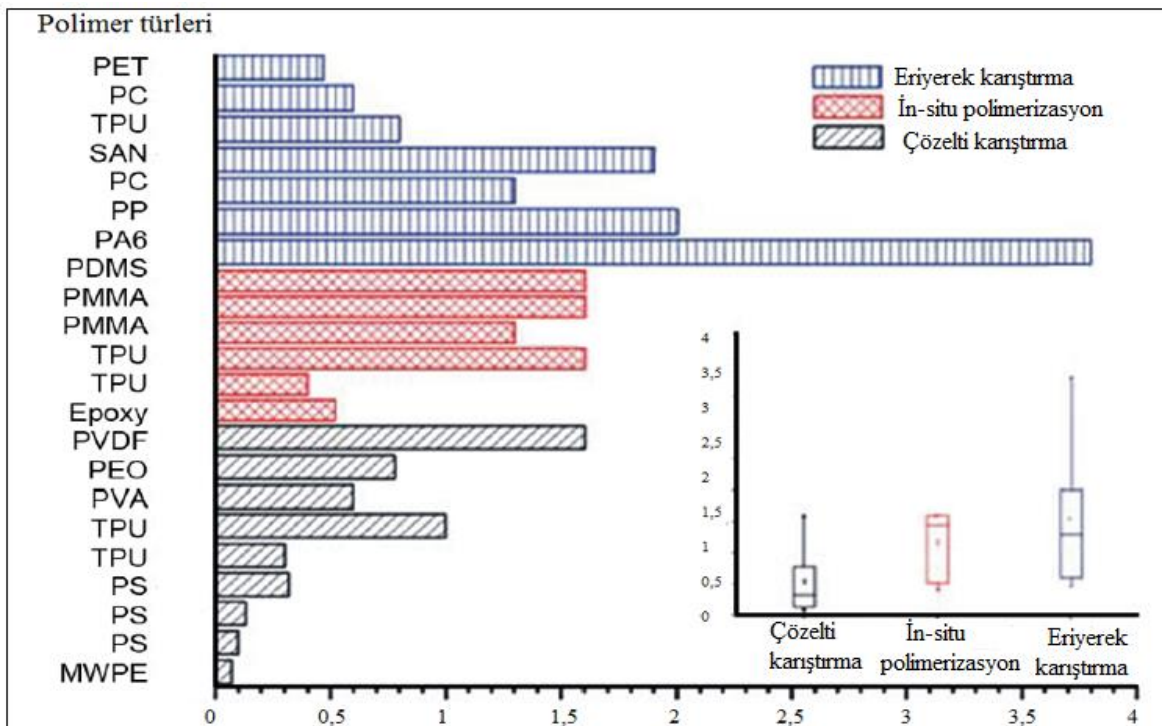
Şerif ve diğerleri yaptığı çalışmada [72], polipirol-grafen oksitin, polipropilenin mekanik özellikler üzerinde etkisini değerlendirmişlerdir. Polipropilene %1 polipirol-grafen oksitten oluşan hibritin eklenmesi, elastiklik modülünün %30 artışına sebep olmuştur. Ayrıca uyumlaştırıcının eklenmesi, takviye edici fazın daha iyi dağıtılmasına ve nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileşmesine sebep olduğunu görmüşlerdir.

3.2. Polimer-Grafen Nanokompozitlerin Elektrik İletkenliği

Geçmiş yıllarda, yalıtkan polimer matrislere elektrik iletken dolgu malzemeler karıştırarak, hafif ve en düşük elektrik direncine ($105 \Omega/m$) sahip olan elektrik iletken kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Bu kompozitlerde elektrik iletkenliğinin takviye edici fazın doğrusal olmayan artışı ile bağlantılı olduğu tespit edilmiştir [73].

Nano kompozitlerde kritik bir oranının üzerinde ilave edilen nanoparçacığın elektrik iletkenliğinde ani artışa sebep olduğu bilinmektedir. Bu kritik değere iletkenlik eşiği denilir (Percolation threshold) [74]. Karbon temelli nano parçacıklarındaki yüksek iletkenlik ve yüksek en-boy oranı, düşük miktarlarda ilavesi ile iletkenlik eşiğine ulaşma özelliğine sahip olduğu için bu parçacıkları uygun bir seçenek haline getirmiştir [75].

Araştırmaların sonucu şunu göstermektedir ki, karbon nanotüpler, düşük oranlarda bile elektriksel geçirgenlik eşiğini oluşturmaktadır. Ayrıca karbon nanotüpler ile eş miktarda veya daha az olan grafen, iletken ağı oluşturabilmektedir [64]. Grafen-polimer nanokompozitlerin elektriksel geçirgenlik eşiği, üretim sürecine göre aşağıdaki diyagramda gösterilmiştir [73].



Şekil 3.2. İşlem türüne göre grafen-polimer nanokompozitlerin elektriksel geçirgenlik eşiği

3.3. Polimer-Grafen Nanokompozitlerin Isıl İletkenliği

Yüksek ısı iletkenliği için dolgu fazı ve polimer arasında güçlü bir arayüzeye ihtiyaç vardır. Bu nedenle, modifiye grafenin eklenmesinin ısı iletkenliği üzerinde etkisi konusunda yapılan araştırmaların çoğunda in-situ polimerizasyon yöntemi ile uygun termal özelliklere sahip nanokompozitlerin üretildiği görülmektedir. Feng ve diğerleri, %2 ağırlıkta grafen ile takviye edilmiş ve polistrenin ısı iletkenliğinin 0.158 W/m.K 'den 0.413 W/m.K'a kadar artışı tespit etmişlerdir [58.76]. In-situ polimerizasyondan üretilmiş, termal yöntem ile katmanlaşmış grafenle takviye edilmiş silikon süngerlerde, %0,25 grafen oranında ısı iletkenliğinin %6 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise grafen hidroksil gruplarıyla ön-polimer SiH grupları arasındaki kovalent bağların varlığıdır. Bu artışın bir kısmı ise grafenin sünger yoğunluğu ve gözenekli mikroyapı üzerindeki dolaylı etkisinden kaynaklandığı öne sürülmüştür [76].

Park ve diğerleri [77], grafen plakalarının eklenmesi ile sıvıların ısı iletkenliğinin arttığını tespit etmişlerdir. Bu araştırmacılar, oksitlenmiş grafen içeren sıvıların, grafen içeren sıvılara göre daha iyi termal özelliklere sahip olduğunu görmüşlerdir.

Choi ve diğerleri [78], az miktarda grafen ilavesi ile hazırlanmış polimetilmetakrilat ve grafen nanokompozitleri, elektriksel cihazlardan üretilen ısıyı dışarıya yönlendirmek için kullanmışlardır. Bu nanokompozitlerin ısı iletkenliğinin, saf numunelerin 3 katı olduğu tespit edilmiştir. Bu tür nanokompozitler, hafif olup oldukça şeffaftırlar.

3.4. Polimer-Grafen Nanokompozitlerin Diğer Özellikleri

Literatürde grafen ile takviye edilmiş polimerlerde termal dayanıklılığının yüksek ve gaz geçirgenliğinin düşük olduğu belirlenmiştir. Polimerlerde gaz geçirgenliği, kanal oluşturma yoluyla gerçekleşir. Çeşitli araştırmalar şunu göstermektedir ki grafen ve grafen oksidin polimer matrise dağılımı, gazların geçmesi için dolaylı ve kıvrımlı bir yol oluşturmuş ve böylece saf polimerlere göre bu bileşimlerle hazırlanan kompozitlerin gaz geçirgenliği düşürülmüştür [77].

Compton ve diğerleri tarafından yapılan son araştırmada, grafen %2.22 hacimsel oranında polistiren matrise eklenmesi, oksijen moleküllerinin geçirgenliğinin oldukça azalmasına sebep olduğu gösterilmiştir [77].

3.5. Polimer Grafen Nanokompozitlerin Kullanım Alanları

Grafen nano parçacıkları ile takviye edilmiş polimer nanokompozitler son yıllarda üretilmiştir, dolayısıyla uygulanabilirliği, daha fazla araştırmalar neticesinde belirlenecektir. Bu bölümde, kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile üretilen grafen ile takviye edilmiş polimer nanokompozitlerin bir kaç tür uygulaması sunulmuştur.

3.5.1. Polimer özelliklerin güçlendirilmesi

Polimer matrisinin mekanik özelliklerini iyileştirmek, bu malzemelerin taşımacılık ile ilgili sanayide kullanılmasını mümkün kılacaktır, özellikle yüksek mukavemetli, hafif ve az yakıt tüketen araçlara ihtiyaç duyulmaktadır [78]. Ayrıca takviye edici nano parçacıkların kullanımı, ince filmler ve sünger gibi tipik liflerle takviye edilemeyen oldukça hassas sistemlerin üretiminin imkânını sağlamaktadır [79].

- 1- Membran olarak ince filmlerin üretiminde kullanımı, membran ile gaz ayırma ve biyomedikal alanı gibi faaliyetlerde uygulanmasını mümkün kılmıştır. Queen ve diğerleri [80], grafen ile gazların ayrılması için membranlar hazırlamışlar ve bu membranların, hidrojen ve metan gazlarının ayrılmasında oldukça kullanışlı olduğunu ve çevre sorunlarını gidermek için verimli olduğunu fark etmişlerdir.

Yapılan çalışmalar poliüretan filme takviye edilen, termal veya kimyasal yöntemlerle indirgenmiş grafenin geçirgenliğinin, benzer oranlarda eklenen kilin geçirgenliğinin daha az olduğunu göstermektedir [81, 82].

Lee ve diğerleri [83], Oksijen - karbondioksit, azot - Karbondioksit ve metan - Karbondioksit gaz karışımlarından karbondioksiti ayırtırmak için membranlar üretmişlerdir. Bu membranların gaz ayırma için oldukça uygun olduğunu ve ayırma gücünün karbon nanotüplerden üretilmiş membranlardan daha fazla olduğunu görmüşlerdir.

2- Nano kompozit lifler, elektro eğirme ve eriyik eğirme yöntemi gibi çözelti ve eriyik karışımından elde edilebilir. Nanokompozit lifler, hafif kumaşlar (akıllı elyaf) ve dokunmuş malzemeler ve ayrıca optik liflerde kullanılabilirler [84].

Araştırmacılar, difenil sülfid yardımıyla karbon nanotüplerin polimetilmetakrilatta dağılması ile üretilmiş bir lifi, emici olarak bir lazer cihazında kullanmışlardır [85]. Elektrospinning yöntemi ile modifiye grafen-polivinilasetat liflerden üretilmiş membran, emici ve lifli lazerlerde ultra kısa lazer darbeleri oluşturmak için etkili bir optik malzeme olarak tanınmıştır [86].

3- Polimer süngerler, yaygın olarak taşımacılık, inşaat, ambalaj ve biyomedikal sektörlerinde kullanılan çok kullanışlı bir malzemedir. Ayrıca grafen nano parçaları, polimer süngerlerde eş zamanlı olarak mekanik özellikler, elektromanyetik dalgalara karşı koruyucu özellikler, ses yalıtımı ve alevlenme özelliklerini geliştirmektedir [87-88].

Bu nano parçacık, biyomedikal alanda hücre iskeletler veya takviye edilmiş polimer süngerlerin özelliklerini iyileştirerek kullanılmaktadır [87,88].

3.5.2. Sensörler

Sensörler; iletken malzemelerden, iletkenlik eşiği miktarına yakın iletken polimer kompozitlerden, gaz, pH basınç veya ısı sensörlerinin üretiminde kullanılabilen elektrik iletkenliği olan polimer nanokompozitlere kadar üretilmektedir [90, 91].

3.5.3. Elektromanyetik girişim dalgalar koruyucusu ve elektrostatik deşarj malzemeleri

ESD elektrostatik deşarj malzemelerinin özelliği, 10¹²'ile 10⁵ Ω aralığında olan yüzey direncidir. Halbuki EMI elektromanyetik koruma malzemelerin direnci 10⁵ Ω'dan daha az olmalıdır. Elektromanyetik girişim dalgalar koruyucusu ve elektrostatik deşarj malzemelerin kullanımı, zemin, ambalaj ve elektronik aletlerdeki kumaş kaplamalarda, uzak mesafeli iletişim antenlerde, cep telefonu parçaları ve elektronik aletler ve uçaklardaki frekans koruyucularında yaygındır [92].

3.5.4. Elektrotlar

gerafen elektrot olarak lityum piller, süperkapasitörler ve organik güneş hücrelerinde uygulanmaktadır [93, 94].

3.6. Cam-Polimer Kompozitler Üzerinde Nano Parçacıkların Etkisi

Polimer nanokompozitler, mekaniksel, kimyasal, aşınma ve dinamik özellikleri ile çeşitli alanlarda kullanılmaktadır, bu nano kompozitler, genelde nano katkıları olmayan polimer numunelere göre daha üstün özelliklere sahiptir. Bu avantajları sayesinde, çeşitli matris ve çeşitli katkılarla farklı nanokompozitler hazırlaması ve incelemesi, son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Mühendislik uygulamalarında kullanılan en önemli polimerden biri epoksidir. Ancak, bir kompozitin dinamik ve mekaniksel yüklere dayanabilmesi gerektiğinden, katkı maddelerle takviye edilmesi ihtiyaç var [95].

Hague ve diğerleri [96] cam / epoksi kompozit malzemesine %1 nano silikat eklemekle katmanlar arasında %44 kayma mukavemetinde artış olduğunu tespit etmişlerdir. Eğme mukavemeti ve tokluğu ise sırayla yüzde %24 ve %23 artış göstermiştir. Mekanik özelliklerdeki bu artışı genelde yüzeylerin arasındaki temas alanının artması ve bağlanma özelliklerinin iyileşmesi ile açıklanmıştır.

Epoksi cam kompozit malzemesi (tek yönlü) üzerinde nano silikanın etkisi Uddin ve Sun tarafından incelenmiştir [97]. %15 nano silika eklenmesi basma mukavemeti ve elastiklik modülünün önemli ölçüde artmasına sebep olmuştur.

Karippal ve diğerleri [98], cam/epoksi kompozit malzemesine nano kil eklemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre %5'e kadar eklenen nano kil, çekme mukavemeti, elastiklik modülü, eğme modülü ve dayanıklılığı ve katmanlar arası kayma mukavemetin artışına yol açmaktadı, ancak %5'ten fazla eklendiğinde adı geçen özelliklerin azalmasına sebep olmaktadır.

Cam/epoksi ve kil nano parçacıklar hibrit nanokompozit özelliklerinin incelenmesi şunu göstermiştir ki nano parçacıkların eklenmesi cam/epoksi kompozitin mekanik ve ısı

özelliklerinin iyileşmesine sebep olmaktadır. Bu sonuç, kil nano parçacıkları ve epoksi matrisin olumlu etkileşimini göstermektedir [99].

Zulfli ve diğerleri [100], kalsiyum karbonat nanoparçacıklarla takviye edilmiş cam/epoksi kompozitlerin mekaniksel özelliklerini incelemişlerdir. Darbe ve eğme testlerinin sonucu, katkısız numuneyle karşılaştırdığında nanokompozit malzemenin elastiklik modülü ve ısı bozunma sıcaklığının oldukça yükseldiğini göstermektedir. Karbon nanotüpleri ile birleşen cam-epoksi hibrit nanokompozitlerde eğme ile çekme deneyinden elde edilen sonuçlara göre elastiklik modülü ve dayanıklılık artmaktadır.

Wang ve diğerleri [101] grafenin cam elyaf ile takviye edilmiş epoksi eklemesiyle nanokompozitin mekanik ve alevlenme özelliklerinin üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Grafenin eklenmesi, mekanik özelliklerin iyileşmesi ve aleve karşı dayanıklılığın artmasına sebep olmaktadır.

Hosseini ve Paul [102], vakum infüzyon yöntemle nanokil parçacık içeren cam/epoksi kompozitler üretmişlerdir. En çok çekme ve eğme özelliklerinin artışının, kil nanoparçacıkların %3 ve %7 oranında ilavesinde olduğunu tespit edilmiştir.

Hamidreza ve Manouchehr Salehi [103], titanyum oksit nano parçacıkları ile takviye edilmiş cam-epoksi hibrit nanokompozit üretilip mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, çeşitli yüzdelerde titanyum oksit nano parçacıkları içeren cam-epoksi kompozitler ve epoksi numunelerinin mekanik özellikleri, üç nokta eğme ve çekme deneyi ile incelenmiştir. Nano parçacıklar içeren epoksi numuneler için çekme deneyinin sonucu şunu göstermektedir ki nano parçacıkların eklenmesi, dayanıklılık ve elastiklik modülünü sınırlı bir şekilde artırmaktadır, ancak nihai mukavemette kırılma şekil değiştirmesini azaltmıştır. Ayrıca, hibrit nanokompozit numuneleri içeren ve dört katmanlı cam kumaş ve nano parçacıklı epoksiden oluşan numunelerde çekme yönünde ve 45° de çekme ile eğme deneyleri yapılmıştır. Testlerin sonucu, çekme ve eğme deneylerinin sonuçlarına göre dayanıklılık ve elastiklik modülü dahil mekanik özellikler artmıştır. %1 nano parçacıkları olan numunelerin özellikleri, diğer numunelere göre daha iyi olmuştur. Bu artış, sadece matrisin mekaniksel özelliklerinin iyileşmesinin neticesi değildir. Hibrit nano kompozitlerin mikroyapıları dikkatlice incelendiğinde, nano parçacıkların eklenmesiyle elyaf ile matris

temas yüzeyinin önemli ölçüde arttığı bununda elyaf ve matris arasındaki yapışkanlığı artırdığı görülmektedir.

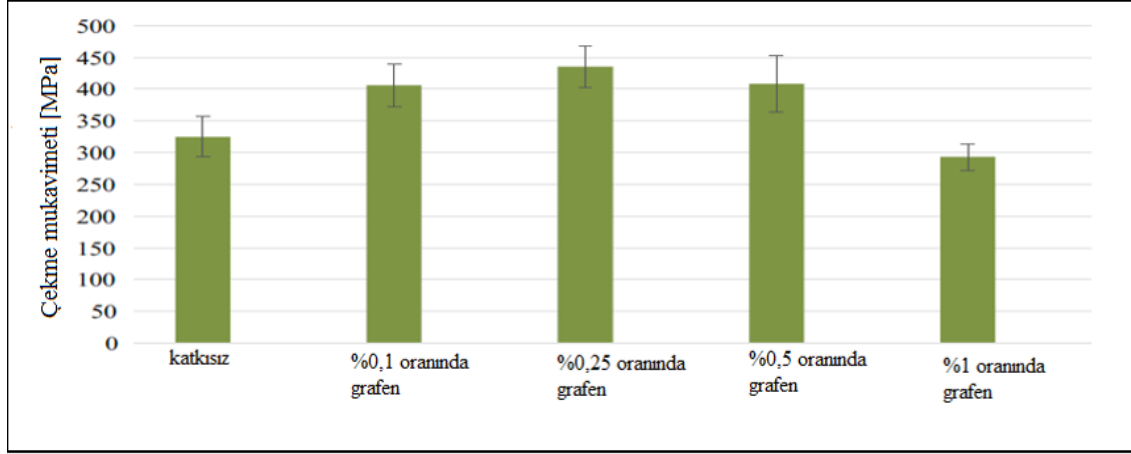
Mohammad ve diğerleri [104], iki farklı çeşit nano parçacık eklemesinin, cam / epoksi katmanlı kompozitlerin gerilme özelliklerinin üzerindeki etkisini inceleyip karşılaştırmışlardır. Nano kompozitler nano kil, % 3, 5, 7 ve 10 ağırlık oranında ve nano silika ise % 0,5, 1 ve 3 ağırlık oranı ile epoksiye dağıtılarak üretilmişlerdir. Sonuçlara göre, nano kilin düşük yüzdelerde eklenmesi, nano kompozit malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz bir şekilde etkilemektedir. En fazla düşüklük, yüzde 3 ağırlıkta görülmektedir. Nano kilin yüzde 5 oranında enerji emilimi en üst seviyededir. Bu oranda malzemenin tokluğu %10 ve çekme mukavemeti %7 artış göstermektedir. Nano killerin tersine nano silika düşük oranlarda eklendiğinde özelliklerin iyileşmesine yardımcı olmaktadır. Nano kompozit malzemede en yüksek mekanik özellik artışı, nano silikanın %0,5 oranında ilavesinde görülmektedir. Bu oranda çekme mukavemeti %10, şekil değiştirme %14 ve tokluğu %27 artmaktadır.

3.7. Grafen Katkılı Hibrit Nano Kompozitler

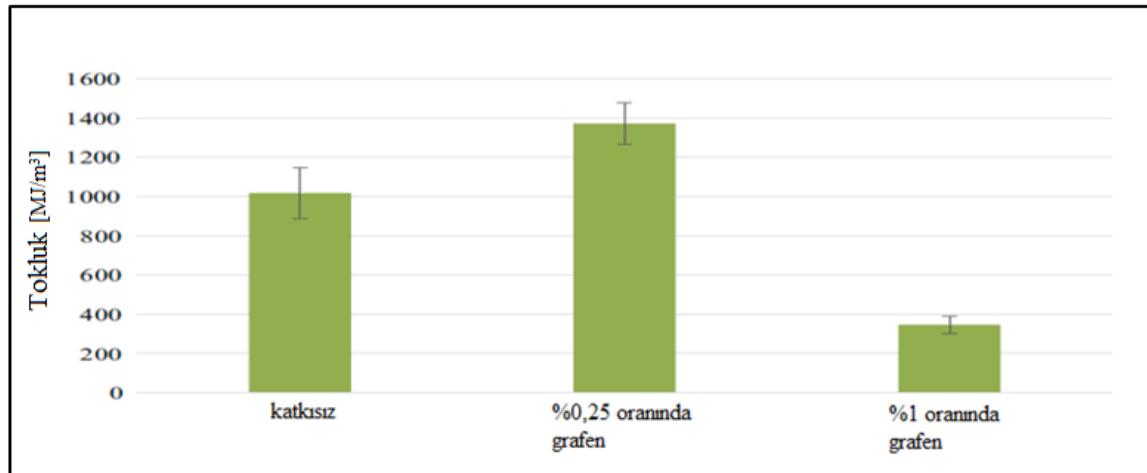
Hao ve diğerleri [105], karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin reçinesini nanografen kullanarak modifiye etmiş ve bu modifikasyonun etkilerini eğme deneyleri yaparak araştırmışlardır. Karbon-epoksi tabakalı kompozit malzemesine grafen eklenmesi, elde edilen kompozit malzemenin sertlik ve eğme mukavemetinin artmasına neden olmuştur. %0, %0,5 ve %1,5 oranlarında grafenin matris malzemesine eklenmesi ile eğilme modülü $27,94 \pm 2,74$ GPa dan $76,87 \pm 4,03$ GPa'a kadar artmıştır. Matris malzemesine %1,0 ve %1,5 grafen eklenmesi, numunelerin sertlik değerlerinde hafif bir artışa neden olmuş ve sırasıyla $38,44 \pm 4,12$ GPa'lık ve $58,71 \pm 13,25$ GPa'lık eğilme rijitliği değerleri elde edilmiştir.

Nikol ve diğerleri çalışmalarında [106], grafenin etkisini cam/epoksi kompozit üzerinde incelemişlerdir. Bu nano kompozitin üretiminde vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. %0,1 %0,25 %0,5 ve %1 ağırlık oranlarında grafen katılmıştır. Sonuçlara göre grafenin artmasıyla eğme mukavemeti ile tokluk değeri artmaktadır ancak grafen oranı %0,25'ten fazla olduğunda bu değerlerde azalma görülmektedir. Bunun sebebi ise matriste boşlukların oluşması ve cam fiber etrafında nano parçacığın topaklanması olabileceği belirtilmiştir. Boşluklar çatlak gibi davranarak ve topaklanan nano parçacıklar fiber ile matris arasında

yapışkanlığı düşürmesiyle kompozitin yapısını olumsuz etkilemektedirler. %0,25 oranında, katkısız numuneye göre eğme mukavemeti %29 ve toklukta %25,5 artmaktadır.



Şekil 3.3. Numunelerin maksimum eğme mukavemeti [106]



Şekil 3.4. Numunelerin kırılma tokluğu [106]





4. MALZEME VE METOD

4.1. Malzeme

Bu çalışmada matris olarak epoksi ve takviye edici eleman olarak cam elyaf, güçlendirici olarak nanografen parçacıklar kullanılmıştır. Cam elyafın, karbon elyafa göre uygun fiyatı ve ayrıca kimyasal mukavemeti nedeniyle kompozitlerde yaygınca kullanılmaktadır.

Bu tezde kullanılan cam fiber kumaş Fibermak Kompozit firmasından temin edilmiştir. Kullanılan cam fiber kumaş Resim 4.1’de, özellikleri Çizelge 4.1’te gösterilmiştir.



Resim 4.1. Plakaların üretiminde kullanılan cam elyaf kumaş

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan cam elyafın teknik özellikleri

Özellikler	Ortalama değer
Çekme gerilme[MPa]	2306
Elastiklik modülü[GPa]	81,5
Uzama [%]	2,97
Cam İçeriği [%]	62,1
Elyafın çapı[μm]	17

Cam kumaştan sekiz katmanlı levha üretmek için 35x33 boyutlarda cam elyaf kumaş kesilip ve etrafı bantladıktan sonra birbirinin üzerinde yerleştirilmiştir (Resim 4.2).



Resim 4.2. Üretimde kullanılan cam elyaf kumaşın kesilmiş hali

Bu araştırmada kullanılan F-1564 reçine ve F-3468 sertleştiricide Fibermak Kompozit firmasından temin edilmiştir. Epoksinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.2’de, sertleştiricinin fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

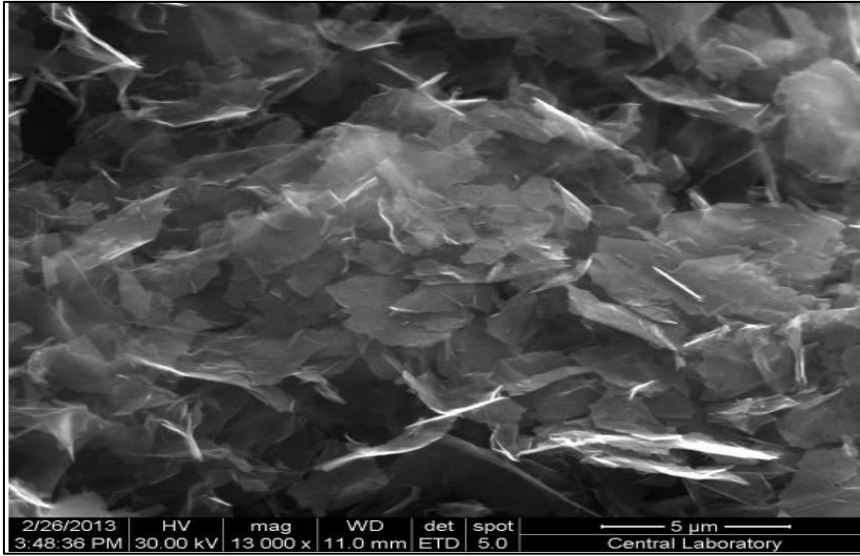
Çizelge 4.2. Kullanılan reçinenin özellikleri

Yoğunluk [g/cm^3]	1,1 - 1,2
Viskozite [mPa s]	1250 - 1450
Epoksi indeksi [Eq/kg]	5,8 – 6,05
Çekme mukavemeti [MPa]	70-75
Elastiklik modülü [GPa]	2,85-3
Eğme mukavemeti [MPa]	110-125
Eğme modülü [GPa]	2,80-3

Çizelge 4.3. Kullanılan sertleştiricinin özellikleri

Görünüm	Berrak – sıvı
Renk	Şeffaf
Vizkozite [m Pa.s]	30-70
Yoğunluk [gr/cm^3]	1
Kürlenme süresi	23 °C 2 gün 80 °C 4 saat 100 °C 2 saat

Bu çalışmada Graphene Factor Engineering firmasından temin edilen nano grafen (GRAFEN®-iGP2) parçacıklar kullanılmıştır. Nano grafenin SEM görüntüsü Resim 4.3’te ve özellikleri Çizelge 4.5’te gösterilmiştir.



Resim 4.3. Grafenin SEM görüntüsü

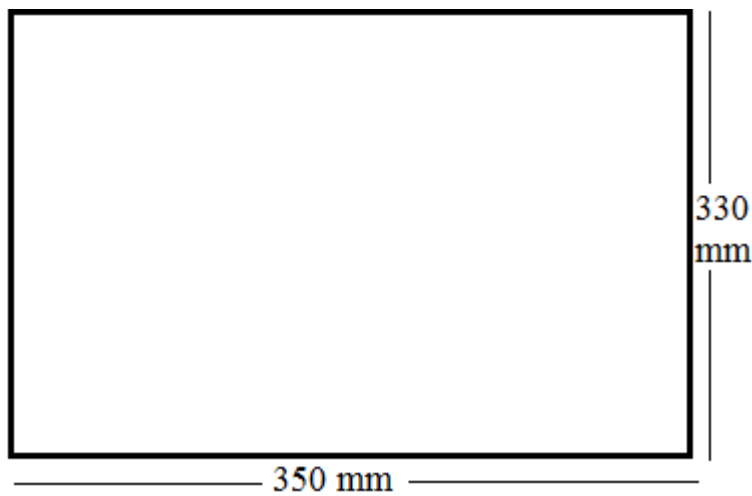
Çizelge 4.4. Nano grafenin özellikleri

Kalınlık [nm]	5-10
Çap [μm]	5 - 10
Saflık	< 99%
Yoğunluk [g/cm^3]	~ 0.05

4.2. Hesaplamalar

4.2.1. Kompozit üretim hesaplaması

Şekil 4.1’de hazırlanan cam elyafın boyutu görülmektedir.



Şekil 4.1. Hazırlanan cam elyafın boyutu

cam elyafın ağırlık hesaplaması;

Cam $\rightarrow$ 8 kat $\rightarrow$ 1mm et kalınlığı $\rightarrow$ 290 g/m²

Cam Elyaf için : ALAN = 0,325 (m) x 0,350 (m) = 0,11375 m²

290 (g/m²) x 0,11375 (m²) = 32 gr $\rightarrow$ 1 kat cam elyaf kütlesi

32 (gr) x 8 (kat cam elyaf) = 264 gr $\rightarrow$ 8 kat Cam elyaf kütlesi

Yapılan kütle hesap sonucunda 8 kat Cam elyaf kütlesi 264 gr olarak hesaplanmıştır.

4.2.2. Reçine hesabı

Reçine hesabı yapılırken epoksi reçine için reçinenin içine katılacak sertleştirici oranı belli bir orandır. Bu oran 100 gr reçineye 34 gr sertleştirici kullanılması gerekir. Toplam reçine ve sertleştirici karışımının kütlesi, elyaflar tarafından kusursuz bir şekilde emilimini sağlamak amacıyla toplam elyaf kütlesinin iki katı alınarak hesaplanır.

364 (gr) x 2 = 528 (gr) (epoksi+ sertleştirici)

134 gr toplam reçine+sertleştirici 100 gr reçine

528 gr toplam reçine+ sertleştirici X gr reçine

X= 394 gr Reçine

134 gr toplam reçine+ sertleştirici 34 gr sertleştirici

528 gr toplam reçine+ sertleştirici X gr sertleştirici

X= 134 gr Sertleştirici

Üretilen kompozit plakaların matris ve takviye edici fazın ağırlıkları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Üretilen kompozit plakalarda matris ve takviye edici fazın ağırlıkları

Cam elyaf kütlesi	264 gr
Kullanılan reçine kütlesi	394 gr
Kullanılan sertleştirici kütlesi	134 gr

4.2.3. Grafen hesabı

Nano kompozitte kullanılan grafenin miktarı, matrisin yüzdesi olarak hesaplanmıştır.

$$\begin{array}{lcl} 100 & & 0,15 \text{ grafen} \\ 528 \text{ g matris} & & X \text{ gr grafen} \end{array}$$

0,79 gr grafen

Çizelge 4.6’da nano kompozitin üretiminde ilave edilmiş grafen ağırlığı ve kodlandırılması verilmiştir.

Çizelge 4.6. Nano kompozitin üretiminde ilave edilmiş grafen ağırlığı ve kodlandırılması

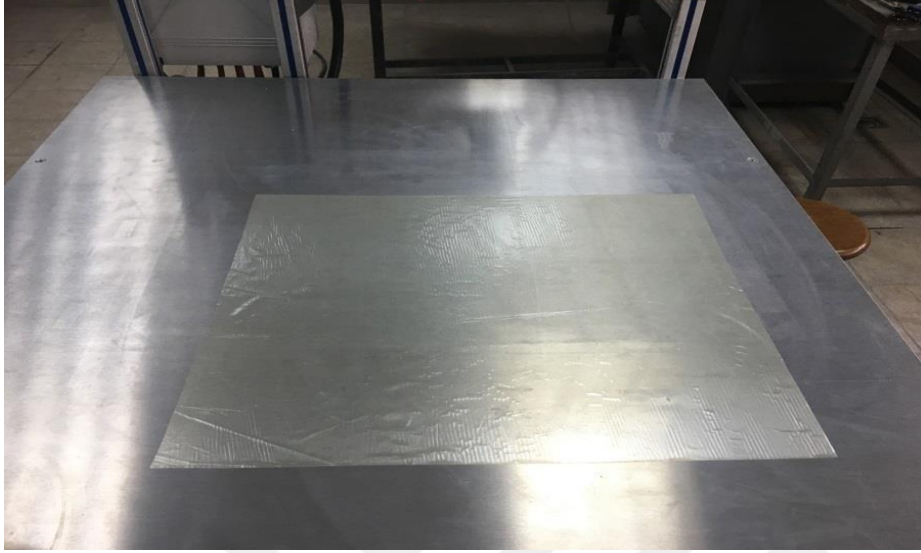
Numunelerin kodlaması	Nanografenin ağırlıkça oranı (%)	İlave edilen grafenin ağırlığı (gr)
Katkısız	0	-
NG15	0,15	0,79
NG25	0,25	1,32
NG35	0,35	1,84
NG45	0,45	2,37
NG75	0,75	3,98

4.3. Kompozit Üretim Aşamaları

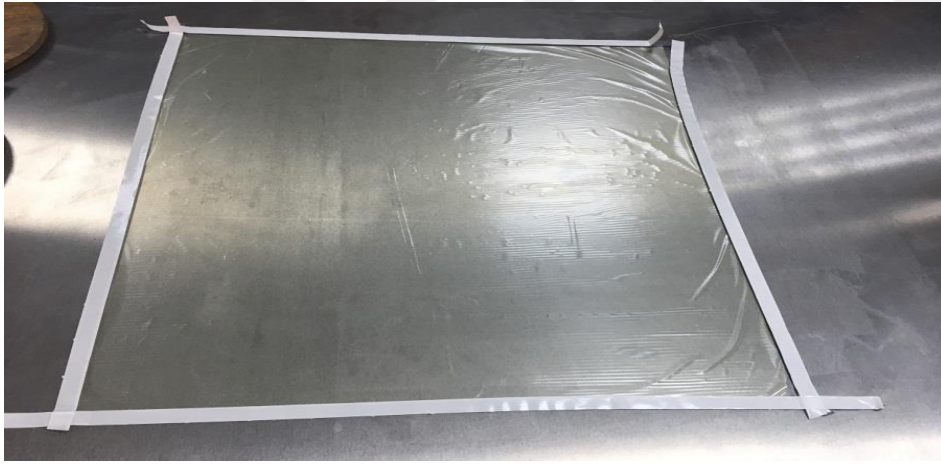
4.3.1. Levhaların üretimi için vakum infüzyon cihazının kullanımı

Bu çalışmada kullanılan numunelerin üretiminde vakum infüzyon yöntemi (VİY) kullanılmıştır. Bu yöntem diğer yöntemlere göre olumlu özellikleri ve kaliteli numuneler üretmesi nedeniyle kullanılmaktadır. Vakum tezgahında düz plaka üretileceğinden tezgahın yüzeyi kalıp olarak kullanılmıştır. İlk olarak tezgahın yüzeyi tamamen temizlenerek toz, kir gibi ufak taneciklerin tezgahı arındırılması sağlanmıştır. Ardından tezgahta cam elyafların serileceği bölgeye kalıp ayırıcı film serilip ardından kalıp ayırıcı filmin çevresi çift taraflı sızdırmazlık bandı ile yapıştırılmıştır. Daha sonra elyaflar ayırıcı film üzerine

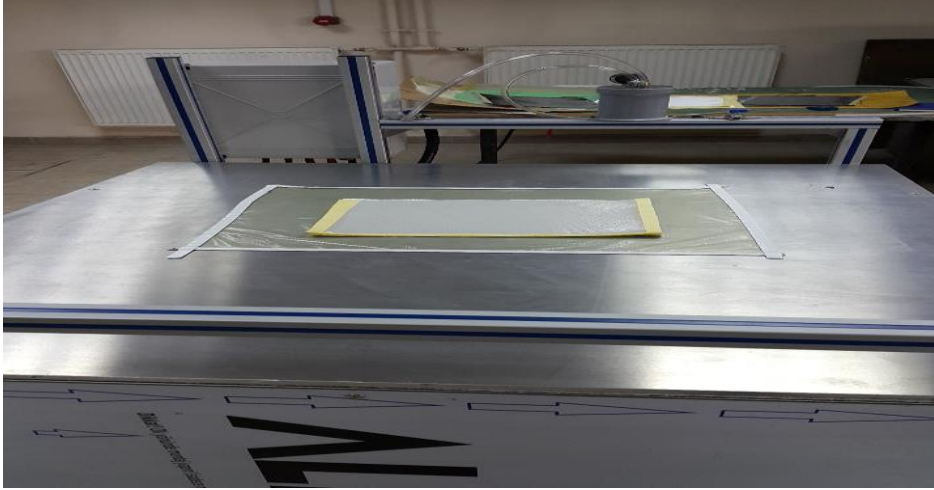
yerleştirilmiştir (Resim 4.4, 4.5, 4.6). Aşağıdaki resimlerde numune hazırlamanın aşamalarını ve vakum infüzyon cihazı gösterilmektedir.



Resim 4.4. Ayırıcı filmin serilmesi

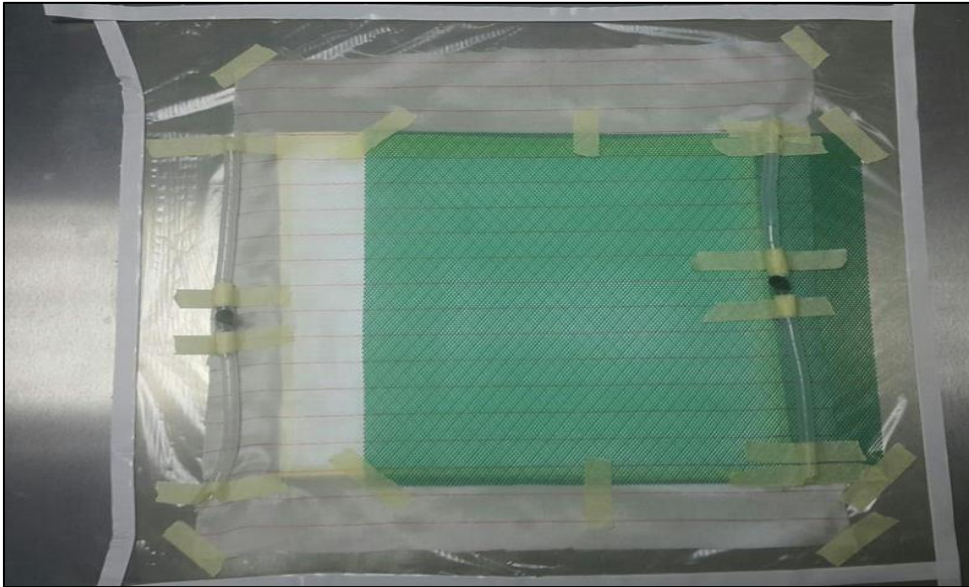


Resim 4.5. Sızdırmaz bantların yapıştırılması



Resim 4.6. Kumaşların (cam) ayırıcı filme serilmesi

Bantlar dikkatli yapıştırıldıktan sonra (Resim 4.6) peel ply kumaş ayırıcı film üzerine teker teker serilen 8 kat elyafların üzerine serilmiştir. Peel ply kumaş serilmesinin amacı hem reçineyi geçirebiliyor hemde karbon kumaşın üzerinden kolayca ayrılabiliyor olmasından kaynaklanmaktadır. Peel ply kumaş elyafların üzerine serilip bantlandıktan sonra flow mesh (akış filesi) peel ply kumaşın üzerine serilmiş ancak mesh tam ortalanmamıştır. Flow mesh kullanılmasının amacı reçinenin yayılmasını hızlandırmaktır. Peel ply kumaşın üzerine tam ortalanmamasının sebebi ise fiberleri reçine ıslattıktan sonra reçine daha yavaş ilerlemesini sağlamaktır.

