



T.C.  
Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü

NANO KOMPOZİT ELASTOMERİK ELEKTRİK  
İLETKEN MALZEMELERDE ÇATLAK OLUŞUM  
VE İLERLEMESİNİN DIC METODU YARDIMI  
İLE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Ahmad NASER ALDEEN

Yüksek Lisans Tezi



**NANO KOMPOZİT ELASTOMERİK ELEKTRİK  
İLETKEN MALZEMELERDE ÇATLAK OLUŞUM VE  
İLERLEMESİNİN DIC METODU YARDIMI İLE  
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Ahmad NASER ALDEEN**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANO KOMPOZİT ELASTOMERİK ELEKTRİK İLETKEN  
MALZEMELERDE ÇATLAK OLUŞUM VE İLERLEMESİNİN DIC METODU  
YARDIMI İLE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Ahmad NASER ALDEEN**

Prof. Dr. Murat YAZICI  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
OTOMOTİV ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

## TEZ ONAYI

Ahmad NASER ALDEEN tarafından hazırlanan "NANO KOMPOZİT ELASTOMERİK ELEKTRİK İLETKEN MALZEMELERDE ÇATLAK OLUŞUM VE İLERLEMESİNİN DIC METODU YARDIMI İLE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Murat YAZICI

**Başkan** : Prof. Dr. Murat YAZICI  
Bursa Uludağ Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi,  
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ  
Bursa Uludağ Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Doç. Dr. Ali Rıza MOTORCU  
Çanakkale On Sekiz Mart Üniversitesi.  
Mühendislik Fakültesi,  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

İmza

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel Eren  
Enstitü Müdürü

.../.../...

10.07.2019



**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

10.10.2019.



**Ahmad NASER ALDEEN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### NANO KOMPOZİT ELASTOMERİK ELEKTRİK İLETKEN MALZEMELERDE ÇATLAK OLUŞUM VE İLERLEMESİNİN DIC METODU YARDIMI İLE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

**Ahmad NASER ALDEEN**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Otomotiv Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Murat YAZICI

Doğal kauçuğun çatlak oluşumunu ve ilerleme direncini birçok faktör etkilemektedir. En önemli faktörlerden biri, kauçukta kullanılan dolgu maddesi tipidir. Son zamanlarda, iki boyutlu düzlemsel grafen (grafen nanoplakaları; GNP'ler) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) nanodolgular olarak mükemmel takviye etkinlikleriyle büyük dikkat çekmektedir. Bu nanodolgular, takviye olarak çok düşük oranlarda kullanıldığında bile, kauçukların sadece mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda çalışma ömrü (yorulma ömrü), elektrik iletkenliği, yırtılma direncinde iyileşmeler sağlamaktadır.

Bu çalışmada, iki aşamalı mekanik bir karıştırma yöntemiyle ana malzemesi SVR olan bir kauçuk karışımı (SVR, SBR ve CBR) ve nanodolgular karıştırılarak elektriksel iletkenliğe sahip iki nanokompozit numune grubu hazırlanmıştır. Birinci grup grafen nanoplakalar (GNP'ler) ile takviye edilirken, ikinci grup ise çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) ile takviye edilmiştir.

Deneysel olarak sanki-statik yüke maruz bırakılan tek kenarına kesik açılmış (düz çentik) numuneler ile çatlak başlangıcı tahrik edilmiştir. Elde edilen bu tek kenar kesikli numunelerde çatlak ilerlemesi ve elektriksel direnç ilişkisini belirlemek için çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çatlak ucuna yakın bölgedeki lokal birim uzama dağılımını araştırmak için Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) tekniği kullanılmıştır. Sonuçlar çatlak uzunluğu, grafen dolgu oranı ve elektriksel iletkenlik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için değerlendirilmiştir. GNP'ler, nanokompozitin yırtılma direncini olumsuz bir şekilde etkilerken, MWCNT'lerin etkisi yırtılma direncini artırma yönünde elde edilmiştir. Nanokompozitin yırtılma davranışında çatlak ucuna yakın alandaki lokal performansla çok yakın bir ilişkisi olduğu gözlemlenmiştir. Her iki nanokompozitin elektrik iletkenliği, nanodolgu maddesi tarafından oluşturulan ve elektrik direncini azaltan iletken ağ ile geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Grafen nanoplaka, Çok duvarlı karbon nanotüp, Karbon siyahı, Hibrit nanokompozit, Doğal kauçuk, Çatlak ilerlemesi, Yırtılma direnci, Elektriksel direnç, J-integral, DIC.

**2019, x + 91 sayfa.**

## ABSTRACT

MSc Thesis

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CRACK INITIATION AND PROPAGATION FOR ELECTRICAL CONDUCTIVE NANOCOMPOSITE ELASTOMER MATERIALS WITH DIC METHOD

**Ahmad NASER ALDEEN**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Automotive

**Supervisor:** Prof. Dr. Murat YAZICI

Many factors can influence the crack initiation and propagation resistance of the natural rubber. One of the most glaring factors is reinforcing filler of the rubber. Recently, graphene nanoplatelets (GNPs) and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) have attracted considerable attention due to their excellent reinforcing efficiency. When the nanofillers used even at very low loading as phr, could not only improve the mechanical properties of rubbers but also improved service life, supplied electrical conductivity, and developed wear resistance.

In this study, two groups of conductive nanocomposites were prepared by mixing a rubber mixture (SVR, SBR, and CBR) with different nanofillers by a two-stage mechanical mixing method. The first group was reinforced by GNPs, whereas the second group was reinforced by MWCNTs.

The quasi-static loading was implemented using single-edge notched specimens which were adopted to estimate the crack propagation and the electrical resistance relation. Digital Image Correlation (DIC) technique was used to investigate the local strains distribution in the area near the crack tip. The results evaluated to clarify the relationship between crack length, graphene filler ratio, and electrical conductivity properties. GNPs affected negatively on the compound's fracture resistance, whereas the MWCNTs had positive effect observed by increasing the fracture resistance of the compound. The fracture properties of the nanocomposite had a very close relationship with The local performance of the area near the crack tip. The electrical conductivity of both of nanocomposites was improved because of the conductive network, which was formed by nanofillers and reduced the electrical resistance.

**Keywords:** Graphene platelets, Multi-walled Carbon nanotubes, Carbon black, Hybrid nanocomposites, Natural rubber, Crack propagation, Fracture resistance, Electrical resistance, J-integral, DIC.

**2019, x + 91 pages.**

## TEŞEKKÜR

İlk emri “Oku” olan alemlerin rabbi Allah’a hamdu-senalar olsun. Alimlerin efendisi, ‘‘Beşikten mezara kadar ilmi arayınız’’ sözü ile ümmetini ilim öğrenmeye teşvik eden, her zamanda ve her mekanda kalbimizde yaşayan sevgili peygamberimiz Hazreti Muhammed (Allah’ın rahmeti ve selamı üzerine olsun)’e, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Otomotiv mühendisliği bölümünün bütün ailesine, özellikle ders aşamasında benim ve arkadaşlarım için her türlü gayret göstermiş olan hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez konumun belirlenmesi, yürütülmesi ve bütün çalışmalarım boyunca bana rehber olan, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen, öğrencisi olmaktan onur ve mutluluk duyduğum sayın hocam Prof. Dr. Murat YAZICI’ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez deneylerimde, deneyimlerimden ve yardımlarımdan faydalandığım, deney aşamasında yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen sayın Dr. Hasan KASIM’a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin Türkçe düzenlenmesi ve yazımında bana yardımcı olan sevgili kardeşim yüksek lisans öğrencisi Altuğ BAKIRCI’ya teşekkürlerimi sunarım.