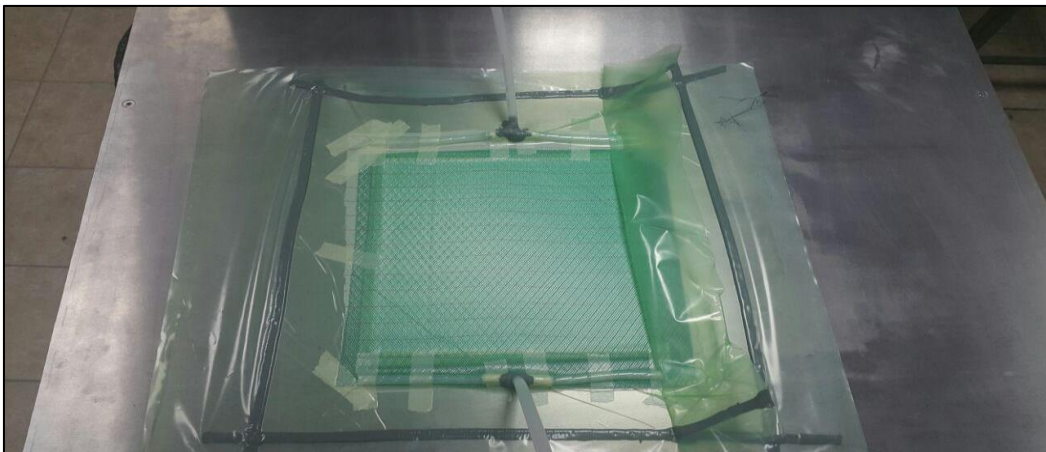


Resim 4.7. Peel ply kumaşın serilmesi

Ardından spiral hortumlar yani reçinenin sisteme gireceği ve geri çıkartılacağı hortumlar yerleştirilmiştir. Spiral hortumlar ile vakum hortumlarını birleştirmek için T bağlantı elemanları spiral hortumlarının ortasına yerleştirilmiş ve tezgah üzerine T bağlantısı yerleştirilmiş spiral hortumlar bantlanmıştır. Spiral hortumların bantlanmasında hortum uçlarından olmalıdır. Bunun sebebi ise hortum kenarlarının keskinliği üzerine gelecek vakum basıncının filmleri yırtmaması içindir. Ardından spiral borulara takılmış olan T bağlantılarının etrafı sızdırmazlık bandı ile hiçbir açıklık kalmayacak şekilde bantlanmıştır (Resim 4.7).

Bantlama işlemi gerçekleştirildikten ve spiral hortumlar sabitlendikten sonra ayıraç film tüm sistemin üzerine serilerek T bağlantı kısımlarından bu film delinip, delik kısımlarının çevresi tekrardan sızdırmazlık bandı ile çevrelenmiş ve ilk başta kalıp ayırıcı filmin etrafında çevrelenen çift taraflı sızdırmazlık bandı ile sisteme yerleştirilmiştir. Ayıraç filmi serilirken en çok dikkat edilmesi gereken durum havanın içeri gireceği yada havanın çıkacağı hiçbir delik yada açıklığın bu film üzerinde veya sızdırmazlık bandı çevresinde olmamasıdır.

Ayıraç filmi serildikten sonra spiral hortuma yerleştirilmiş olan T bağlantılarının uçlarına vakum hortumları monte edilip hortumların çevresi sızdırmazlık bantları ile bantlanmıştır. Vakum hortumlarının bir tanesi reçinenin sisteme verileceği bir diğeri de sistemden reçinenin çıkarılacağı hortumdur. Reçineyi sisteme veren hortumun ucu sistemin havayla temasını kesmek amacıyla kapatılmış, reçineyi sistemden çıkaracak hortumun ucu ise vakum tezgahının vakum vanasına monte edilmiştir. Ardından tezgah çalıştırılarak vakum işlemi gerçekleştirilip sistem içindeki havanın tamamı vakumlanmıştır (Resim 4.8).



Resim 4.8. Ayıraç filmi ve hortumların yerleşimi

Vakumlama işleminden sonra tezgahın basınç göstergesinden sistemde sızdırma olup olmadığı kontrol edilip eğer sızdırma varsa sızdırmanın olduğu yer belirlenip sızdırma sorunu giderilmeli ve tekrar vakumlama yapılmalıdır.

4.3.2. Grafen- epoksi karıştırılması

Epoksi içinde nanografen parçacıklarının homojen karıştırılması için ilk önce nanografen belirli yüzdelerde reçineye eklenip yaklaşık 2 saat 45 °C sıcaklıkta manyetik karıştırıcı ile (Resim 4.9), ikinci aşamada yaklaşık 1 saat 45 °C sıcaklıkta ultrasonik karıştırma cihazında karıştırılmıştır. Bu işlem nano grafenin topaklanma ve kümelenmesini giderilmesi amacıyla yapılmıştır (Resim 4.10).



Resim 4.9. Manyetik karıştırıcıda nano grafen – epoksi karıştırılması

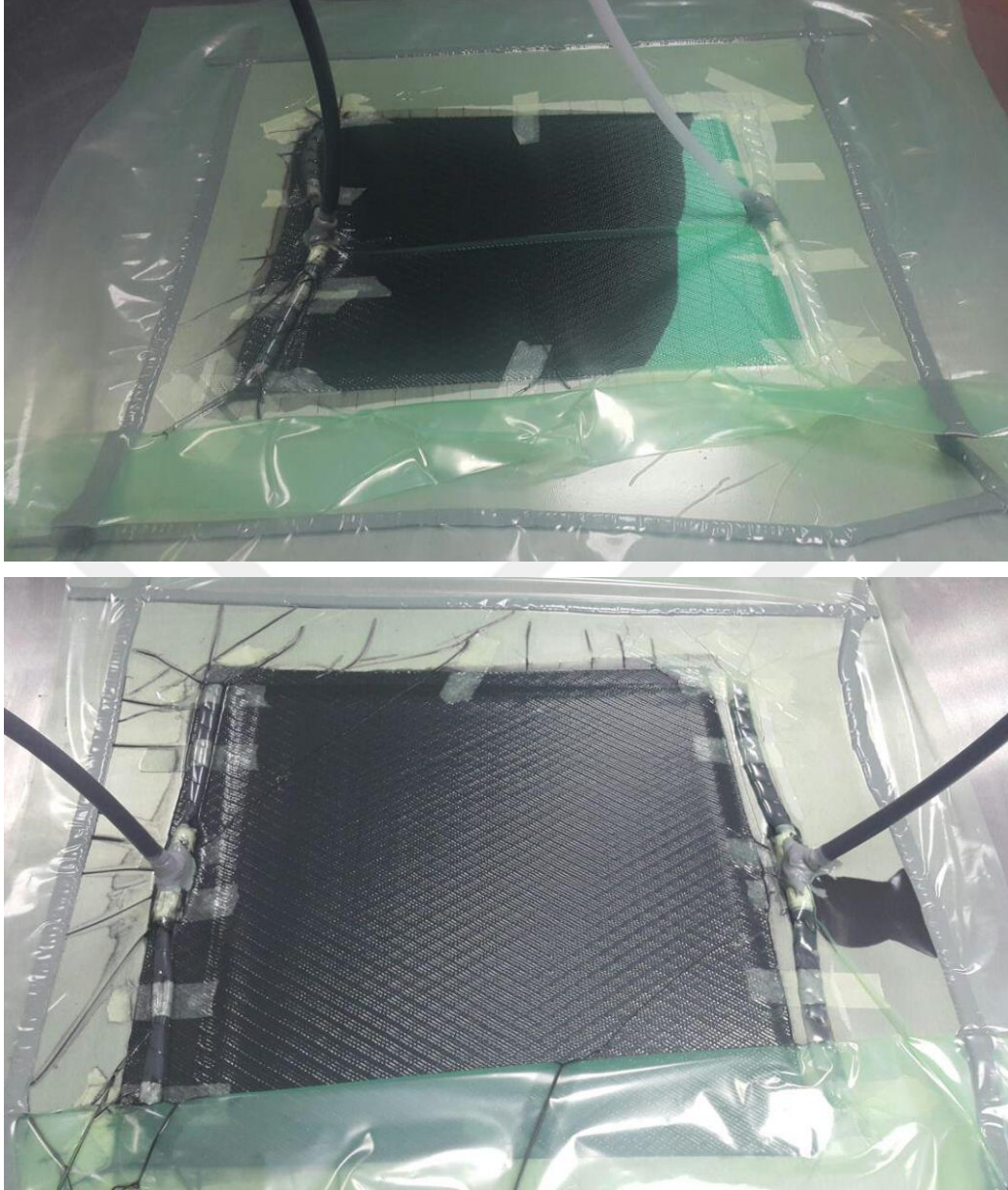


Resim 4.10. Ultra sonik cihazında grafen-epoksi karıştırılması

Böylece nanoparçacıklar homojen olarak epoksi reçinede dağıtılmıştır. Daha sonra reçineye sertleştirici eklenmiştir. Reçineye sertleştiriciyi ilave ettikten sonra, karışım 5 ila 10 dakika arasında el ile karıştırılmıştır.

4.3.3. Grafen- epoksi karışımı cam elyafa emilmesi ve kürleşme işlemi

Kürleşme işleminden önce, cam elyafın, hazırlanan nano grafen-reçine karışım ile iyice doyması gerekmektedir. Bu amaçla, elyafın hazırlanan nano grafen-reçine karışımı içine çekmesi sırasında cihazın sıcaklığı, çözelti viskozitesinin artırılması için 40 °C de tutulmuştur. Emme işlemi ve nano grafen-reçine karışımın cam elyafa nüfuz etme ve doyurma işlemlerinden sonra kürleşme işlemi 95-105 °C de yaklaşık 1 saat süre de gerçekleştirilmiştir. Cihaz soğuduktan sonra üretilen levhadan üzerindeki ayırıcı kumaş, dağıtıcı file ve diğer kullanılan malzemeler ayrılmıştır. Emme ve kürleşme işlemleri Resim 4.11'de gösterilmektedir.



Resim 4.11. Nano grafen-reçine karışımın kalıp içine emdirilmesi

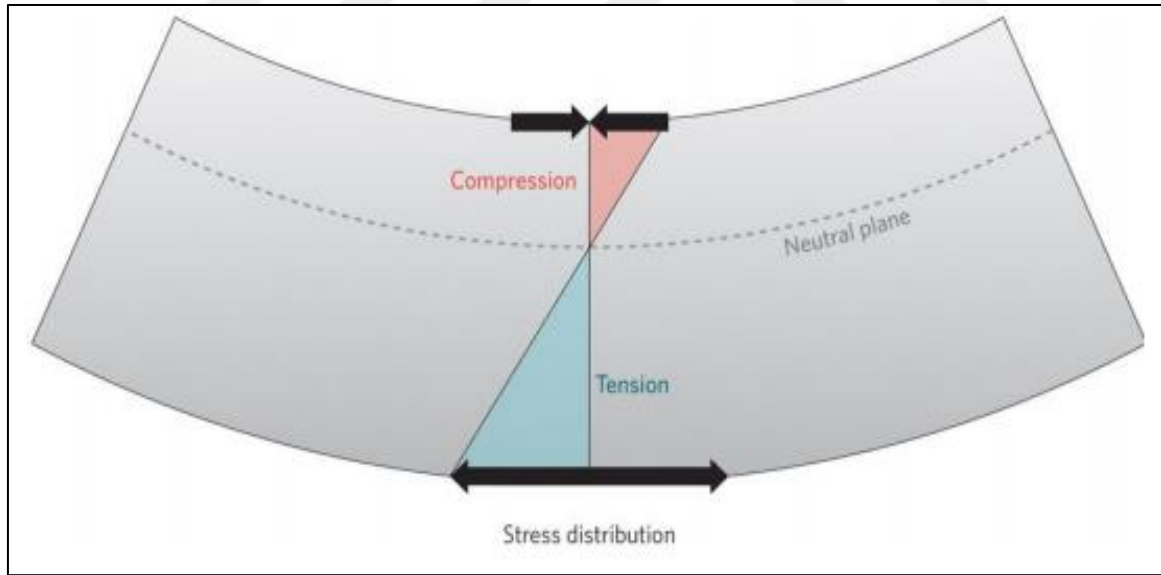
Emdirme işleminden önce nano grafen-reçine karışımın viskozitesine dikkat edilmesi gerekmektedir. Viskozitenin az olması, reçine karışımın cam elyafta hızlı biçimde hareket etmesine sebep olur ve elyafta uygun bir şekilde doymasını engelleyebilir. Ayrıca viskozitenin fazlalığı, elyafta reçine karışımın homojen olarak dağılması ve doymasında sorun yaratabilir.

4.4. Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testi mekanikte klasik bir deneydir. Bu deney malzemenin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. İki desteğe serbest olarak oturtulan, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının yön değiştirmeksizin ortasına bir kuvvet uygulandığında oluşan biçim değişimi olarak tanımlanır.

Eğme deneyi sonucunda eğme momenti (M_e), eğme mukavemeti (σ_e), elastisite modülü (E_e) gibi değerler hesaplanır. Bu deney genellikle kırılğan ve gevrek malzemeler için yapılır. Örneğin; dökme demirler, yüksek mukavemetli çelikler, çelik dökümler, seramikler, kompozitler vb.

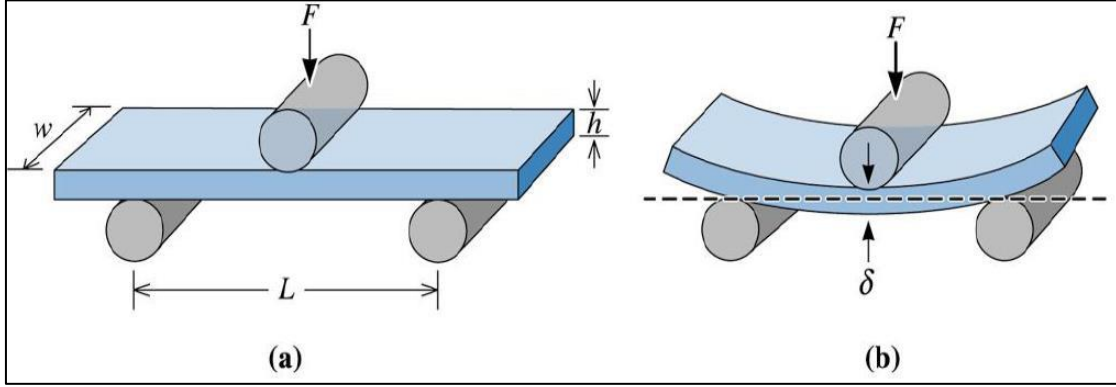
Deney numunesini bir kuvvet etkilediğinde, numune kesitinin bir kısmında basma gerilmesi, kesitin geri kalan kısmında çekme gerilmesi meydana geliyorsa numune eğilme halindedir.



Şekil 4.2. Eğilme halindeki çubuk üzerindeki gerilme dağılımı

Deneyin temel prensibi, deneyde kullanılacak malzemeyi "basit kiriş" modeli olarak kabul etmeye dayanmaktadır. Kiriş denklemi ideal moment durumuna göre çıkarıldığından, kirişte oluşan kayma gerilmesinin normal gerilmelere göre ihmal edilebilir düzeyde kalması istenmektedir. Bu sebeple malzemenin sabit kesit alanlı uzunluk değerinin en geniş değere oranla en az 16 katı büyük olması gerekmektedir. Deneyin sınır koşulları "basit kiriş"

modellemesi ile aynıdır. Test numunesi uzunlamasına yatay bir pozisyonda destekler üzerine konurken, numunenin tam ortasından kuvvet uygulanır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Numuneye uygulanan kuvvet

Deney süresince, F kuvveti artırılırken numunenin tam ortasında oluşan sehim değeri ölçülür. Ölçülen değerler sonucu kuvvete karşılık gelen sehim grafiği elde edilir. Bu ölçümler, tüm numune için en yüksek sehim ve momentin oluştuğu orta noktadan yapılır.

Eğme mukavemeti, sehim ve eğme elastiklik modülü Eş. 4.1, Eş. 4.2 formüllerine göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (4.1)$$

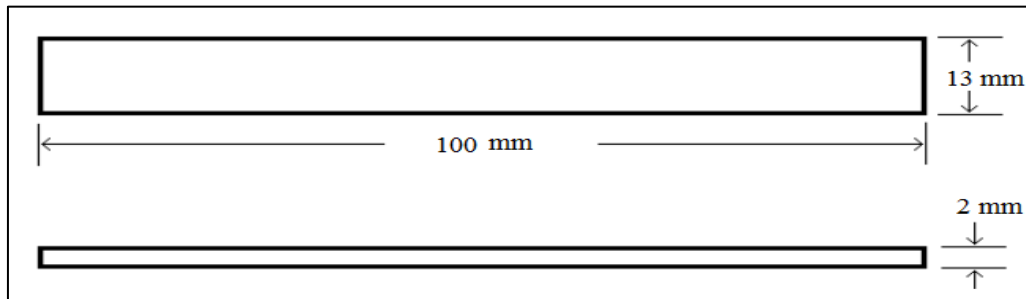
$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (4.2)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.3)$$

Kompozit levhaların simetrik olamayabilir veya elyafın dağılımı ve doyması homojen şekilde gerçekleşmeyebilir. Bundan dolayı eğme özellikleri, gücün uygulandığı yüzey ve noktaya göre değişebilir. Bu değişimler, üzerinde deney yapılan numunenin nötr eksen veya noktasal sertliklerin değişimine yol açabilir. Ayrıca eğme özellikleri, kalınlık ve güç uygulamanın hızı ve deneyin diğer koşullarına da bağlıdır.

Testler TOBB Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında bulunan Shimadzu test cihazında (ASTM) D7264/D7264M standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Numunenin kalınlığı 2 mm, eni 13 mm ve uzunluğu kalınlığının 40 katı olarak 80 mm belirlenmiştir. Numunenin nihai uzunluğu, dayanak üzerinde yerleştiğinden dolayı standart uzunluktan %20 daha uzun olacaktır.

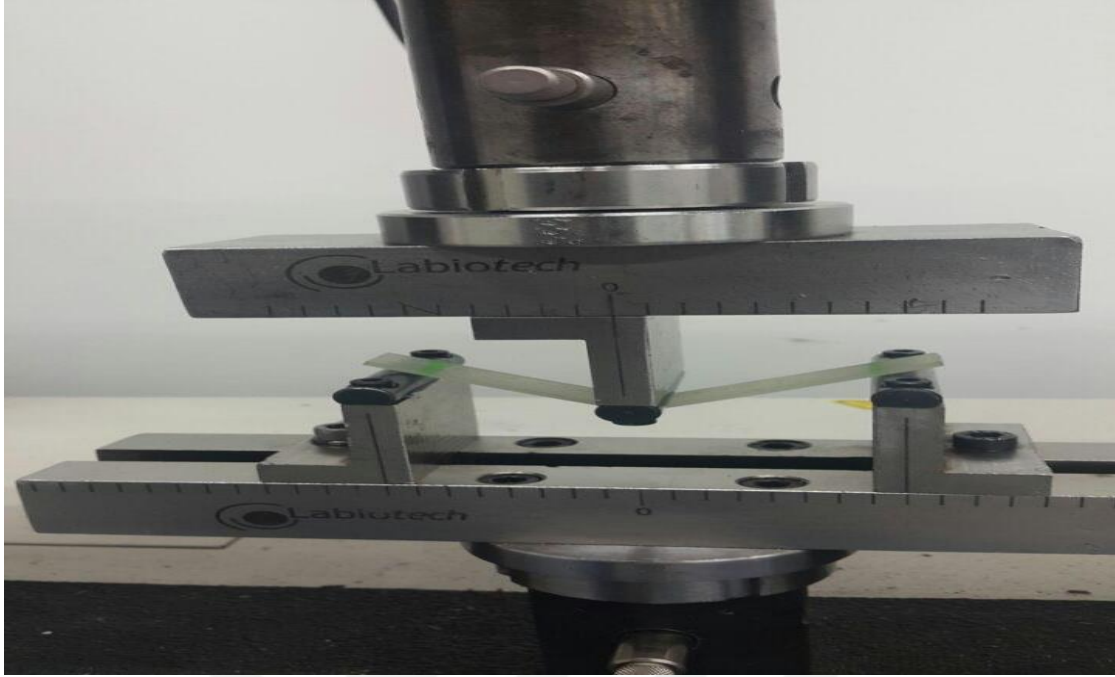
Şekil 4.4 ve Resim 4.12’de üç nokta eğme test numunesinin boyutları ve Resim 4.13’de üç nokta eğme deneyi görülmektedir.



Şekil 4.4. Üç nokta eğme test numunesinin boyutları



Resim 4.12. Üç nokta eğme test numunesinin boyu



Resim 4.13. Üç nokta eğme deneyi

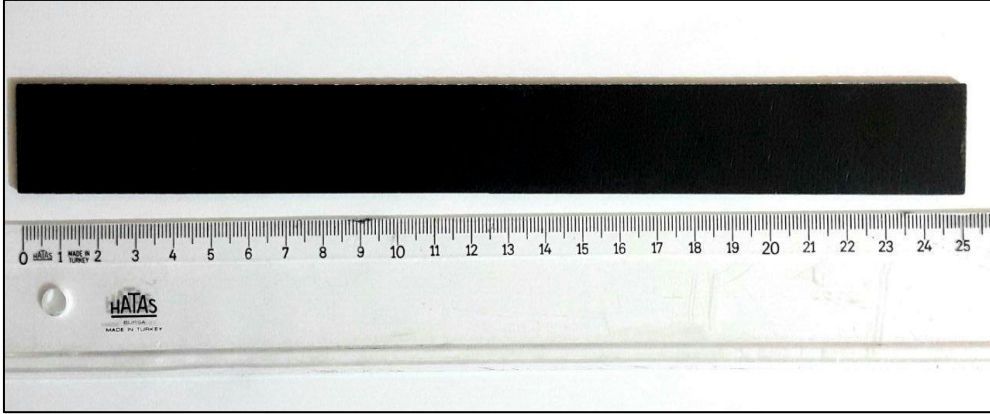
4.5. Çekme Testi

Bu testde numune kırılmasına kadar artan çekme kuvvetine tabi tutulur. Yükleme, mekanik ya da hidrolik olarak gerçekleşir ve genelde bu deneyin sonuçları mühendislik gerilme-gerinme eğrisi şeklinde gösterilir. Çekme testinden elde edilen sonuçlar genelde malzeme seçiminde kullanılmaktadır.

Aşağıdaki resimde, genel olarak kompozit malzeme oluşumunda kullanılan fiber ve matrisin tipik gerilme-gerinme eğrisi gösterilmektedir.

Kompozit malzemeler onu oluşturan malzemelerin davranışlarını gösterirler. Şekil 4.5'te kompozit malzeme için tipik bir çekme deneyi eğrisi verilmiştir. Fiber tek başına gevrek bir yapı sergilerken matris malzeme ise sünektir ve bir akma noktası vardır. Kompozit malzemeye çekme gerilmesi uygulandığında I. bölgede gerilme-gerinim eğrisi matrisin akma noktasına kadar doğrusal olarak devam eder ve malzeme elastik olarak şekil değiştirir.

Matris bu noktadan sonra akmaya başlar ancak eğrinin eğimi azalmasına rağmen neredeyse doğrusal olarak devam eder. II. bölgede fiberler tarafından taşınan yük artmış olur.



Resim 4.14. Çekme test numunesinin boyu

Resim 4.15’de numunenin çekme testi esnasında kırılmış hali görülmektedir.



Resim 4.15. Çekme deneyi esnasında kırılan numune

Çekme mukavemeti, şekil değiştirme ve elastiklik modülü Eş. 4.4, Eş. 4.5 ve Eş. 4.6 ya göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g} \quad (4.5)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.6)$$

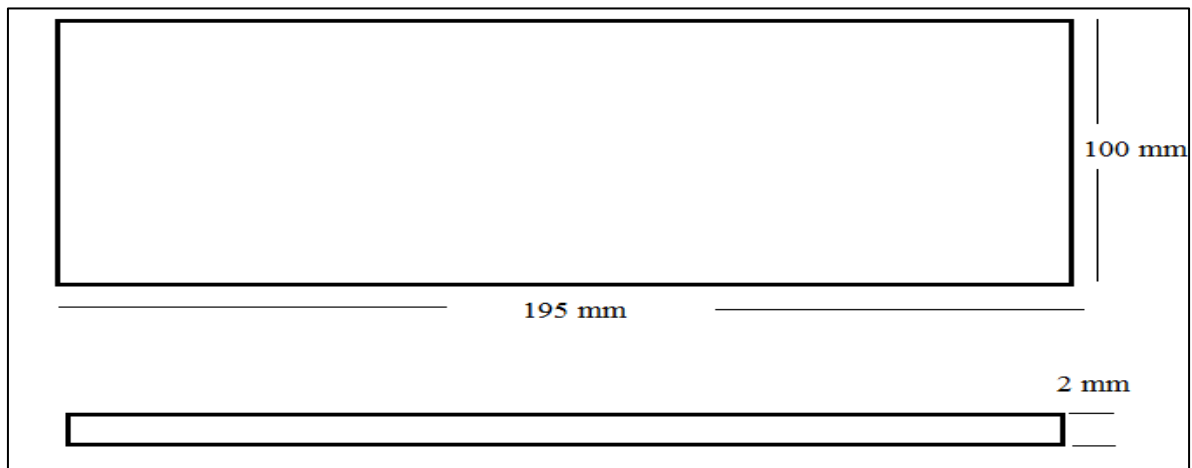
4.6. Serbest Ağırlık Düşürme Darbe Testi

Malzemenin dinamik yüklere karşı mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan bir deneydir.

Genelde test için kullanılan numune, daha büyük bir parçadan özel olarak kalıplanmış veya kesilmiş düz bir plakadır. Plaka kenarlardan desteklenerek ağırlık (çekiç) dikey düşerek plakanın merkezine çarpmaktadır. Çarpma performansının, parçada deformasyon veya hasar geliştiği zaman, sistemde absorbe edilen enerjiye bağlı olduğu belirlenmiştir.

Testler Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Resim 4.10'da hazırlanan numune ve test cihazı görülmektedir. Numuneler 100 mm en, 19,5 mm boy ve 2 mm kalınlıkta hazırlanmıştır.

Şekil 4.7 ve Resim 4.16'da serbest ağırlık düşürme darbe testi numunesinin boyutları görülmektedir.



Şekil 4.7. Darbe testinde kullanılan test numunesinin boyutları



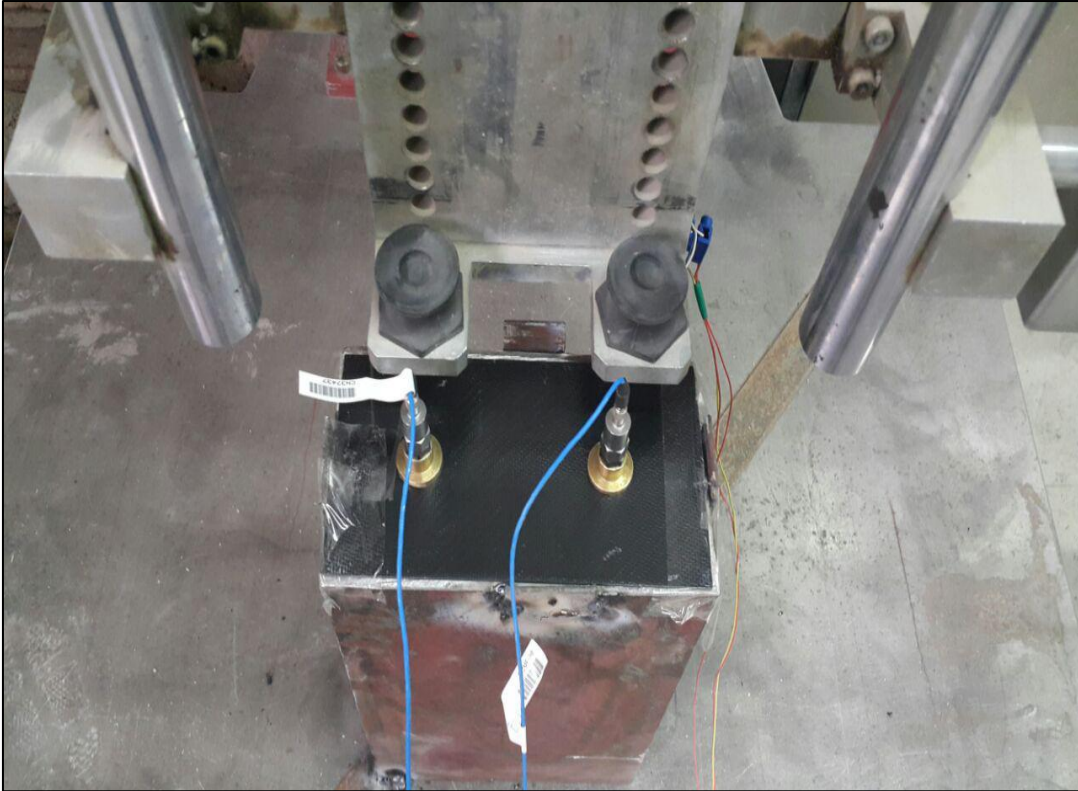
Resim 4.16. Darbe testinde kullanılan test numunesinin boyutları

Testlerde düşme yüksekliği olarak 750 mm ve düşme ağırlığı olarak ise 10,2 kg seçilmiştir. Testlerde seçilen düşü yüksekliği ve ağırlığı ile test numunelerine $10,2 \times 750 \times 9,81 = 75046,5$ Joule'luk bir çarpma enerjisi uygulanmıştır. Numunelerin hepsine özdeş enerjili çarpma yüklemesi uygulanarak matris bölümüne katılan nano grafen miktarındaki değişimin numunelerin çarpma davranışı üzerindeki etkileri yorumlanmıştır.

Numunelere uygulanan çarpma yüklemesinde numunelerin üzerinden iki noktadan ivme-zaman değişimleri ölçülmüş ve ivmenin ölçüldüğü bir noktadan ise birim deformasyon-zaman değişimleri ölçülmüştür. Çarpma yüklemesi 100x195 mm boyutlarında dikdörtgen şeklindeki levha olarak üretilen numunelerin tam orta noktasından küresel bir çekiç başlığı ile uygulanmış ve 40 kN kapasiteli dinamik bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Kullanılan cihaz ve numunenin yerleşimi Resim 4.17'de gösterilmiştir.



a)



b)

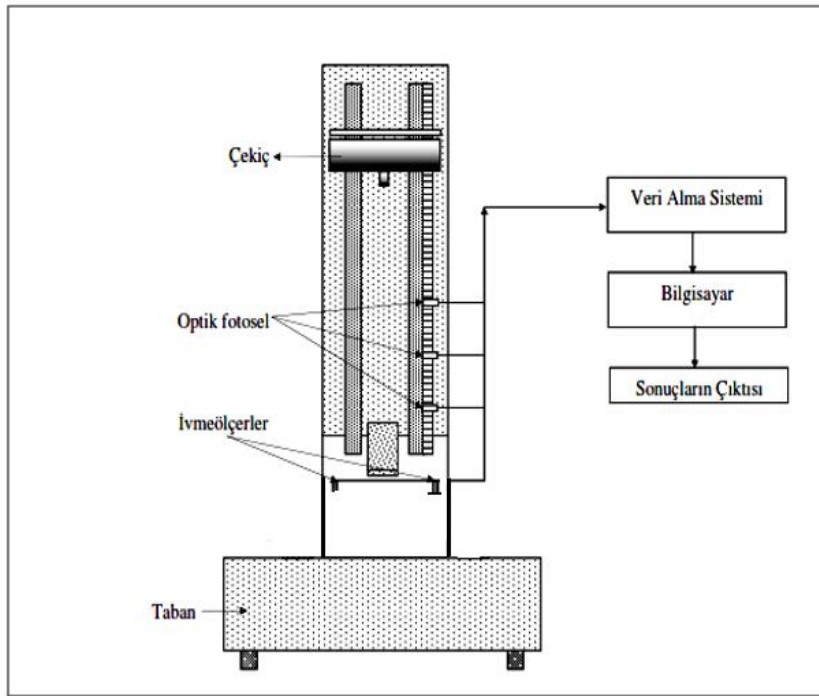
Resim 4.17. a) ve b) Kullanılan cihaz ve test numunesinin yerleşimi

4.7. Serbest Ağırlık Düşürme Darbe Testi Deney Düzeneği ve Ölçüm Araçları

Deney düzeneğine ve ölçüm araçlarına karar verilirken öncelikli olarak yapılmış çalışmalar dikkate alınmış ve literatür taramasında benzer çalışmalar için kullanılan serbest ağırlık düşürme deney düzeneği seçilmiştir. Ölçüm araçları da bu tür çalışmalarda kullanılan ve serbest ağırlık deney düzeneği ile uyum sağlayabilecek şekilde belirlenmiştir.

4.7.1. Deney düzeneği

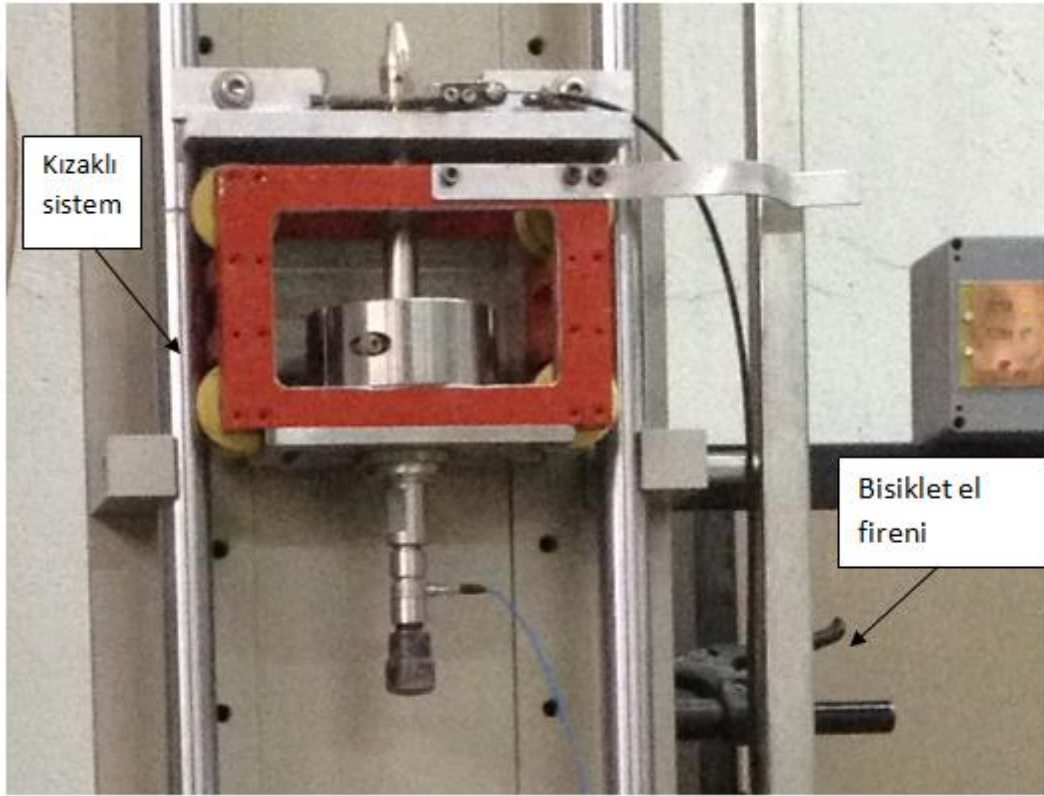
Çalışmada kullanılan deney düzeneği serbest ağırlık düşürme deney düzeneği olarak seçilmiştir. Kullanılan deney düzeneği farklı yüksekliklerden farklı ağırlıklar ile deney yapılmasına olanak sağlayabilen özel olarak bu tür çarpışma testleri için tasarımı yapılmış bir düzeneştir. Deney düzeneği Şekil 4.8’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.8. Çalışmada kullanılan deney düzeneği

Şekil 4.8’de görülen deney düzeneğinin en önemli parçalarından olan çekiç ağırlığının ettiği kısımdır. Ağırlık artırılabilir şekilde bir mekanizmaya sahiptir. Alüminyum malzemeden yapılmıştır. Kendi ağırlığı 5,25 kg’dır. Çekicinin kütlesi, eklenen ağırlıkların hareketini önleyen bir mekanizma ile çekicinin iç kısmına kütle eklenerek artırılmaktadır. Yürütülen çalışmada çekice eklenen ağırlıklar ile toplam ağırlığı 10,2 kg’a çıkartılarak

deneyler gerçekleştirilmiştir. Çekiç aynı ekseninde krom kaplanmış ve sürtünmesi minimuma indirilmiş kızaklarla numuneye kadar serbest düşme hareketi yapmaktadır. Çekicinin yüksekliği isteğe göre ayarlanmaktadır ve bir bisiklet el fireni yardımı ile serbest bırakılmaktadır (Resim 4.18).



Resim 4.18. Deney düzeneğinde bulunan çekiç ve düzeneği

4.7.2. İvmeölçerler

İvme, fizikte hızın zamana göre değişme miktarı veya hızın zamana göre türevine eşit olan niceliktir. Vektörel bir nicelik olup, cismin hem yönünün hem de hızının zamana göre değişimini verir. İvmeölçer vasıtası ile ölçüldüğünde, m/s^2 olarak SI cinsinden birimlendirilir.

İvmeölçer veya akselerometre, bir kütleye uygulanan ivmeyi ölçen cihazlardır. Uygulanan ivmenin ölçümünde, koordinat ivmesi(referans ivme) bilinmesine gerek yoktur. Bunun yerine ivmeölçer, içindeki test kütlesine referans eksenindeki, kütleden kaynaklı olan uygulanan kuvvetlere bakar.

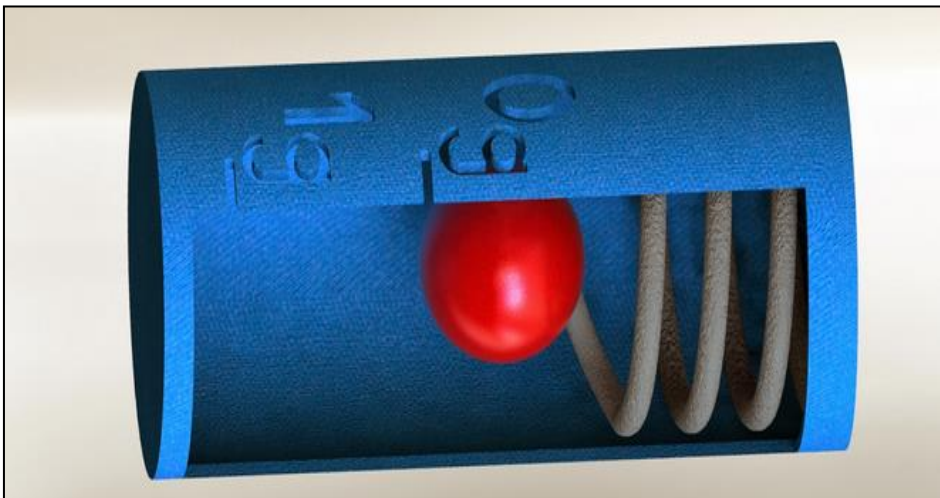
Genel bilgi

İvmeölçer birçok alanda kullanılabilir. Yüksek hassasiyete sahip ivmeölçerler füze, uçak, gemi ve denizaltılarının navigasyon sistemlerinde kullanılan en önemli parçalardan birini oluşturmaktadır. Ayrıca cihazın içerisindeki titreşimi kontrol edip, bu titreşimin istenilen aralıkta olup olmadığını kontrol eder. Tablet bilgisayar ve dijital kameralarda titreşimi engelleyici sistemlerde aktif olarak kullanılmaktadır.

Birçok cihazda etkin olarak kullanılan ivmeölçerin birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Bu sensör silah sanayi ve endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneyde uygulanacak sistem için uygun bir ivmeölçer seçmek yapmamız gereken en önemli işler.

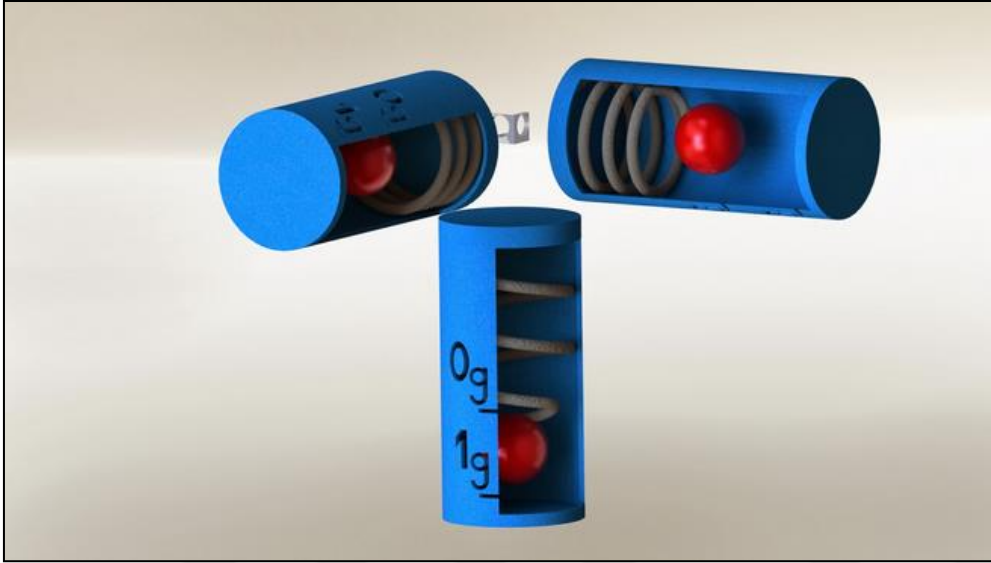
İvmeölçerin yapısı

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi, kütle ivme kılavuzunun içerisinde yatay olarak konumlandırılmıştır. Başlangıç noktası 0 gram olarak belirlenmiş olup, kıyaslamaları 0 grama göre yapmaktadır. Bu kılavuz dikey olarak konumlandırıldığında ise, kütlenin konumu 1 grama gelmektedir; çünkü içerisindeki kütle yatay olarak $9,86 \text{ m/s}^2$ ’ye eşit bir ivmeyle hareket ettirilseydi, 1 gram noktasına denk gelecek şekilde kütle konumlanacaktır. Burada dikey olarak kütleye etki eden yerçekimi etkisiyle, yatayda görülen etki dikeyde de geçerli olacaktır.



Şekil 4.9. İvmeölçerin yapısı

Burada ele alınan ivmeölçer bu eksenlerin birleşmesiyle hareketi kontrol etmektedir. Bilindiği gibi, bu sensörler tek yönlü ölçüm yapmaktadır. Bu nedenle, Şekil 4.10'deki gibi 3 adet sensör birleşerek 3 boyutta hareketi kontrol edebilir. Bu 3 eksen ise; x, y, z olarak isimlendirilirse, bu şekilde gösterimle koordinat sistemi oluşmuş olur. Böylece, sistem oluşacak ivme değişikliklerini her yönde kontrol edebilecektir.