Tüm bu zahmetli süreçte destek ve yardımlarını devamlı üzerimde hissettiğim, evlatları olmaktan büyük gurur ve mutluluk duyduğum sevgili babam Dr. Mahmoud NASER ALDEEN, annem İman KHORŞİD’e ve her zaman iyi ki var dediğim canım kardeşlerim Dr. Giyas, Alaa, Mohammad ve Abdullah’a teşekkürlerimi sunarım.

Ahmad NASER ALDEEN

10/7/2019

*Ahmad*



# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Hiperelastik malzemeler.....	3
2.1.1. Tanımlar .....	3
2.1.2. Hiperelastik malzemelerin sıkıştırılmazlığı .....	4
2.1.3. Hiperelastik malzemelerin modellenmesi .....	4
2.1.4. Malzeme parametrelerinin belirlenmesi.....	7
2.2. Elastomerik nanokompozitler .....	11
2.2.1. Dolgu malzemesinin etkisi .....	11
2.2.2. Kauçuk nanokompozitler .....	12
2.2.3. Takviye işleminde en-boy oranının rolü .....	13
2.2.4. Dolgu maddelerinin sınıflandırılması .....	14
2.2.5. Karbon esaslı nanodolgular.....	16
2.2.6. Hiperelastik nanokompozitlerin elektriksel özellikleri .....	20
2.2.7. Çift dolgulu nanokompozitler .....	22
2.3. Hiperelastik malzemelerde çatlak büyüme olgusu.....	23
2.3.1. Kırılma mekaniğine klasik yaklaşımlar .....	23
2.3.2. Kırılma mekaniği ve enerji kriteri.....	23
2.3.3. Elastomerin yırtılma parametreleri .....	24
2.3.4. Numune geometrileri .....	28
2.4. Dijital görüntü Korelasyonu (DIC) .....	31
2.4.1. DIC teknolojisi nedir? .....	31
2.4.2. Dijital görüntü korelasyonu tekniği nasıl uygulanır?.....	32
2.4.3. Dijital görüntü korelasyonu tekniğinin avantajları.....	33
2.4.4. Ncorr yazılımı .....	34
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	41
3.1. Giriş.....	41
3.2. Malzemelerin hazırlanması .....	41
3.2.1. Malzeme üretimi .....	41
3.2.2. Benek deseninin hazırlanması.....	47
3.2.3. Tek kenar kesikli numune geometrisi .....	48
3.3. 2D-Ncorr uygulamasının doğruluğu .....	50
3.4. Yırtılma direncinin araştırılması .....	51
3.5. Elektriksel özelliklerin araştırılması .....	55
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	56
4.1. 2D-Ncorr uygulamasının doğruluğu .....	56
4.2. Yırtılma direncinin araştırılması .....	56

4.2.1. Grafen nanoplaka dolgulu nanokompozit .....	56
4.2.2. MWCNT dolgulu nanokompozit .....	66
4.3. Elektriksel özelliklerin araştırılması .....	70
4.3.1. Grafen nanoplaka dolgulu kauçuğun elektriksel özellikleri .....	70
4.3.2. MWCNT dolgulu kauçuğun elektriksel özellikleri.....	72
5. SONUÇ .....	73
KAYNAKLAR .....	75
EKLER.....	79
EK 1: Malzeme parametrelerinin belirlenmesi (uygulama).....	80
EK 2: 2D-Ncorr uygulamasının doğruluğunu isbat eden MATLAB kodu.....	86
EK 3: Malzemenin J-integral – yer değiştirme eğrisini sağlayan MATLAB kodu. ....	88
EK 4: Çatlak ucundan başlayan x yönü boyunca lokal dikey birim uzama dağılımı veren MATLAB kodu.....	90
ÖZGEÇMİŞ .....	91



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
a	Kesik uzunluğu
C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub>	Hiperelastik malzeme parametreleri
E <sub>yy</sub>	Lokal dikey birim uzama
I <sub>1</sub> , I <sub>2</sub> , I <sub>3</sub>	Birim uzama sabitleri
J-değer	Alan biriminin başına yırtılma enerjisi
J <sub>IC</sub>	Alan biriminin başına kritik yırtılma enerjisi
T <sub>R</sub>	Yırtılma modülü
U	Yer değiştirme enerjisi
W	Yer değiştirme enerjisinin yoğunluğu
λ	Uzama oranı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
CB	Karbon siyahı
CBR	<i>cis</i> polibütadien kauçuğu
CTOD	Çatlak ucu açma deplasmanı
DIC	Dijital görüntü korelasyonu
GNP	Grafen nanoplaka
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
NR	Doğal kauçuk
ROI	İlgi bölgesi
ROV	Görüş bölgesi
SBR	Stiren-bütadien kauçuğu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SENT	Kesikli Çekme Testi
SVR	Standart Vietnam kauçuğu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Elastik ve hiperelastik malzemelerin mekanik performansı .....	3
Şekil 2.2. Drucker'a göre stabil ve instabil malzemelerin mekanik performansı.....	9
Şekil 2.3. Farklı dağılım şartlarında %35 oranında Silika dolgulu kompozitlerin mekanik özellikleri .....	13
Şekil 2.4. Karbon siyahı dolgulu (aktif) ve dolgusuz (inaktif) kauçuklar arasındaki mekanik özelliklerin karşılaştırılması.....	14
Şekil 2.5. Nanodolgu yapısı (a) Nanopartikül, (b) Nanofiber, (c) Nanoplaka.....	15
Şekil 2.6. Karbon esaslı nanodolgular: (a) Grafit, (b) Grafen nanoplakaları, (c) Tek grafen plakası, (ç) Tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT), (d) Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) .....	16
Şekil 2.7. Silikon kauçuğu (metil-vinil-silikon kauçuğu; MVQ)'nun grafen nanoplakaları dağılımının SEM görüntüsü .....	17
Şekil 2.8. GNPs/MVQ kompozitinin dolgu oranının çekme dayanıklılığı ve modülünün üzerindeki etkisi.....	17
Şekil 2.9. GNPs/MVQ kompozitinin dolgu oranının birim uzama ve sertliği üzerindeki etkisi .....	18
Şekil 2.10. CNT/SiR kompozitinin dolgu oranının mekanik özelliklerinin üzerindeki etkisi: (a) dayanıklılık, (b) birim uzama, (c) sertlik.....	19
Şekil 2.11. CNT dolgulu kauçuğun 7 phr oranında CNT dağılımının SEM görüntüsü..	19
Şekil 2.12. Farklı oranlarda dolgu içeren GNPs/MVQ kompozitlerin frekans ve elektriksel iletkenlik arasındaki ilişkisi.....	21
Şekil 2.13. Dolgu oranının CNT/SiR kompozitinin elektriksel iletkenliği üzerindeki etkisi .....	21
Şekil 2.14. SENT numunesi: (a) deforme olmayan SENT numunesinin geometrisi; (b) (c) Yük altındaki numunenin sırasıyla yandan ve önden görünümü; (d) önden görünüme göre çatlak başlarken CTOD görüntüsü.....	26
Şekil 2.15. Genel olarak kritik enerji ( $J_{IC}$ ) ile çatlak ucu açma deplasmanı (CTOD) arasındaki ilişki .....	27
Şekil 2.16. (a) Farklı oranlarda CNT'ye sahip CNT/CB/SBR kompozitinin $J$ -değeri ile CTOD ilişkisi, (b) CNT'nin farklı oranlarında çatlak eksenini boyunca birim uzama; $x=0$ çatlak ucunun konumudur .....	28
Şekil 2.17. Kesikli Çekme Testi'nin (SENT) tek kanarına kesik açılmış numunesi .....	29
Şekil 2.18. Düzemsel çekme (Basit kayma) deney numunesi .....	30
Şekil 2.19. DIC analizinin aşamaları.....	31
Şekil 2.21. DIC tekniğinden elde edilen çapsal basmaya maruz kalan halka için yer değiştirme dağılımının haritası. (a) Ncorr (b) Vic 2D.....	34
Şekil 2.22. Altküme (Subset) .....	35
Şekil 2.23. İki subset'in korele işlemi.....	35
Şekil 2.24. DIC metodunun korelasyon temeli .....	37
Şekil 2.25. Ncorr'un Grafik kullanıcı arayüzü (GUI) .....	38
Şekil 3.1. Malzemenin üretme aşamaları.....	42
Şekil 3.2. Dolgusuz kauçuk karışımının SEM görüntüsü .....	44
Şekil 3.3. 1 phr oranında grafen nanoplaka dolgulu nanokompozitin SEM görüntüsü ..	44
Şekil 3.4. 4 phr oranında grafen nanoplaka dolgulu nanokompozitin SEM görüntüsü ..	45