Şekil 4.10. Üç eksenli ivmeölçer

İvmeölçerler farklı yöntemlerle çalışmaktadır. Bunların en yaygın olarak kullanılanları piezoelektrik ve kapasitif ivmeölçerlerdir.

- Piezoelektrik ivmeölçerler içerisindeki mikroskobik kristaller maruz kaldıkları stres sonucunda orantılı olarak gerilim üretir. Üretilen bu gerilim değeri, önceden tanımlanmış olan gerilim değeri ile kıyaslanır ve ivmenin etkisi bulunmuş olur.
- Diğer bir tip ise kapasitif ivmeölçerlerdir. Birbirine yakın iki paralel levha arasında kapasitif etki oluşur ve kapasitans değeri ortaya çıkar. Bu tip ivmeölçerlerde kapasitif iletim prensibi kullanılmıştır. Bir ivme uygulandığı takdirde sabit elektrot ve hareketli elektrot arasındaki mesafe değişecek, bu sayede kapasite değerinin de değişmesi sağlanacaktır. Sonuç olarak ivme ile ilintili bir çıkış değeri elde edilecektir.

Deneyde kullanılan ivmeölçer

Deneyimizde piezoelektrik ivmeölçerlerden yararlanılacaktır. Kullanılan donanım oldukça kompakt olup sahada ölçüm almaya uygundur. İvmeölçerler PCB Grup firmasına ait piezoelektrik ICP tipi ivmeölçerlerden olup, model numarası 353B02'dir. Kullanılacak ivmeölçerler Resim 4.19'da görülmektedir.

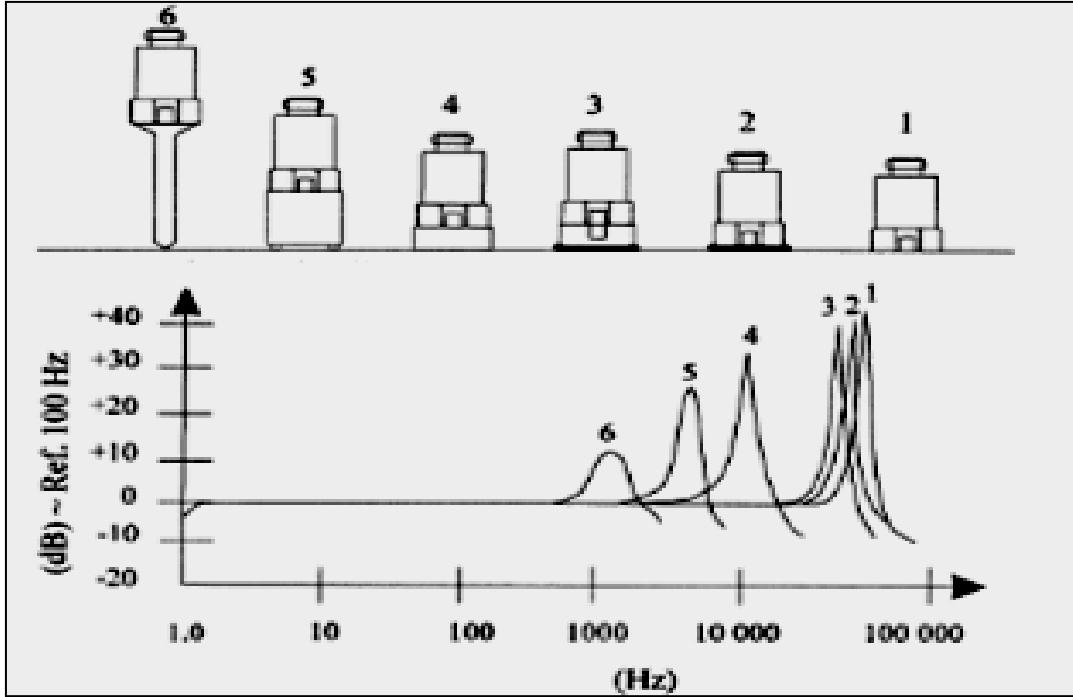


Resim 4.19. ICP Model 353B02 Piezoelektrik ivmeölçer

ICP tipi ivmeölçerlerin üstünlükleri;

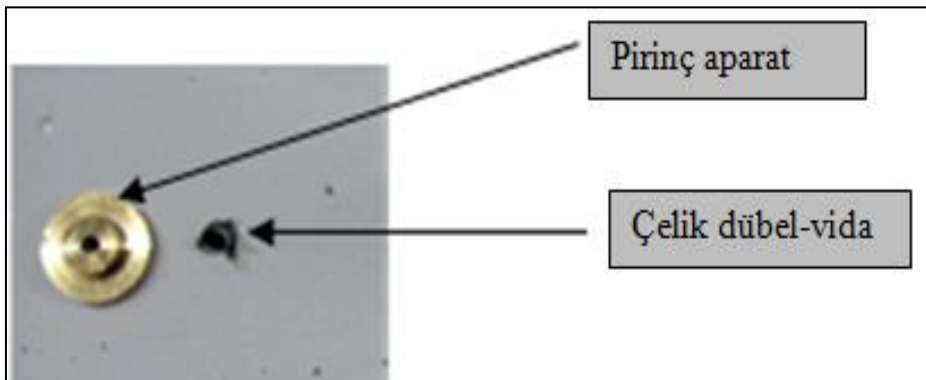
- Uygun tip ve uzunlukta kabloya bakmaksızın sabit voltaj hassasiyeti
- Düşük empedanslı çıkış sinyali, oldukça uzun kablolarda bile çevre etkilerine rağmen sinyal kalitesini kaybetmeme
- Düşük gürültü aralığı, veri toplama donanımları, kaydedici, sinyal çözümüleme, standart okuyucu ile voltaj-çıkış sinyali uyumu olarak sayılabilir.

Bu tip ivmeölçerlerle ölçümleri almak için montaj şekilleri vardır. Bu montaj şekillerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Montaj yapılan yerin karakteristik özellikleri, pürüzsüzlük, sıcaklık değişim büyüklüğü, erişilebilirlik ve taşınabilirlik son derece önem teşkil etmektedir. Firmanın kendi laboratuvarlarında yaptığı testlerle montaj şeklinin hassasiyetleri yüksek frekans altında test edilip grafik halinde Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. İvmeölçerlerin montaj şekilleri ve yüksek frekansa etkileri 1. Vida ile 2. Yapıştırıcı ile 3. Montaj pedi ile 4. Düz mıknatıs ile 5. Çift taraflı mıknatıs ile 6. El çubuğu ile (Manual)

Çarpma anında yüksek frekanslar oluştuğu için ayrıca numune üzerine tutturabilmek için vida ile montaj şekli tercih edilmiştir. Optimum bağlama düzenlemeleri önemli ölçüde ölçümün doğruluk payını arttırmaktadır. En iyi performans için, özellikle yüksek frekanslarda, ivmeölçerin tabanı ve test edilecek nesnenin yüzeylerinin temiz, düz, pürüzsüz, çiziksiz olmasına dikkat edilmelidir. Vidalı montaj için numune üzerine delik açılmış ve bu deliklere çelik dübel yardımı ile vidalar yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerin ölçüm değerlerini hassas bir şekilde okuyabilmesi için iletkenliği iyi olan pirinç malzemeden montaj aparatı yapılmış ve bu aparat ile ivmeölçerler numune üzerine monte edilmiştir (Resim 4.20).



Resim 4.20. Montaj yeri ve aparatı

Kullandığımız ivmeölçerlerin teknik özellikleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Model 353B02 İvmeölçerin teknik özellikleri

Özellik	Değer
Hassasiyet(± 5 %)	2.04 mV/(m/s ²)
Ölçüm Aralığı	± 5434 m/s ²
Frekans Aralığı (± 5 %)	1-7000 Hz
Frekans Aralığı (± 10 %)	0.7-10 000 Hz
Frekans Aralığı (± 3 dB)	0.35-18 000 Hz
Rezonans Frekansı	≥ 38 kHz
Geniş bant Hassasiyeti(1-10 000 Hz)	0.05 m/s ²
Düzensizlik	≤ 1 %
Çaprazlama Hassasiyeti	≤ 5 %
Aşırı Yük Sınırı	98 100 m/s ²
Çalışma Sıcaklığı	-54 ile +121 °C
Uyarma Voltajı	18-30 VDC
Sabit Akım Uyarma	2-20 mA
Çıkış Empedansı	≤ 100 ohms
Çıkış Öngerilim Voltajı	8-12 VDC
Boşaltım Zamanı	0.5-2.0 s
Hazır Hale Gelme Zamanı	< 5 s
Algılama Elemanı	Quartz
Elektrik Bağlantısı	10-32 Koaksiyal Jak
Elektrik Bağlantı Yeri	Üst
Ağırlık	10 gr

4.7.3. Veri toplayıcısı

Genel bilgi

Veri toplayıcıları, genel olarak dataları bilgisayar ortamına aktaran aygıtlardır. Yapılan deney çeşidine göre farklı türleri mevcuttur.

Deneyde kullanılan veri toplayıcısı

Sahada ölçümlerin toplanması ve bilgisayara aktarılması için National Instruments firmasının ürettiği NI 9233-USB-9162 modeli veri toplayıcı kullanılacaktır (Resim 4.21). Bu veri toplayıcı, dört kanallı dinamik sinyal yakalayıcısı olup, yüksek doğrulukta ölçüm alabilen IEPE algılayıcılarından yapılmıştır.



Resim 4.21. NI 9233-USB-9162 veri toplayıcı

Kullanılacak veri toplayıcı aygıt iki modülden oluşmaktadır. Birinci modül veri toplayıcısıdır. Bu modüle ölçüm aygıtları bağlanmaktadır. İkincisi sinyal taşıyıcı modüldür. Bu modül de birinci modülden gelen sinyalleri bilgisayara aktarmaktadır. Her iki modül birbirinden bağımsızdır. Veri toplayıcıdan bilgisayar ortamına aktarılan veriler özel olarak yazılmış bilgisayar programı yardımıyla almak istediğimiz veri türüne çevrilerek kaydedilecektir. Ayrıca bu program yardımıyla bağladığımız ölçüm aygıtlarının kalibrasyon ayarları yapılmaktadır.

4.7.4. Fotoseller

Genel bilgi

Fotoseller, optik prensiplere göre çalışan bir sensör veya optoelektronik sensör olarak da bilinir. Fotosel yani optikelektronik, dokunmaksızın bir cismi, ışık (optik) yardımıyla algılama, sonra elektronik olarak değerlendirme ve sinyale dönüştürme demektir.

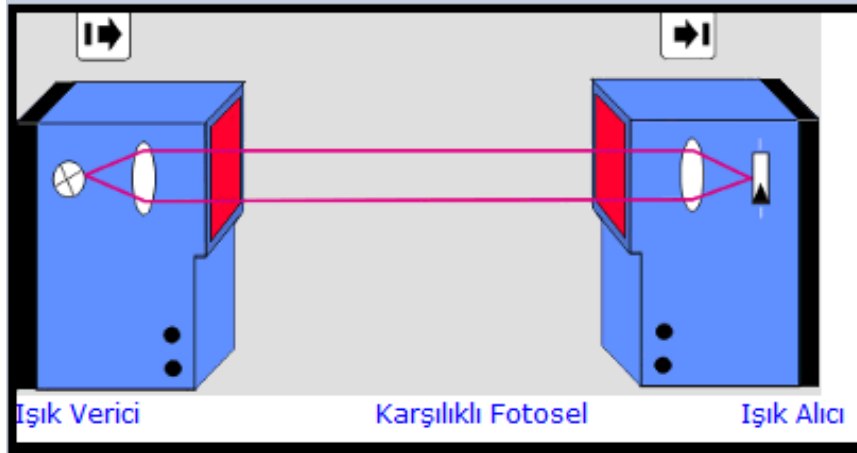
Fotosellerin yapısı

Fotoselin bir cismi algılamak için ihtiyacı olan ışık, 1 mm ile 10 nm arasındaki elektromanyetik ışıma aralığındaki dalgalardan oluşur. Işık kaynağı olarak çoğunlukla dalga boyu 880 nm olan kızıl ötesi (infrared) ışık kullanılır. Fakat bazı özel durumlarda dalga boyu 660 nm olan kırmızı ışık da kullanılır. Kızıl ötesi ışığın kullanılmasının amacı, dış kaynakların etkilerine karşı olabildiğince çok bağımsızlık kazandırmaktır. Alıcı olarak

kullanılan transistörün en yüksek duyarlılığa kızıl ötesi ışıktaki sahip olması, kızıl ötesi ışık kullanımıyla sensörlerin görülebilir aralıktaki dış ışık kaynaklarından daha az etkilenmesi diğer nedenlerdendir. Çok küçük toz parçalarının çapından daha uzun dalga boyu olan ışığın, hiçbir sorunla karşılaşmadan bu parçacıkları geçmesi olayından yararlanır. Kirlenme ve toza karşı koruma sağlamak için uzun dalga boylu ışınım (UV değil IR) kullanımının nedeni budur.

Fotoseller; yansıtıcı (reflektörlü), cisimden yansımali ve karşılıklı olmak üzere üç çeşittir.

- *Karşılıklı sensörler:* Karşılıklı tip fotosellerde, verici ve alıcı olmak üzere iki farklı birim mevcuttur. Vericiden çıkan ışık alıcıya yönlendirilir. Eğer ışığın alıcıya ulaşmasını engelleyen herhangi bir cisim varsa, sensör bu durumu hissederek çıkış üretir. Şeffaf cisimlerde emin olmayan algılamaya, mat cisimlerde ise emin algılamaya sahiptir (Şekil 4.12).



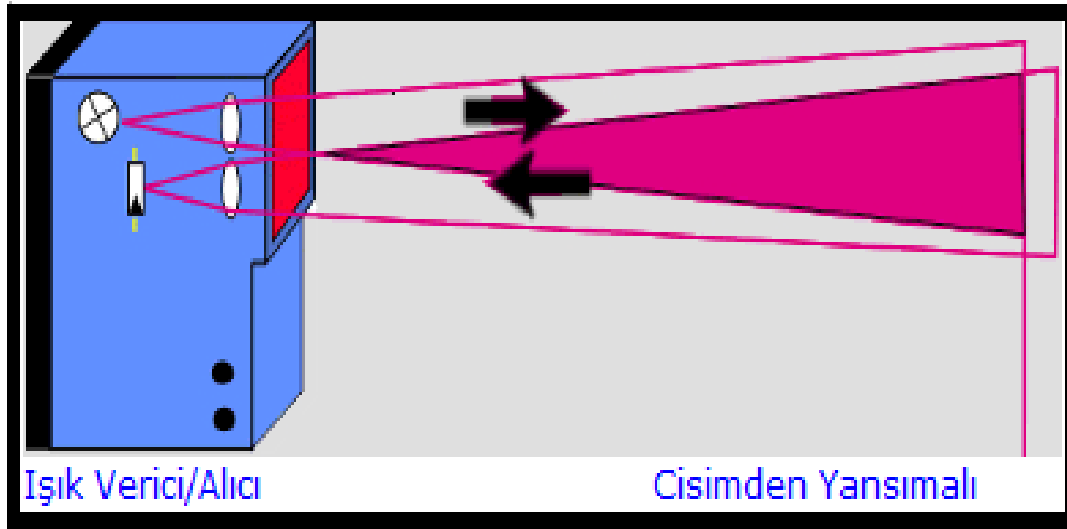
Şekil 4.12. Karşılıklı fotosel

- *Cisimden yansımali sensörler:* Cisimden yansımali fotosellerde belirli bir algılama mesafesi vardır. Bu mesafe içersine bir cisim girdiği anda, sensörden çıkan ışık cisme çarparak tekrar geri yansıyacak ve algılama alanında bir cisim olduğu belirlenmiş olacaktır.

Cisimden yansımali sensörlerin de bazı dezavantajları vardır. Cisimden yansıyan ışığın değerlendirilmesi ve algılanması nedeniyle, cismin algılanması büyük oranda cisim

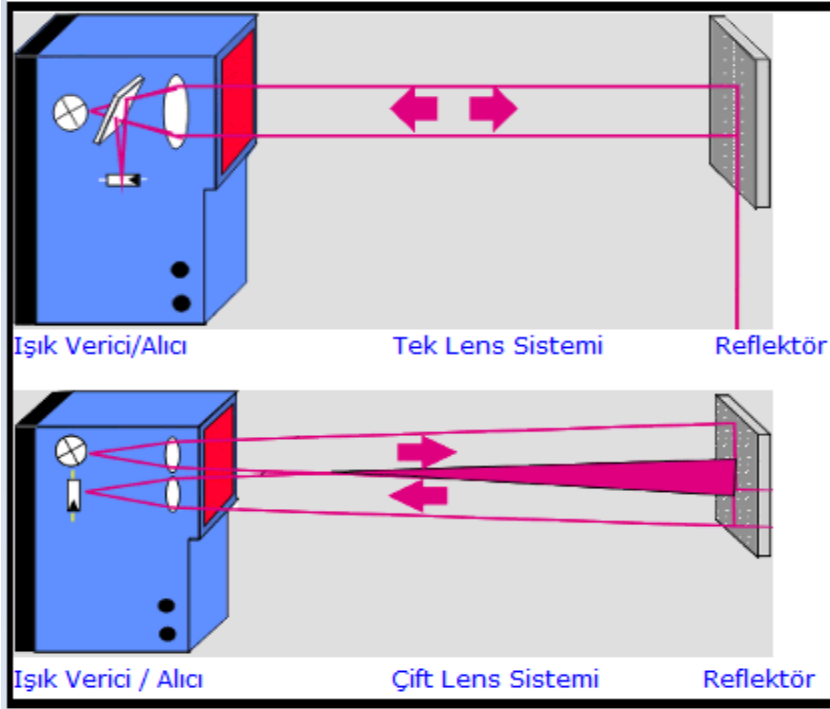
yüzeyinin özelliklerine bağlıdır. Karşılıklı ve reflektörlü sensörlere göre olası maksimum algılama mesafesi daha kısadır.

Cisimden yansımali fotosellerin önemli avantajları ise şunlardır: Monte edilecek sadece bir fotosel vardır. Yanlış ayarlama ve yansıtıcı kirlenmesi yoktur. Şeffaf cisimler karşılıklı ve yansıtıcıli fotosellerden daha iyi algılanabilir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Cisimden yansımali fotosel

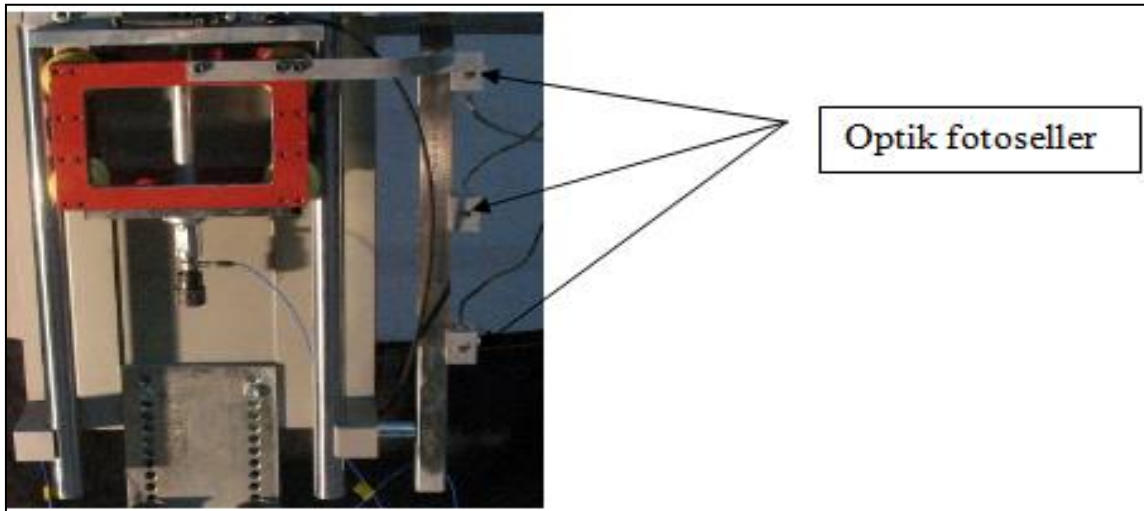
- *Yansıtıcıli sensörler (reflektörlü fotosel):* Reflektörlü fotosellerde (yansıtıcıli sensörlerde), fotoselin karşısına bir reflektör (yansıtıcı) yerleştirilir ve sensörden çıkan ışık bu reflektöre çarparak geri yansır. Sensör ile reflektör arasına herhangi bir cismin girmesi durumunda, ışığın bu yansıması kesintiye uğrayacağından çıkış verir ve cisim algılanmış olur. Verici ve alıcı tek bir birimde toplanmıştır. Şeffaf cisimlerde emin olmayan algılamaya, mat cisimlerde ise emin algılamaya sahiptir. Yansıtıcı cisimlerde de yine emin olmayan algılamaya sahiptir. Yalnızca polarizasyon filtresi olan sistemlerde yansıtıcı cisimler de algılanabilir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Reflektörlü fotosel

Deneyde kullanılan fotosel

Deney düzeneğinde kullandığımız fotoseller cisimden yansımali fotosellerdir. Bu fotoseller, ağırlığın düşmeye başladığı andan deney elemanına çarptığı ana kadar geçen süreyi ölçebilmek için kullanılmaktadır. Çekiç üzerine monte edilen bir parça yardımıyla çekiç fotoselin önünden geçtiği anda fotoseli harekete geçirir. Bu durum fotoselin ölçüm almasını sağlar. Deneyimizde üç adet fotosel bulunmaktadır (Resim 4.22).



Resim 4.22. Deneyde kullanılan fotoseller

En üstte bulunan fotosel çekicin harekete geçtiği anda zaman ölçüm devresini açar, ortada bulunan fotosel önünden çekiç geçtiği anda ilk zaman ölçümünü alır ve en altta bulunan fotosel ise çekicin harekete başladığı andan deney elemanına çarptığı ana kadar geçen toplam zamanı ölçer. Böylelikle çekicin zamana bağlı hız değişimi belirlenmiş olmaktadır.

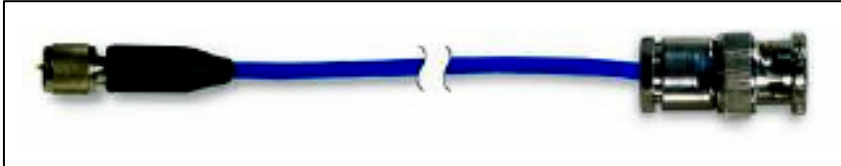
4.7.5. Düşük gürültülü koaksiyal kablo

Genel bilgi

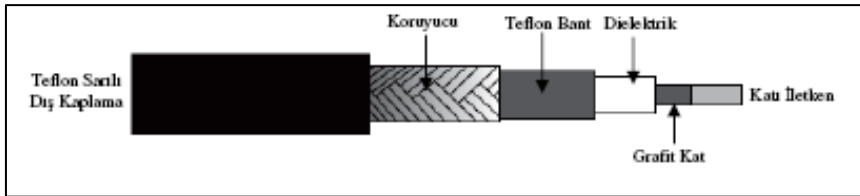
Bu kablo ölçüm aygıtlarından alınan ölçüm değerlerinin değer kaybına uğramadan deney alanından veri toplayıcısına iletilmesi için kullanılan özel kablolardır.

Deneyde kullanılan düşük gürültülü koaksiyal kablo

Deneylerimizde PCB Group firmasının imal ettiği 003A20 Model numaralı kablo kullanılacaktır (Resim 4.23). Bu kablo düşük gürültülü koaksiyal bir kablodur. İç yapısı Şekil 4.15’de ki gibidir.



Resim 4.23. 003A20 Model numaralı kablo



Şekil 4.15. 003A20 Model düşük gürültülü koaksiyal kablo ve iç yapısı

Bu tip kablolar yüksek sıcaklıklarda kullanılan algılayıcılarda, yüksek empedanslı sinyallerde, ICP algılayıcılarda ve düşük empedanslı voltaj sinyallerinin iletilmesinde kullanılmaktadır. Kablo çapı 2 mm olup çalışma sıcaklık aralığı -90 ile 260 °C’dir. Kablo empedansı 50 ohm’dur.

4.7.6. Deneylerde kullanılan halka kuvvet algılayıcı: 201B03 Model ICP

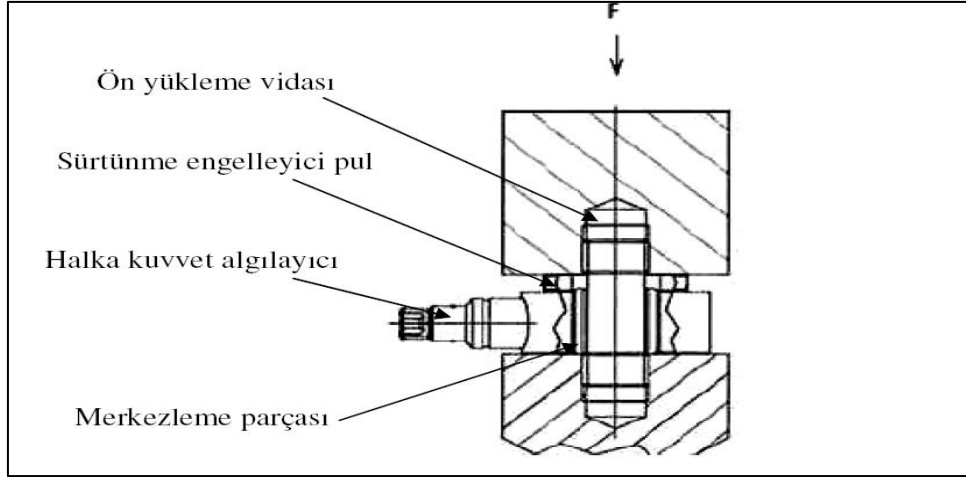
Deneylerimizde PCB Group firmasının üretimi olan kuvars halka kuvvet algılayıcılarından 201B03 Model ICP türü kullanıldı (Resim 4.24).



Resim 4.24. 201B03 Model ICP kuvars halka kuvvet algılayıcısı

Bu tip algılayıcıların kullanımında en önemli adım algılayıcının montajıdır. Montaj yapılırken yapılan hatalar ölçümleri tamamen yanlış alınmasına sebep olur. Halka kuvvet algılayıcıların montajı Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi algılayıcı, iki yapı arasına özel bir vida ile monte edilmiştir. Bu vida berilyum-bakır karışımı özel bir malzemeden yapılmış olup ön yükleme yapılmasına imkân vermekte, kalibrasyonu düzgün bir şekilde sağlanmakta ve algılayıcıdan okunan ölçme değerleri lineer olmaktadır. Algılayıcıyı merkezlenmek için vida ile halka arasına plastik bir parça yerleştirilir. Kuvvetin geldiği taraf ile algılayıcı arasına sürtünmeyi engelleyici pul konmuştur.

Laboratuvarımızda mevcut olan halka kuvvet algılayıcısı, yapılan pilot deneylerde kullandığımız çekiç kütlesi ile çarpma anında oluşan kuvvetin maksimum değerinin, algılayıcının maksimum ölçme değerini aştığı görülmüştür. Fakat kuvvetteki değişim değerlerini görmek için deneylerde kullanılmıştır. Kullandığımız halka kuvvet algılayıcının teknik özellikleri Çizelge 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.16. Halka kuvvet algılayıcısı montaj şekli

Çizelge 4.8. 201B03 model ICP halka algılayıcısı teknik özellikleri

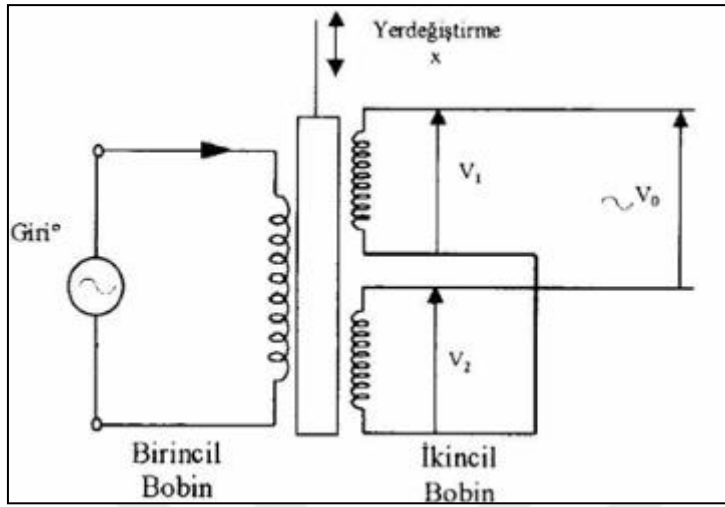
Özellik	Değer
Hassasiyet ($\pm 15\%$)	2248 mV/kN
Ölçüm aralığı (basınç kuvvet)	2,224 kN
Maksimum istatistik kuvvet (basınç kuvvet)	13,34 kN
Geniş bant çözünürlüğü (1- 10000 Hz)	0,04448 N-rms
Düşük frekans yanıtı (-5%)	0,0003 Hz
En üst frekans sınırı	90 kHz
Düzensizlik	$\leq 1\%$ FS
Çalışma sıcaklığı	-54 ile +121 °C
Sıcaklık hassasiyet katsayısı	$\leq 0,054\%$ °C
Boşaltma zaman sabiti (oda sıcaklığında)	≥ 2000 saniye
Uyarma voltajı	20 ile 30 VDC
Uyarma akım sabiti	2 ile 20 mA
Çıkış empedansı	≤ 100 ohms
Çıkış öngerilim voltajı	8 ile 14 VDC
Ön yükleme	0,89 kN
Dış gövde	Paslanmaz çelik
Elektrik bağlantısı	10-32 oaksiyel Jak

4.7.7. Doğrusal değişkenli fark transformatörler (LVDT)

Genel bilgi

LVDT bir objenin doğrusal olan mekanik hareketini, elektrik sinyallerine dönüştüren elektromekanik bir dönüştürücüdür. Bu yer değişimi algılayıcıları, 0.01 μ seviyelerindeki yer değişimlerini belirleyebilecek kapasitededir.

Doğrusal değişkenli fark transformatörler (LVDT) 'in yapısı



Şekil 4.17. Doğrusal değişkenli fark transformatörün yapısı

En basit haliyle bir LVDT primer, sekonder sargılar ve bunların merkezinde temas etmeden hareket eden bir çekirdekten meydana gelir. (Şekil 4.17) Primer sargılar sabit genlikli bir Alternatif Akım ile beslendiğinde bu LVDT'nin merkezinde bir manyetik alan yaratır ve sekonder sargılarda indüklenen akım ile çekirdeğin o anki konumu tespit edilir. Primer sargılar sabit genlikli bir Alternatif Akım ile beslendiğinde bu LVDT'nin merkezinde bir manyetik alan yaratır ve sekonder sargılarda indüklenen akım ile çekirdeğin o anki konumu tespit edilir.

Sekonder bobin sinyali önce faz hassasiyetine sahip bir demodülatör (primer bobin beslemesi ile aynı frekansa sahip) tarafından işlenir ve filtreleme, düzeltme ardından çekirdeğin sıfır noktasına göre doğrultusu, uzaklığı ile orantılı bir doğru akım elde edilir. LVDT'nin konum belirlemek için kullanılan diğer sensörlere göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Avantajları:

- Çok kullanıldığı ve üretildiği için diğer çözümlere göre daha ucuzdur.
- Dayanıklı bir yapısı olduğundan çeşitli çevre koşullarında kullanılabilir.
- Teorik olarak sonsuz hassasiyete sahiptir. Pratikte ise ölçüm esnasında kullanılan kuvvetlendirici ve voltaj ölçüm cihazlarına bağlıdır.

- Bu transformatörler elektriksel olarak tam yalıtıma sahip olup, temassız trafolardır. Bu sebeple sürtünme etkisi ve aşınma en asgari düzeyde kalır. Sürtünmeye dair kayıplar olmadığından herhangi bir bakım yapılmadan çalışma süresi de daha uzundur.

Dezavantajları:

- Çekirdeğin doğrudan veya dolaylı olarak ölçülecek yüzeye temas etmesi gerekir ki bazı durumlarda bu mümkün olmayabilir.
- Dinamik ölçümler yapılırken LVDT'nin rezonans frekansının 1/10'una kadar doğru ölçüm yapılır ki bu da çoğu zaman 2kHz'e kadar geçerli bir aralıktır.

4.8. Yakma Deneyi

Bu deneyde, reçine eriyene ve geride elyaf kalana kadar numuneye ısı uygulanır. Yakma deneyinin amacı ise üretilen numunelerde matris, fiber, nano parçacıklar ve boşluğun hacimsel oranlarını tespit etmektir. Özellikle, üretilen numunelerin kalitesini gösteren boşluk hacmi, çekme, eğme ve darbe deneylerinin analizinde faydalıdır. Yakma deneyi, D2734 ve D2584 standartlarına göre yapılmıştır. Numuneler kare şeklinde ve boyutları 250 mm olarak hazırlanmıştır (Resim 4.25).



Resim 4.25. Fırına koymadan önce hazırlanan yakma deney numuneler

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Yakma Deneyi

Yakma deneyi ile üretilen kompozitlerin fiber, matris ve boşluk hacim oranları belirlenmiştir. Nanopartikül katkısının epoksi yoğunluğuna etkisi hesaba katılarak hacim oranlarının daha sağlıklı belirlenmesi sağlanmıştır. Epoksi yoğunluğu her bir numune için bu bilgiler ışığında tek tek hesaplanmıştır. Çizelge 5.1’de üretilen numunelerin hacim oranları verilmiştir. V_f fiber hacim oranını, V_m matris hacim oranını, V_v ise boşluk hacim oranını vermektedir.

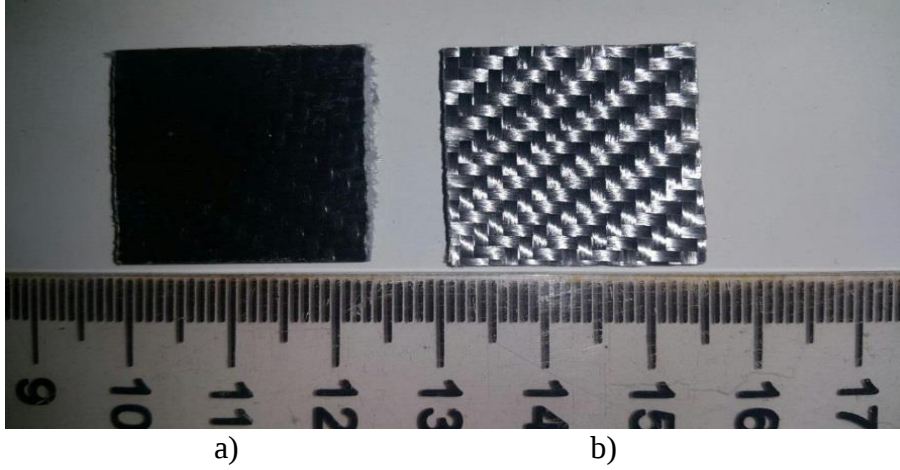
Çizelge 5.1. Numunelerin hacim oranları

	V_f	V_m	V_v
Katkısız	68,025	30,62	1,15
NG15	66,95	31,23	1,82
NG25	66,47	31,49	2,04
NG35	66,24	31,65	2,11
NG45	65,85	31,67	2,48
NG75	63,61	32,87	3,51

Çizelge 5.1 incelendiğinde nanopartikül katkısı ile fiber hacim oranının düşmesi ve boşluk hacim oranının artması dikkat çekmektedir. Bunun nedeni nanopartikül katkısının matrisin viskozitesini arttırması olduğu söylenebilir. Matrisin viskozitesinin artması üretim esnasında fazla epoksinin katkısız numunelere kıyasla vakum altında daha az çekilebilmesine yol açabilir. Dolayısıyla kompozit yapı içerisindeki matris hacim oranının arttığı söylenebilir.

Nanopartikülün matris içerisinde homojen olarak dağıtılması önemli bir problemdir. Boşluk hacim oranındaki artışın nanopartikül katkısıyla orantılı olarak artması ise nanopartiküllerin topaklanması ile açıklanabilir. Nanopartiküllerin matris içerisinde kümelenmeler oluşturarak üretim esnasında epoksinin elyafı ıslatırken önünde sanki bir engel oluşturduğu dolayısıyla kompozit yapı içerisinde küçük hava boşluklarının olduğu söylenebilir [106].

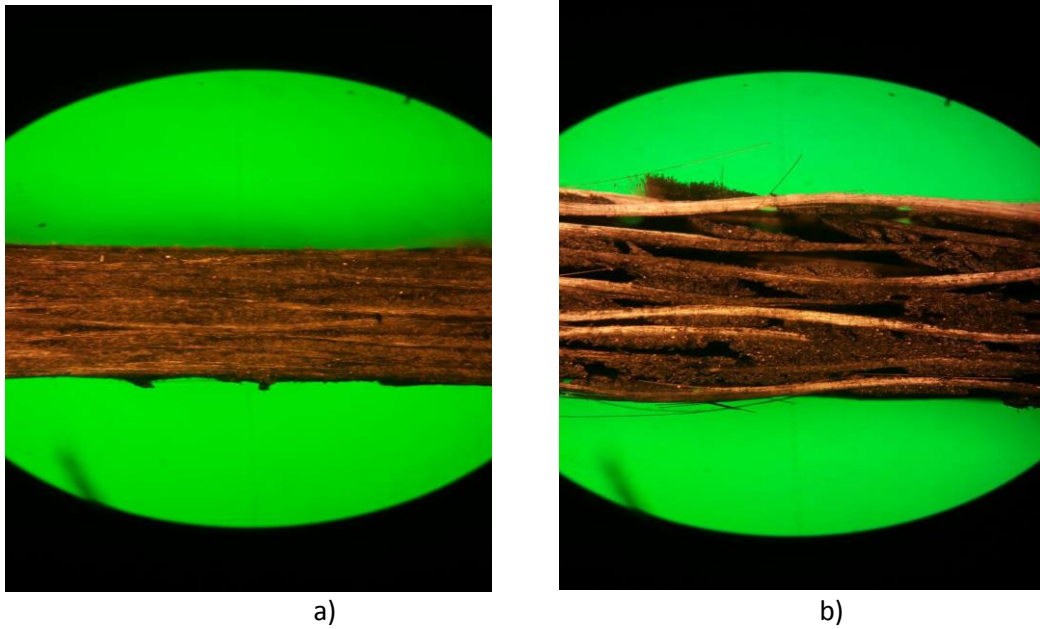
Resim 5.1’de numunelerin yakma deneyi sonrası resimleri görülmektedir.



Resim 5.1. Grafen katkılı numunenin yüzey alanı a) yakma deneyinden önce b) yakma deneyinden sonra

Resim 5.1’de görüldüğü gibi grafen katkılı numunenin rengi yakma deneyi sonrasında beyaza dönmüştür.

Resim 5.2’de numunelerin yakma deneyi öncesi ve sonrasında optik mikroskopta yan taraftan çekilen resimleri görülmektedir.



Resim 5.2. Grafen katkılı numunenin yan tarafı a) yakma deneyi öncesi, b) yakma deneyi sonrası

Resim 5.2’de görüldüğü gibi yakma deneyi sonrası epoksinin gidirilmesi ile tabakalar arasında yapışkanlık düşmüştür ve aralarında mesafe oluşmuştur. Numunelerin tabakaları kolayca ayrılabilir.

5.2. Çekme Deneyi

Çekme deneyi ile nanografen katkılı hibrit nanokompozitlerin ve katkısız cam/epoksi kompozitin eksenel çekmede davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Sonuçlara göre nanografenin artmasıyla çekme mukavemetinde artış görülmektedir, ancak daha fazla nanoparçacığın eklemesi ile çekme mukavemetinde düşüş tespit edilmiştir.

Çizelge 5.2. Çekme deneyi sonuçları

	Çekme mukavemeti [MP]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Elastiklik modülü [GPa]	Tokluk [MJ/m ³]
Katkısız	361,21	0,02624	19,54	4,94
NG15	404,06	0,02862	24,61	6,05
NG25	431,13	0,02941	26,56	6,78
NG35	447,92	0,02938	26,08	7,66
NG45	474,24	0,03116	28,13	8,71
NG75	437,39	0,02836	26,83	6,72

Numunelerin çekme testi sonuçları yüzdesi katkısız numuneye göre Çizelge 5.3’te görülmektedir.

Çizelge 5.3. Çekme deneyi nanopartikül etkisi

	Çekme mukavemeti [MP]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Elastiklik modülü [GPa]	Tokluk [MJ/m ³]
katkısız	-	-	-	-
NG15	11,86	9,07	25,94	22,46
NG25	19,35	12,08	35,92	37,24
NG35	24	11,96	33,46	55,04
NG45	31,29	18,75	43,96	76,31
NG75	21,09	8,07	37,73	36,03

NG15 numunesinde katkısız numuneye göre çekme mukavemetinde %11,86 artış görülmektedir. Grafen oranı %0,15’den % 0,45’e artmasıyla numunelerin çekme mukavemeti artmaktadır. NG45 numunesinde çekme mukavemeti katkısız numuneye göre

%31,13 artmaktadır. Ancak grafen oranı %0,45'ten %0,75'e artmasıyla çekme mukavemeti % 8,87 düşmüştür. Bunun sebebi literatürde bahsedildiği gibi boşluk hacim oranının artmasıdır [105]. Bu boşluklar matriste çatlak gibi davranarak hasar oluşmasına sebep olmuştur. Ayrıca grafen oranının artması cam elyafın etrafında topaklanmaya sebep olmuştur. Topaklanma ve boşlukların oluşması cam elyafıyla matris arasında yapışkanlığını düşürmektedir buda malzemenin mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur.