Şekil 3.5. 8 phr oranında grafen nanoplaka dolgulu nanokompozitin SEM görüntüsü ..	45
Şekil 3.6. 1 phr oranında MWCNT dolgulu nanokompozitin SEM görüntüsü .....	46
Şekil 3.7. 2 phr oranında MWCNT dolgulu nanokompozitin SEM görüntüsü .....	46
Şekil 3.8. 3 phr oranında MWCNT dolgulu nanokompozitin SEM görüntüsü .....	47
Şekil 3.9. Benek deseninin hazırlanma aşamaları: a) kauçuk esaslı boya hazırlanması, b) benek deseni hazırlanması, c) 45°C altında 15 dk boyunca beneklerin vulkanizasyonu .....	48
Şekil 3.10. Tek kenar kesikli örneğin geometrisi.....	49
Şekil 3.11. Kesik açılma işlemi.....	49
Şekil 3.12. Hazırlanan örnekler: a) grafen nanoplaka dolgulu kauçuk, b) MWCNT dolgulu kauçuk; malzemeyi tanımlayıcı ifadenin harflerle ifade edilen kısmı dolgu malzemesini (MWCNT-1 vb) ve sağındaki sayı da dolgu malzemesi oranının phr değerini gösterir.....	50
Şekil 3.13. Soldan sağa 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 mm'lik çatlak ucu açma deplasmanı (CTOD) .....	53
Şekil 3.14. Dört problu elektriksel direnç ölçme yöntemi .....	55
Şekil 4.1. Deneysel çekme testi ile Ncorr uyumluluğu: a) deforme olmayan numune, b) %200 birim uzama göstermiş numune, c) %200'e kadar olan birim uzamada gerilme – birim uzama eğrisi.....	56
Şekil 4.2. Farklı grafen nanoplaka dolgulu nanokompozitlerden seçilmiş 3 mm kesikli numunelerin mekanik performansı .....	57
Şekil 4.3. GNP-1'in farklı kesik boylarındaki numunelerinin mekanik performansı .....	58
Şekil 4.4. GNP-4'in farklı kesik boylarındaki numunelerinin mekanik performansı .....	59
Şekil 4.5. GNP-8'in farklı kesik boylarındaki numunelerinin mekanik performansı .....	60
Şekil 4.6. GNP-1 numunesinin 100 mm uzanmasına kadar depolanmış yer değiştirme enerjisi – çatlak uzunluğu eğrisi .....	61
Şekil 4.7. GNP-1'in J-değeri-yer değiştirme eğrisi.....	61
Şekil 4.8. GNP-4'in J-değeri-yer değiştirme eğrisi.....	62
Şekil 4.9. GNP-8'in J-değeri-yer değiştirme eğrisi.....	62
Şekil 4.10. Farklı GNP dolgulu nanokompozitlerin J-değeri – CTOD eğrisi .....	63
Şekil 4.11. %100 global birim uzamada çatlak ucuna yakın alandaki (5x5 mm <sup>2</sup> ) Ncorr-2D ile elde edilen lokal dikey birim uzama dağılım haritası; Konturların paralel hale geldiği nokta, çatlak ucundaki lokal birim uzamanın etkisinin sona erdiğini gösterir .....	64
Şekil 4.12. Global birim uzamanın %100 olduğundaki farklı GNP kompozitleri için çatlak ucundan başlayarak x yönü boyunca lokal dikey birim uzama dağılımı. Karşılaştırmak için Her kompozitten kesigi 3 mm olan numune seçildi .....	64
Şekil 4.13. Nanokompozitlerin %100 uzanmalarına kadar depolanmış yer değiştirme enerjisinin yoğunluğu .....	65
Şekil 4.14. MWCNT-1'in J-değeri-yer değiştirme eğrisi .....	66
Şekil 4.15. MWCNT-2'in J-değeri-yer değiştirme eğrisi .....	66
Şekil 4.17. MWCNT dolgulu nanokompozitin J-değeri – CTOD eğrisi; her nanokompozitten kesigi 5 mm olan numune seçildi .....	67
Şekil 4.18. Global birim uzama %50 olduğunda farklı MWCNT kompozitleri için çatlak ucundan başlayarak x yönü boyunca lokal dikey birim uzama dağılımı; Karşılaştırmak için her kompozitten kesigi 5 mm olan numune seçildi .....	69
Şekil 4.19. Elektriksel direnç - Çatlak ilerlemesi eğrisi.....	71
Şekil 4.20. GNP dolgulu nanokompozitin test boyunca elektriksel direncinin değişimi	71

Şekil 4.21. MWCNT dolgulu nanokompozitin test boyunca elektriksel direncinin değişimi .....72





## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Grafen nanoplaka dolgulu kompozitin içerikleri; phr, her yüz partikülde nanodolgu partikül sayısı .....	42
Çizelge 3.2. MWCNT dolgulu kompozitin içerikleri .....	43
Çizelge 4.1. Farklı GNP dolgulu nanokompozitlerin yırtılma parametreleri.....	63
Çizelge 4.2. Çatlak ucuna yakın olan alanın parametreleri.....	65
Çizelge 4.3. Farklı MWCNT dolgulu nanokompozitlerin yırtılma parametreleri .....	68
Çizelge 4.4. %50 birim uzamaya kadar depolanan yer değiştirme enerjisinin yoğunluğu .....	69
Çizelge 4.5. Çatlak ilerlemesinin elektriksel direnç ile ilişkisi.....	71



## 1. GİRİŞ

Uluslararası Kauçuk Çalışma Grubu'na (IRSG) göre, küresel kauçuk talebinin 2017'de 28,4 milyon ton ve 2018'de 29,3 milyon ton olduktan sonra 2019'da yüzde 2,5 artarak 30 milyon tona yükselmesi bekleniyor. Bu istatistik raporları insanların günlük yaşamında kauçuğun kaçınılmaz bir madde olduğunu göstermektedir.