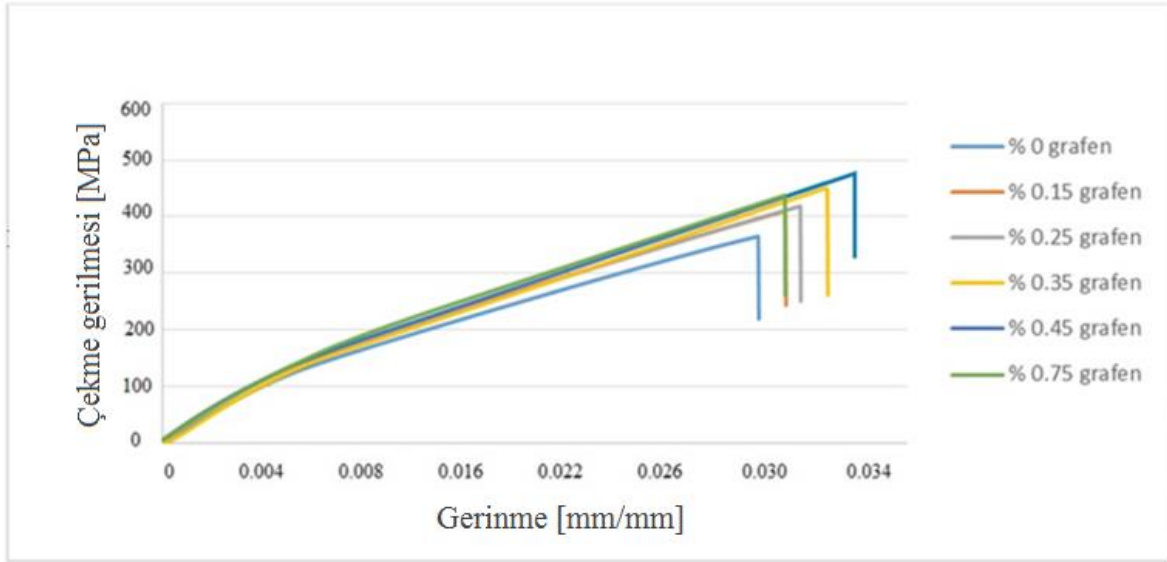
Grafenin eklenmesi %0,45 ağırlık oranına kadar ilavesi şekil değiştirmenin miktarını artırmaktadır. NG15 numunesinde katkısız numuneyle kıyasla şekil değiştirmenin miktarı %9 artmıştır. Buradada en yüksek şekil değiştirme NG45 numunesinde tespit edilmiştir. Bu numunede şekil değiştirmenin miktarı katkısız numune göre % 18,75 artış göstermektedir. NG75 numunesinde şekil değiştirmenin miktarı NG45 numunesindeki şekil değiştirme miktarına göre yaklaşık %9 düşmüştür.

Elastiklik modülü incelendiğinde nanoparçacığın %0,45 ağırlık oranına kadar artması bu değeri artırdığı görülmektedir. NG15 numunesinin elastiklik modülü katkısız numuneyle karşılaştırıldığında yaklaşık % 26 artmıştır. En yüksek elastiklik modülü NG45 numunesinde tespit edilmiştir. Bu numunede elastiklik modülünün değeri katkısız numune göre yaklaşık %26 artmıştır. NG75 numunesinde elastiklik modül değerinde NG45 numunesine göre %4,7 düşüş tespit edilmiştir.

Tokluk değerlerine bakıldığında nano parçacığın oranı %0,15 olduğu zaman tokluk değeri katkısız numuneyle göre %22,59 artış göstermektedir. Diğer değerler gibi en yüksek değer NG45 numunesinde tespit edilmiştir. Bu numunede tokluğun değeri katkısız numuneyle göre %76,31 artmıştır. NG75 numunesinde tokluğun değeri NG45 numunesi ile karşılaştırıldığında yaklaşık %28 düşmüştür.

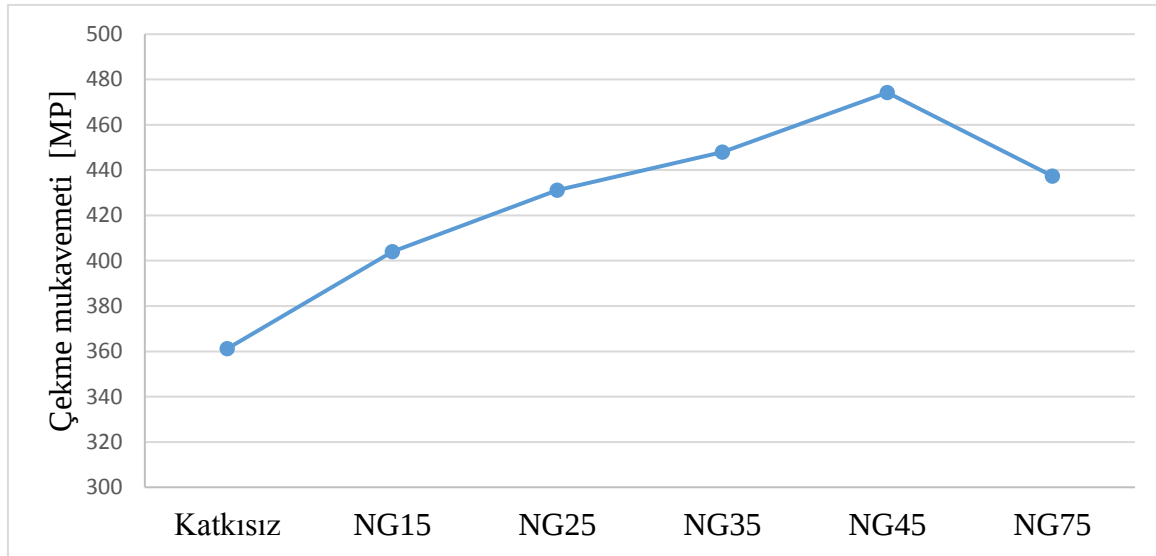
Şekil 5.1'de çekme deneyinin gerilme-gerinme eğrileri grafik olarak verilmiştir. Katkılı numunelerin eğrileri bir bölgede kümelenmişken, katkısız numunenin katkılı olanlardan oldukça ayrı olduğu açıktır. Eğrinin kırılma noktasına kadar elastiklik şekil değiştirme bölgesidir. Ancak kırılma noktasından sonra fiber malzeme elastiklik deformasyona devam ederek matris malzeme plastik şekil değiştirmeye başlar. kompozit malzemelerde matris akmaya başladığında fiber daha fazla yük taşımaktadır.

Elde edilen eğrilerde elastik ve plastik bölgenin eğimi az fark göstermektedir. Kırılma noktasından sonra eğrilerin eğimi azalarak yaklaşık doğrusal olarak devam etmektedir.



Şekil 5.1. Çekme deneyi eğrileri

Şekil 5.2’de numunelerin çekme deneyi çekme mukavemeti sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.

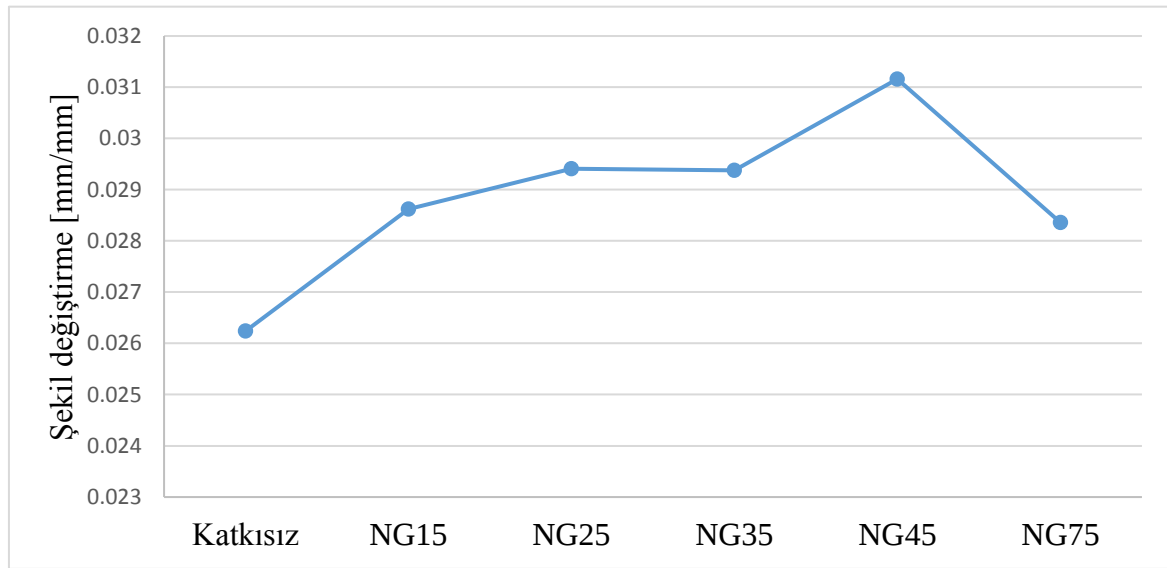


Şekil 5.2. Numunelerin çekme deneyi çekme mukavemeti grafiği

%0,15 oranında grafenin eklenmesi çekme mukavemetinde % 11,86 artışa sebep olmuştur. Şekilde 5.2’de görüldüğü gibi NG45 numunesinde en yüksek mukavemet elde edilmiştir. Yani bu numunede nanoparçacık ile matris ve fiber arasında kuvvetli bağ oluşmuştur.

Mukavemetin düşüşü NG75 numunesinde grafenin artmasına bağlanmıştır. Boşlukların artmasıyla matris içinde hava kabarcıklarının çatlak gibi davranması ve cam elyaflar arasında yapışkanlığın düşmesi mukavemetin düşüşünün nedenlerinden sayılabilmektedir. Ayrıca yüksek oranlarda nano parçacığın eklenmesi topaklanma ihtimalini artırılmaktadır dolayısıyla bu olumsuz etki mukavemetin düşüşünde rol oynayabilir.

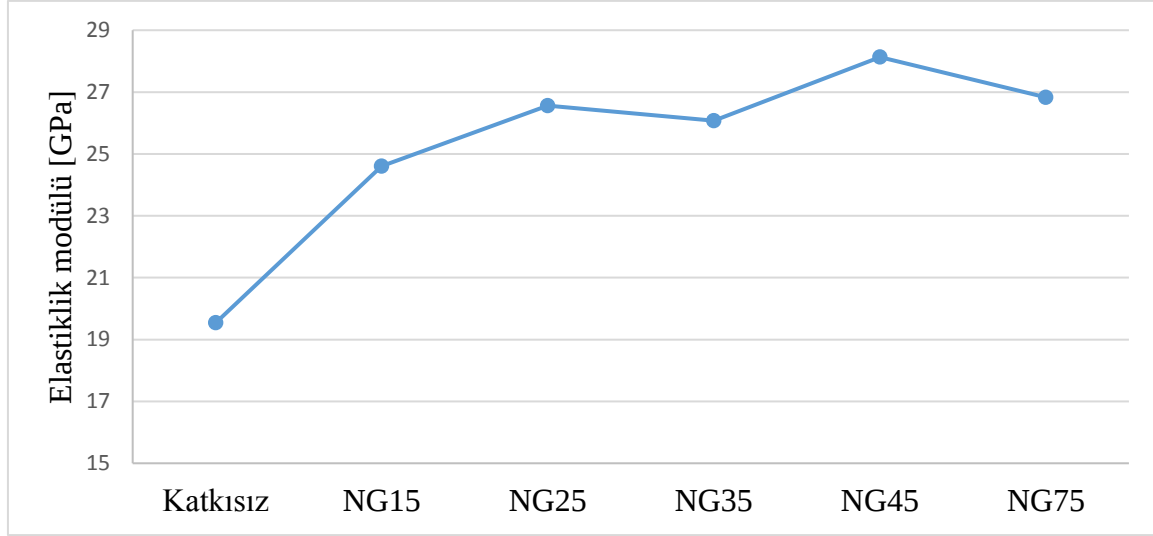
Şekil 5.3'te grafen katkılı numunelerin çekme deneyi şekil değiştirme sonuçları ve bunların grafik şeklinde sunumu verilmiştir.



Şekil 5.3. Numunelerin çekme deneyi şekil değiştirme grafiği

Sonuçlara bakıldığında grafen oranının artmasıyla şekil değiştirme miktarı artmaktadır. En yüksek şekil değiştirme NG45 numunesinde tespit edilmiştir. Ancak nanopartikülün daha fazla artmasıyla şekil değiştirme miktarı düşmektedir.

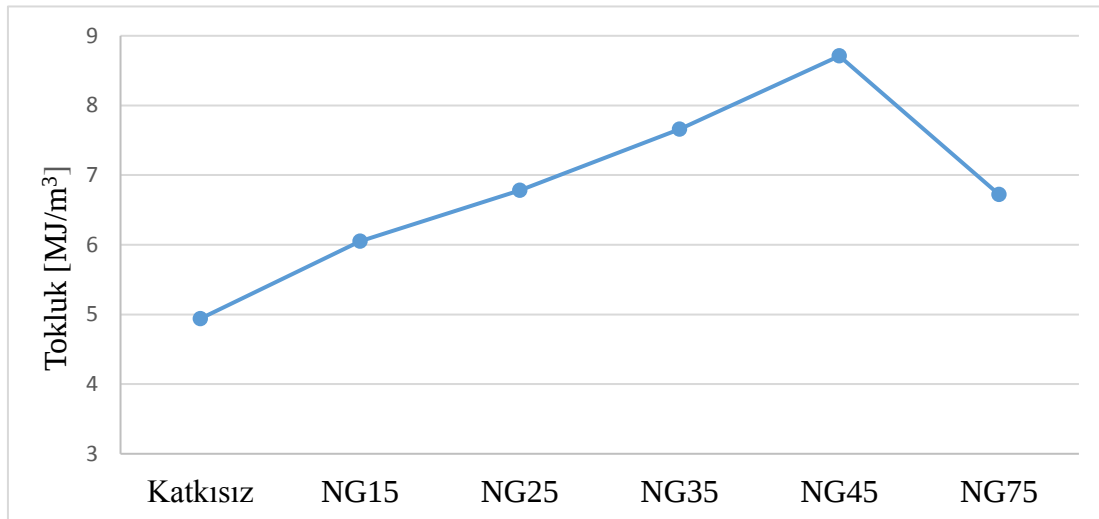
Şekil 5.4'de numunelerin çekme deneyi elastiklik modülü sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Numunelerin çekme deneyi elastiklik modülü grafiği

Elastiklik modülü eğrinin kırılma noktasından önce eğriden bulunmaktadır. Şekil 5.4’de katkısız numunenin en düşük elastiklik modülüne sahip olduğu açıktır. Sadece %0,15 ağırlık oranında grafen eklenmesi ile elastiklik modül değerinde %26 artış tespit edilmiştir. En yüksek elastiklik modülü NG45 numunesinde görülmektedir. Diğer değerler gibi NG75 numunesinde elastiklik modül değerinde düşüş tespit edilmiştir.

Şekil 5.5’de numunelerin çekme deneyi tokluk sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Numunelerin çekme deneyi tokluk grafiği

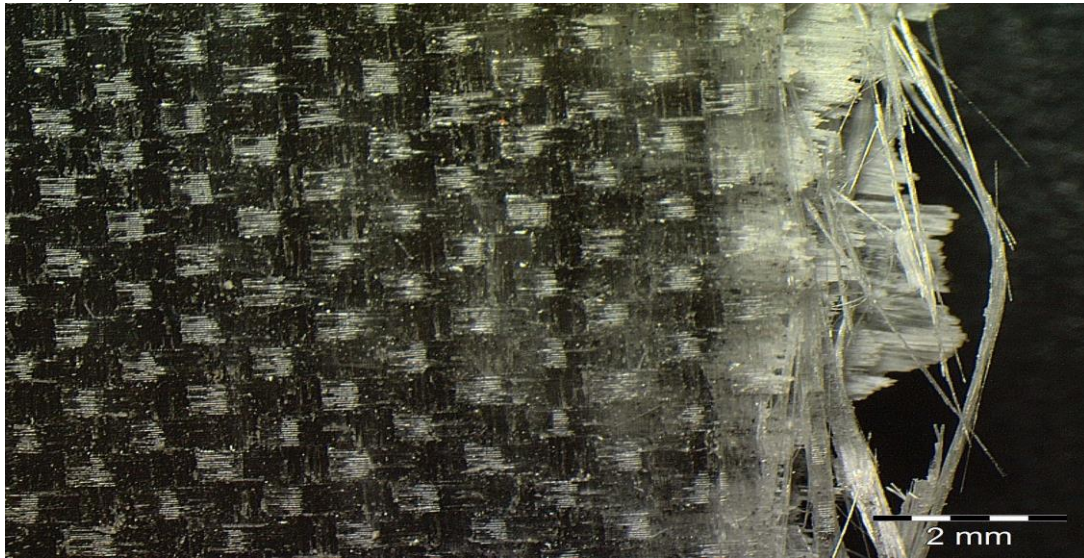
Bir malzemenin kırılmadan önce enerji absorbe etme kabiliyetine tokluk denilir. Sadece %0,15 nano parçacığın eklenmesi ile malzemenin tokluğunda %22,59 artış görülmektedir. En

yüksek değer NG45 numunesinde tespit edilmiştir. Nano parçacığın daha fazla olması malzemenin tokluğunun düşmesine sebep olmaktadır. NG75 numunesinde tokluk miktarı N25 numunesinde bulunduğu değere kadar düşmektedir.

Resim 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6’da çekme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyinden farklı yönlerden makro ve mikro görüntüleri verilmektedir.

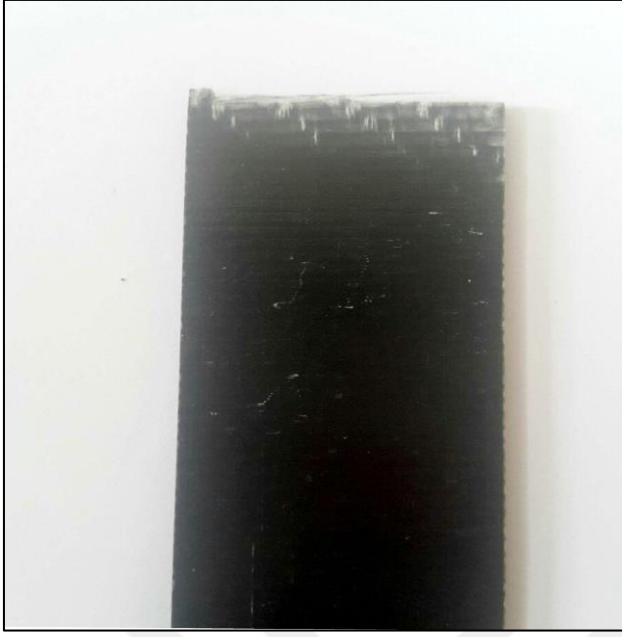


a)



b)

Resim 5.3. Çekme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi arka taraftan enine kesit yönde a) makro görüntüsü b) optik mikroskop görüntüsü

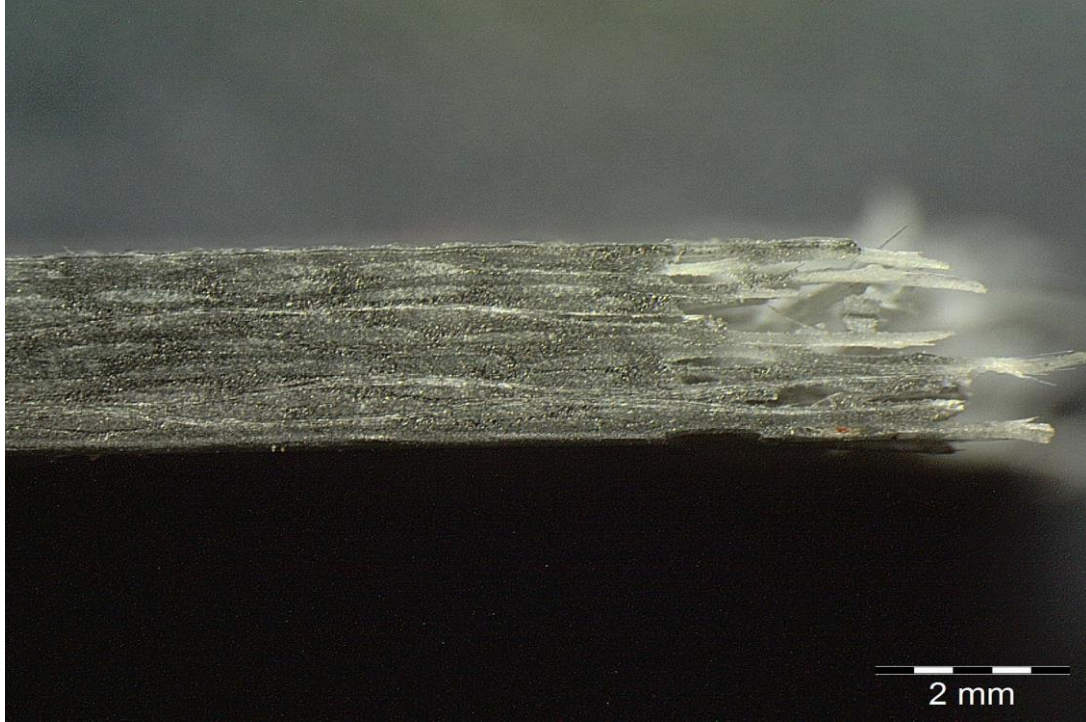


a)

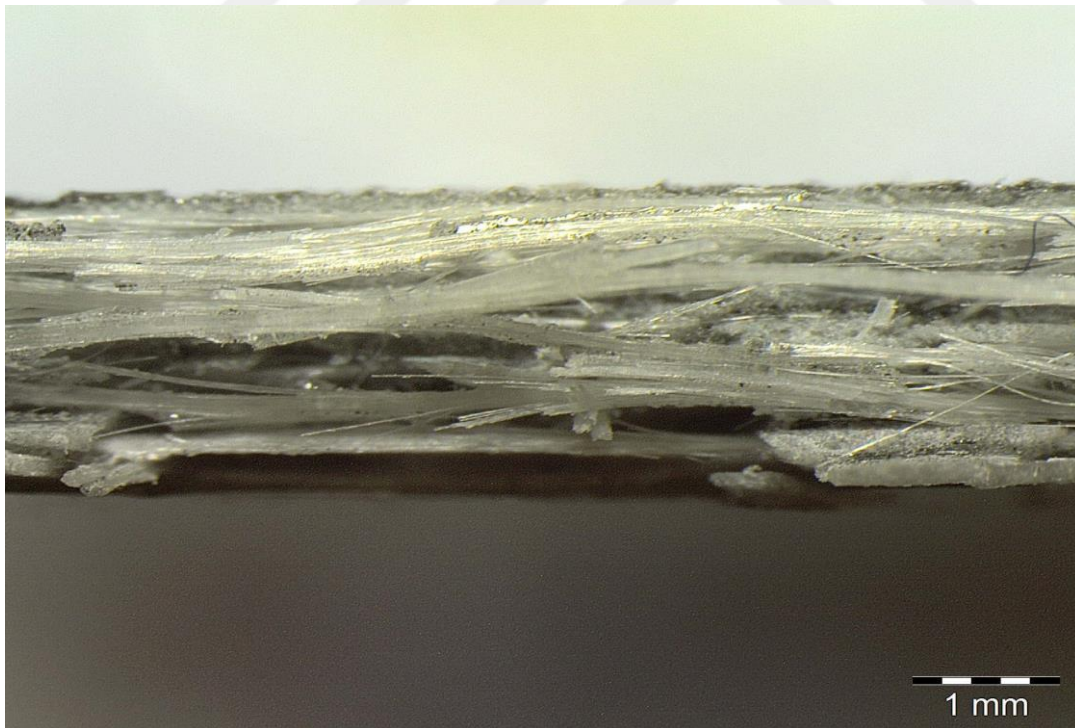


b)

Resim 5.4. Çekme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi ön taraftan enine kesit yönde
a) makro görüntüsü b) optik mikroskop görüntüsü



Resim 5.5. Çekme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi boyuna kesitden alınan optik mikroskop görüntüsü



Resim 5.6. Çekme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi optik mikroskop görüntüsü

Resimlerde görüldüğü gibi (Resim 5.5) eksenel yükte numunelerin kırılması fiberin kopmasıyla meydana gelmiştir. Bu deneyde kırılma yüzeyinde tabakaların ayrılması görülmemektedir. Nedeni ise çekme deneyinde bütün tabakalara eşit çekme yük

uygulanmaktadır. Tabakalar arasında gerilme düşük miktarda oluşmuştur, dolayısıyla fiberlerin kopması kırılmada daha çok etkili olduğu tespit edilmiştir.

5.3. Üç Nokta Eğme Deneyi

Üç nokta eğme deneyi ile nanografen katkılı hibrit nanokompozitlerin eğme yükü altında davranışları incelenmiştir. Çizelge 5.4’de üç nokta eğme deney sonuçları verilmiştir.

Sonuçları incelendiğinde nano parçacığın eklenmesi ile eğme mukavemeti ve eğme elastiklik modülünde artış görülmektedir. Ancak grafen belli bir miktardan fazla olursa malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. En yüksek değer NG25 numunesinde tespit edilmiştir. Ancak nano parçacığın oranının artmasıyla eğme mukavemeti ve eğme elastiklik modülünde düşüş görülmektedir.

Çizelge 5.4. Üç nokta eğme testinden elde edilen sonuçlar

	Eğme mukavemeti [MPa]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Eğme elastiklik modülü [GPa]	Tokluk [MJ/m ³]
katkısız	497,28	0,03247	20,1	7,25
NG15	630	0,02716	28,31	8,53
NG25	670,061	0,02678	30,65	8,7
NG35	604,17	0,02705	27,82	8,44
NG45	582,13	0,02683	26,89	7,57
NG75	516,6	0,02836	23,94	7,15

Çizelge 5.5’de eğme deneyleri sonucunda nanopartikül katkısının mekanik özelliklere yüzde olarak etkisi tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 5.5. Üç nokta eğme deneyi nanoparçacık etkisi

Grafen oranı	Eğme mukavemeti [MPa]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Eğme elastiklik modülü [GPa]	Tokluk [MJ/m ³]
Katkısız	-	-	-	-
NG15	26,89	-16,35	40,84	17,65
NG25	34,74	-17,52	52,48	20
NG35	21,49	-16,69	38,40	16,41
NG45	17,06	-17,30	33,78	4,04
NG75	3,88	-12,65	19,10	1,37

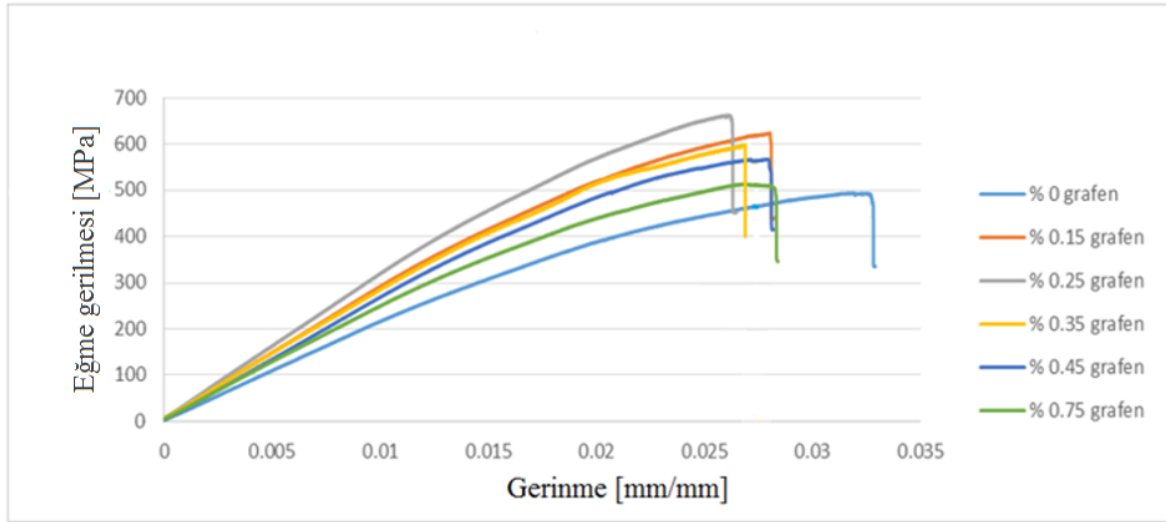
Eğme mukavemeti değerlerine bakıldığında sadece %0,15 oranında grafenin eklenmesiyle eğme mukavemetinde katkısız numuneye kıyasla %26,89 artış görülmektedir. En yüksek eğme mukavemeti NG25 numunesinde tespit edilmiştir. Bu numunede eğme mukavemeti değeri katkısız numuneye göre %34,74 artmaktadır. Grafenin artmasıyla bu miktar düşmektedir. En düşük değer NG75 numunesinde görülmektedir. Bu numunede eğme mukavemetinin değeri katkısız numuneye göre sadece %3,88 artmıştır. Nedeni ise grafenin artmasıyla boşluk hacim oranının artmasıdır. Bu olumsuz faktörün çatlak gibi davranması matrisin hasar görmesine neden olmaktadır. Ayrıca grafenin artması cam elyaf ile katmanlar arasında yapışkanlığın düşüşüne sebep olmuş ve buda kompozitin mekaniksel yapısını olumsuz etkilemiştir.

Şekil değiştirmede en yüksek değer katkısız numuneye aittir. Grafenin eklenmesiyle şekil değiştirme değerinde düşüş görülmektedir. Nano parçacığın %0,15 eklenmesi şekil değiştirme değerinde % 16,35 düşüşe sebep olmuştur. Grafen katkılı numuneler içinde en düşük şekil değiştirme NG25 numunesinde görülmektedir. Bu numunede şekil değiştirme değeri katkısız numuneye kıyasla % 17,52 azalmıştır. Grafen katkılı numunelerin içinde en yüksek şekil değiştirme değeri NG75 numunesinde görülmektedir. Bu numunede şekil değiştirme değeri grafensiz numuneye göre %12,65 düşmüştür.

Eğme elastiklik modülünde eğme mukavemeti gibi en düşük değer katkısız numuneye aittir. Sadece % 0,15 ağırlık oranda grafenin eklenmesi eğme elastiklik modülünü katkısız numuneye göre % 40,84 artırmıştır. Buradada en yüksek elastiklik modülü NG25 numunesinde tespit edilmiştir. Bu numunede grafen eklenmesi, elastiklik modül miktarını katkısız numuneye göre % 52,48 artırmıştır. Nano parçacığın artması kompoziti olumsuz etkileyerek elastiklik modülünün düşüşüne neden olmuştur. En düşük değer NG75 numunesinde tespit edilmiştir. Bu numunede elastiklik modülünün değeri NG25 numunesinde belirlenen değerle karşılaştırdığında % 21,01 düşmüştür.

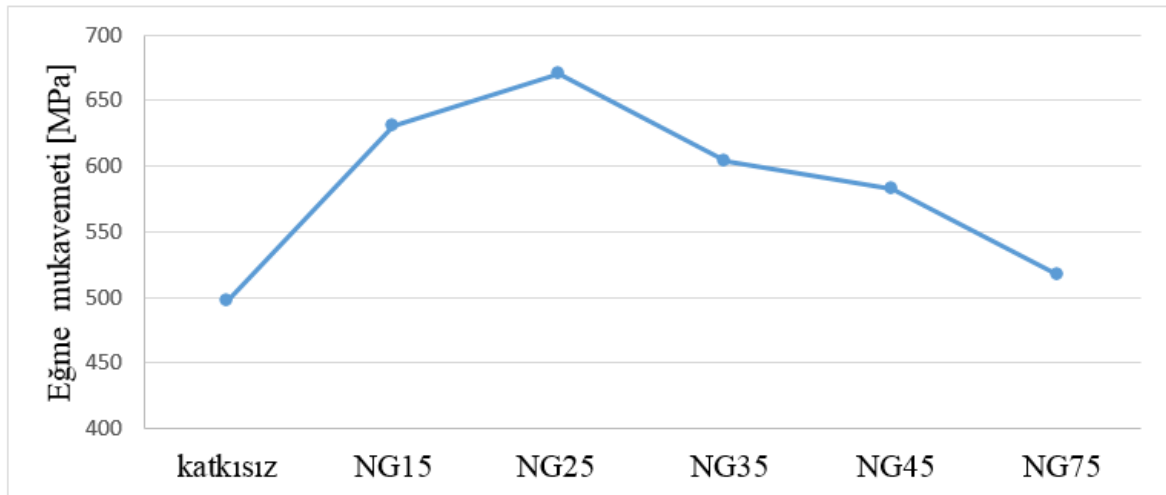
En yüksek tokluk NG25 numunesinde ve en düşük tokluk NG75 numunesinde görülmektedir. NG15 numunesinin tokluk değeri katkısız numuneye göre %17,65 artmaktadır. Tokluk değeri grafen ağırlık oranı %0,15'ile %0,35 aralığında çok az değişmektedir. Grafen katkılı numunelerde en düşük değer NG75 numunesinde tespit edilmiştir. Bu numunede tokluğun değeri katkısız numuneye göre %1,3 düşmektedir.

Şekil 5.6’da üç nokta eğmenin gerilme - gerinme eğrisi verilmiştir. Eğriler başlangıçtan kopma noktasına kadar neredeyse doğrusal şekilde çizilmiştir. Yükün artmasıyla eğriler arasında mesafe artmaktadır. En düşük eğim katkısız numune eğrisinde ve en yüksek eğim NG25 numunesinin eğrisinde görülmektedir.



Şekil 5.6. Üç nokta eğme testi gerilme – gerinme eğrisi

Şekil 5.7’de katkısız ve grafit katkılı numunelerin üç nokta deneyi eğme mukavemeti grafik şeklinde gösterilmiştir.

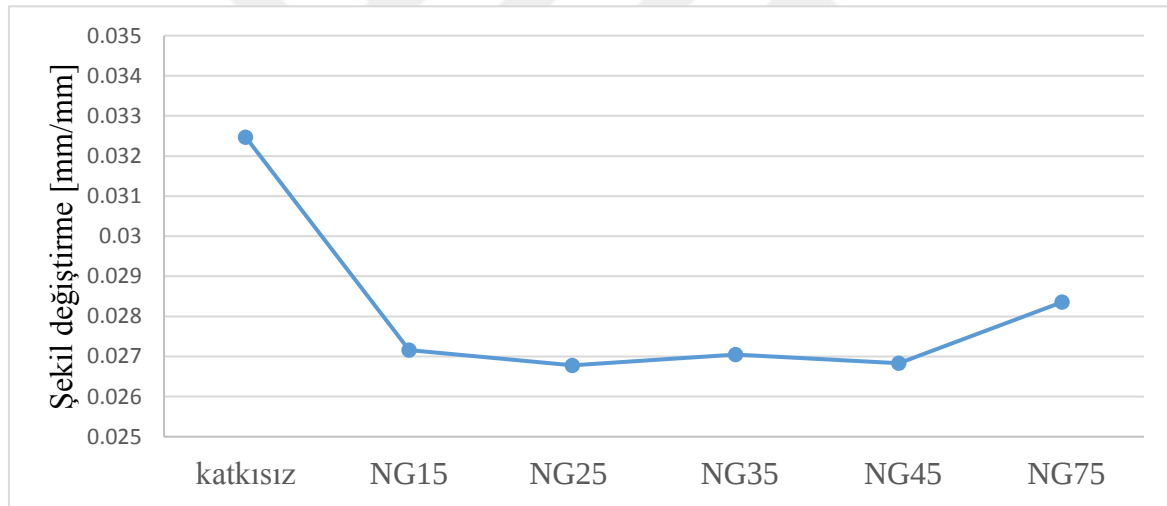


Şekil 5.7. Numunelerin üç nokta deneyi eğme mukavemeti grafiği

Şekil 5.7'ye bakıldığında en yüksek eğme mukavemeti NG25 numunesinde görülmektedir. Buda çatlak olan bölgelerde köprüleme özelliği ve matris ile fiber arasında kuvvetli bağ oluşmasına bağlanabilir.

Katkısız numuneye grafenin eklenmesi eğme mukavemetini artmaktadır ancak grafen ağırlık oranı %0,25'den fazla olursa nanokompoziti olumsuz etkiler ve eğme mukavemetinin düşmesine sebep olur. Yani belirli bir orandan sonra topaklanma ve boşluk hacim oranının artması neticesinde faydadan çok zarar verdiği görülebilmektedir[105]. Bu sonuçlarda da NG25 numunesinden sonra diğer numunelerde eğme mukavemetinin düşüşü görülmektedir.

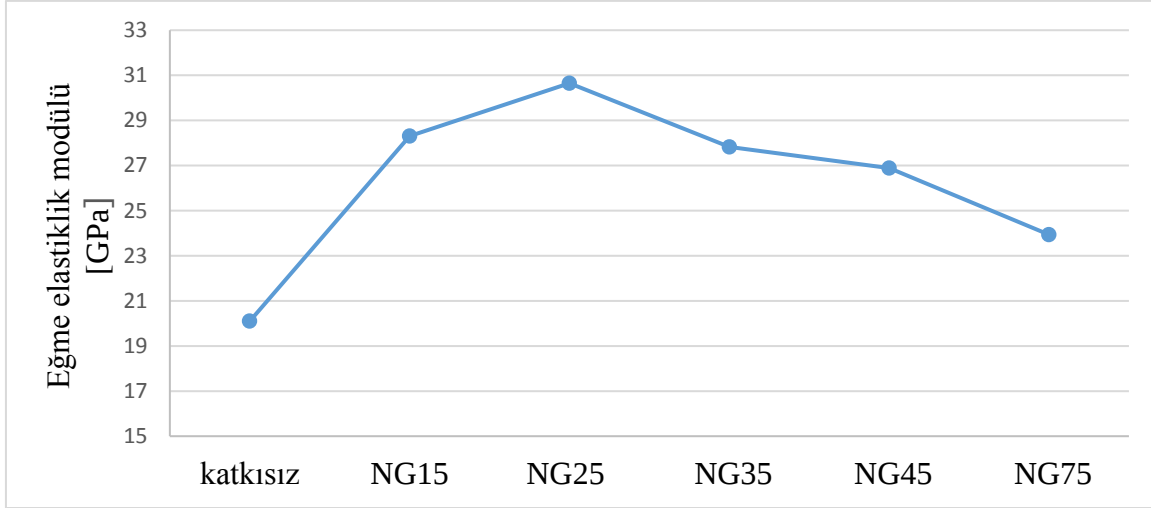
Şekil 5.8'de katkısız ve grafen katkılı numunelerin üç nokta eğme deneyi şekil değiştirme sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Numunelerin üç nokta eğme deneyi şekil değiştirme grafiği

Şekil 5.8'e bakıldığında grafenin ilave edilmesi malzemenin şekil değiştirmesinde düşüşe sebep olmuştur. Sadece %0,15 ağırlık oranında grafenin eklenmesi ile şekil değiştirme miktarında ciddi bir düşüşe tespit edilmiştir. En düşük şekil değiştirme NG25 numunesinde görülmektedir. NG25 numunesinde şekil değiştirme miktarı katkısız numuneyle kıyasla % 17,52 azalmıştır. Grafen oranının artması şekil değiştirme miktarını çok düşük miktarda artırmaktadır.

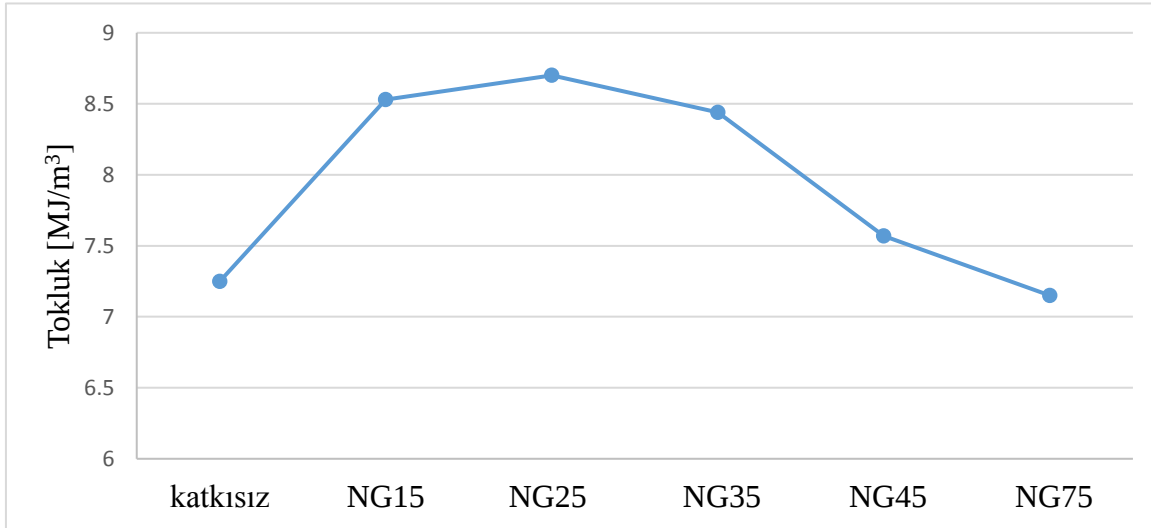
Şekil 5.9'da katkısız ve grafen katkılı numunelerin üç nokta eğme deneyi eğme elastiklik modül sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Numunelerin üç nokta eğme deneyi eğme elastiklik modülü

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi grafen oranı %0,25 kadar artmasıyla eğme elastiklik modülü artmaktadır. Ancak daha fazla nano parçacığın ilavesi malzemeyi olumsuz etkilemiş ve eğme elastiklik modülü %0,25 oranından %0,75 oranına kadar düzenli şekil de düşmüştür.

Şekil 5.10’da katkısız ve grafen katkılı numunelerin üç nokta eğme deneyi tokluk sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.