Saf kauçuklara endüstride genel itibariyle rastlanmaz; kauçuklar çoğunlukla imalat sırasında kauçuğun performansını iyileştirmeyi amaçlayan bazı değişikliklerden sonra üretilirler. Bu değişiklikler arasında en önemli olanı, takviye işlemidir.

Kauçuk benzeri malzemelerin takviyelendirilmesi, yüksek mekanik ve elektriksel özelliklere sahip bazı katkı maddelerinin eklenmesiyle gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda, nanobilimin gelişmesi sayesinde nano dolgu maddesi olarak adlandırılan daha verimli katkı maddeleri üretilmiştir. Bu dolgu maddeleri eklendikten sonra oluşan karışımlara kauçuk nanokompozitler adı verilmektedir. Kauçuk benzeri malzemelerin bu katkı maddeleri ile güçlendirilmesi, daha iyi mekanik özellikler, daha iyi yırtılma direnci dolayısıyla daha fazla servis ömrü gibi ileri özellikler kazandırmaktadır.

Takviye edilmiş kauçuk benzeri malzemeler, otomotiv endüstrisi, tekstil, gıda, hayvancılık ve inşaat gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Son zamanlarda, bu malzemelerin elektrikli ve elektronik cihazlarda kullanılmasıyla birlikte elektriksel özelliklerin incelenmesine ayrı bir önem verilmektedir.

Bu çalışmada, hiperelastik kompozitte nanodolgu oranının malzemenin yırtılma ve elektrik özelliklerine etkisinin belirlenmesi ve çatlak ilerlemesi ile elektriksel direncin ilişkisinin incelenmesi amacıyla, farklı oranlarda karbon esaslı nanodolgularla takviye edilmiş kauçuk nanokompozitlerin mekanik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir.

Tezin ilk bölümünde, hiperelastik malzemeler, nano dolgular ve özellikleri, kırılma mekaniği ve bazı önemli alanların yerel performansını optik olarak incelemek için seçilen

dijital görüntü korelasyonu (DIC) teknolojisi ile ilgili önemli bilgi ve teorileri içeren bir kaynak araştırmasını kapsayan bilgiler sunulmuştur.

İkinci bölümde, çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve grafen nanoplakaları ile takviye edilmiş kauçuk nanokompozitlerin yırtılma özelliklerini incelemeyi amaçlayan deneysel uygulamalar hakkında bilgi verilmiştir. Bu çerçevede dolgu oranının yırtılma direnci üzerindeki etkisi açıklanmıştır. Daha sonra bahsedilen kauçuk nanokompozitlerin testler sırasında ve çatlak ilerlemesinde elektriksel özelliklerinin değişimi incelenmiştir.

Araştırılan malzemeler ve çalışma yöntemi üçüncü bölümde açıklanmıştır. Sonuçlar dördüncü bölümde verilmiş olup, beşinci bölümde özetlenmiştir. Son olarak ise MATLAB programla yazılan ve bu çalışmada kullanılan bazı kodlar ekler kısmında verilmiştir.

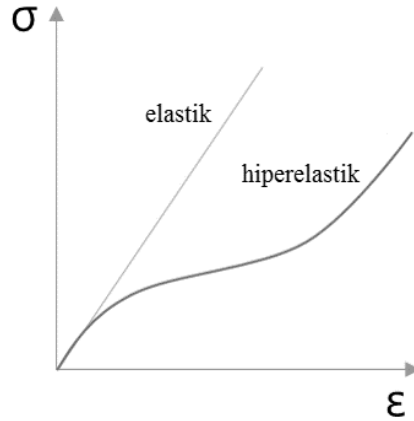
## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Hiperelastik malzemeler:

#### 2.1.1. Tanımlar:

Hiperelastik malzemeler, çok büyük birim uzamalara (%700'e kadar) maruz kaldıklarında elastik olarak tepki göstermeye yatkın ve tamamen orijinal haline geri dönebilir bir malzemedir. Ayrıca nonlinear yapıda büyük şekil değiştirme kabiliyetine sahiptir.

Gerilim ile birim uzama arasındaki ilişkiyi lineer olarak tanımlayan Hooke kanunu, çelik, alüminyum, plastik vb. gibi çok bilinen mühendislik malzemelerini lineer elastik davrandığı bölgede doğru bir şekilde tanımlamaktadır. Bu, Hooke kanununun, dış kuvvetlere maruz kaldığında lineer performansı gösteren malzemeler için uygulanabileceği anlamına gelir. Ancak, bu kanun, gerilim-birim uzama ilişkisi lineer olmayan, yüksek deformasyona sahip olan ve de sıkıştırılmayan (Poisson oranısı $\approx 0.5$ ) hiperelastik gibi malzemeleri tanımlamak için uygun değildir (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1.** Elastik ve hiperelastik malzemelerin mekanik performansı

Kauçuk-benzer malzemeler, dış kuvvetlere maruz kaldığında nonlinear davranış gösteren malzemeler arasındadır. Bu türlü malzemeleri karakterize edilmek için kullanılan model, yer değiştirme enerjisi yoğunluğu fonksiyonundan türetilmektedir (Kumar ve Rao 2016, Mooney 1940). Benzer bir şekilde dolgu malzemesiyle takviye edilmiş kauçuk

kompozitler hiperelastik idealizasyonu yapılarak, normal bir hiperelastik malzeme gibi, modellenmektedir.

Kauçuk-benzer malzemeleri tanımlamak için Gerinim enerjisi yoğunluğu fonksiyonuna dayanan ilk matematiksel model R. Rivlin ve M. Mooney tarafından ortaya konmuştur. Mooney-Rivlin ilişkisi hiperelastik malzemeleri karakterize etmek için Polynomial bir modeldi. Ardından, Mooney-Rivlin'in modelini Neo-Hookean, Ogden, Arruda-Boyce ve Yeoh gibi diğer temel modeller takip etti. Kullanılacak temel model mevcut verilere ve deneysel birim uzama değerine göre seçilir (örnek, Neo-Hookean için %30, Mooney-Rivlin için %30 ÷ 200, Arruda-Boyce için %300 ve Ogden için %700) (Kim ve ark. 2012).

### **2.1.2. Hiperelastik malzemelerin sıkıştırılamazlığı:**

Genel olarak, kauçuk-benzer malzemeler de dahil olmak üzere hiperelastik malzemeler, kayma elastikliğinin yüksekliğine rağmen küçük bir sıkışabilirliğe sahiptir. Bu küçük sıkışabilirlik, 3B problemlerde veya deneydeki numune çok sınırlı olduğunda dikkate alınmalıdır. Ancak, 2B elemanlar için veya çok kısıtlı olmayan serbest numuneler durumunda ciddi bir etkisi yoktur (Anonim 2019a).

Deneysel bölümde kullanılacak numune, diğer boyutlarına göre çok küçük bir kalınlığa sahip olduğundan, iki boyutlu bir tabaka sayılıp sıkıştırılamaz bir malzeme olarak kabul edilecektir.

### **2.1.3. Hiperelastik malzemelerin modelleri:**

#### **Potansiyel yer değiştirme enerjisi yoğunluğunun fonksiyonu:**

Yer değiştirme enerjisi yoğunluğu fonksiyonu, polinomsal hiperelastik model olarak da adlandırılır (Rivlin ve Saunders 1951). Mooney-Rivlin modeli, yer değiştirme enerjisi yoğunluğu fonksiyonunun basitleştirilmiş bir halidir. Bu fonksiyon aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (2.1)$$

$C_{ij}$  ve  $D_i$ , malzeme parametreleri,  $I_1$ ,  $I_2$  birim uzama sabitleri ve  $J_{el}$  elastik hacim oranıdır. Bu model iki bölümden oluşmaktadır; birincisi kayma deformasyonunu açıklar, ikincisi ise malzemenin sıkışabilirliği ile ilgilidir. Daha önce açıklandığı gibi, çoğunlukla hiperelastik malzemeler sıkıştırılmaz olarak kabul edilir, bu nedenle ikinci kısım sıfıra eşitlenir. ( $J_{el} = 1$ ).

### **Neo-Hookean:**

Neo-Hookean modeli, hiperelastik malzemeleri karakterize etmek için en basit modellerden biridir. Yer değiştirme enerjisi yoğunluğu fonksiyonundan türetilmektedir. Lineer elastik malzemeleri tanımlayan Hook'un kanununa benzer. Başlangıçta lineer bir gerilim-birim uzama ilişkisi sağlar, ancak belirli bir noktada nonlineer ilişkiye dönüşür.

$$W = C_1 (I_1 - 1) \quad (2.2)$$

$W$ , yer değiştirme enerjisi yoğunluğudur;  $C_1$ , bir materyal parametresidir;  $I_1$ , ilk birim uzama sabitidir. Neo-Hookean modeli, diğer modellere göre düşük birim uzamalarda kullanılabilir.

### **Mooney-Rivlin:**

Bu model, R. Rivlin ve M. Mooney tarafından tanıtılmıştır (Selvadurai 2006). Sol *Cauchy-Green* deformasyon tensörü  $B$ 'nin ilk iki sabitten oluşan bir birleşimidir (Menderes ve ark. 1999). Neo-Hookean'inkilerden daha doğru sonuçlar vermektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi Mooney-Rivlin modelinde malzeme sıkıştırılmaz kabul edilir, kayma deformasyonu bölümünde ise sadece ilk iki sınırı alınarak potansiyel enerji fonksiyonunun basit bir haline dönüştürülür.



$$W = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3) \quad (2.3)$$

$C_1$  ve  $C_2$ , malzemenin parametreleridir.

Mooney-Rivlin modelindeki sabitler, malzemenin kayma modülü  $G$  ile ilişkilidir:

$$G = 2 (C_1 + C_2) \quad (2.4)$$

Çeşitli yapılar için Mooney-Rivlin modelinin, yaklaşık olarak %200'e kadar olan birim uzamalarda doğru sonuçlar verdiği bilinmektedir.

### **Yeoh:**

Bu model yalnızca ilk birim uzama sabitini kullanır. Yeoh (1993), diziyi üç terim ile sınırlandırmıştır; ancak daha sonraki çalışmalarda üçten daha fazla terim kullanılmıştır (Selvadurai 2006).

$$W = \sum_{i=1}^N C_i (I_1 - 3)^i \quad (2.5)$$

### **Ogden:**

Ogden modeli, gerilim-birim uzama eğrisi nonliner olan hiperelastik malzemeyi tanımlamak için kullanılan modellerden biridir. 1972'de, Ogden tarafından ortaya koyulan denklem, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (2.6)$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  temel uzanma oranlarıdır.  $\mu_i$  ve  $\alpha_i$  malzeme sabitleridir.

$$\lambda = \varepsilon + 1 \quad (2.6a)$$

Ogden modeli yaygın bir şekilde kullanılmaktadır; çünkü test verilerinin direkt kullanılmasını sağlar ve %700'e kadar olan birim uzamalarda deneysel sonuçlara gayet iyi bir uyum gösterir.

#### 2.1.4. Malzeme parametrelerinin belirlenmesi:

Hiperelastik malzemeler, parametreleri belirlenerek tanımlanabilir, böylece malzemenin davranışını belirleyen hiperelastik model belirlenir. Yer değiştirme enerjisi yoğunluğu fonksiyonundan elde edilen hiperelastik modellerin parametreleri (yani  $C1, C2, C3...$ ) genel olarak istatistiksel analizle belirlenir. Bu analiz, MATLAB veya PYTHON gibi kodlama programlarından birinde deneysel veriler kullanılarak bir denklem sistemi ile tanımlanır. Daha sonra bu sistem malzemenin parametreleri olan ortak çözümleri elde etmek için çözülecektir. Seçilen ortak çözüm, çoğunlukla en küçük kareler kriteri olan amaç fonksiyonunu yerine getirmelidir (Wu ve ark. 2016).

$$\min: S = \sum_{q=1}^p w_q \left( \sum_{i=1}^{n_q} ((f_q)_i - (\sigma_q)_i)^2 \right) \quad (2.7)$$

Bu denklemde;  $Wq$ , bir deney tipinin ağırlığıdır (deneyin çözüme katılma oranı);  $n_q$ , her deney tipi için deneysel veri sayısını;  $q$ , deney tipi indeksi;  $p$ , test tipi sayısı;  $(f_q)_i$ , denklem tarafından tahmin edilen değeri (teorisel veri) ve  $(\sigma_q)_i$  ise deneysel değeri gösterir.

Bulunan model, bu modelin parametreleri elde edildiğinde yalnızca hesaplamaya katılan testlerin sonuçlarını tahmin etmek için kullanılır. Yani, sadece tek eksenli çekme testi dikkate alındığında bulunan model, iki eksenli çekme veya saf kesme testinden elde edilen sonuçları öngörmeye geçersiz olur (Charlton ve ark. 1994). Bu nedenle daha geçerli veya daha kapsamlı bir model elde etmek için, malzeme parametreleri tüm test türleri göz önüne alınarak elde edilmelidir (Wu ve ark. 2016). Genel olarak, bu malzemenin parametreleri belirlenmesinde, dört tür test dikkate alınmaktadır,

- Tek eksenli çekme testi.
- Eş iki eksenli çekme testi.
- Düzlemsel çekme (basit kayma) testi.
- Hacimsel çekme testi.

Hacimsel çekme ve sıkıştırma testi sadece 3D analizlerinde veya sınırlandırılmamış numunelerde sıkıştırılabilirlik göz ardı edilemediğinde gereklidir, bu nedenle bu çalışmada ihmal edilecektir.

Birim uzama sabitleri  $I_1$ ,  $I_2$  ve  $I_3$ , sol *Cauchy-Green* deformasyon tensörü  $B$ 'den (Treloar 1973) elde edilir ve bu ifadeler aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\
 I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\
 I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Genel olarak, hiperelastik malzemeler sıkıştırılmaz maddeler olarak kabul edildiğinden birim uzama sabitlerinin hesaplanması aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\
 I_2 &= \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} \\
 I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1
 \end{aligned}
 \tag{2.8a}$$

Rivlin (1956), nominal gerilmeler  $T$  ile temel uzanma oranları ( $\lambda = \mathcal{E} + I$ ) arasındaki diferansiyel denklemleri oluşturmuştur;  $W$ , yer değiştirme enerjisi yoğunluğudur.