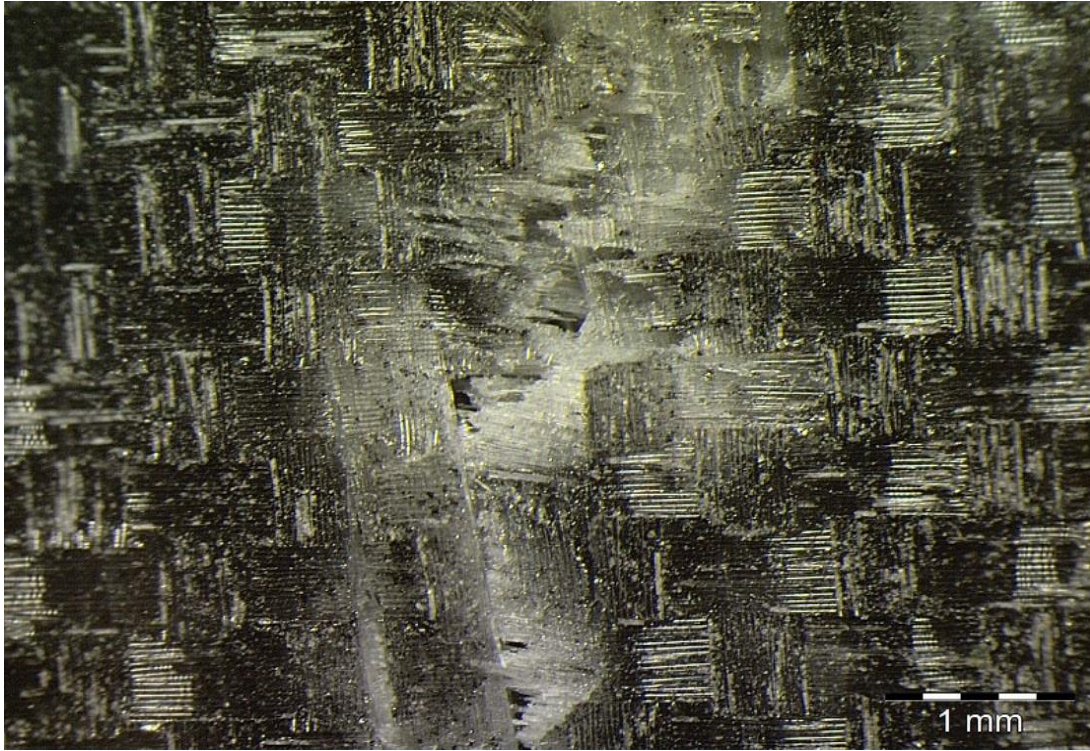
Şekil 5.10. Numunelerin üç nokta eğme deneyi tokluk grafiği

Şekil 5.10’da görüldüğü gibi %0,25 ağırlık oranına kadar grafenin eklenmesi ile tokluğun artışı tespit edilmiştir. Ancak %0,25 oranından fazla nano parçacık ilave edilirse tokluk değeri düzenli şekilde düşmektedir. NG75 numunesinde en düşük tokluk değeri görülmektedir.

Üç nokta eğme deneyi sonrası NG25 numunesi kırılma bölgesinde farklı yüzeylerden makro ve mikro resimleri görülmektedir.



a)

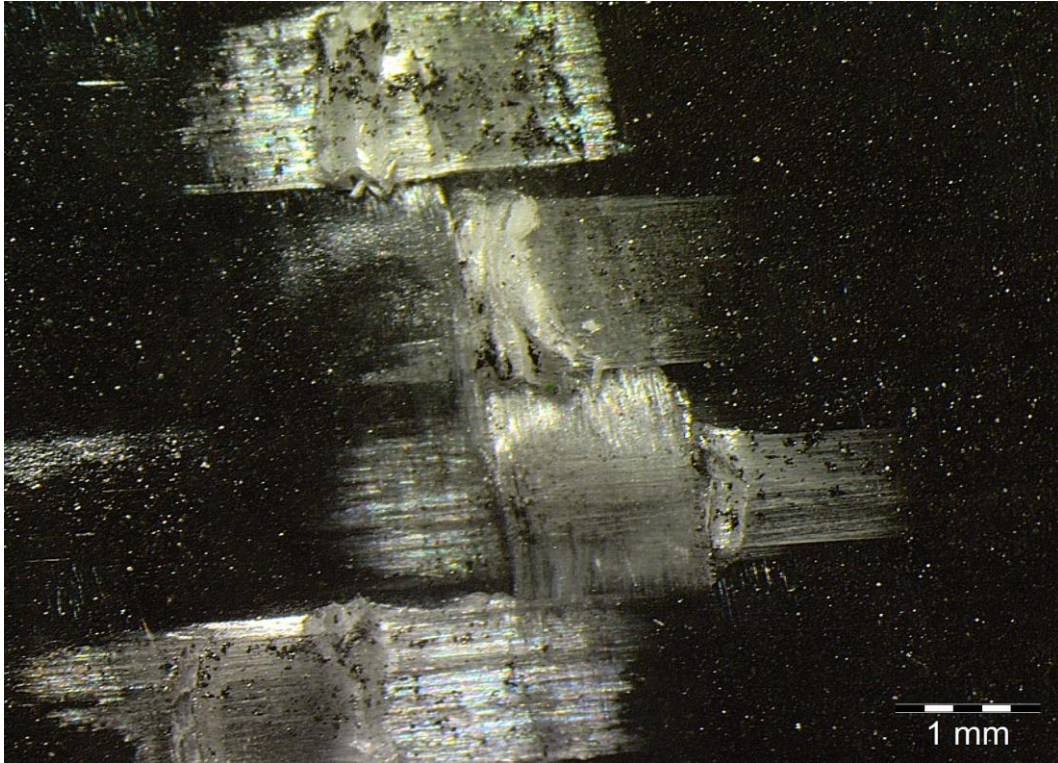


b)

Resim 5.7. Üç nokta eğme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi arka taraftan enine kesit yönde a) makro görüntüsü b) optik mikroskop görüntüsü

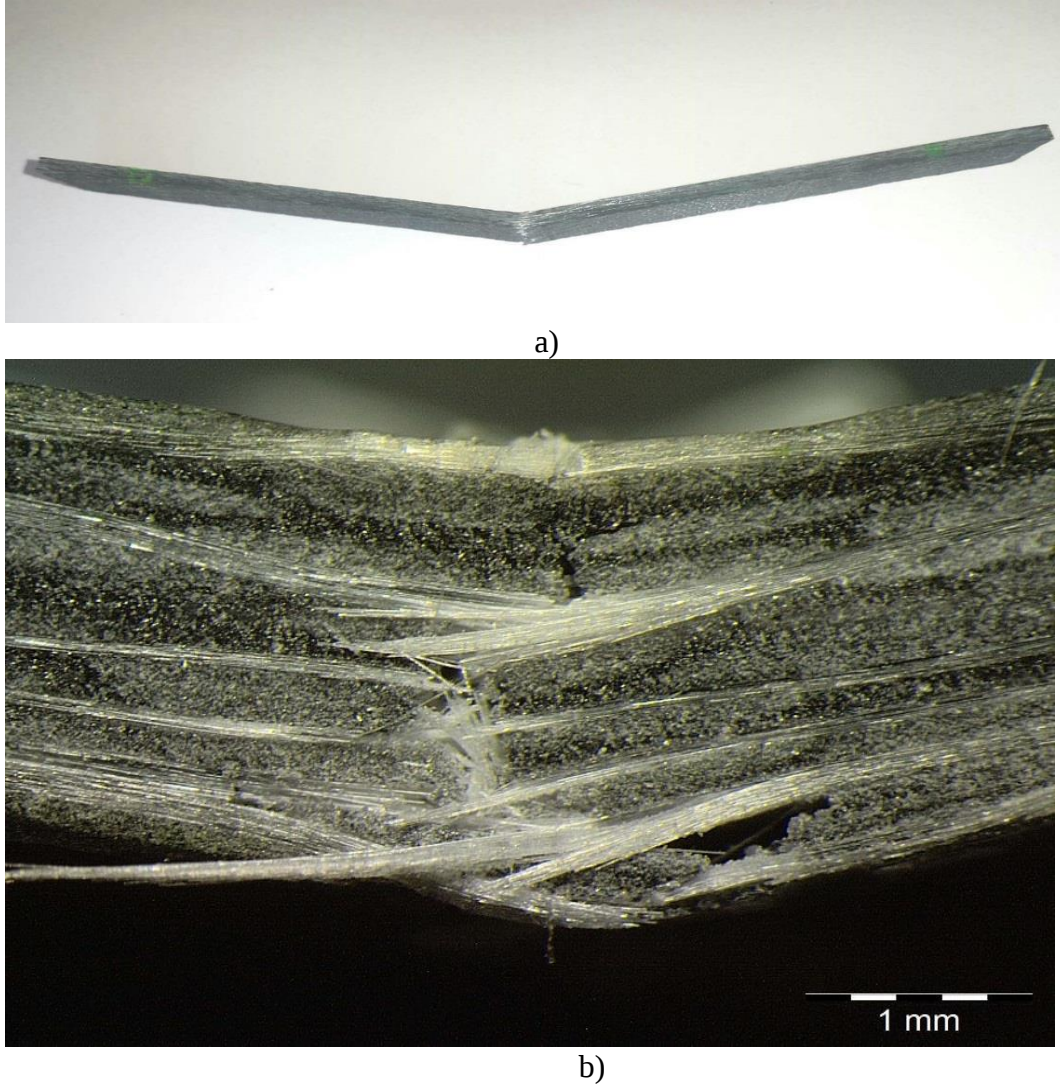


a)



b)

Resim 5.8. Üç nokta eğme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi ön taraftan enine kesit yönde a) makro görüntüsü b) optik mikroskop görüntüsü



Resim 5.9. Üç nokta eğme deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi boyuna kesit yönde a) makro görüntüsü b) optik mikroskop görüntüsü

Üç nokta eğme deneyinde kırık yüzeye bakıldığında (Resim 5.9) üç farklı hasar tipi görülmektedir. Fiberlerin kopması, sıyrılma ve tabakalar arasında ayrılma görülmektedir. Üç nokta eğme deneyinde uygulanan yükten dolayı tabakalar arasında gerilme oluşmuştur. Oluşan gerilmenin neticesinde tabakalar arasında ayrılma az olsa bile görülmektedir. Yani fiber ile matris arasında yapışkanlık malzemenin yapısının sağlam olmasında önem taşımaktadır.

5.4. Serbest Ağırlık Düşürme Darbe Deneyi

Ağırlık düşürme darbe deneyi nanografen katkılı hibrit nanokompozitlerin çarpma davranışları incelenmiştir.

Uygulanan yüklemenin etkisiyle meydana gelen titreşim ise levha merkezinden 50 mm sol ve sağ tarafa doğru uzaklaşarak bu iki noktadan alınmıştır. Alınan sol ve sağ taraf ivme-zaman ölçümleri incelendiğinde birbirlerine son derece yakın ölçüldüğü görülmüştür. Elde edilen bu sonuç deney elemanlarının üretiminde kullanılan grafen malzemesinin üniform bir şekilde matris içerisinde dağıtılabildiğinin önemli bir göstergesidir. Deney elemanları simetriğe yakın bir davranış sergilemişler ve sol ve sağ taraftan ölçülen ivme değerleri birbirlerine yakın ölçülmüştür. Maksimum yer değiştirme değeri sol ve sağ ivme ölçümleri içerisinde ölçülen maksimum ivme değerinin iki kere nümerik integrasyonu alınarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda National Instrument firmasının deney verilerini işlemek için geliştirdiği Diadem 10.2 yazılımı kullanılmıştır. Deney elemanları üzerinden bir adet birim deformasyon-zaman ölçümü sağ ivme

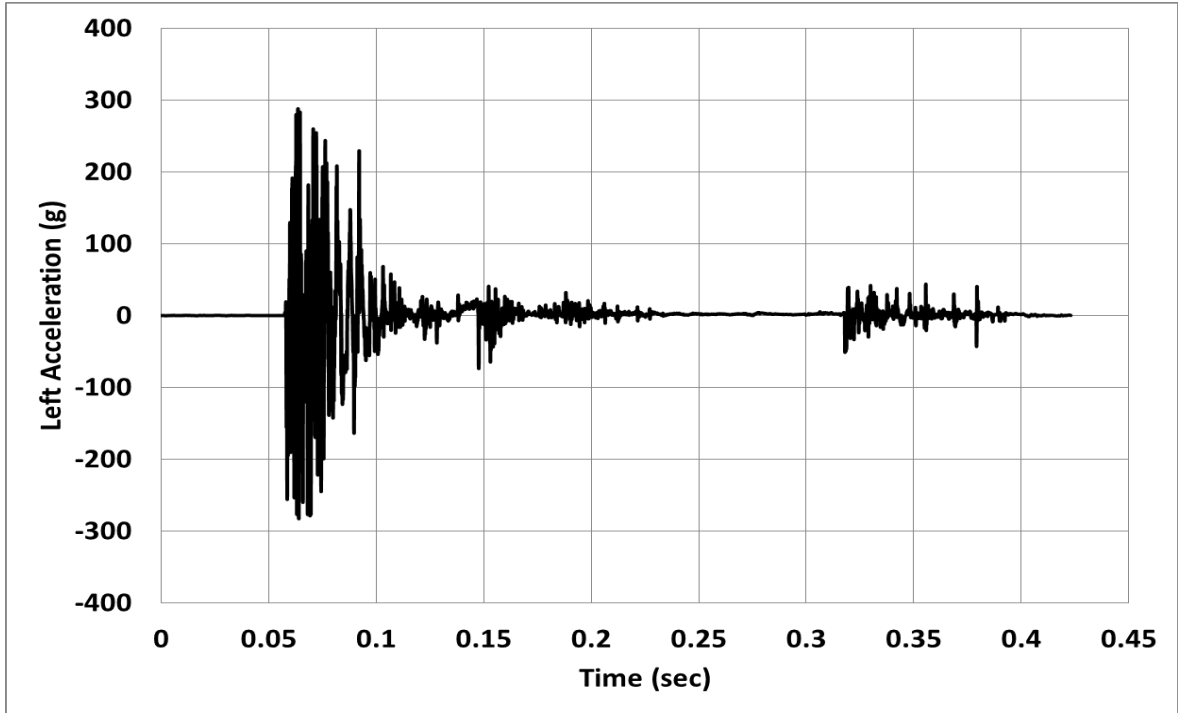
ölçerin bağlandığı noktadan alınmıştır. Deney elemanlarının her birinden iki adet ivme-zaman, bir adet birim-deformasyon zaman ve uygulanan çarpma yüklemesi zaman değişimleri ölçülerek grafikleri çizilmiştir. Ayrıca nümerik integrasyon ile maksimum ivme ölçümünden hesaplanan yer değiştirme-zaman grafikleri ise hesaplanarak çizilmiştir.

Katkısız deney elemanında çekicinin düşmesi ile elde edilen sonuçlar Çizelge 5.6’da görülmektedir. Bu deneyde katkısız numune esnek olduğu için uygulanan yük altında kırılmaması dikkat çekmektedir.

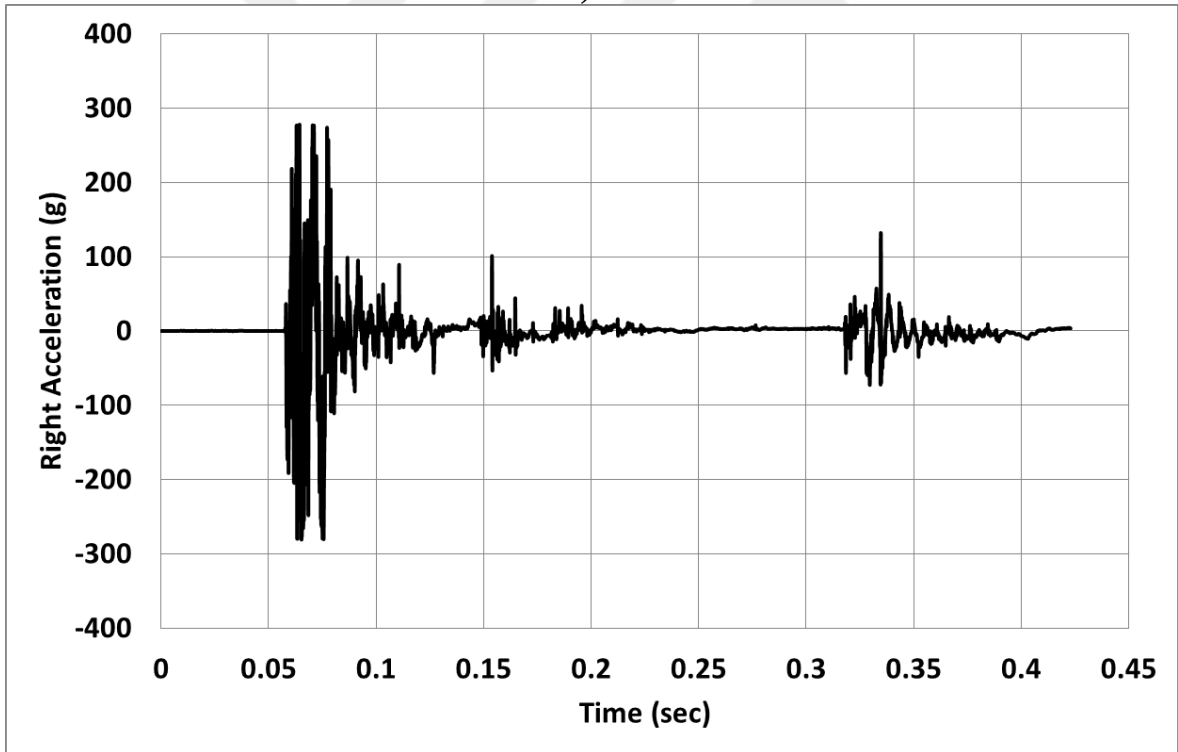
Çizelge 5.6. Katkısız numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları

	İvme [g]				Yer değiştirme [mm]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Çarpma Yükü [kN]
	Sol		Sağ				
	Max	Min	Max	Min			
Katkısız	277,14	-277,07	276,69	-276,38	2,686	0,010428	4,25

Deney esnasında çizilen ivme (acceleration) - zaman, yer değiştirme (displacement) - zaman, şekil değiştirme (strain) - zaman ve çarpma(impact) -zaman grafikleri görülmektedir.

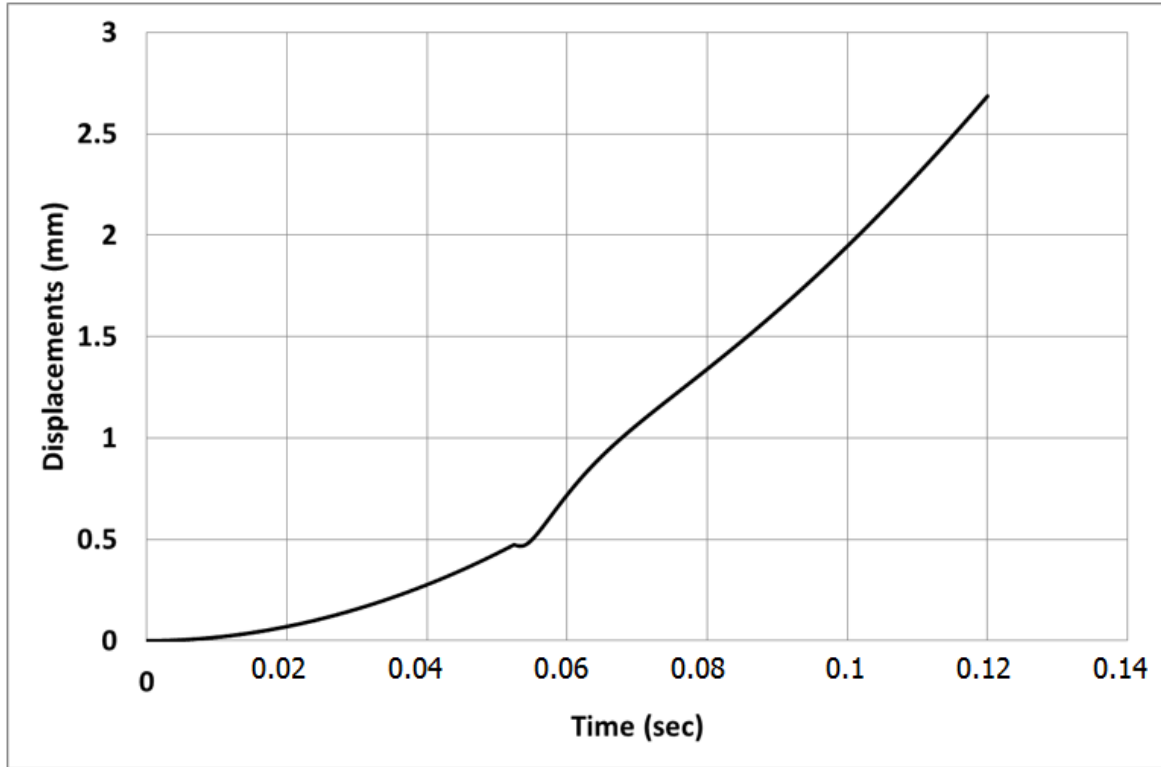


a)

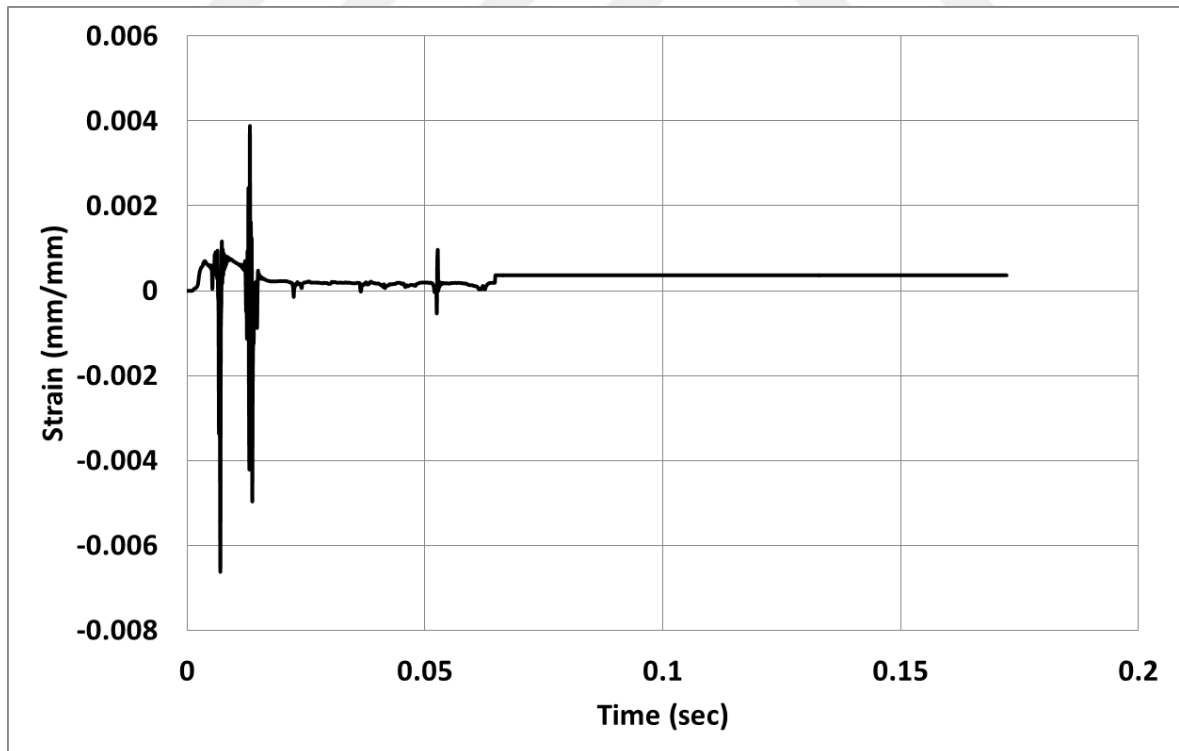


b)

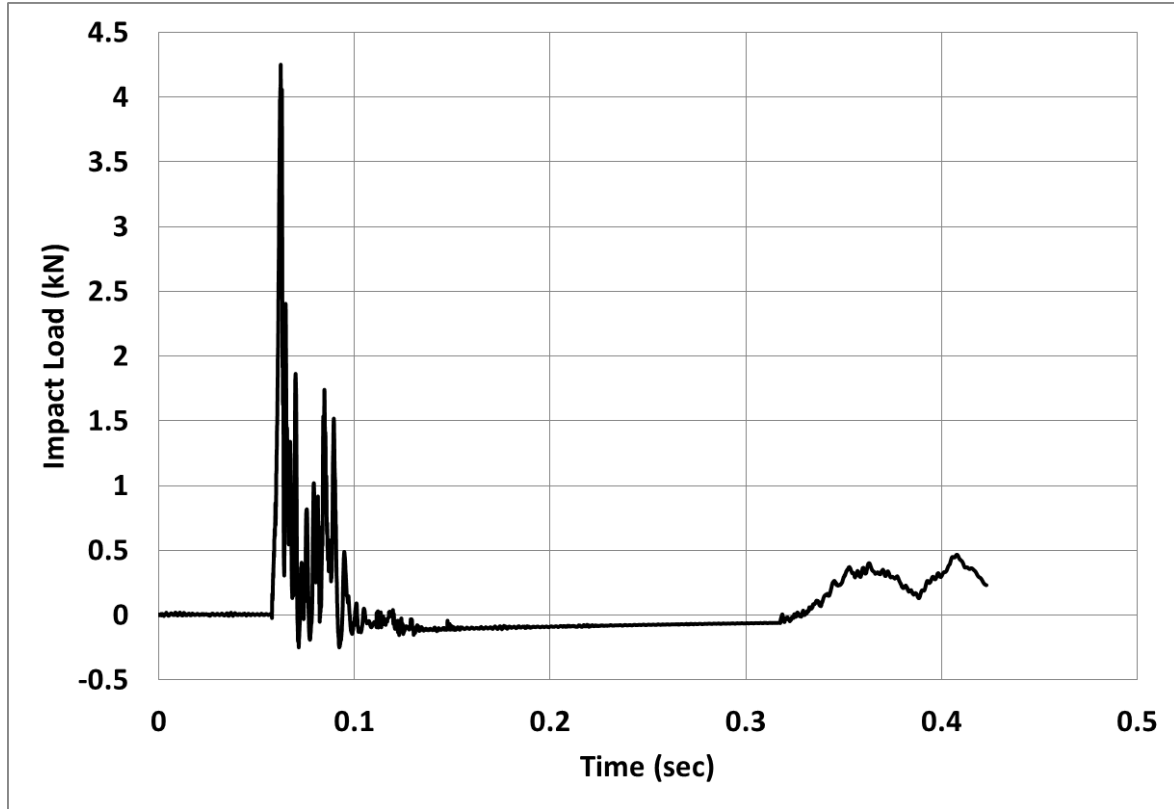
Şekil 5.11. Katkısız numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği



Şekil 5.12. Katkısız numunesinde yer değişim (displacements) - zaman grafiği



Şekil 5.13. Katkısız numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği



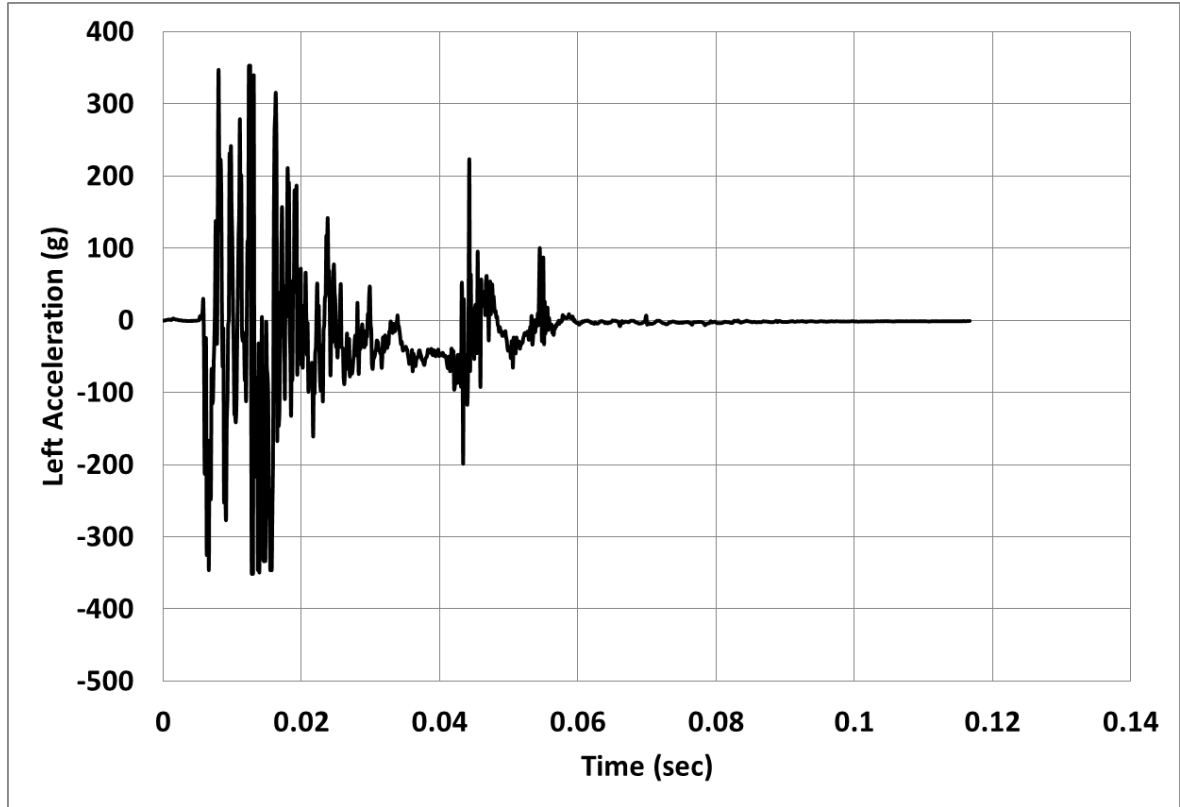
Şekil 5.14. Katkısız numunesinde çarpma yük (impact load) - zaman grafiği

NG15 numunesinde gerçekleştirilen düşüşte elde edilen iki numunenin ortalama sonuçları Çizelge 5.7’de görülmektedir.

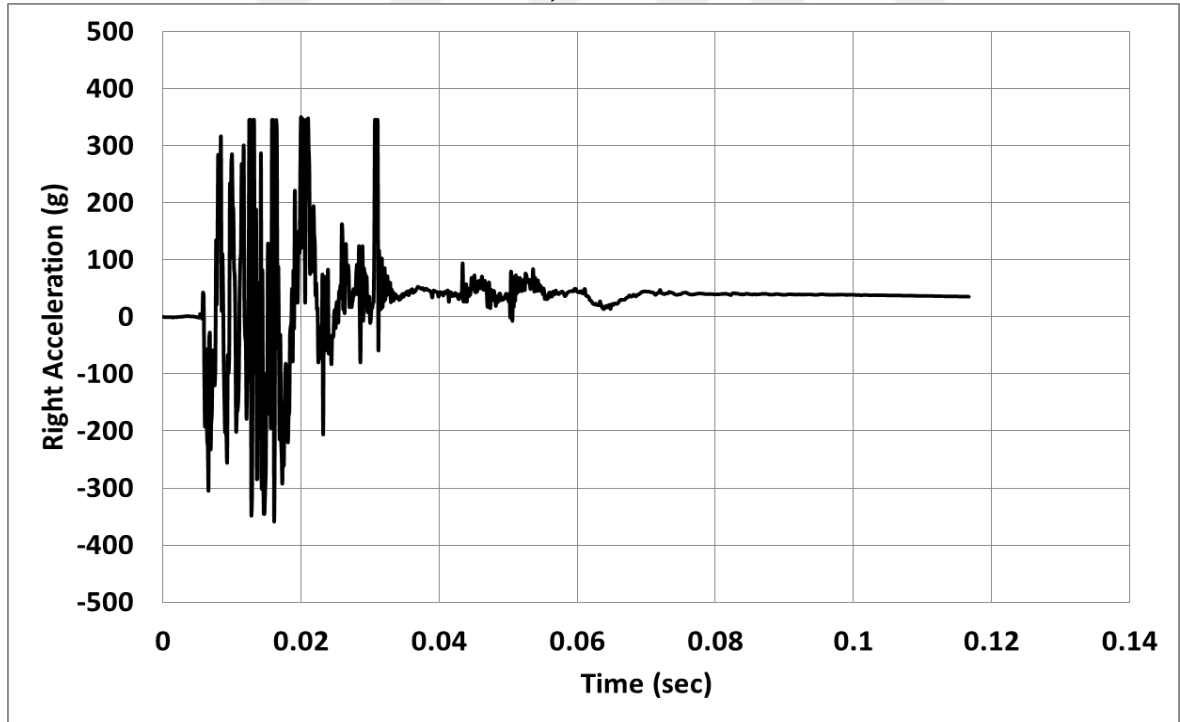
Çizelge 5.7. NG15 numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları

	İvme [g]				Yer değiştirme [mm]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Çarpma Yükü [kN]
	Sol		Sağ				
	Max	Min	Max	Min			
NG15	346,43	-346,33	345,59	-345,20	0,759	0,032908	4,29

NG 15 numunesinin deney esnasında çizilen grafikler Şekil 5.15, 5.16, 5.17 ve 5.18’de görülmektedir.

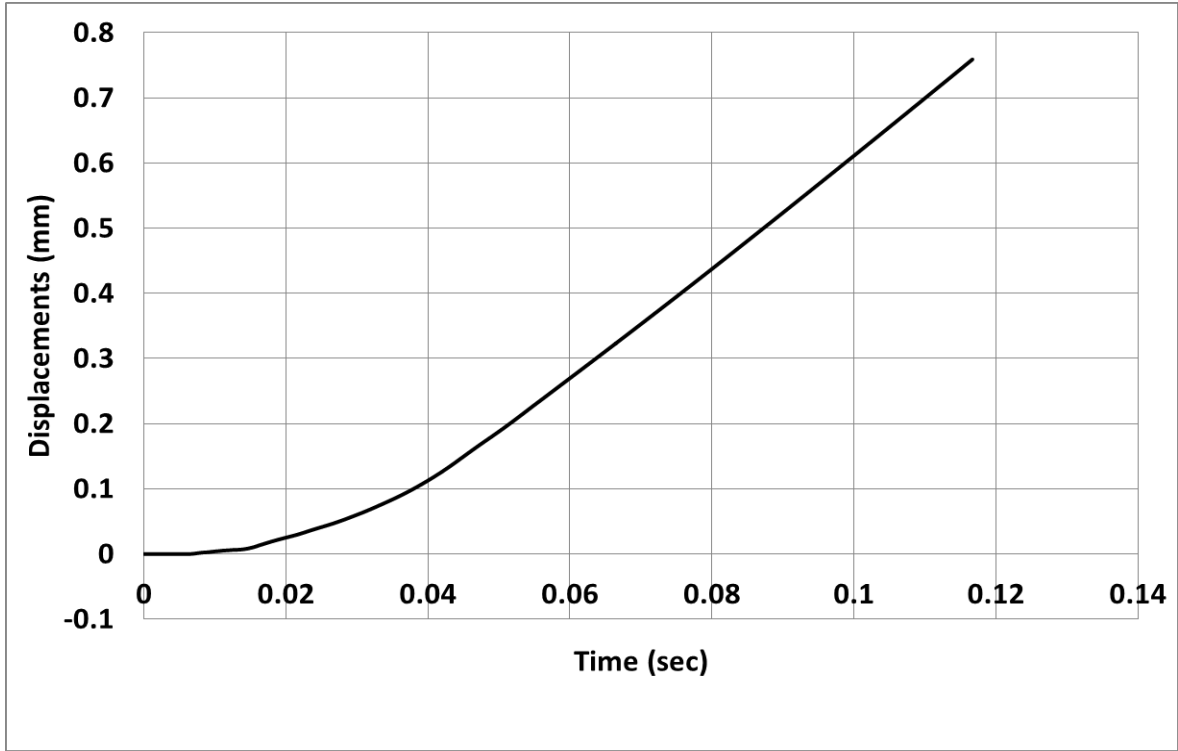


a)

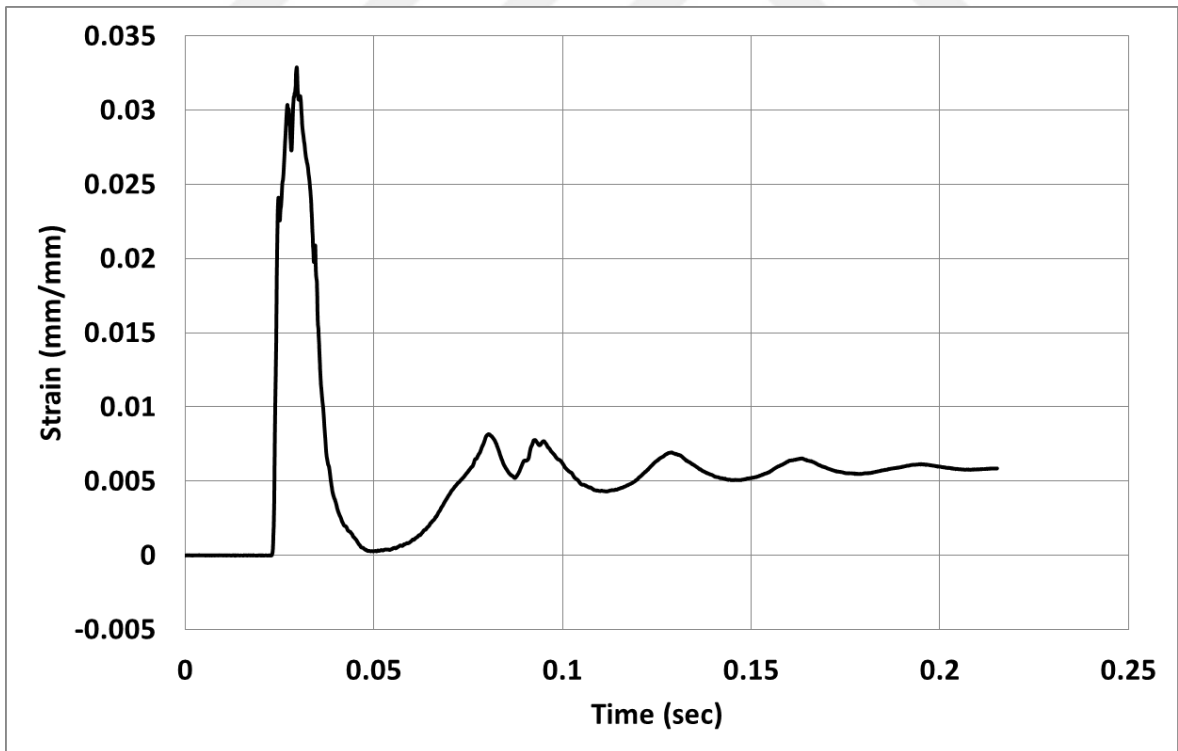


b)

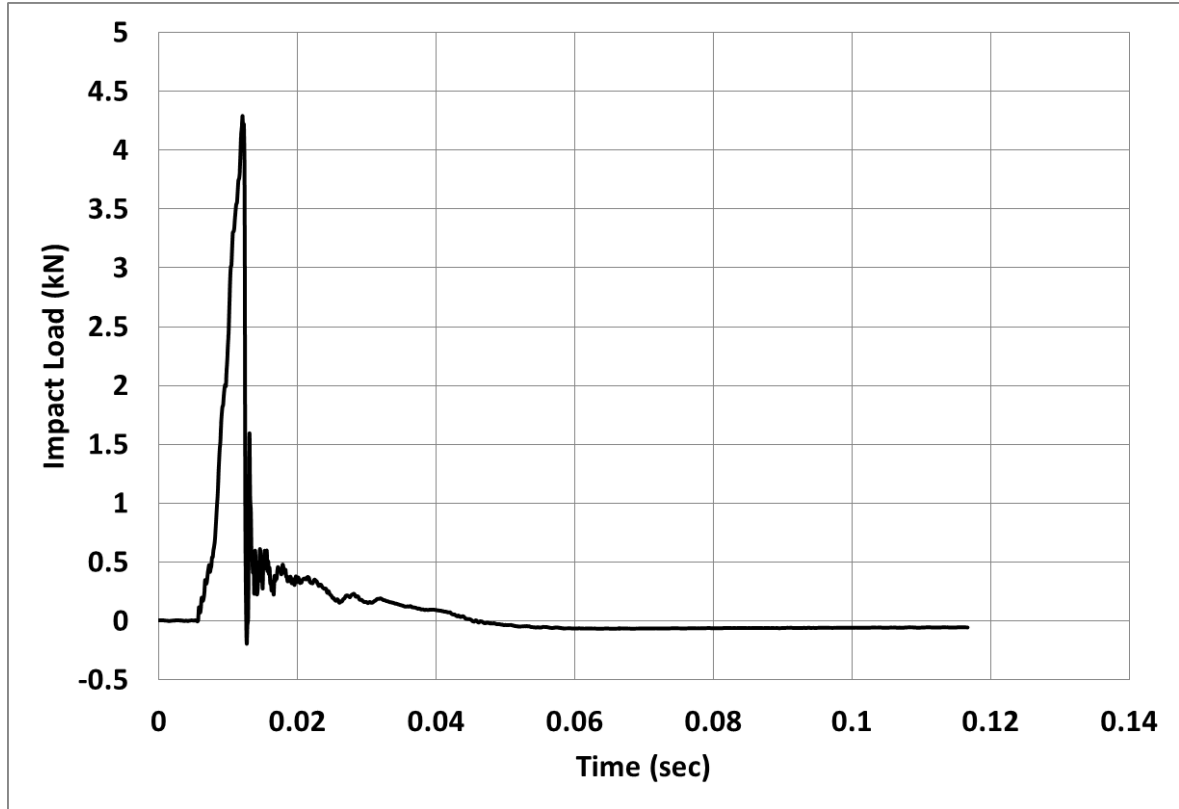
Şekil 5.15. NG15 numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme(acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği



Şekil 5.16. NG15 numunesinde yer değişim (displacements) - zaman grafiği



Şekil 5.17. NG15 numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği



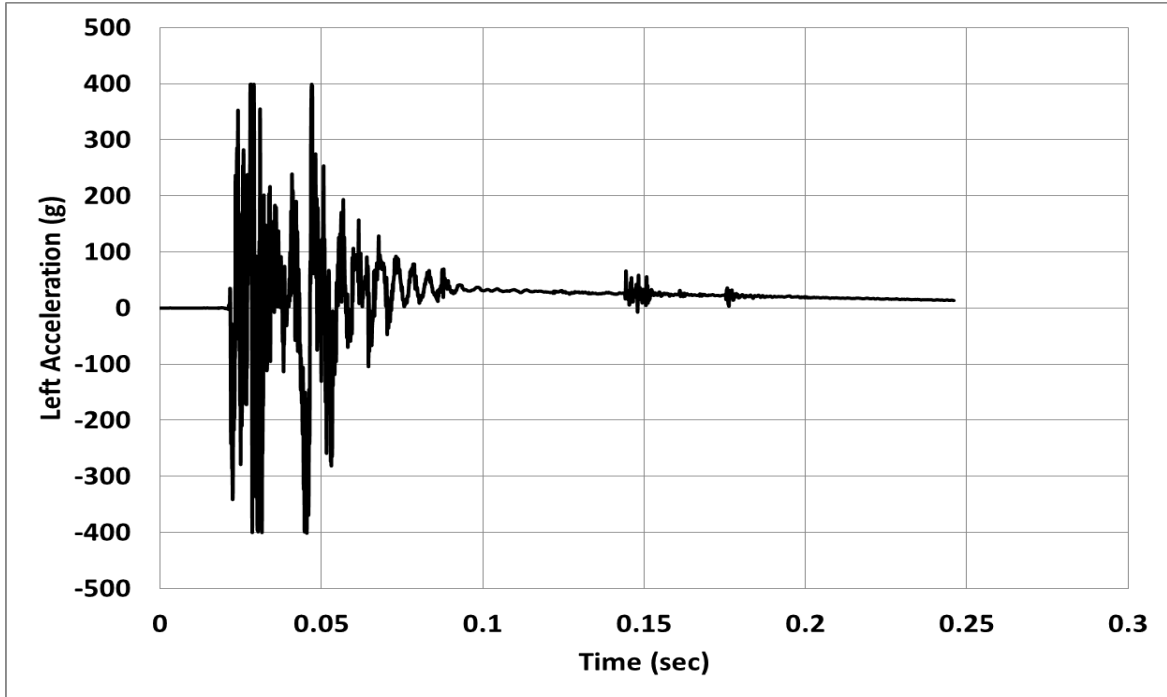
Şekil 5.18. NG15 numunesinde çarpma yük (impact load) - zaman grafiği

NG25 numunesinde gerçekleştirilen düşüşte elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8’de verilmiştir.