Tek eksenli çekme testi:

$$T = 2(1 - \lambda^{-3}) \left( \lambda \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)
 \tag{2.9}$$

Eş iki eksenli çekme testi:

$$T=2(\lambda-\lambda^{-5})\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_2}\right) \quad (2.10)$$

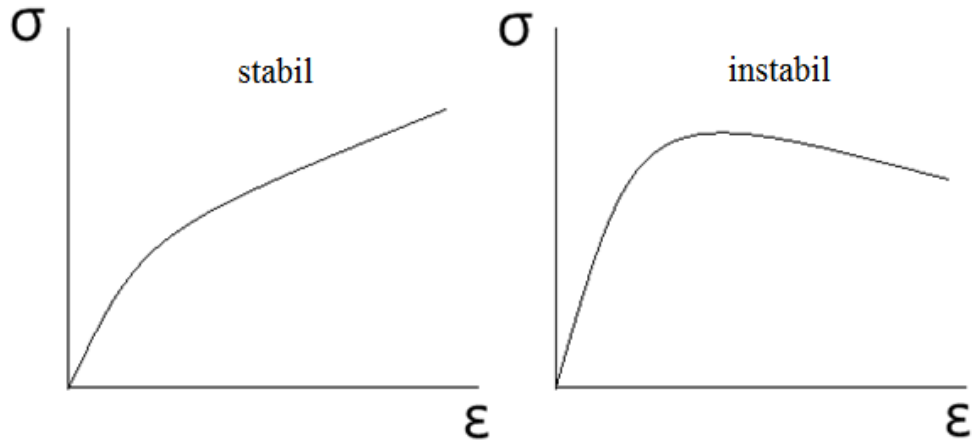
Düzlemsel çekme (Basit Kayma) testi:

$$T=2(\lambda-\lambda^{-3})\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2}\right) \quad (2.11)$$

Not: Temel hiperelastik modeli, bir malzemenin stabil olup olmadığına karar veren Drucker kriterini sağlamalıdır. Drucker, tipik malzeme çekme testi sırasında gerilme-birim uzama eğrisinin test sonunda yumuşama bölgesine sahip olmaması gerektiğini ortaya atmıştır, aksi takdirde bu malzeme instabil malzeme olarak kabul edilmektedir (Şekil 2.2). Böylece Drucker'ın stabilite kriteri aşağıda gibi ifade edilebilmektedir:

$$\sum_i \partial \sigma_i \partial \varepsilon_i \geq 0 \quad (2.12)$$

$\partial \sigma_i$ , temel Cauchy gerilme değişimi ve  $\partial \varepsilon_i$  ise  $\partial \sigma_i$ 'ye karşılık gelen birim uzamanın değişimidir.



**Şekil 2.2.** Drucker'a göre stabil ve instabil malzemelerin mekanik performansı

Daha önce belirtilen tüm noktaları dikkate alarak, malzeme parametrelerinin hesaplanması aşağıdaki adımlarla açıklanabilir:

- 1- Hazırlanacak modelin amacına ve çalışma esnasında oluşacak birim uzama sınırına bağlı olarak bir hiperelastik model seçilir.
- 2- Tek eksenli, çift eksenli ve basit kayma testleri için uzanma oranları ile nominal gerilimi bağlayan Rivlin'in denklemleri uygulanır.
- 3- Her bir test tipi için gerilme-uzanma oranı ilişkileri elde etmek için birim uzama sabitlerine göre seçilmiş yer değiştirme enerjisi yoğunluğu fonksiyonu türetilir.
- 4- İlişkilerde deneysel değerlerin kullanıldığı, bilinmeyenleri malzeme parametreleri olan bir denklem sistemi kurulur.
- 5- Matlab veya Python da kriteri en küçük kareler olan bir istatistiksel analiz uygulandıktan sonra ortak çözümler elde edilir.
- 6- Drucker'in stabilite şartları uygulanır.

Not: Bu tez çalışmasında, Hiperelastik malzemenin parametreleri belirlemek için MATLAB'la bir kod hazırlanmıştır, kodun doğruluğunu ölçebilmek için hazırlanan kodtan çıkan sonuçların Abaqus manual'da (Anonim 2019a) bulunan bir örnekle karşılaştırması araştırmaya eklenmiştir (EK 1).

## **2.2. Elastomerik nanokompozitler:**

### **2.2.1. Dolgu malzemesinin etkisi:**

Genel olarak, dolgular malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Bu amaca ulaşmak için geçen yüzyılda karbon siyahı ve silika gibi geleneksel dolgu maddeleri kullanılmıştır.

Doldurulmuş bir elastomerin takviye seviyesi, dolgu en-boy oranına, dolguların oryantasyonuna, ilave dolgu ve kauçuk partikülleri arasındaki etkileşim yüzeyine bağlıdır. Yani daha verimli bir takviye işleminin, dolgu maddelerinin daha fazla dağıtılmasını ve daha ince olmasını gerektirir. Ayrıca verimli bir takviye işlemi mekanik özelliklerin iyileşmesini de sağlar (Bokobza 2017). Geleneksel dolgu malzemeleri büyük ve kompleks yapıya sahip olduğundan, kompozitte ince dağılımı sağlayabilmek için karıştırmacının büyük kesme kuvvetlerini karşılaması gerekir. Bundan dolayı, bu türlü dolguların kullanımı sınırlı gerçekleşir.

Nanobilim ve nanoteknoloji son yıllarda çok disiplinli alanlarda çığır açıcı bilim dalları olarak kabul edilmektedir. Teknolojik uygulamalardaki çeşitlilik açısından, nanoteknoloji benzersiz yenilik ve çok yönlülük sunmaktadır.

Nanobilim alanındaki çalışmalar sayesinde, grafit, grafen, ve karbon nanotüp gibi nanodolgular ortaya çıkmıştır. İnce boyutları nedeniyle nanodolgular, dolgu ve kauçuk partikülleri arasında daha büyük etkileşim alanı sağlamaktadır. Bundan dolayı, nanodolgular, matris malzemelerini geleneksel dolgulardan daha verimli bir şekilde takviye etmekte ve daha verimli kompozitler elde edilmesini sağlamaktadır.

Dahası yüksek kullanılan nanodolgu oranı kompozitin ağırlığının artmasına yol açar. Arroyo ve ark. (2003), 10 phr organokil doğal kauçuk (NR)'nin mekanik özelliklerinin 40 phr karbon siyahlı NR ile karşılaştırılabilir olduğunu ortaya koymuştur. Kısacası, nanodolguların kullanılması kompozitin ağırlığının önemli ölçüde azalmasını sağlamaktadır.



### 2.2.2. Kauçuk nanokompozitler:

Son yıllarda, hem endüstri hem de üniversitelerdeki araştırmacılar ilgilerini, geleneksel dolgulu polimerlerin yerine çığır açıcı bir alternatif olan polimerik nanokompozitlere odaklamışlardır. Geleneksel kompozitlerin aksine, nanokompozitlerde takviye edici faktör, takviye malzemesinin en az bir boyutunun 1-100 nm seviyesinde olmasıdır.

Genel olarak kauçuk nanokompozitler, geleneksel dolgulu kompozitlere kıyasen, avantajlı mekanik özellikler, daha yüksek elastik modül, daha düşük su hassasiyeti ve daha düşük gaz geçirgenliği gösterir. Bununla birlikte nanokompozitler, nanodolguların sunduğu avantajları da kazanmaktadır:

1. Nanodolguların takviyesi geleneksel dolgularınkinden daha etkilidir, boyutları nano mertebesinde olması sebebiyle nanodolguların elastomer partikülleriyle sürtünmesi daha düşük olacaktır; bu matris özelliklerine olumlu bir etki olarak yansımakta ve düşük maliyetli ve kolay işlenebilirliğe yol açmaktadır.
2. Yüzey alanlarının artmasından dolayı arayüzde iyi yapışma sağlayarak nanokompozitlerde matrisin yük transferini artırır.
3. Nanodolguların küçük boyutları nedeniyle arayüzdeki çatlak yayılmasını artırıp, hem dayanıklılığını hem de çatlak direncini güçlendirmektedir.
4. Nano boyutlarından dolayı nano dolgu maddeleri, kauçuk karışımlarında homojen olarak yayılabilir, bu da etkileşim alanını artırıp takviye işlemini iyileştirir.

Takviye maddelerinin, partikül büyüklüğünün, yapısının ve yüzey özelliklerinin, takviye yeteneklerini belirleyen üç ana faktör olduğu iyi bilinmektedir. Partikül büyüklüğü bu üç faktör arasında birincil belirleyicidir (Hamed 2000).

Nanotakviye işlemi genel malzeme performansını arttırmasına rağmen, nanokompozitlerin karşılaştığı zorluklar vardır:

1. Nanopartiküller imalat işlemleri sırasında toplanmaya yatkındır. Aşırı partiküllerin toplanması nanokompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini düşürür. Nanodolguların matris içinde homojen dağılması, yüksek performanslı nanokompozitler elde etmek için kritik öneme sahiptir.

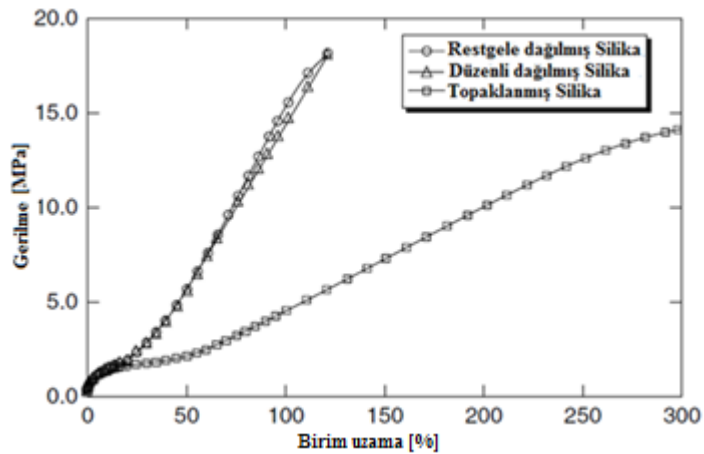
2. Nanodolguların üretimi, kullanımı ve imhasında sağlık ve çevresel tehditler ortaya çıkabilir. Nanopartiküller vücudun doğal savunmasına zarar verebilir ve bazı alerjik reaksiyonların ortaya çıkmasına neden olabilir. Nanoteknoloji endüstrisindeki işçiler, yüksek yoğunluklarda nanopartiküllere maruz kaldıklarından riskli çalışma koşulları içerisindeyler. Zaten hava kirliliğine sebep olan nanopartiküllerin, kimyasal ince parçacıklarından dolayı akciğere, 50 kat daha fazla zarar verebileceği bilinmektedir.

### 2.2.3. Takviye işleminde en-boy oranının rolü:

Daha önce belirtildiği gibi takviye işlemi sonrası, dolgu partiküller birbirleriyle ve kauçuk matrisiyle etkileşim içindedir. Takviye işleminin anlaşılmasında başrol oynayan anahtar kavram olarak betimleyebileceğimiz özellik en-boy oranıdır.

Daha yüksek bir en-boy oranı, dolgunun hacim biriminde daha fazla etkileşim arayüzü sağlayabilir, bu da ağırlık artmadan daha fazla takviye anlamına gelir.

Dolgu-dolgu etkileşiminde en önemli faktör homojenlik ya da dolgunun dağılım kalitesidir. Kötü bir dağılım, dolgu maddelerinin topaklanması anlamına gelir, dolayısıyla en-boy oranı düşük olan daha kompleks yapıların oluşumuna yol açar, ki bu da takviye işleminde olumsuz bir rol oynamaktadır (Pu ve ark. 1997) (Şekil 2.3).



**Şekil 2.3.** Farklı dağılım şartlarında %35 oranında Silika dolgulu kompozitlerin mekanik özellikleri, (Pu ve ark. 1997)

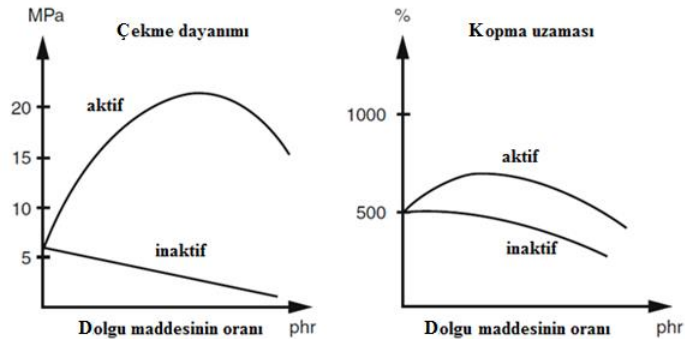
Aynı zamanda, yüksek nanokompozit dayanımını sağlanmak için dolgu maddenin dağılımı sürekli yüzeyi (mekanik perkolasyon) sağlamalıdır. Bu sürekli yüzey dolgu partiküllerden oluşan pozisyonu ve oryantasyonu rastgele dağılmış olan zincirlerden oluşur (Balberg ve ark. 1984, Bréchet ve ark. 2001). Bunu en-boy oranı yüksek bir nanodolgu madde, düşük hacim oranında bile kolayca yerine getirebilmektedir.

#### 2.2.4. Dolgu maddelerinin sınıflandırılması:

Temel olarak kauçuk takviyesinde kullanılan iki tür dolgu maddesi vardır. Geleneksel dolgular ve nano dolgular:

##### Geleneksel dolgular:

**Siyah dolgular:** Kauçuk endüstrisinde çeşitli kauçuk mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan en önemli partikül dolgu maddeleri, geleneksel dolgu maddeleri olarak karbon siyahı ve silikadır. Genel olarak, karbon siyahı, çekme dayanımını arttırmak için kullanılır ve silikayla takviye edilmiş kauçuktan daha yüksek elastisite modülüne sahiptir. Silika ise kauçukta karbon siyahından daha iyi dağılılabılır. Karbon siyahı, elastomerlerde; fiziksel, kimyasal veya mekanik özellikleri ve orijinal kauçuklara verdiği performans nedeniyle en yaygın kullanılan dolgu maddedir (Mushack ve ark 1996). Her yıl yaklaşık 5 milyon ton karbon siyahı tüketilirken, sadece 250.000 ton silika kullanılmaktadır.