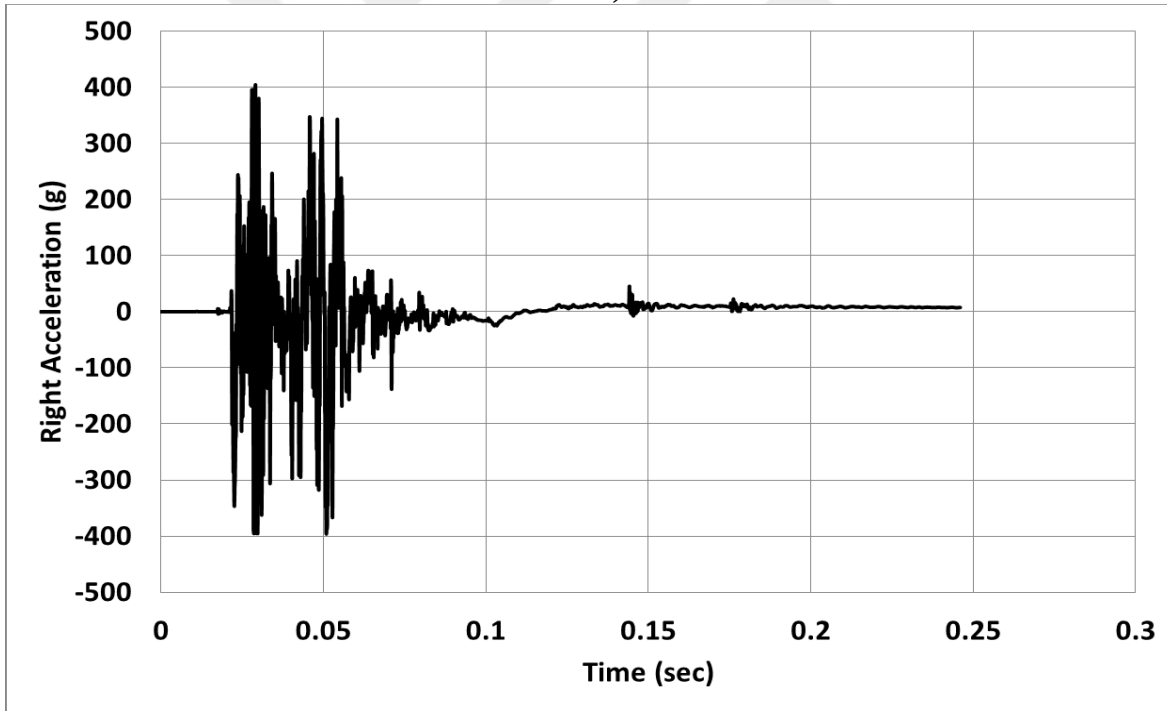
Çizelge 5.8. NG25 numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları

	İvme [g]				Yer değiştirme [mm]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Çarpma Yükü [kN]
	Sol		Sağ				
	Max	Min	Max	Min			
NG25	399,09	-398,97	395,67	-395,23	0,560	0,055379	4,31

NG 25 numunesinin deney esnasında çizilen grafikler Şekil 5.19, 5.20, 5.21 ve 5.22’de görülmektedir.

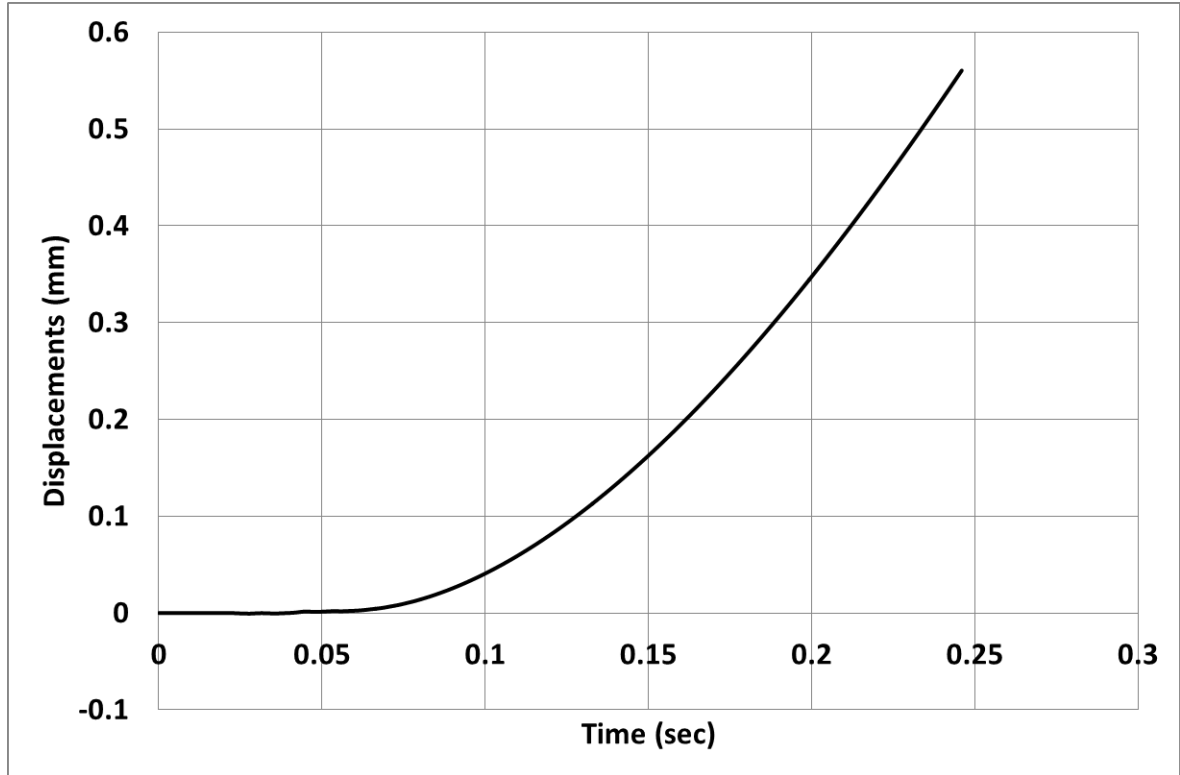


a)

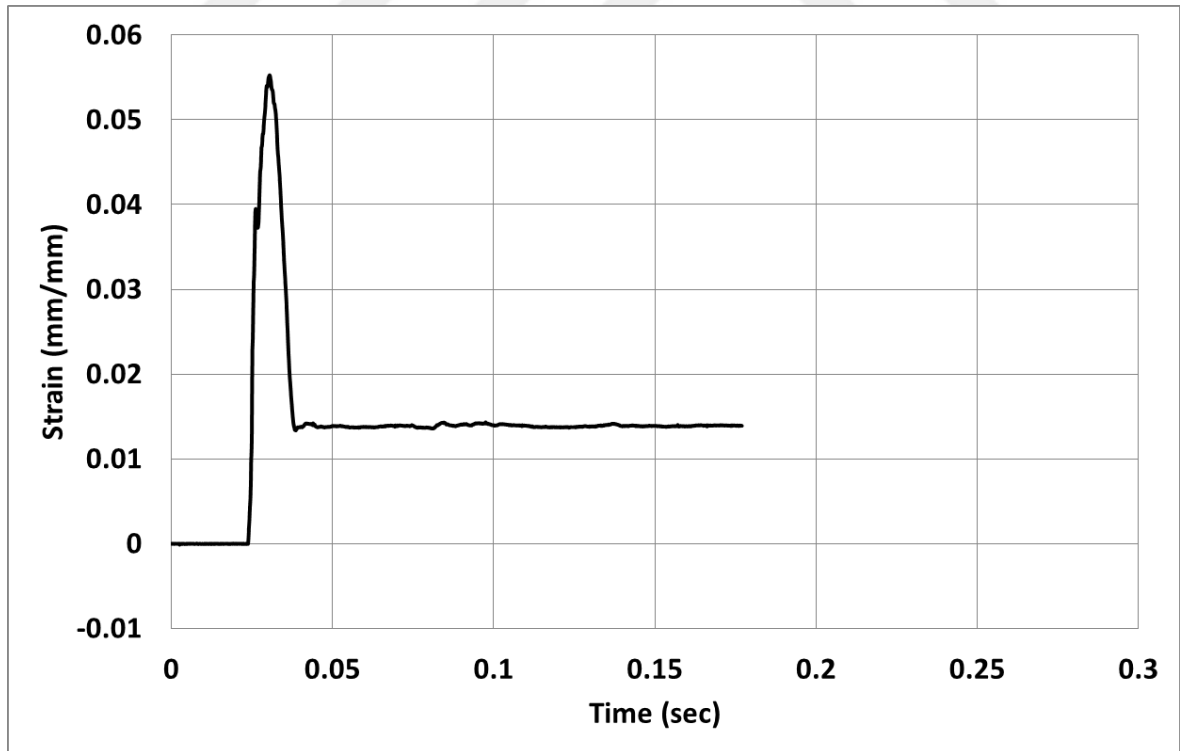


b)

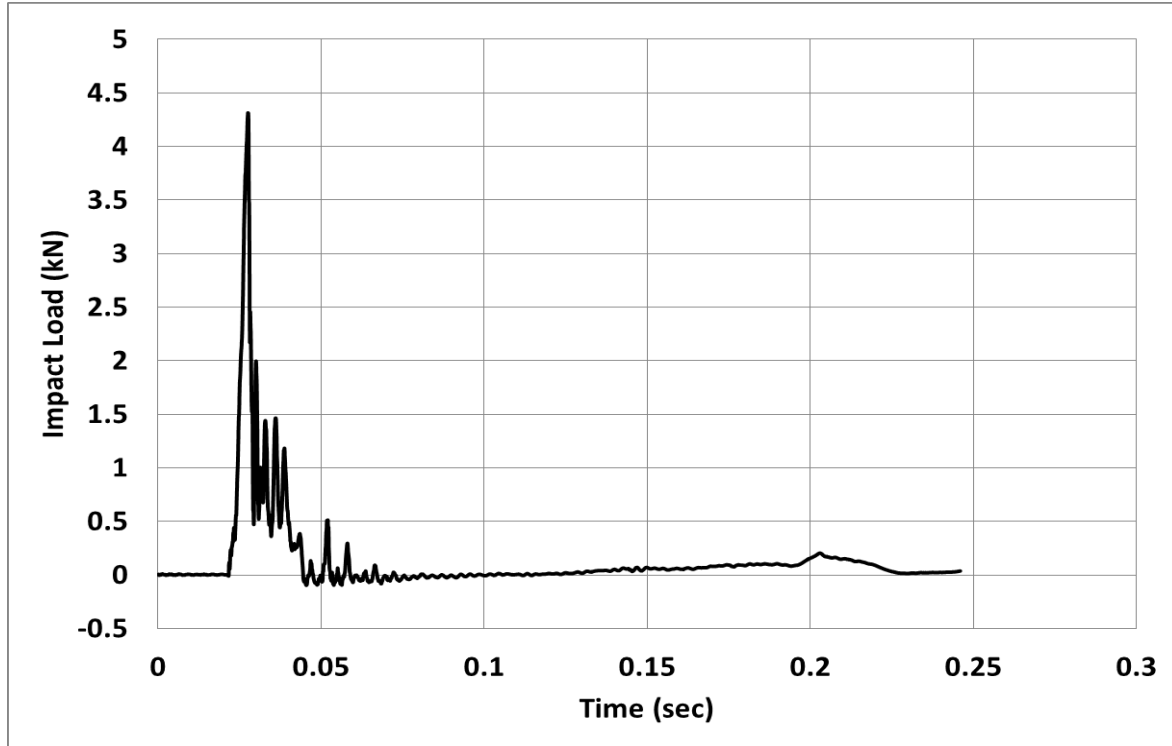
Şekil 5.19. NG25 numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği



Şekil 5.20. NG25 numunesinde yer değişim (strain) - zaman grafiği



Şekil 5.21. NG25 numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği



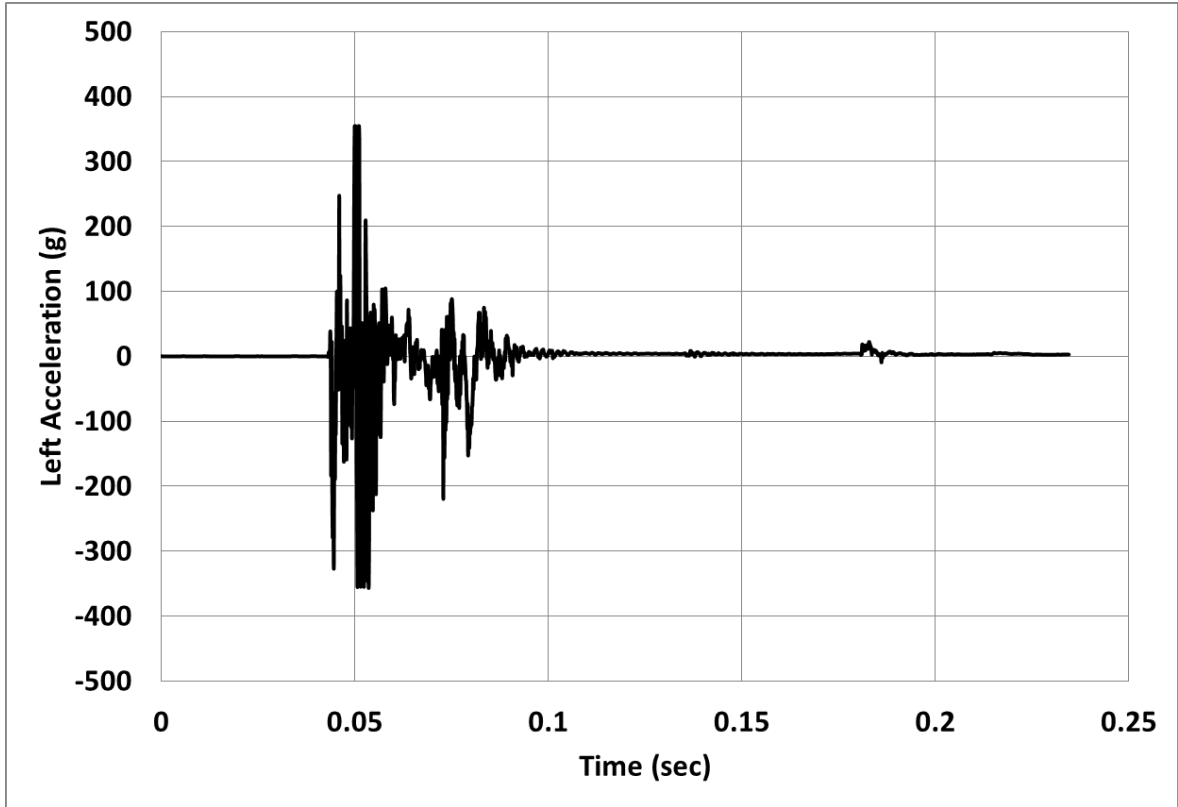
Şekil 5.22. NG25 numunesinde çarpma yük (impact load) - zaman grafiği

NG35 numunesinde gerçekleştirilen düşüşte elde edilen sonuçlar Çizelge 5.9’da görülmektedir.

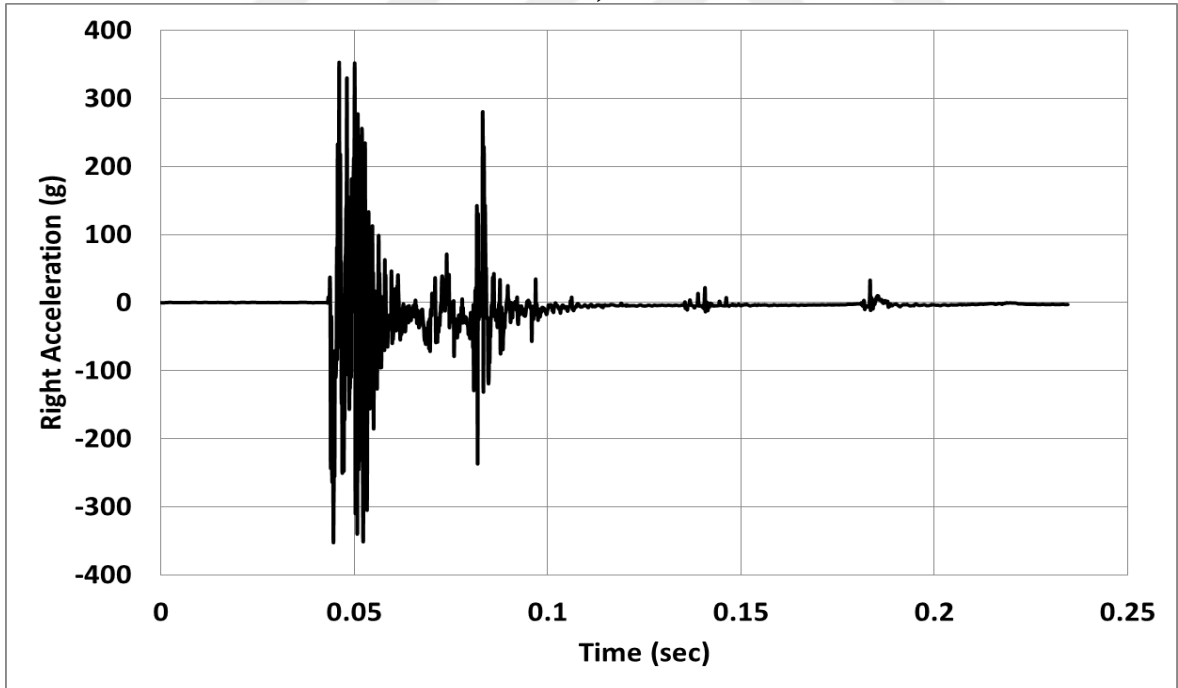
Çizelge 5.9. NG35 numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları

	İvme [g]				Yer değiştirme [mm]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Çarpma Yükü [kN]
	Sol		Sağ				
	Max	Min	Max	Min			
NG35	354,75	-354,64	351,95	-351,56	0,633	0,043412	4,30

NG35 numunesinin deney esnasında çizilen grafikler Şekil 5.23, 5.24, 5.25 ve 5.26’da görülmektedir

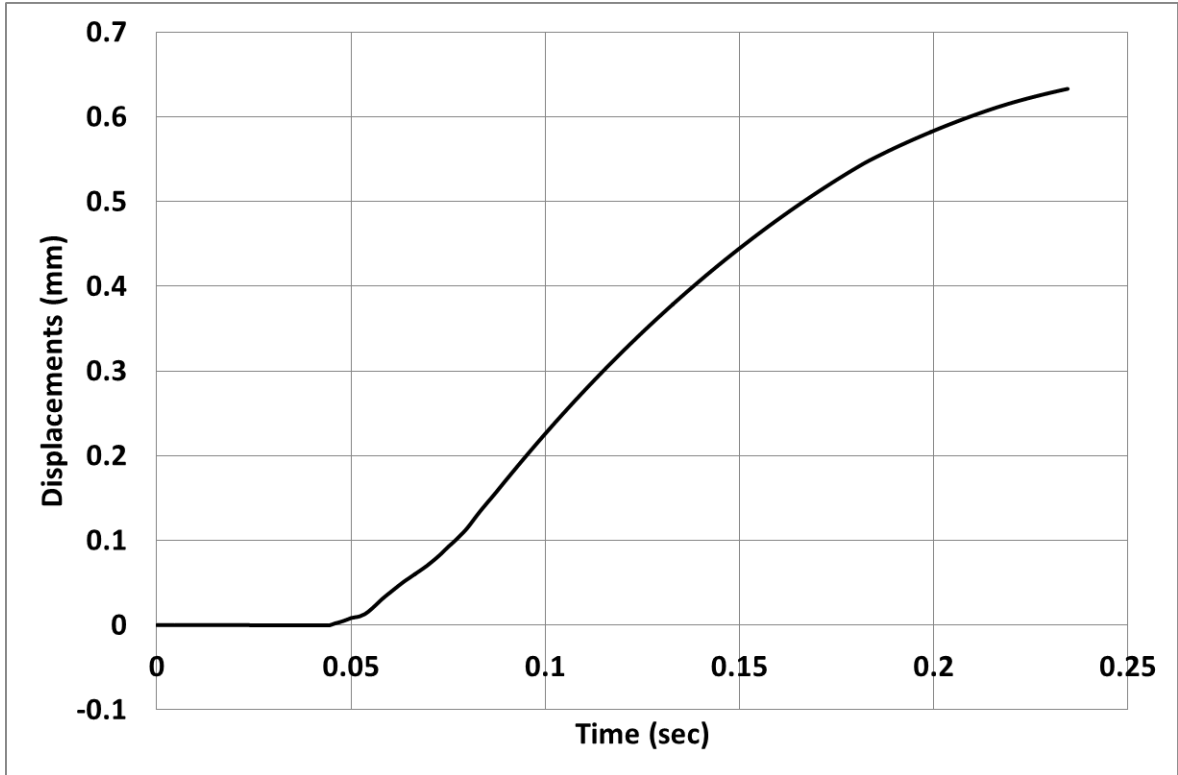


a)

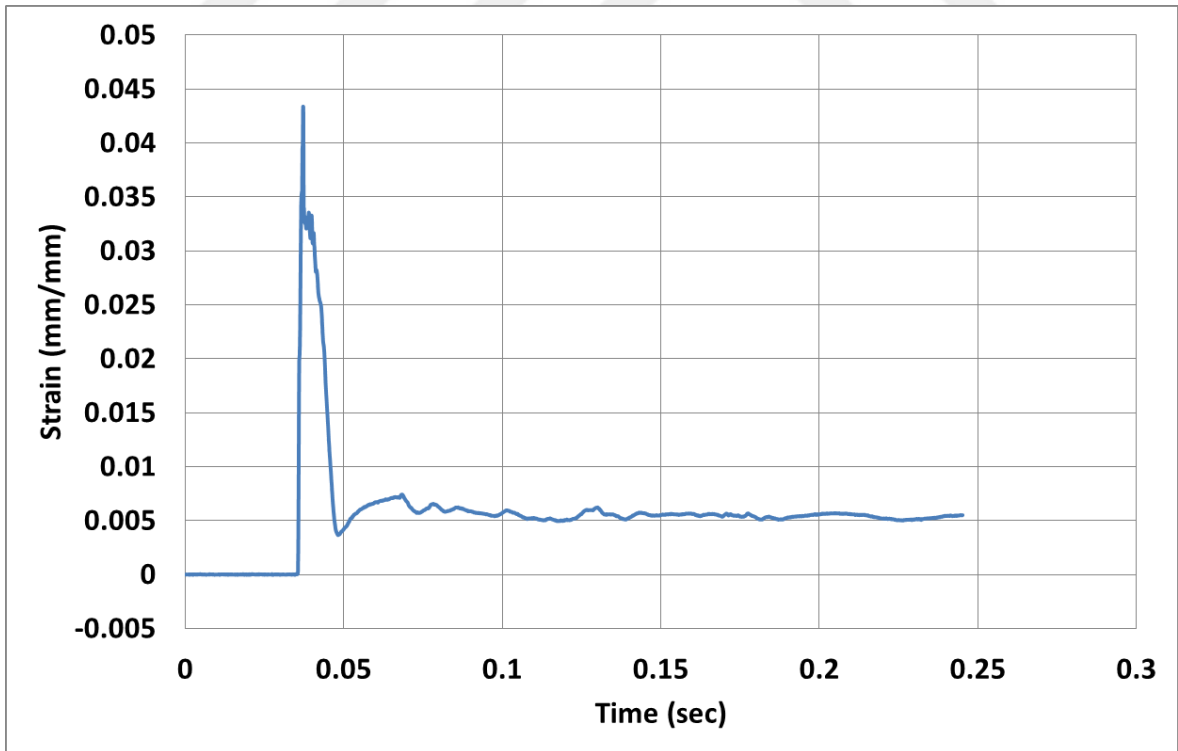


b)

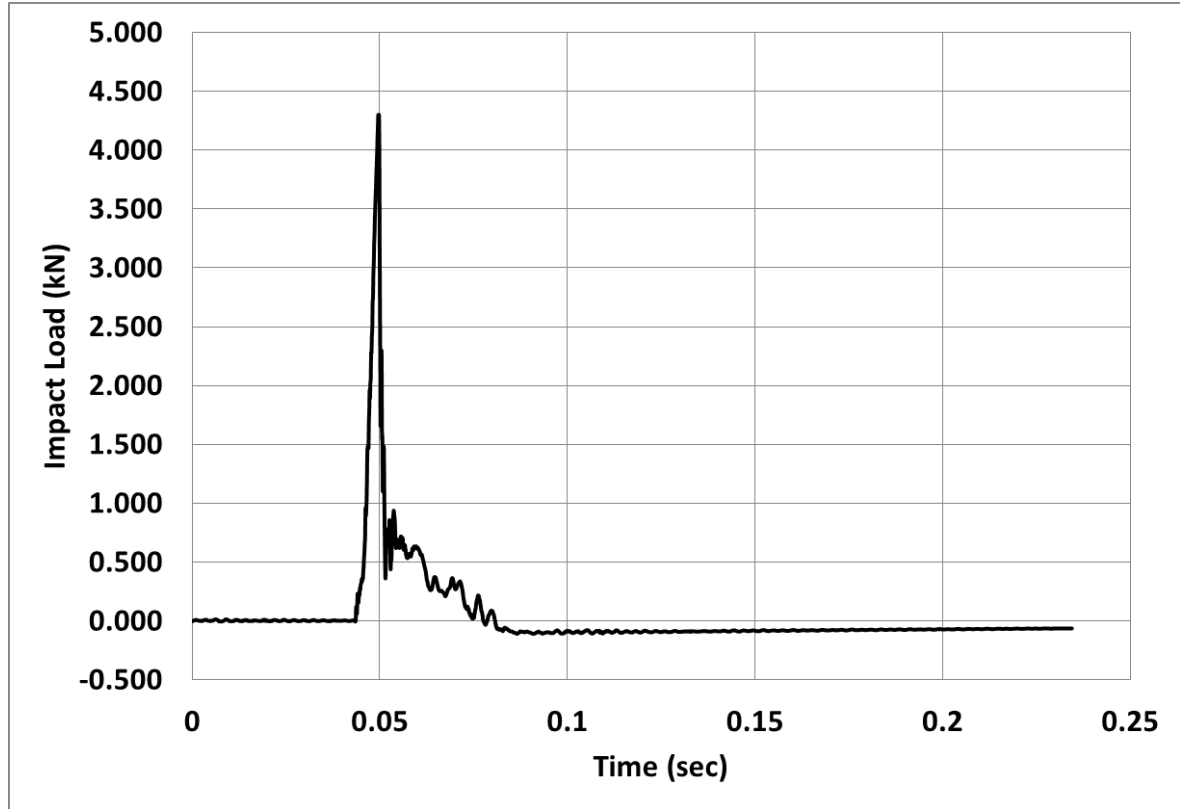
Şekil 5.23. NG35 numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) -zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) -zaman grafiği



Şekil 5.24. NG35 numunesinde yer değişim (strain) - zaman grafiği



Şekil 5.25. NG35 numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği



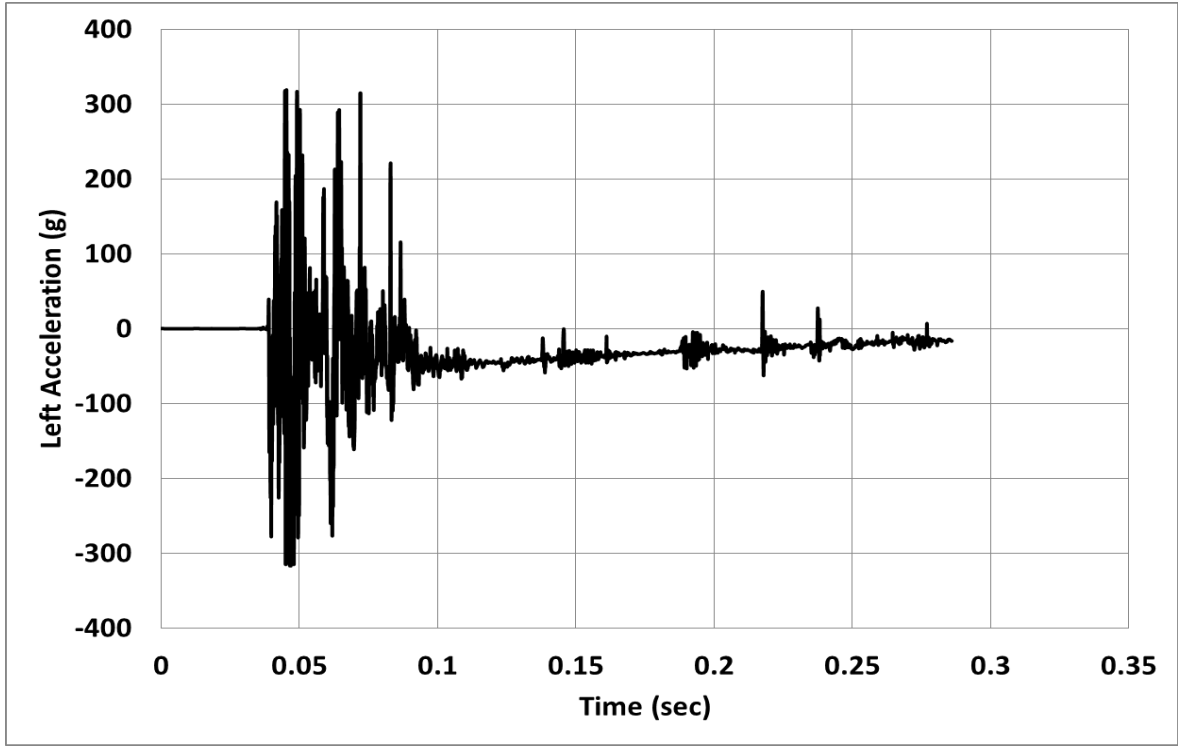
Şekil 5.26. NG35 numunesinde çarpma yük (impact load)- zaman grafiği

NG45 numunesinde gerçekleştirilen düşüşte elde edilen sonuçlar Çizelge 5.10'da görülmektedir.

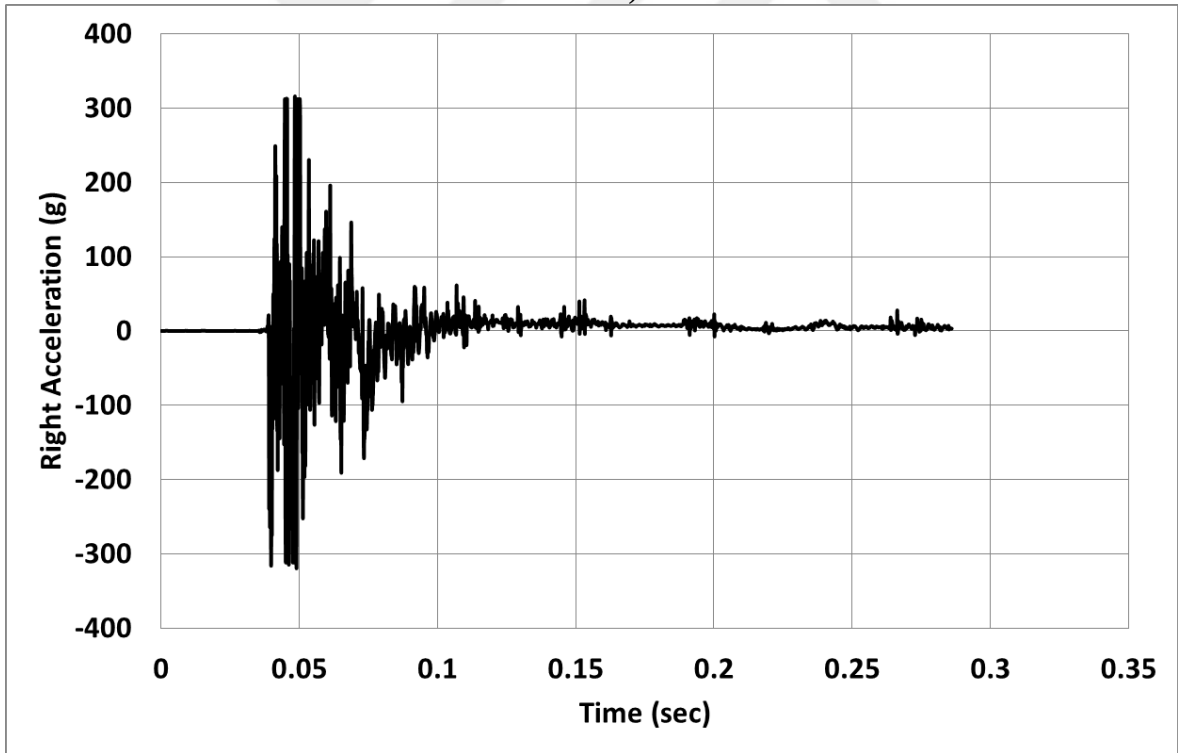
Çizelge 5.10. NG45 numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları

	İvme [g]				Yer değiştirme [mm]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Çarpma Yükü [kN]
	Sol		Sağ				
	Max	Min	Max	Min			
NG45	314,84	-314,75	312,11	-311,76	0,972	0,030665	4,29

NG45 numunesinin deney esnasında çizilen grafikler Şekil 5.27, 5.28, 5.29 ve 5.30'da görülmektedir

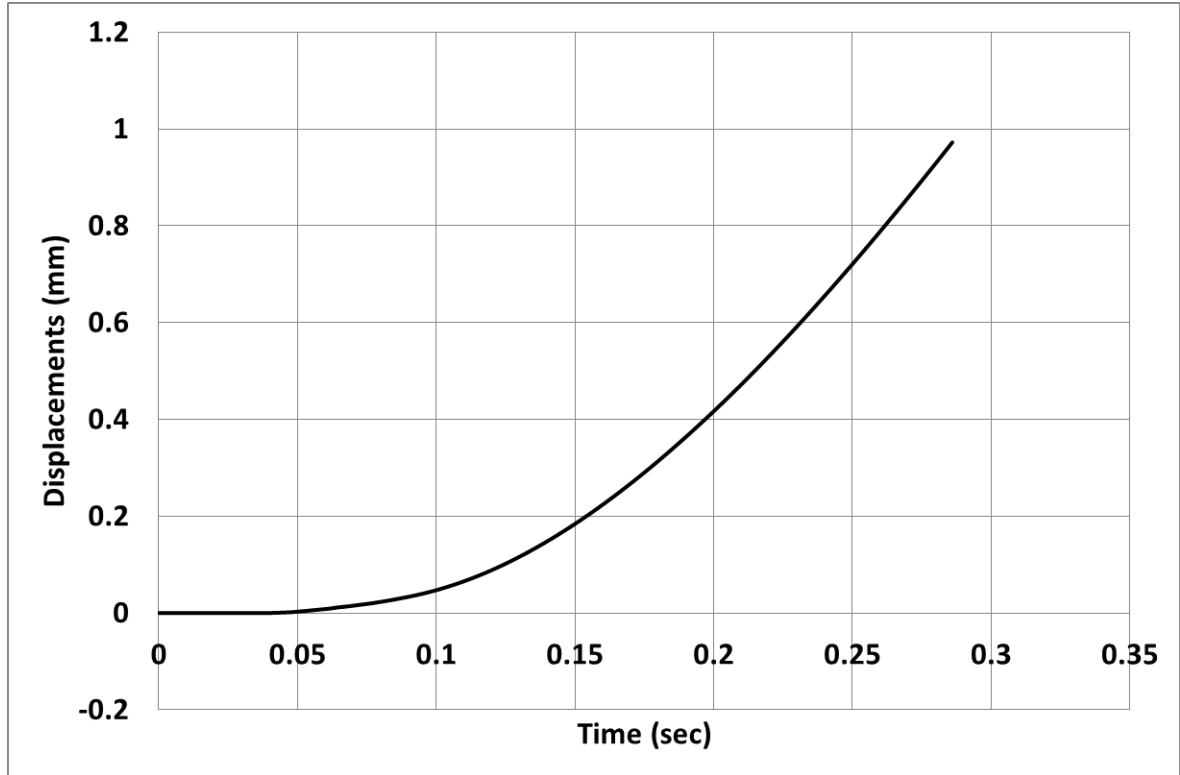


a)

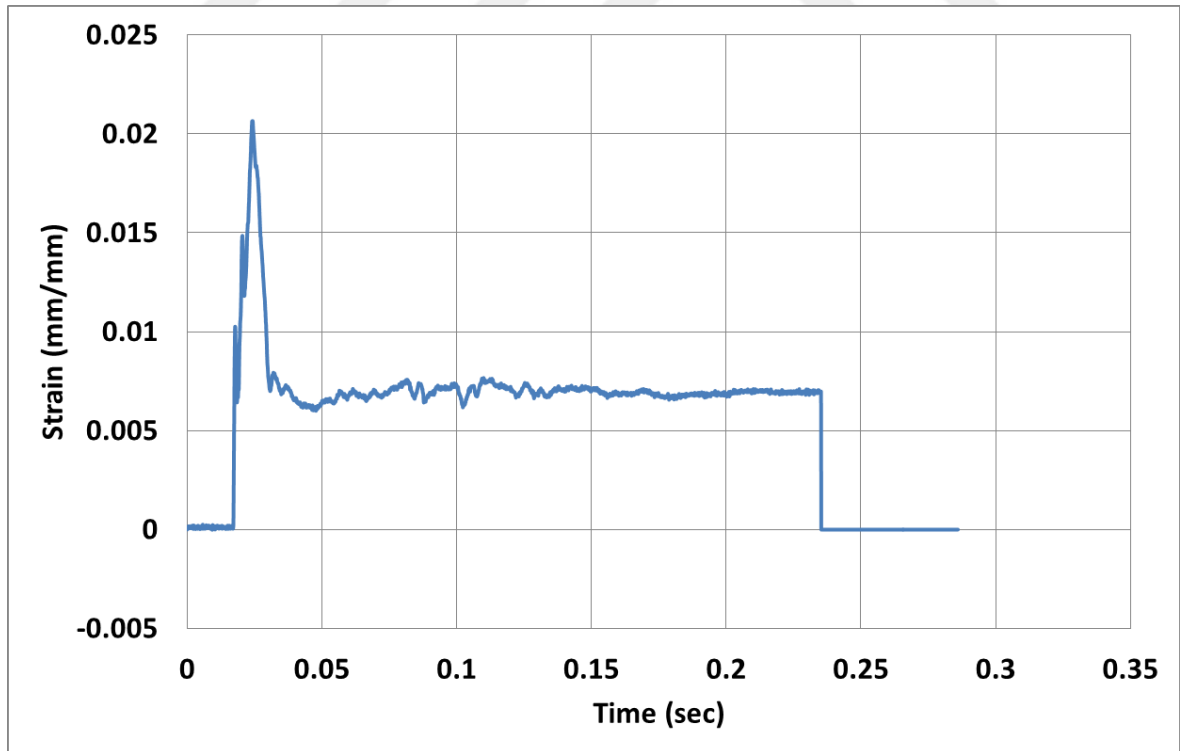


b)

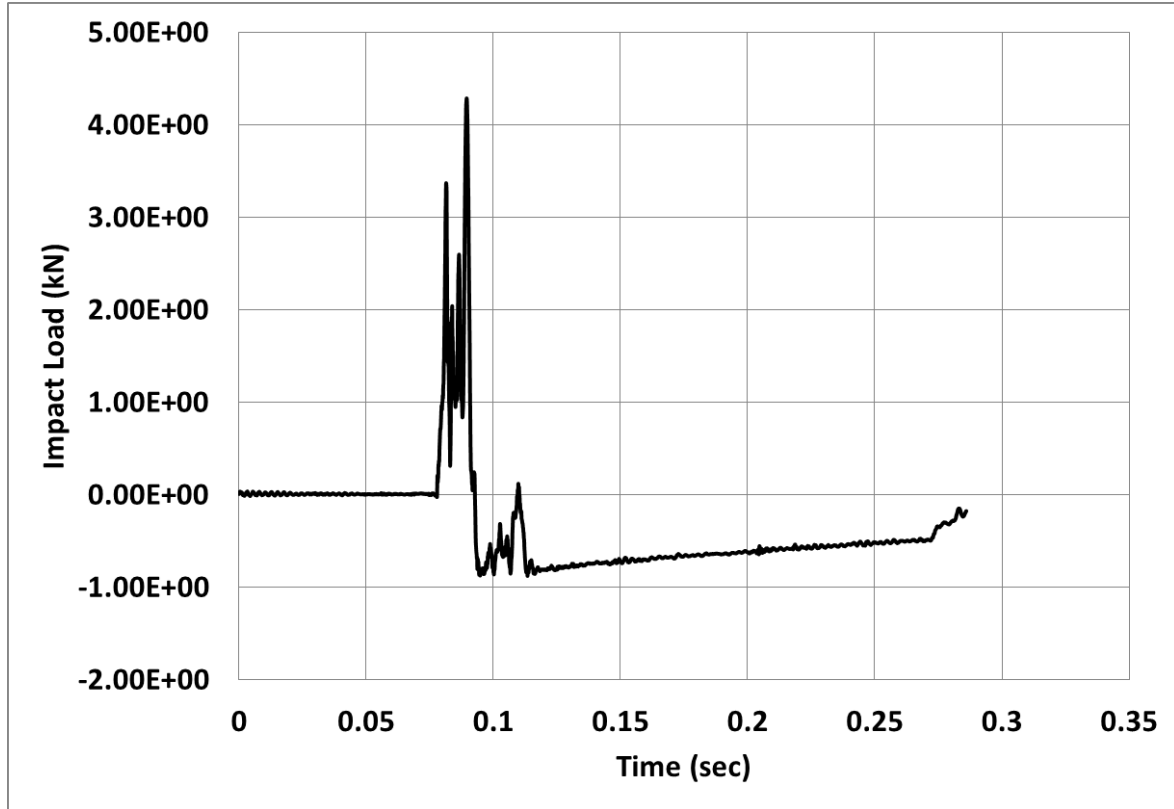
Şekil 5.27. NG45 numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği



Şekil 5.28. NG45 numunesinde yer değişim (strain) - zaman grafiği



Şekil 5.29. NG45 numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği



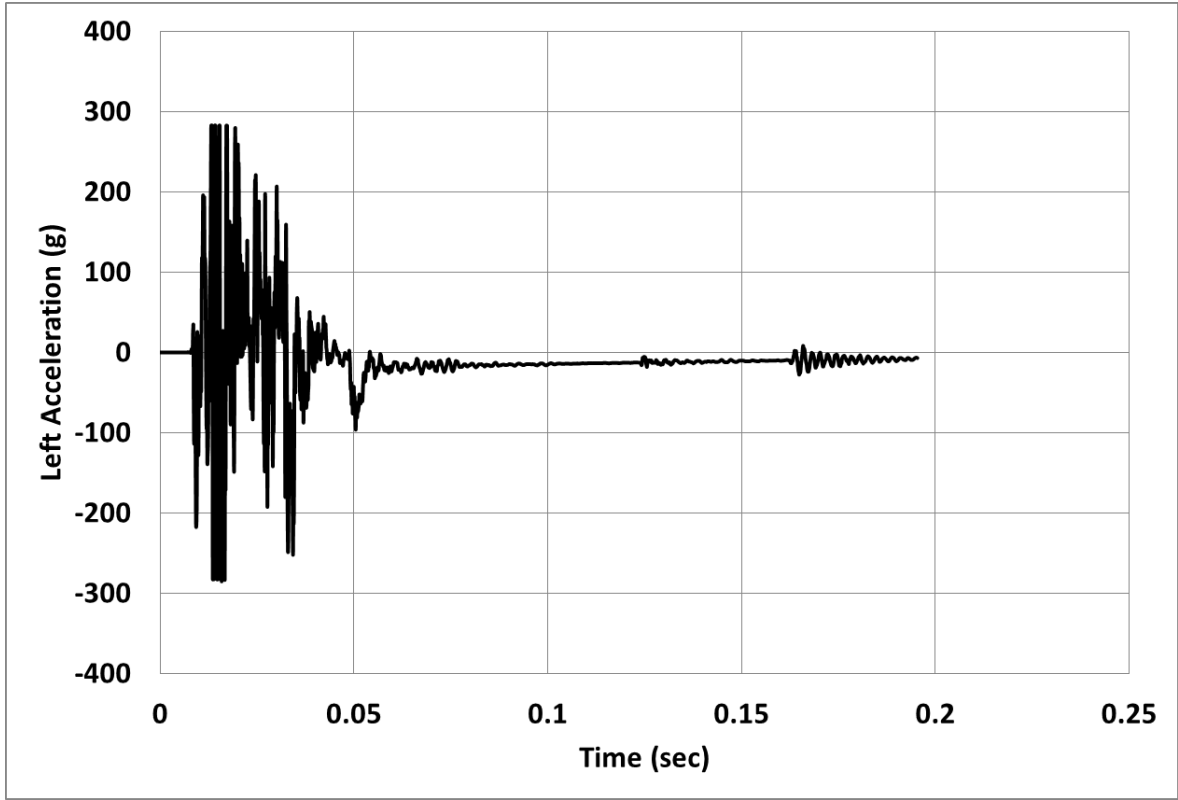
Şekil 5.30. NG45 numunesinde çarpma yük (impact load) - zaman grafiği

NG75 numunesinde gerçekleştirilen düşüşte elde edilen sonuçlar Çizelge 5.11’de görülmektedir.

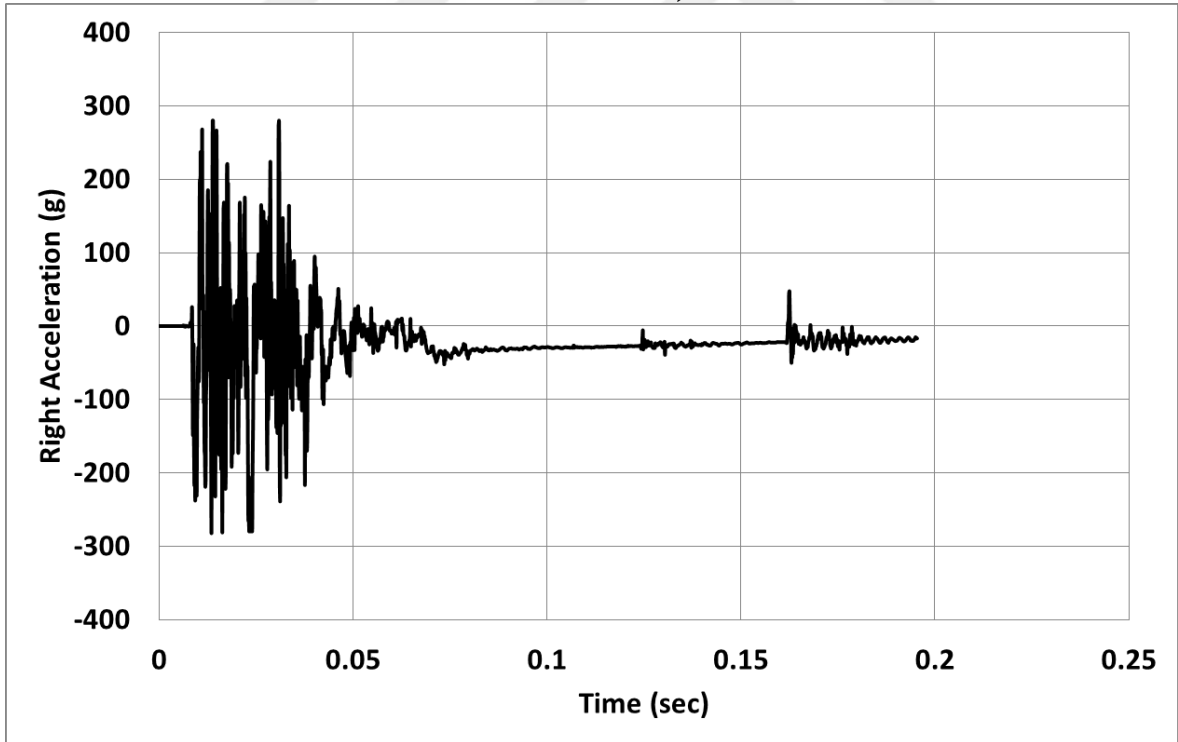
Çizelge 5.11. NG75 numunesinde elde edilen ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları

	İvme [g]				Yer değiştirme [mm]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Çarpma Yükü [kN]
	Sol		Sağ				
	Max	Min	Max	Min			
NG75	282,69	-282,61	280,01	-279,70	1,486	0,014975	4,29

NG 75 numunesinin deney esnasında çizilen grafikler Şekil 5.31, 5.32, 5.33 ve 5.34’te görülmektedir.

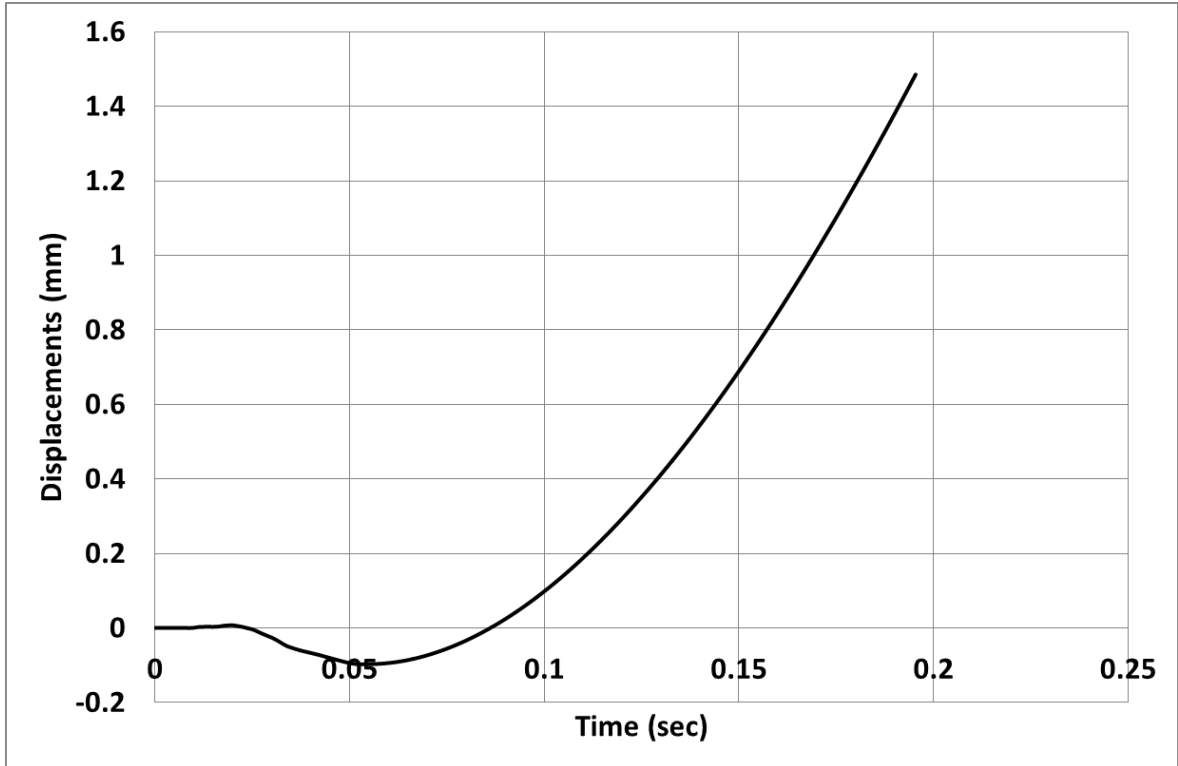


a)

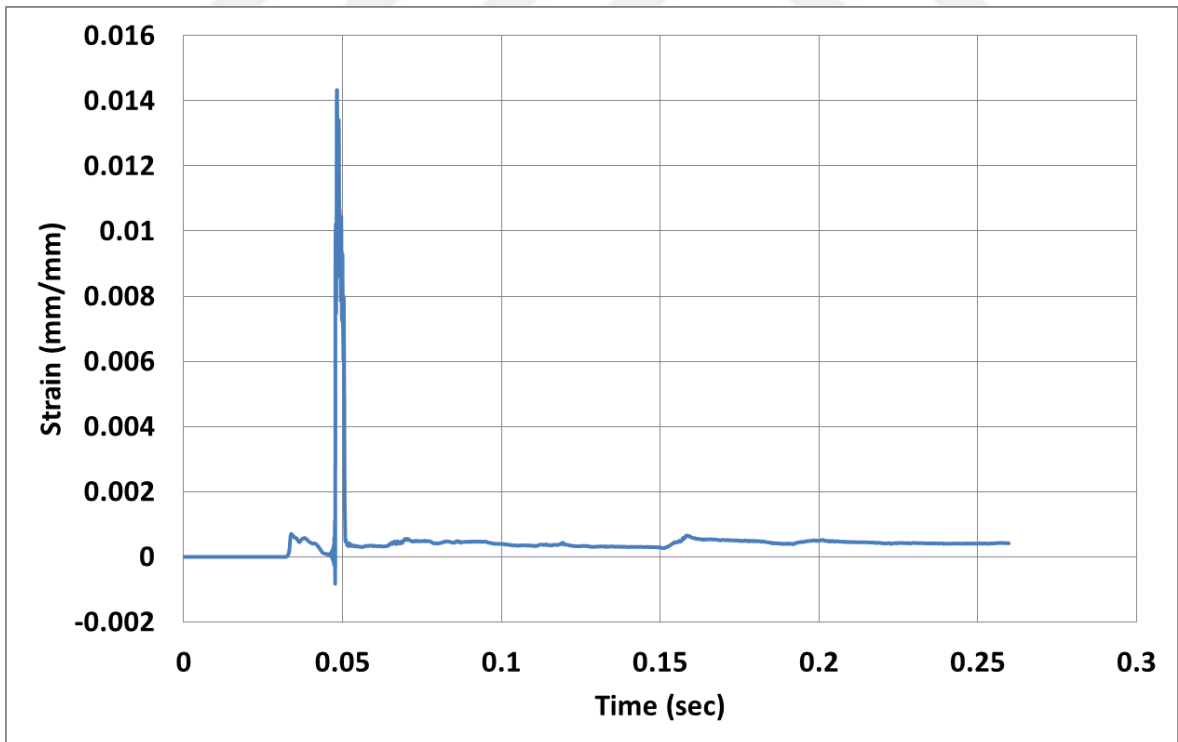


b)

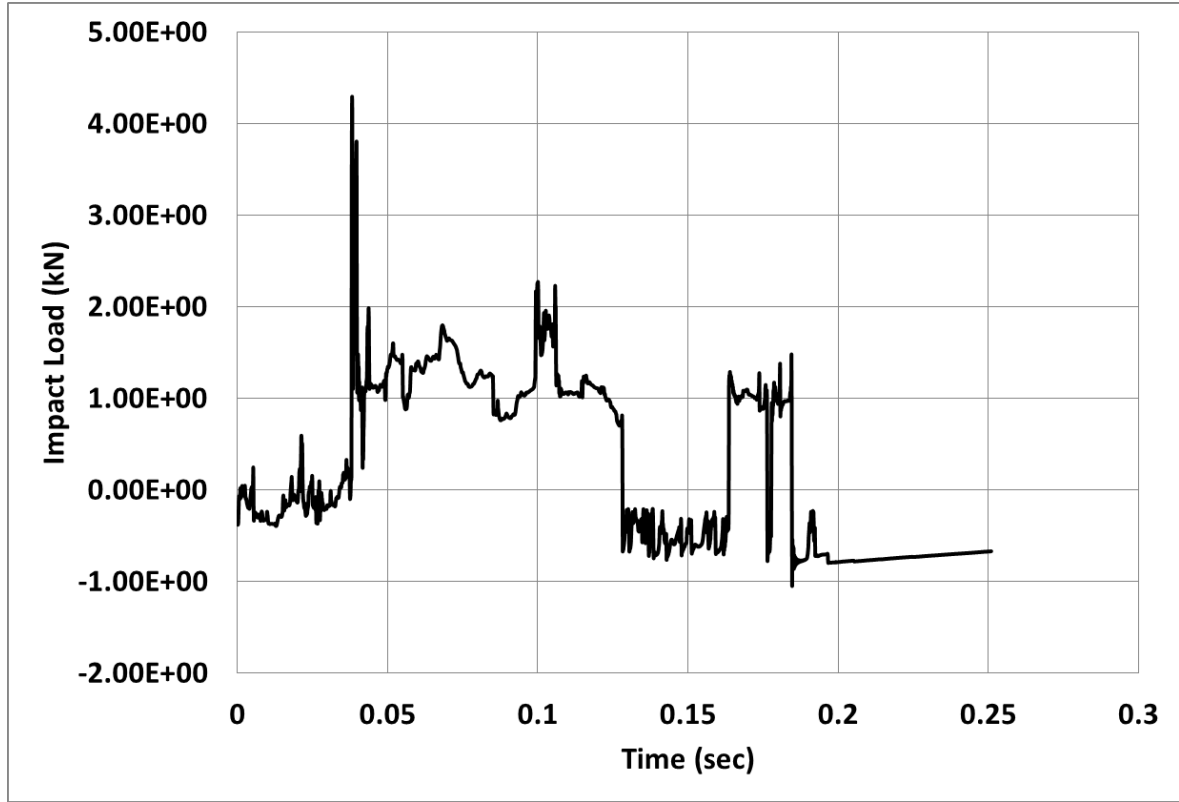
Şekil 5.31. NG75 numunesinde a) sol ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği b) sağ ivmeölçerden alınan ivme (acceleration) - zaman grafiği



Şekil 5.32. NG75 numunesinde yer değişim (strain) - zaman grafiği



Şekil 5.33. NG75 numunesinde şekil değişim (strain) - zaman grafiği



Şekil 5.34. NG75 numunesinde çarpma yük (impact load) - zaman grafiği

Elde edilen ivme, yer değiştirme, birim deformasyon ve çarpma yüklemesinin maksimum değerleri karşılaştırma ve yorumların yapılması için özetlenerek verilmiştir (Çizelge 5.12).

Çizelge 5.12. Ağırlık düşürme darbe deneyi sonuçları

	İvme [g]				Yer değiştirme [mm]	Şekil değiştirme [mm/mm]	Çarpma Yükü [kN]
	Sol		Sağ				
	Max	Min	Max	Min			
katkısız	277,14	-277,07	276,69	-276,38	2,686	0,010428	4,25
NG15	346,43	-346,33	345,59	-345,20	0,759	0,032908	4,29
NG25	399,09	-398,97	395,67	-395,23	0,560	0,055379	4,31
NG35	354,75	-354,64	351,95	-351,56	0,633	0,043412	4,30
NG45	314,84	-314,75	312,11	-311,76	0,972	0,030665	4,29
NG75	282,69	-282,61	280,01	-279,70	1,486	0,014975	4,29

DeneySEL sonuçlar incelendiğinde deneySEL çalışmada incelenen matrisle katılan nano grafen miktarındaki artışın deney numunelerinin çarpma davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Deney elemanlarından ölçülen ivme değerleri incelendiğinde malzemenin basınç dayanım değeri arttıkça deney elemanlarından ölçülen ivme değerlerinin de artış gösterdiği görülmüştür. Deney numunelerine katılan %0,15 ve %0,25 değerlerindeki grafen numunelerin çarpma davranışını olumlu yönde etkilemiş, ölçülen maksimum ivme değerleri

artmış, yer değiştirme değerleri azalmış ve birim deformasyon değerleri ise artış göstermiştir. Ancak grafen miktarının daha fazla artırılması deney numunelerinin çarpma davranışı üzerindeki olumlu etkinin azalmasına neden olmuş. NG35, NG45 ve NG75 numunelerinde ölçülen maksimum ivme değerleri azalmış, maksimum yer değiştirme değerleri artmış ve maksimum birim deformasyon değerleri de azalmıştır. Özellikle NG75 numunesi katkısız numuneye benzer bir davranış sergilemiştir. Yapılan deneylerin sonuçları çarpma davranışını iyileştirmek için matrise katılması gerekli olan optimum grafen miktarının %0,25 olduğunu göstermiştir

Çizelge 5.13'te numunelerin değerlerinin yüzdesi grafensiz numuneye göre görülmektedir

Çizelge 5.13. Ağırlık düşürme darbe deneyi nanopartikül etkisi

	İvme	Yer değiştirme	şekil değiştirme
katkısız	-	-	-
NG15	25	-71,74	215
NG25	44	-79,15	431,38
NG35	28	-76,43	316,6
NG45	14	-63,81	194,24
NG75	2	-44,67	43,66

Matris içerisine giderek artan oranda grafen katılan NG15, NG25, NG35, NG45 ve NG75 numunelerinde ölçülen maksimum ivme değerleri katkısız numuneye göre sırasıyla %25, %44, %28, %14 ve %2 oranlarında fazladır. Elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi NG15 ve NG25 numunelerinde katılan grafen ile ivme değerleri artış gösterirken NG35 numunesinde katılan grafen ile ivme değerlerinde azalma başlamış ve NG75 numunesinde ivme artış oranı %2'ye kadar azalarak katkısız deney numunesine yaklaşmıştır.

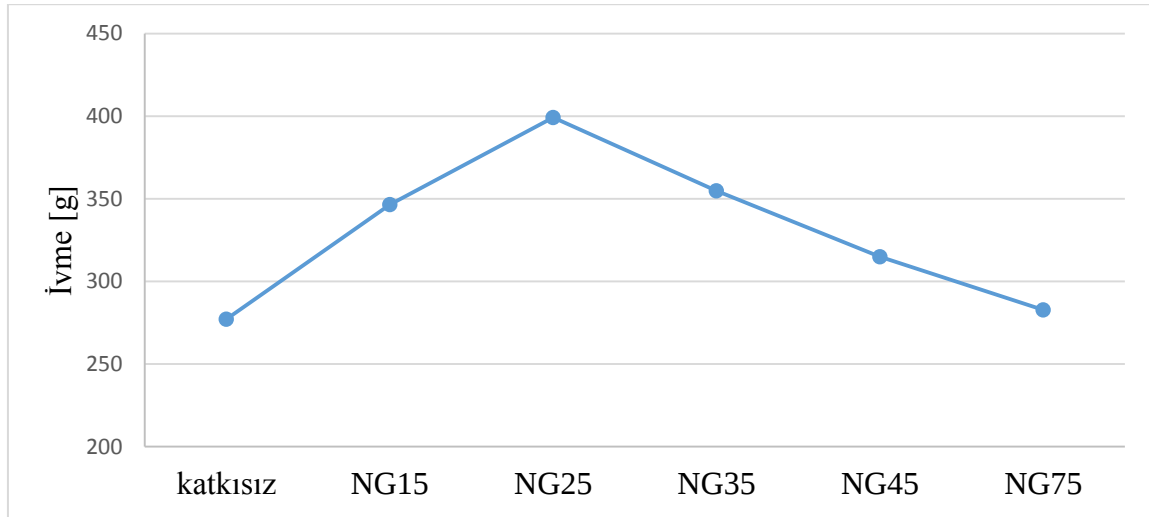
Aynı davranış trendi maksimum yer değiştirme değerleri için de görülmüştür. Deney elemanlarından ölçülen maksimum ivme değerlerinden alınan nümerik integrasyon ile hesaplanan yer değiştirme değerleri incelendiğinden grafen değerlerindeki artış ile deney numunelerinden ölçülen maksimum yer değiştirme değerinin azaldığı görülmüştür. NG15 ve NG25 deney numunelerinde maksimum yer değiştirme değerleri katkısız numuneye göre sırasında 3,54 ve 4,80 kat daha düşük hesaplanmıştır. NG35, NG45 ve NG75 numunelerinde maksimum yer değiştirme değerindeki azalınan oranı azalmaya başlamış ve yer değiştirme değeri katkısız numunenin değerine yaklaşmıştır. NG35, NG45 ve NG75 deney

numunelerinde maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla katkısız deney numunesinden 4,24, 2,76 ve 1,81 kat daha küçük hesaplanmıştır.

Deney numunelerinden ölçülen maksimum birim şekil değiştirme değerleri incelendiğinde grafen katkısının şekil değiştirme değerlerini artırdığını göstermektedir.

Maksimum ivme değerlerindeki davranış trendi birim deformasyon değerlerine benzer şekilde görölmüş ve N15 ve NG25 numunelerinde birim deformasyon değeri artış gösterdikten sonra artan grafen oranı ile artış miktarında azalım meydana gelerek düşmüştür. En yüksek şekil değiştirme değeri NG25 deney numunesinde tespit edilmiştir. Bu oranda şekil değiştirme değeri grafensiz numuneye kıyasla 5,3 kat artmıştır. Ancak grafen oranının artmasıyla şekil değiştirme değerlerinde düşüş görölmektedir. En düşük şekil değiştirme değeri NG75 numunesinde belirlenmiştir. Bu oranda şekil değiştirme değeri katkısız numuneye göre %43 artmıştır.

şekil 5.35’de katkısız ve grafen katkılı numunelerin serbest ağırlık darbe deney ivme sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.

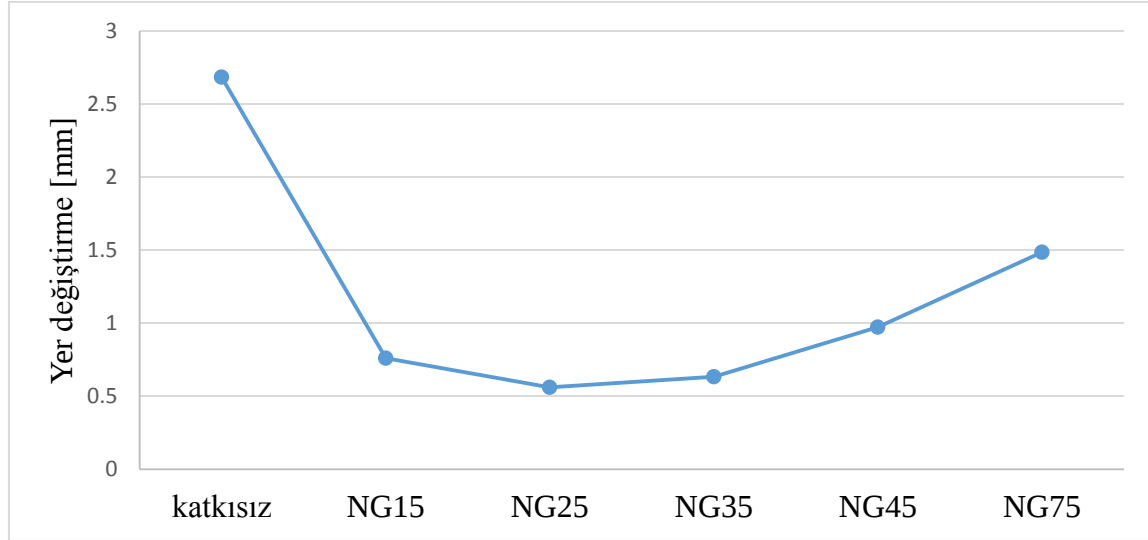


şekil 5.35. Numunelerin ağırlık düşürme darbe deneyi grafiği

şekil 5.35’te göröldüğü gibi grafen oranının artmasıyla ivme değeri artmaktadır. İvme değerinin artması malzemenin sertleşmesini göstermektedir. grafen oranı %0,25’e artmasıyla ivme değerinde artış tespit edilmiştir. Ancak grafen fazla ilave edilirse ivme değerinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu düşüş grafen ağırlık oranı %0,75 kadar artmasıyla

düşmektedir ve grafen katkılı numunelerde en düşük ivme değeri bu oranda görülmüştür. Nano parçacık oranı %0,25'den %0,75'e kadar artmasıyla ivme değeri %18,4 düşmektedir.

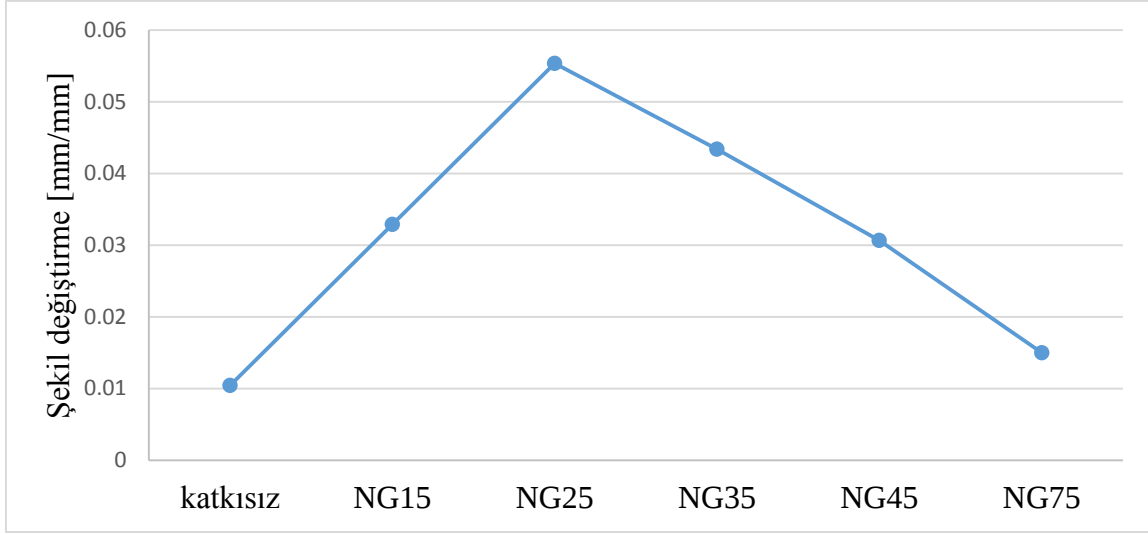
Şekil 5.36 katkısız ve grafen katkılı numunelerin ağırlık düşürme darbe deneyi yer değiştirme sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 5.36. Numunelerin ağırlık düşürme darbe deneyi grafiği

Şekil 5.36'da görüldüğü gibi en yüksek yer değiştirme katkısız numuneye aittir. Deney sırasında katkısız numune esnek olduğundan dolayı çarpmaya maruz kaldığında kırılmadığı görülmüştür. Sadece %0,15 oranında grafenin artmasıyla yer değiştirme değerinde ciddi bir düşüş görülmektedir. Bu düşüş NG25 numunesine kadar devam etmektedir ancak daha fazla grafenin ilavesi ile yer değiştirme değerinde artış görülmüştür. Yer değiştirme değeri NG75 deney numunesinde NG25'e göre göre % 165,35 artmıştır.

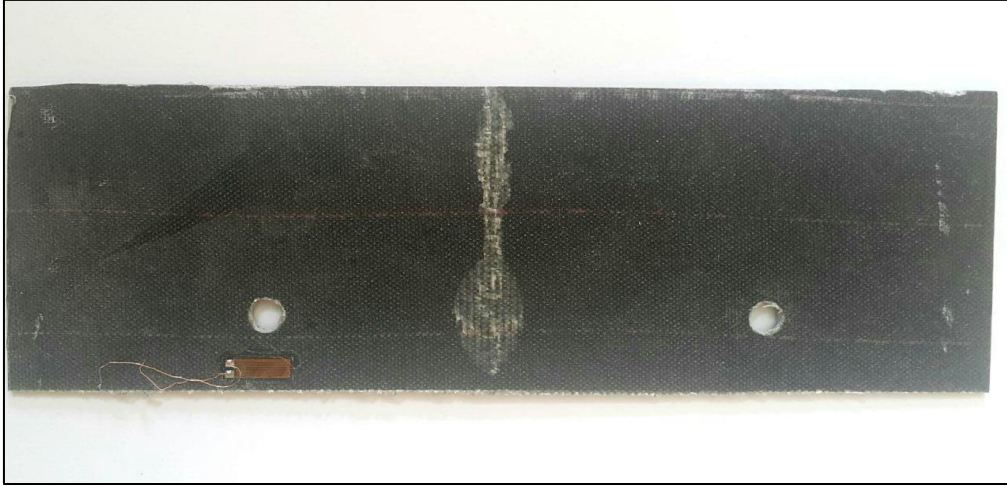
Şekil 5.37'de katkısız ve grafen katkılı numunelerin ağırlık düşürme darbe deneyi şekil değiştirme sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.



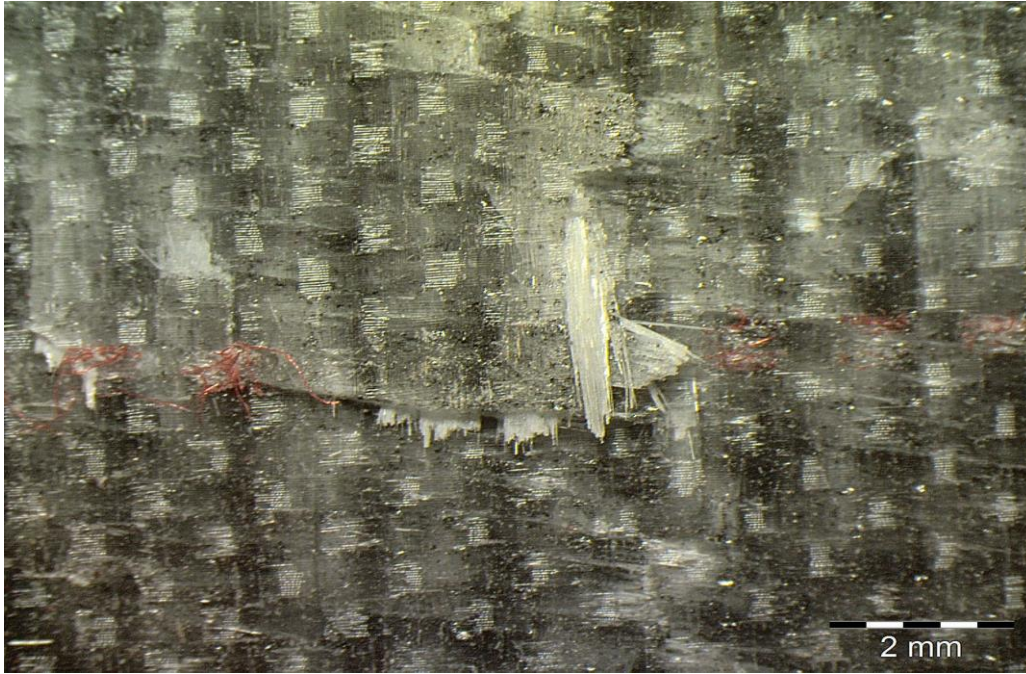
Şekil 5.37. Numunelerin ağırlık düşürme darbe deneyi grafiği

Şekil 5.37’de görüldüğü gibi yer değiştirme değerinin tam tersine şekil değiştirmenin değeri grafen oranının miktarının artmasıyla artmıştır. NG25 numunesinde en yüksek şekil değiştirme ve NG75 deney numunesinde en düşük şekil değiştirme tespit edilmiştir. Şekil değiştirmenin değeri NG75 numunesinde NG25 numunesine göre göre %72,95 düşmektedir.

Ağırlık düşürme darbe deneyi sonrası NG25 numunesi kırılma bölgesinde farklı yüzeylerden makro ve mikro resimleri görülmektedir.



a)

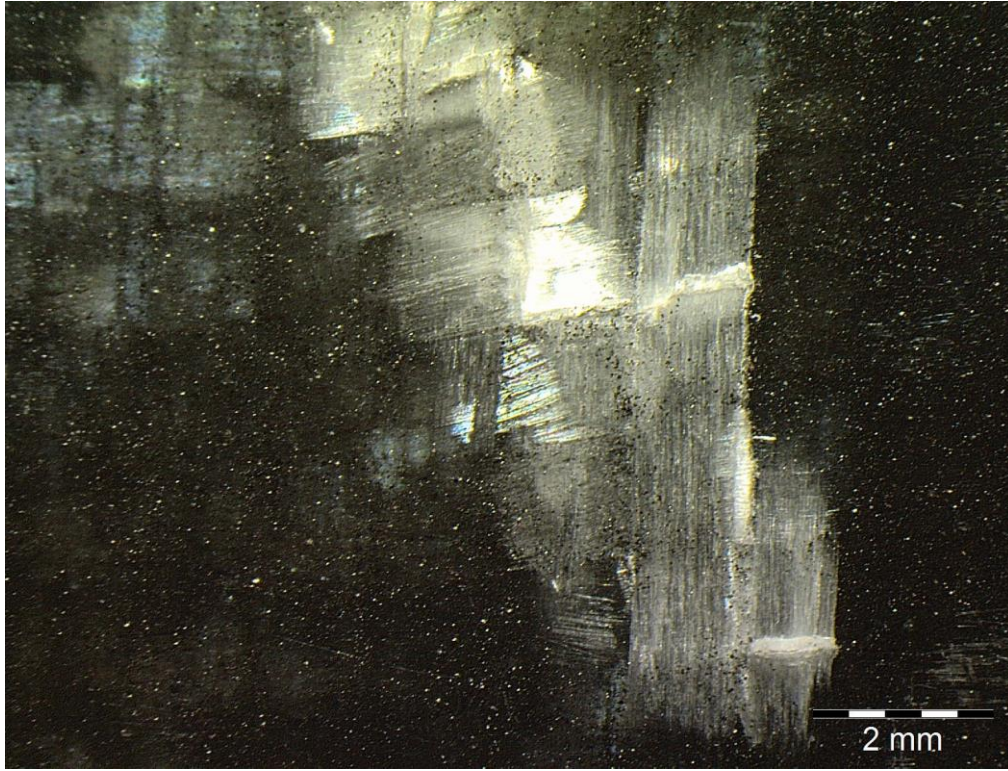


b)

Resim 5.10. Ağırlık düşürme darbe deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi arka taraftan
a) makro görüntüsü b) optik mikroskop görüntüsü

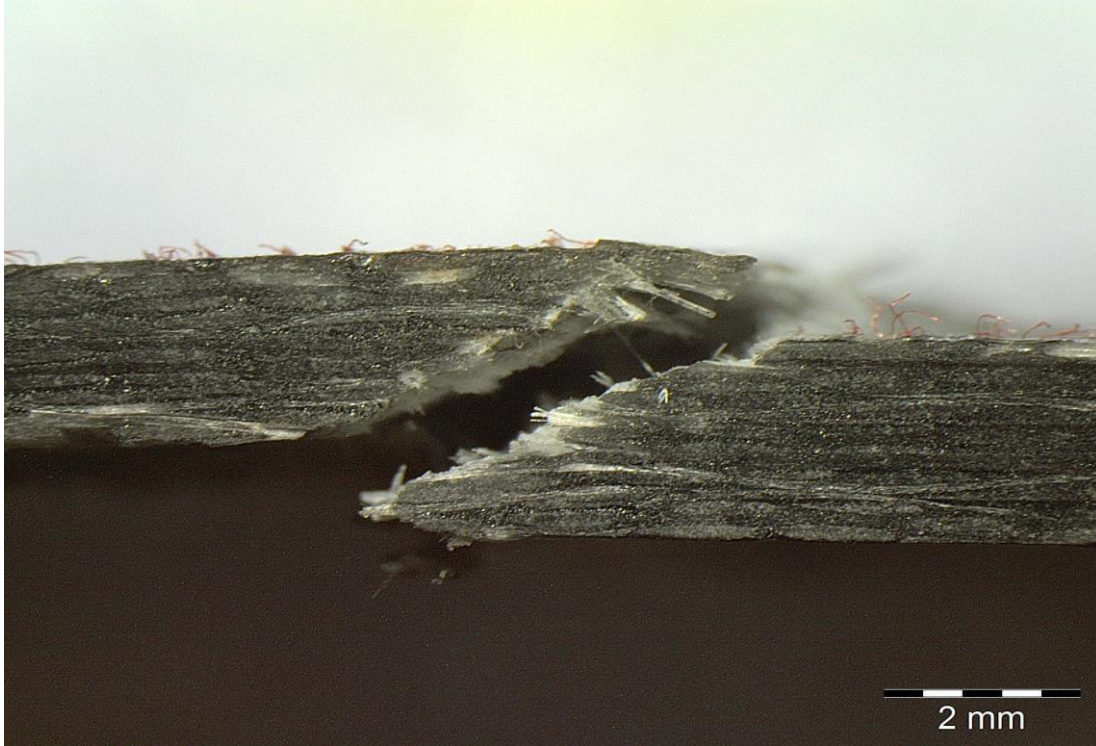


(a)



b)

Resim 5.11. Ağırlık düşürme darbe deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi arka taraftan
a) makro görüntüsü b) optik mikroskop görüntüsü



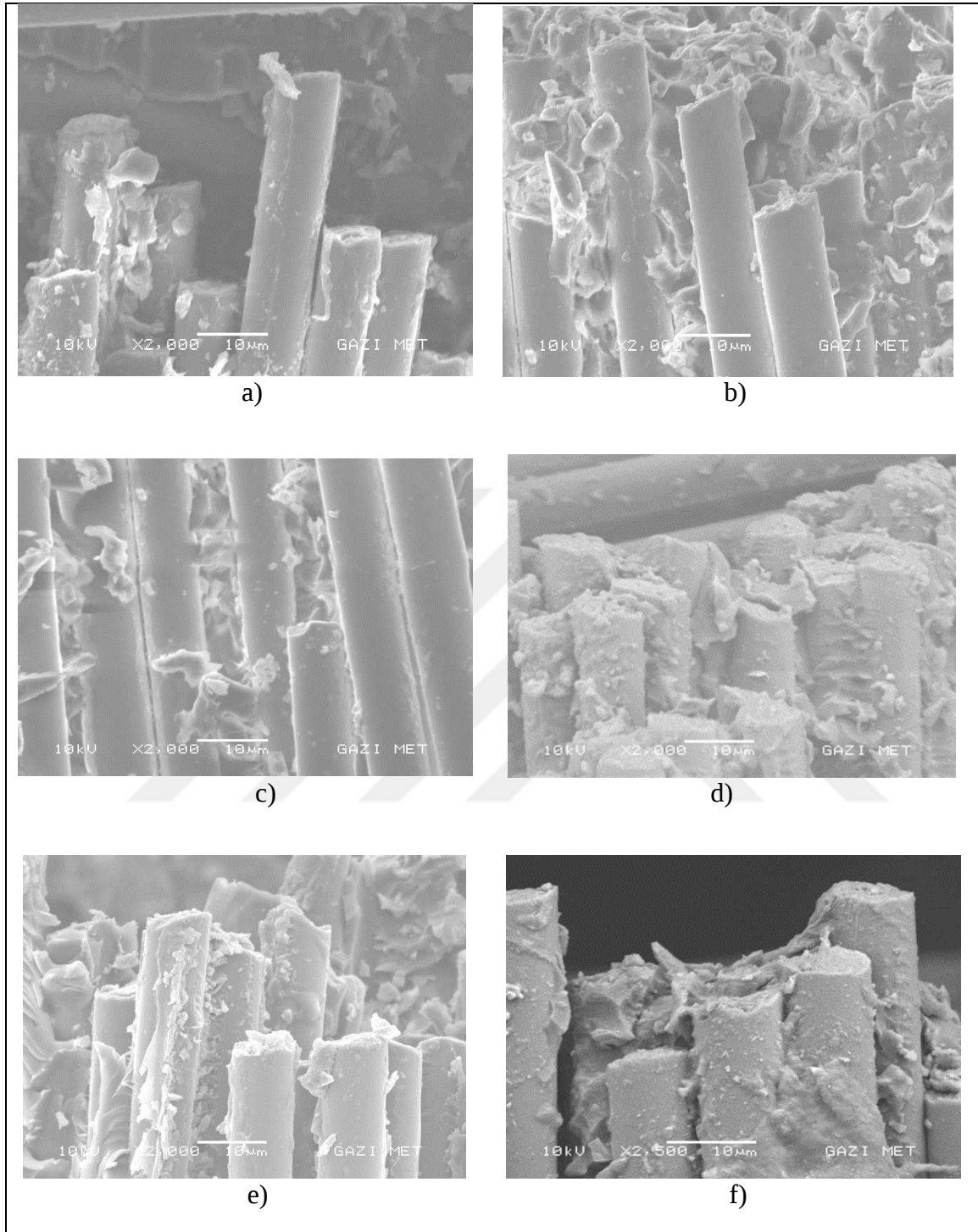
Resim 5.12. Ağırlık düşürme darbe deneyi sonrası NG25 numunesi kırık yüzeyi enine kesit yönde optik mikroskop görüntüsü

Serbest ağırlık düşürme darbe deneyi sonrasında kırık yüzeye bakıldığında (Resim 5.10) çarpma bölgesinde tabakaların ayrılması ve fiberlerin kopması görülmektedir. üç farklı hasar tipi görülmektedir. Fiberlerin kopması, sıyrılma ve tabakalar arasında ayrılma görülmektedir. Ağırlığın çarpmasından dolayı tabakalar arasında gerilme oluşmuştur. Tabakaların ayrılması oluşan gerilmeye bağlanabilmektedir.

5.5. Kırık Yüzey SEM İncelemesi

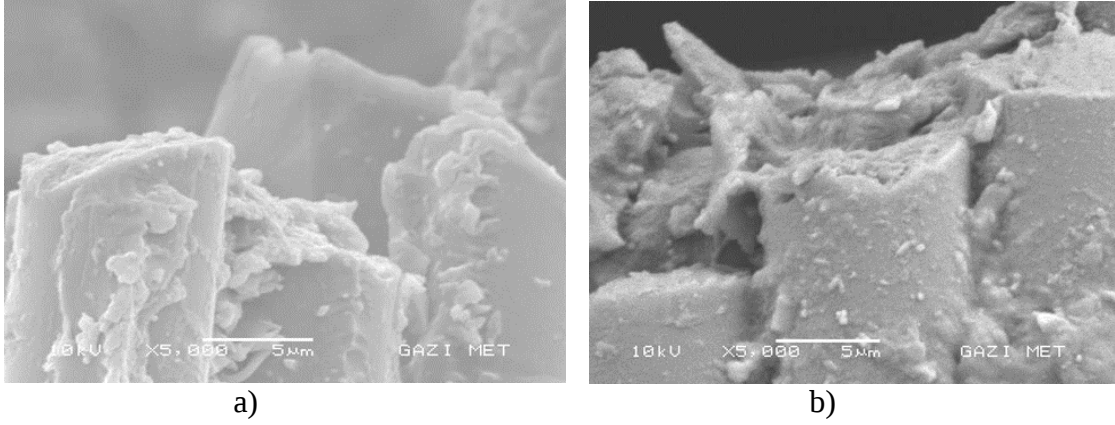
Çekme deneyi sonrasında deney numuneleri kırık yüzey incelemesi SEM ile yapılmıştır. Numunelerin hepsinden kırık yüzeyden ve kırılma bölgelerine dikey yönden görüntüler alınmıştır. Grafen malzemenin iletkenliğini artırma eğiliminde olduğundan dolayı grafen oranı artıkça SEM görüntüleri daha şeffaf ve belirgin olmuştur.

Resim 5.13'te çekme deney numunelerinde kırık yüzeye dik yönden alınan düşük büyütme SEM görüntüleri verilmiştir.



Resim 5.13. Çekme deney numunelerinde kırık yüzeye dik yönden düşük büyütme alınan SEM görüntüleri a) Katkısız b) NG15 c) NG25 d) NG35 e) NG45 f) NG75

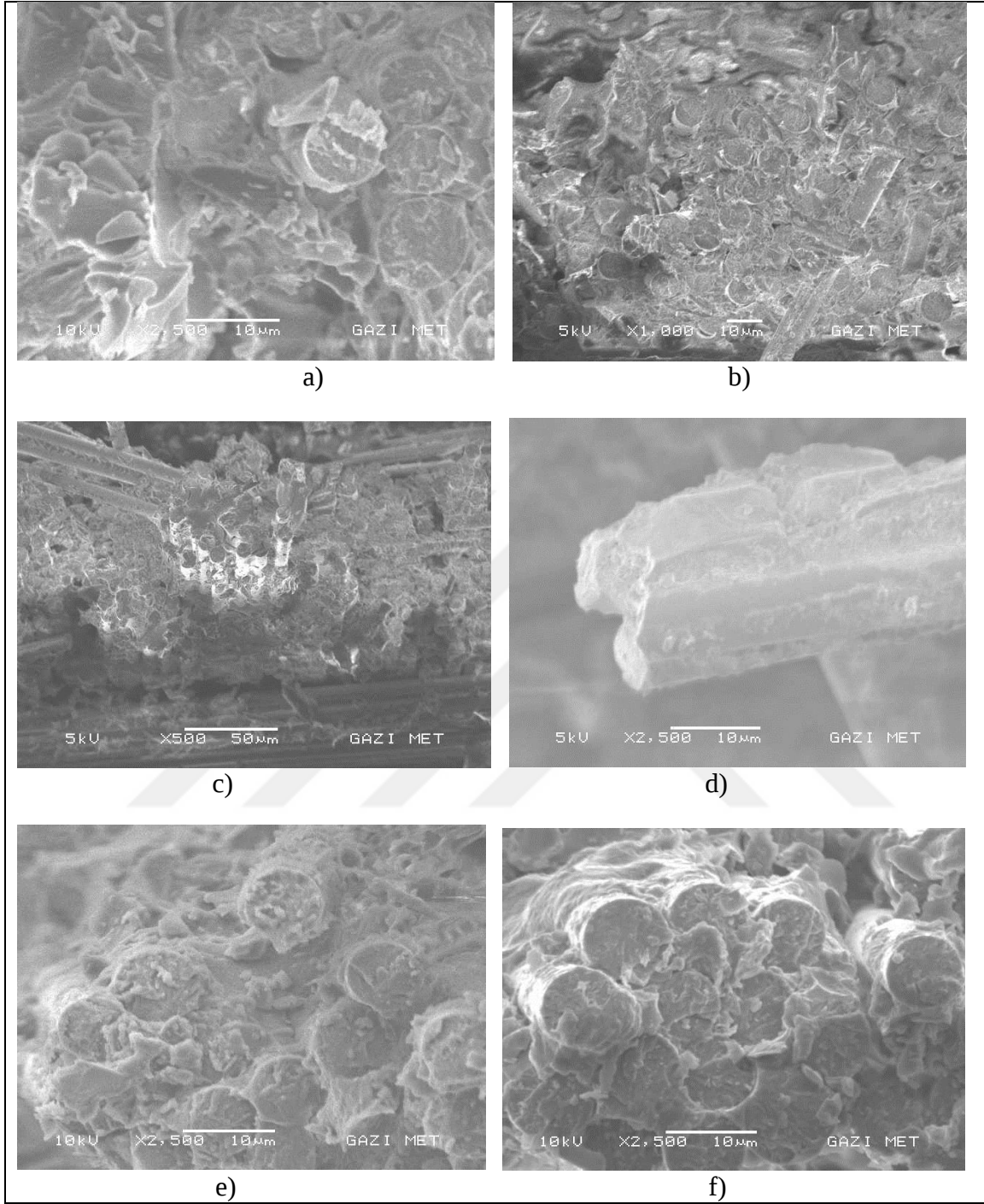
Resim 5.14’de çekme deney numunelerinde kırık yüzeye dik yönden alınan yüksek büyütme SEM görüntüleri verilmiştir.



Resim 5.14. Çekme deney numunelerinde kırık yüzeye dik yönden yüksek büyütme alınan SEM görüntüleri a) NG45 b) NG75

Katkısız numune yalıtkan olduğundan dolayı resimler tam net görülememektedir ancak grafenin ilavesi malzemenin iletkenliğini artırmaktadır dolayısıyla daha yüksek oranda ilave edilen nano parçacığın daha yüksek büyütme oranlarında çekilen görüntüleri daha belirgin ve şeffaf olmuştur.

Resim 5.15’de çekme deneyi sonrası kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir.



Resim 5.15. Çekme deneyi numunelerinde kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüleri a) Katkısız b) NG15 c) NG25 d) NG35 e) NG45 f) NG75

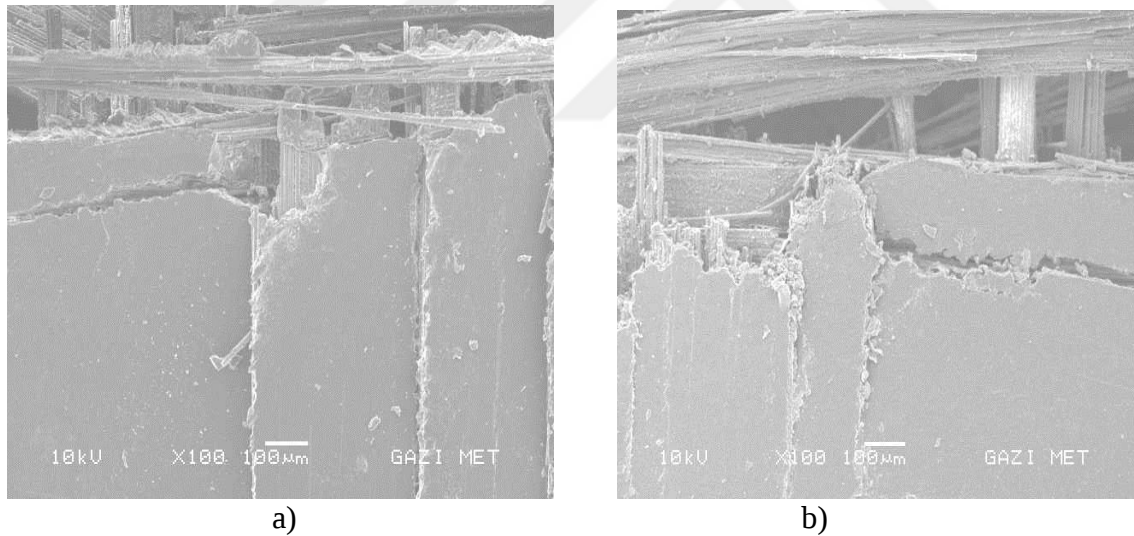
Görüntülere bakıldığında katkısız numunede fiber ile matris arasında boşluk görülmektedir. Grafen içeren numunelerde ise fiber ile matris arasında neredeyse sağlam bağın olduğu dikkat çekmektedir. Ancak bu tip numunelerde grafen oranı arttıkça fiber ile matris arasında topaklanma oluşmaktadır. NG35, NG45 ve NG75 numunelerinde fiber etrafında grafen

topaklandığı ve malzemenin özelliklerini olumsuz etkileyip cam fiber ile matrisin yapışkanlığını düşürmektedir.

Ayrıca topaklanma neticesinde matrisde boşlukların oluşma ihtimali artabilmektedir. Bu boşluklar çatlak gibi davranarak malzeme yük altında olduğunda malzemenin hasar görmesine neden olabilirler.

Topaklanma üç nokta eğme deneyinde numuneleri daha erken olumsuz etkileyip ve grafen oranı %0,25 den fazla olduğunda malzemenin eğme mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur. Ancak çekme deneyinde bu olumsuz etki en yüksek oranda yani NG75 deney numunesinde çekme mukavemetini düşürmektedir.

Resim 5.16'da numunelerin kırık yüzeyde oluşan hasar bölgelerine dikey yönden alınan SEM görüntüleri verilmiştir.



Resim 5.16. Çekme deneyi numunelerin kırık yüzeyde oluşan hasar bölgelerine dikey yönden alınan SEM görüntüleri a) GN45 ve b) GN75

Daha önce belirtildiği gibi malzeme yalıtkan olduğundan dolayı SEM görüntüleri belirli ve şeffaf görülmemektedir. Dolayısıyla hasar gören bölgelerin görüntülerinden sadece kırılma modelini anlamak için yararlanabiliriz. Görüldüğü gibi hasar gören yüzey dikey ve yatay şeklinde kırılmıştır. Yüzeyde kırılan bazı bölgeler birbirlerinin üzerinde kaymışlardır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada grafen nano parçacıkları cam/epoksi kompozite ilave ederek hibrit kompozit malzemeler üretilmiş ve hazırlanan numunelerin mekanik özellikleri incelenmiş ve hasar analizi yapılmıştır.

Fiber malzemesi cam matris malzemesi ise epoksidir. Nano parçacık olarak ağırlıkça %0,15. %0,25. %0,35. %0,45 ve %0,75 oranlarında ve katkısız olmak üzere 6 farklı numune üretilmiştir.

Vakum infüzyon yöntemi üretim metodu olarak kullanılmıştır. Nano parçacıkların reçine içinde homojen şekilde karıştırılması için manyetik karıştırıcı ve ardından ultrasonik karıştırma cihazı kullanılmıştır. Üretim farklıklarını ortadan kaldırmak için tüm numuneler aynı süreçten geçirilmiştir.

Hazırlanan numunelere yakma deneyi, çekme deneyi, üç nokta eğme ve serbest ağırlık düşürme darbe deneyi uygulanmıştır. Ardından sonuçlara bakılarak grafen nano parçacıkların malzeme özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Yakma deneyi ile numunelerin fiber, matris ve boşluk hacim oranları bulunmuştur. Nanopartikül miktarı arttıkça fiber hacim oranının azaldığı ve boşluk hacim oranının arttığı tespit edilmiştir. Matrisin viskozitesinin artması üretim esnasında fazla epoksinin katkısız numunelere kıyasla vakum altında daha az çekilebilmesine yol açmıştır. Dolayısıyla kompozit yapı içerisindeki matris hacim oranının arttığı fiber hacim oranının ise azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çekme deneyinde numunelerin davranışları eksenel yük altında incelenmiştir. Grafen oranının % 0,45'e kadar artmasıyla çekme mukavemeti neredeyse düzenli şekilde artmıştır. En yüksek çekme mukavemeti NG45 deney numunesinde tespit edilmiştir. Bu numunede çekme mukavemeti katkısız numuneye göre %31,29, şekil değiştirmesi %18,75; elastiklik modülü %43,96 ve tokluğu %76,31 artmıştır. Ancak grafen oranı %0,75'e artması bu değerlerin düşüşüne sebep olmuştur.

Üç nokta eğme deneyi ile numunelerin eğme yükü altındaki davranışları incelenmiştir. Grafenin artmasıyla eğme mukavemeti artmaktadır, ancak en yüksek eğme mukavemeti NG25 deney numunesinde tespit edilmiştir. Bu numunede katkısız numuneye kıyasla eğme mukavemeti %34,74; şekil değiştirmesi -%17,52; eğme elastiklik modülü %52,48 ve tokluğu %20 değişmiştir. Nano parçacığın artmasıyla eğme mukavemetinde düşüş görülmektedir. Katkılı numuneler içerisinde en düşük eğme mukavemeti NG75 numunesinde tespit edilmiştir.

Ağırlık düşürme darbe deneyinde numunelerin ivme, yer değiştirme ve şekil değiştirmesi incelenmiştir. Sonuçlara göre en yüksek ivme ve düşük yer değiştirme değeri NG25 deney numunesinde tespit edilmiştir. Grafen oranının daha fazla artmasıyla bu değerlerin düşüşü görülmektedir. Bu numunede ivme ve yer değiştirme değeri grafensiz numuneye kıyasla sırayla %44 ve -%74,15 değişmiştir. %0,25 oranında şekil değiştirmenin değeri katkısız numuneye göre 5 kattan daha fazla artmıştır. Grafen katkılı numunelerin içinde en düşük değer NG75 numunesinde tespit edilmiştir.

Ayrıca çekme deney numunelerin kırık yüzey ve kırık yüzeye dik yönden SEM görüntüleri çekilmiştir.

Çekme ve üç nokta eğme deneylerinde grafenin kritik bir orandan fazla ilavesi ile çekme ve eğme mukavemetinde düşüş görülmektedir. Yakma deneyi elde edilen sonuçlara göre grafenin artmasıyla matriste boşluk hacim oranı artmıştır. Ayrıca SEM görüntülerine bakıldığında grafen oranı %0,25’de fazla olduğunda cam elyafın etrafında topaklanmaktadır. Boşluk oranı ve topaklanmanın artması malzemenin yapısını olumsuz etkileyip özelliklerinin düşmesine sebep olmuştur. Bu faktörler numunenin eğme ve darbe testlerinde elde edilen özelliklerini çekme testinde elde edilen özelliklere göre daha düşük miktarda etkilemektedir.

Çekme testinde tabakalara eşit çekme yükü uygulandığından dolayı kompozitte tabakalar arasında yüksek gerilme oluşmamaktadır. Bu nedenle kırılma yüzeyinde tabakaların ayrılması görülmemektedir.

Ancak üç nokta eğme ve ağırlık düşürülmeli deneylerinde tabakalara homojen şekilde yük uygulanmamaktadır, dolayısıyla basma yük altında tabakalar arasında oluşan gerilme

nedeniyle tabakaların ayrılması görülmektedir. Bu nedenle eğme ve ağırlık düşürmeli darbe deneylerinde çekme deneyine kıyasla cam - epoksinin yapışkanlığının düşmesi numunenin yapısını daha fazla olumsuz etkilemektedir.

Farklı grafen oranlarında SEM görüntülerinin şeffaflığı ve belirgin dikkate alınarak, grafenin artması malzemenin iletkenliğini artmaktadır.

Grafen katkılı cam/epoksi kompozitlerinde optimum grafen oranı %0,5'in altında olduğu görülmektedir. Ancak grafen/epoksi nano kompozitlerinde bu oran %3'e kadar artmaktadır. SEM görüntülerinde bahsedildiği gibi cam elyafın etrafındaki topaklanmalar malzemenin yapısını olumsuz etkilemektedir. Ancak grafen/epoksi nano kompozitlerde topaklanmanın olumsuz etkisi daha yüksek oranlarda tespit edilmiştir. Dolayısıyla grafen katkılı cam/epoksi kompozitlerinde topaklanmanın azaltılmasıyla daha iyi sonuçlar elde edilebilir.



KAYNAKLAR

1. Wetzela, B., Hauptert, F. and Zhang, M.Q. (2003). Epoxy nanocomposite with high mechanical and tribological performance. *Compos Science Technology*, 63(2), 2055-2067.
2. Vaia, R.A. and Wagner, H.D. (2004). Framework for nanocomposites mater. *Today*, 7(2), 32–37.
3. EL-Wazery, M.S. (2017). Mechanical characteristics and novel applications of hybrid polymer composites- a review. *Journal on Mechanical Engineering & Sciences*, 8(2), 666-675.
4. Zhang, X., Liu, M., Mao, Y., Xu, Y., and Niu, S. (2014). Ultrasensitive photoelectrochemical immunoassay of antibody against tumor-associated carbohydrate antigen amplified by functionalized graphene derivatives and enzymatic biocatalytic precipitation. *Bioelec*, 59(22), 21–27.
5. Dao, T.D., Hong, J.E., Ryu, K.S., and Jeong, H.M. (2014). Supertough functionalized graphene paper as a high-capacity anode for lithium ion batteries. *Chem Engeland*, 250(12), 257–266.
6. Cardarelli, F. (2008). *Materials handbook: a concise desktop reference*. Basım Yeri: Springer Science & Business Media.
7. Kaw, A.K. (2010). *Mechanics of composite materials*. Basım Yeri: CRC press.
8. Harper, C.A. (2002). *Handbook of plastics, elastomers, and composites*. Basım Yeri: McGraw-Hill New York.
9. Visakh, P.M. , Martínez-Morlanes, M.J. (2016). *Nanomaterials and nanocomposites: Zero- to three-dimensional materials and their composit*. Basım Yeri: Springer Netherlands
10. Yiu-Wing mai, Zhong-Zhen yu. (2006). *Polymer nanocomposites*. Basım Yeri: Woodhead Publishing.
11. Ellis, B. (1993). *Chemistry and technology of epoxy resins*. Basım Yeri: Springer Netherlands.
12. Bentur, A, and Kovler, K, (1997). Durability of some glass fibre reinforced cementations composites, fifth international concrete on structural failure, durability retrofitting. *Singapore*, 28(18), 190-199.
13. Fiber-reinforced composites, (2007). *Materials, manufacturing, and design*. Third edition. CRC Press Textbook, B/W Illustrations.
14. Geim, A.K. and Novoselov, K.S. (2007). The rise of graphene. *Nature Material*, 6, 183–191.

15. Pumera, M., Ambrosi, A., Bonanni, A., Chng, E.L.K. and Poh, H.L. (2010) Graphene for electrochemical sensing and bio sensing. *Trends in Analytical Chemistry*, 29(11), 954–965.
16. Geim, A.K. (2009). Graphene: Status and prospects. *Science*, 324(33), 1530–1534.
17. Katsnelson, M. (2007). Graphene: carbon in two dimensions. *Mater Today*, 10(2), 20–27.
18. Rao, C.N.R., Biswas, K., Subrahmanyam, K. S. and Govindaraj, A. (2009). Graphene, the new nanocarbon. *Journal Mater Chem*, 19(5), 2457–2469.
19. Heyrovská, R. (2008). *Atomic structures of graphene, benzene and methane with bond lengths as sums of the single*. Double and Resonance Bond Radii of Carbon.
20. Vaia, R.A. and Wagner, H.D. (2004). Framework for nanocomposites. *Mater Today*, 7(2), 32–37.
21. Rueger, D.V. and Kessler, M.R. (2014). Effect of silane structure on the properties of silanized multiwalled carbon nanotube-epoxy nanocomposites. *Polymer*, 55(11), 1854–1865.
22. Jin, S.B., Son, G.S., Kim, Y.H. and Kim, C.G. (2013). Enhanced durability of silanized multi-walled carbon nanotube/ epoxy nanocomposites under simulated low earth orbit space environment. *Compos Science Techonogy*, 87(7), 224–231.
23. Ullah-Khan, S., Pothnis, J.R. and Kim, J.K. (2013). Effects of carbon nanotube alignment on electrical and mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Composite*, 49(24), 26–34.
24. Shadlou, S., Alishahi, E. and Ayatollahi, M.R. (2013). Fracture behavior of epoxy nanocomposites reinforced with different carbon nano-reinforcements. *Composions Struces*, 95(15), 577–581.
25. Lingpu, J., Shengjiao, Y., Yimin, J., and Chunming, W. (2014). Electrochemical deposition of diluted magnetic semiconductor znmnse on reduced graphene oxide/polyimide substrate and its properties. *Alloyg Composions*, 609(29), 233–238.
26. Zhang, X., Liu, M., Mao, Y., Xu, Y. and Niu, S. (2014). Ultrasensitive photo electrochemical immunoassay of antibody against tumor-associated carbohydrate antigen amplified by functionalized graphene derivatives and enzymatic biocatalytic precipitation. *Biosenc Bioelec*, 59(28), 21–27.
27. Dao, T.D., Hong, J.E., Ryu, K.S. and Jeong, H.M. (2014). Supertough functionalized graphene paper as a high-capacity anode for lithium ion batteries. *Chem Engeland*, 250(12), 257–266.
28. Aoyama, S., Park, Y.T. and Macosko, W. (2014). Melt crystallization of poly (ethylene terephthalate): Comparing addition addition of graphene vs carbon nanotubes. *Polymer*, 55(1), 2077–2085.

29. Bandla, S. and Hanan, J.C. (2012). Microstructure and elastic tensile behavior of polyethylene terephthalate-exfoliated graphene nanocomposites. *Materyal Science*, 47(11), 76-82.
30. Li, M. and Jeong, Y.G. (2012). Influences of exfoliated graphite on structures, thermal stability, mechanical modulus, and electrical resistivity of poly. *Applied Polymer Science*, 125(12), 53-40.
31. Kotov, N.A. (2006). Materials Science: Carbon sheet solutions. *Nature*, 442(22), 254–255.
32. Rao, C.N.R., Biswas, K., Subrahmanyam, K.S. and Govindaraj, A. (2009). Graphene, the new nanocarbon. *Materials Chemistry*, 19(11), 2457–2469.
33. Rao, C.N.R., Biswas, K., Subrahmanyam, K.S. and Govindaraj, A. (2010). Graphene, the new nanocarbon. *Journal Modares Mechanical Engineering*, 19(8), 2457–2469.
34. Soldano, C., Mahmood, A. and Dujardin, E. (2010). Production, properties and potential of graphene. *Carbon*, 48(6), 2127–2150.
35. Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V. and Grigorieva, I.V. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(2), 666–669.
36. Shokrieh, M.M., Shokrieh, Z. and Hashemianzadeh, S.M. (2012). Effective parameters in modeling of graphene sheet young's modulus. *Journal Modares Mechanical Engineering*, 12 (3), 147-155.
37. Dato, A., Radmilovic, V., Lee, Z., Phillips, J. and Frenklach, M. (2008). Substrate-free gas-phase synthesis of graphene sheets. *Nano Letters*, 8(2), 2012–2016.
38. Reina, A., Jia, X., Ho, J., Nezich, D., Son, H., Bulovic, V., Dresselhaus, M.S. and Kong, J. (2009). Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition. *Nano Lett*, 9(1), 30–35.
39. Verdejo, R., Mar-Bernal, M., Romasanta, L.J. and Manchado, M.A. (2011). Graphene filled polymer nanocomposites. *Materials Chemistry*, 21(33), 3301-3310.
40. Park, S. and Ruoff, R.S. (2009). Chemical methods for the production of graphenes. *Naturel Nanotech*, 4(2), 217–224.
41. Chen, G., Wu, D., Weng, W. and Wu, C. (2003). Exfoliation of graphite flake and its nanocomposites. *Carbon*, 41(11), 619–621.
42. Ramanathan, T., Stankovich, S., Dikin, D.A., Liu, H., Shen, H., Nguyen, S.T. and Brinson, L.C. (2007). Graphitic nanofillers in PMMA nanocomposites-an investigation of particle size and dispersion and their influence on nanocomposite properties. *Polymed Science Part B: Polymed Physholg*, 45(4), 2097–2112.
43. Uhl, F.M., Yao, Q. and Wilkie, C.A. (2005). Formation of nanocomposites of styrene and its copolymers using graphite as the nanomaterial. *Polymers For Advanced Technologies*, 16(21), 533–540.

44. Merhari, L. (2009). *Hybrid Nanocomposites for Nanotechnology*. Basım Yeri: Springer US.
45. Yanan, C. (2015). *Tabakali hibrit kompozitlerin bireysel zirih malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü, Elazığ.
46. Maley, J.A. (2008). *An investigation into low-cost manufacturing of carbon epoxy composites and a novel "mouldless" technique using the Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) method*. Master of Applied Science, Ottawa-Carleton Institute for Mechanical and Aerospace Engineering, Ottawa.
47. Summerscales, J. and Searle, T.J. (2005). Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 219(1), 45-58.
48. Williams, C., Summerscales, J. and Grove, S. (1996). Resin infusion under flexible tooling (RIFT): a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(7), 517-524.
49. Tuccillo, F., Antonucci, V., Calabro, A., M., Giordano, M. and Nicolais, L. (2005). *Practical and theoretic analysis of resin flow in vacuum assisted resin transfer molding processes*. in *Macromolecular symposia*. Basım Yeri: Wiley Online Library.
50. Parnas, R.S. and Walsh, S.M. (2005). Vacuum- assisted resin transfer molding model. *Polymer Composites*, 26(4), 477-485.
51. Kuentzer, N., Simacek, P., Advani, S.G. and Walsh, S. (2007). Correlation of void distribution to VARTM manufacturing techniques. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(3), 802-813.
52. Ajayan, P.M. and Tour, J.M. (2007). Materials Science: NanotubeComposites. *Nature*, 447(12), 1066–1068.
53. Stankovich, S., Dikin, D.A., Dommett, G.H.B., Kohlhaas, K.M., Zimney, E.J., Stach, E.A., Piner, R.D., Nguyen, S.T. and Ruoff, R.S. (2006). Graphene-based composite materials. *Nature*, 442(23), 282–286.
54. Lee, C., Wei, X.D., Kysar, J.W. and Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(11), 385–388.
55. Das, B., Prasad, K.E., Ramamurty, U. and Rao, C.N.R. (2009). Nano-indentation Studies on Polymer Matrix Composites Reinforced by Few-layer Graphene, *Nanotechnology*, 20(11), 125701–125705.
56. Kuila, T., Bose, S., Hong, C.E., Uddin, M.E., Khanra, P., Kim, N.H. and Lee, J.H. (2011). Preparation of Functionalized graphene/linear low density polyethylene composites by a solution mixing method. *Carbon*, 49(12), 1033–1051.
57. Rafiee, M.A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.Z. and Koratkar, N. (2009). Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content. *ACS Nano*, 3(2), 3884–3890.

58. Verdejo, R., Bujans, F., Perez, M.A. and Saja, J.A. (2008). Physical properties of silicone foams filled with carbon nanotubes and functionalized graphene sheets. *Materials Chemistry*, 18(4), 2221–2226.
59. Ansari, S. and Giannelis, E.P. (2009). Functionalized graphene sheet-poly (vinylidene fluoride) conductive nanocomposites. *Polymer Science*, 47(2), 888–897.
60. Liang, J.J., Huang, Y., Zhang, L., Wang, Y., Ma, Y.F., Guo, T.Y. and Chen, Y.S. (2009). Molecular-level dispersion of graphene into poly (vinyl alcohol) and effective reinforcement of their nanocomposites. *Advanced Functional Materials*, 19(3), 2297–2302.
61. Liang, J.J., Xu, Y.F., Huang, Y., Zhang, L., Wang, Y., Ma, Y.F., Li, F.F., Guo, T.Y. and Chen, Y.S. (2009). Molecular-level dispersion of graphene into poly (vinyl alcohol) and effective reinforcement of their nanocomposites. *Physical Chemistry C*, 113(5), 9921–9927.
62. Rafiee, M.A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.Z. and Koratkar, N. (2010). Fracture and fatigue in graphene nanocomposites. *Small*, 6(1), 179–183.
63. Tang, L.C., Wan, Y.J., Yan, D. and Pei, Y.B. (2013). The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites. *Carbon*, 60(11), 16–27.
64. Steurer, P., Wissert, R., Thomann, R. and Mulhaupt, R. (2009). Functionalized graphenes and thermoplastic nanocomposites based upon expanded graphite oxide. *Macromolecular Rapid Communications*, 30(15), 316–327.
65. Ramanathan, T., Abdala, A.A., Stankovich, S., Dikin, D.A., Alonso, M., Piner, R.D., Adamson, D.H., Schniepp, H.C., Chen, X., Ruoff, R.S., Nguyen, S.T. and Aksay, I.A. (2008). Functionalized graphene sheets for polymer nanocomposites. *Nature Nanotechnology*, 3(4), 327–331.
66. Shokrieh, M.M., Ghoreishi, S.M. and Esmkhani, M. (2014). Effects of graphene nanoplatelets and graphene nanosheets on fracture toughness of epoxy nanocomposites. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 37(3), 1116–1123.
67. Shokrieh, M.M. and Joneidi, V.A. (2014). Characterization and simulation of impact behavior of graphene/polypropylene nanocomposites using a novel strain-rate-dependent micromechanics model. *Composite Materials*, 25(12), 1–12, 2014.
68. Shokrieh, M.M., Esmkhani, M., Haghighatkhah, A.R. and Zhao, Z. (2014). Flexural fatigue behavior of synthesized graphene/carbon-nanofiber/epoxy hybrid nanocomposites. *Materials & Design*, 64(4), 401–408.
69. Shokrieh, M.M. and Esmkhani, M. (2013). Effect of graphene nanosheets (GNS) and graphite nanoplatelets (GNP) on the mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Science of Advanced Materials*, 48(8), 260–266.
70. Shokrieh, M.M., Shokrieh, Z. and Hashemianzadeh, S.M. (2012). Effective parameters in modeling of graphenesheet young's modulus. *Modares Mechanical Engineering (In Persian)*, 210(12), 47–155.

71. Shokrieh, M.M., Hosseinkhani, M.R. and Naimi, M.R. (2013). Nanoindentation and nanoscratch investigations on graphene-based nanocomposites. *Polymer Testing*, 47(2), 45–51.
72. Zare, M., Sharif, M. and Kashkooli, A. (2014). Study on the effect of polypyrrole and polypyrrole/graphene oxide nanoparticles on the microstructure, electrical and tensile properties of polypropylene nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 53(11), 1392–1401.
73. Verdejo, R., Mar Bernal, M., Romasanta, L.J. and Manchado, M.A. (2011). Graphene filled polymer nanocomposites. *Materials Chemistry*, 21(19), 3301–3310.
74. Park, S.S. and Kim, N.J. (2014). Study on methane hydrate formation using ultrasonic waves. *Industrial & Engineering Chemistry*, 20(13), 1911–1915.
75. Choi, J.Y., Kim, S.W. and Cho, K.Y. (2014). Improved thermal conductivity of graphene encapsulated poly (methyl methacrylate) nanocomposite adhesives with low loading amount of graphene. *Composites Science and Technology*, 94(27), 147–154.
76. Verdejo R., Bujans F., Perez M.A., and Saja J.A., (2008). Physical Properties of Silicone Foams Filled with Carbon Nanotubes and Functionalized Graphene Sheets. *Materials Chemistry*, 18, 2221–2226.
77. Compton, O.C., Kim, S., Pierre, C., Torkelson, J.M. and Nguyen, S.T. (2010). Crumpled graphene nanosheets as highly effective barrier property enhancers. *Advanced Materials*, 22(9), 4759.
78. Meyyappan, M. (2004). *Carbon nanotubes: science and applications*. USA: CRC Press.
79. Su, P.G. and Chiou, C.F. (2014). Electrical and humidity-sensing properties of reduced graphene oxide thin film fabricated by layer-by-layer with covalent anchoring on flexible substrate. *Sensors and Actuators B*, 200(22), 9–18.
80. Verdejo, R., Bujans, F., Perez, M.A., Saja, J.A., Arroyo, M.M. and Manchado, A.L. (2008). Physical properties of silicone foams filled with carbon nanotubes and functionalized graphene sheets. *Materials Chemistry*, 18(8), 3933– 3939.
81. Kim, H., Miura, Y. and Macosko, C.W. (2010). Graphene/polyurethane nanocomposites for improved gas barrier and electrical conductivity. *Chemical Materials*, 22(7), 3441–3450.
82. Bunch, J.S., Verbridge, S.S., Alden, J.S., Zande, A.M.V.D., Parpia, J.M. and Craighead, H.G. (2008). Impermeable atomic membranes from graphene sheets. *Nano Letters*, 8(2), 2458–2462.
83. Lee, J. and Aluru, N.R. (2013). Water-solubility-driven separation of gases using graphene membrane. *Membrane Science*, 428(56), 546–553.
84. Wallace, G.G. (2007). Putting function into fashion: organic conducting polymer fibres and textiles. *Fibers and Polymers*, 8(4), 135–142.

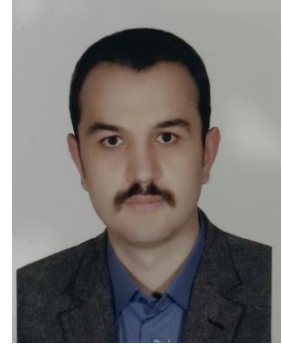
85. Uchida, S., Martinez, A., Song, Y.W. and Ishigure, T. (2009). Carbon nanotube-doped polymer optical fiber. *Optics Letters*, 34(21), 3077–3079.
86. Bao, Q., Zhang, H., Yang, J.X., Wang, S., Tang, D.Y., Jose, R., Ramakrishna, S., Lim, C.T. and Loh, K.P. (2010). Graphene– polymer nanofiber membrane for ultrafast photonics. *Advanced Functional Materials*, 20(10), 782–791.
87. Verdejo, R., Stampfli, R., Lainez, M., Mourad, S., Perez, M.A.R. and Bruhwiler, P. (2009). Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 69(9), 1564–1569.
88. Verdejo, R., Jell, G., Safinia, L., Bismarck, A. and Stevens, M.M. (2009). Reactive polyurethane carbon nanotube foams and their interactions with osteoblasts. *Biomedical Materials Research*, 88(12), 65–73.
89. Li, F., Yue, H., Yang, Z., Li, X., Qin, Y. and He, D. (2014). Flexible free-standing graphene foam supported silicon films as high capacity anodes for lithium ion batteries. *Material Letters*, 128(29), 132–135.
90. Chen, L., Chen, G. and Lu, L. (2007). Piezoresistive behavior study on finger-sensing silicone rubber/graphite nanosheet nanocomposites. *Advanced Functional Materials*, 18(15), 898–904.
91. Song, W.L., Cao, M., Lu, M.M., Bi, S., Wang, C.Y., Liu, J., Yuan, J. and Fan, L.Z. (2014). Flexible graphene/polymercomposite films in sandwich structures for effective electromagnetic interference shielding. *Carbon*, 66(16), 67–76.
92. Wang, G., Shen, X., Yao, J. and Park, J. (2009). Graphene nanosheets for enhanced lithium storage in lithium ion batteries. *Carbon*, 47(13), 2049–2053.
93. Verma, V.P., Das, S., Lahiri, I. and Choi, W. (2010). Large-area graphene on polymer film for flexible and transparent anode in field emission device. *Applied Physics Letters*, 96(6), 203–208.
94. Wetzela, B., Hauptert, F. and Zhang, M.Q. (2003). Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance. *Composites Science and Technology*, 63(20), 2055–2067.
95. Haque, A., Shamsuzzoha, M., Hussain, F. and Dean, D. (2003). S2-Glass/epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties. *Journal of Composite Materials*, 37(14), 1821–1837.
96. Uddin, M.F. and Sun, C.T. (2008). Strength of unidirectional glass/epoxy composite with silica nanoparticle-enhanced matrix. *Composites Science and Technology*, 68(22), 1637–1643.
97. Karippal, J.J., Narasimha Murthy, H.N., Rai, K.S., Sreejith, M. and Krishna, M. (2011). Study of mechanical properties of epoxy/glass/nanoclay hybrid. composites. *Journal of Composite Materials*, 45(30), 1893–1899.
98. Lin, L.Y., Lee, J.H., Hong, C.E., Yoo, G.H. and Advani, S.G. (2006). Preparation and characterization of layered silicate/glass fiber/ epoxy hybrid nanocomposites via

- vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM). *Composites Science and Technology*, 66(11), 2116- 2125.
99. Zulfli, N.H.M., AbuBakar, A. and Chow, W.S. (2014). Mechanical and thermal properties improvement of nano calcium carbonate- filled epoxy/glass fiber composite laminates. *High Performance Polymers*, 26(6), 223-229.
 100. Wang, X., Song, L., Pornwannchai, W., Hua, Y. and Kandola, B. (2013). The effect of graphene presence in flame retarded epoxy resin matrix on the mechanical and flammability properties of glass fiber-reinforced composites. *Composite A*, 53(2), 88–96.
 101. Hoseini, S.A. and Pol M. H. (2014). Investigation of the tensile and the flexural properties of the glass/epoxy composites reinforced with nanoclay particles. *Modares Mechanical Engineering*, 45(5), 24-32.
 102. Salehi, H. Salehi,M. (2015). Synthesis and Mechanical Properties Investigation of Nano TiO₂/Glass/Epoxy Hybrid. *Modares Mechanical Engineering*,49(3), 98-103.
 103. Pol M.H., Liaghat, G.H., Yeganeh, E.M. and Afrouzian, A. (2016). Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particles effects on mechanical properties of glass epoxy composites. *Composites Science and Technology*,74(7), 569-701.
 104. Hao, L. C. and Yu, W. D. (2010). Comparison of the morphological structure and thermal properties of basalt fiber and glass fiber. *Proceedings InternationalTextile Science and Technology Forum*. 34(6),47-52.
 105. Kamar, N.T. and Hossain, M.M. (2014). Interlaminar reinforcement of glass fiber/epoxy composites with graphene nanoplatelets *ScienceDirect Composites. Part A*. 32(4), 36-40.
 106. Tüzemen, M.Ç. (2015). *Karbon Nanotüp Ve Nanokil Katkili Civata Bağlantılı Karbon/Epoksi Nanokompozit*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KHAKZAD, Farnoud
Uyruğu : İran
Doğum tarihi ve yeri : 02/10/1985, Khoy
E-Posta : farnoudkhakzad@yahoo.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ İleri Teknolojiler	2017
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	2017
Lisans	Khoy islami azad üniversitesi	2009

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Kitap, Müzik, Film



GAZİ GELECEKTİR..