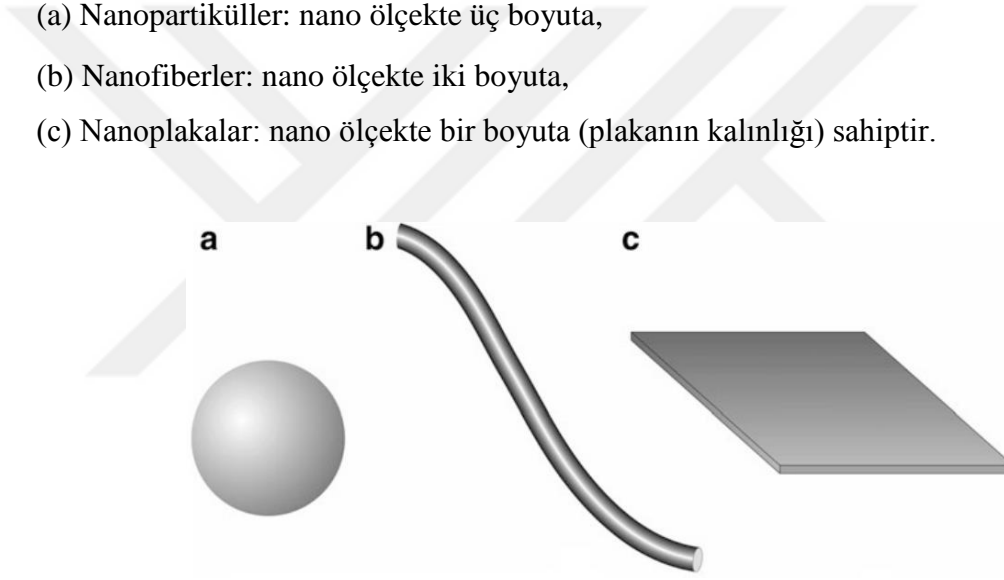
**Şekil 2.4.** Karbon siyahı dolgulu (aktif) ve dolgusuz (inaktif) kauçuklar arasındaki mekanik özelliklerin karşılaştırılması, (Mushack ve ark. 1996)

**Siyah olmayan dolgular:** Çökelmiş silika, fme silika, alümina, killer, selüloz, magnezyum karbonatlar ve beyazlatıcı dolgu maddeleri (kalsiyum karbonat) gibi çok çeşitli siyah olmayan dolgu maddeleri, geçmişte dolgu maddeleri olarak kullanılmışlardır.

### **Nanodolgular:**

Takviye edilmiş elastomerlerdeki nano dolgular, nano-ölçekte (yaklaşık 1-100 nm) bir ya da daha fazla boyuta sahip, katı elementlerdir. Bunu dikkate alarak nanodolgular üç temel sınıfa ayrılabilir (Şekil 2.5):

- (a) Nanopartiküller: nano ölçekte üç boyuta,
- (b) Nanofiberler: nano ölçekte iki boyuta,
- (c) Nanoplakalar: nano ölçekte bir boyuta (plakanın kalınlığı) sahiptir.



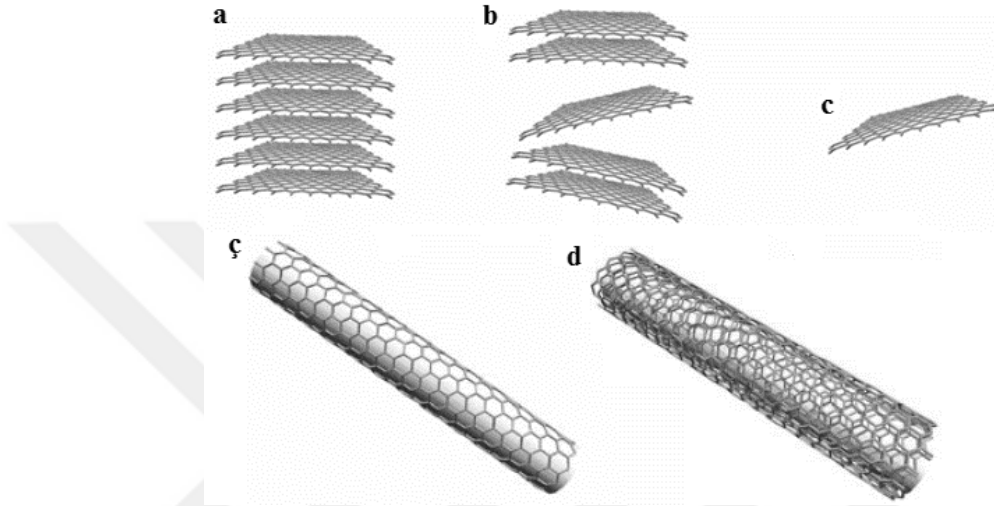
**Şekil 2.5.** Nanodolgu yapısı (a) Nanopartikül, (b) Nanofiber, (c) Nanoplaka

nano dolgular esas olarak aşağıdaki gruplardan oluşur:

- (a) Karbon esaslı nanodolgular
- (b) Kil esaslı nanodolgular
- (c) Metal hidroksit esaslı nanodolgular
- (d) Diğer nanodolgu sistemleri

### 2.2.5. Karbon esaslı nanodolgunlar:

Bu çalışmada kullanılan nanodolgunlar karbon esaslıdır, bu yüzden detaylı olarak açıklanacaktır. Bu dolgunlar esas olarak ünitesi altıgen olan bir plakadan oluşmaktadır (Şekil 2.6).



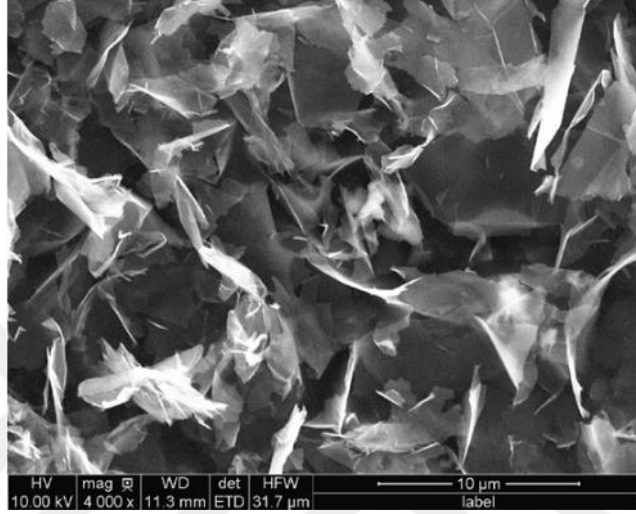
**Şekil 2.6.** Karbon esaslı nanodolgunlar: (a) Grafit, (b) Grafen nanoplakaları, (c) Tek grafen plakası, (ç) Tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT), (d) Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT)

**Grafit** (Şekil 2.6 a), birbirine paralel plakalardan oluşmaktadır. Bu bir nanodolgu sayılmaz. Elastomerlerde çoğunlukla doğal olarak genişletilmiş grafitler kullanılır. Kimyasal veya termal genleşme ile nano yapı haline getirilmektedir.

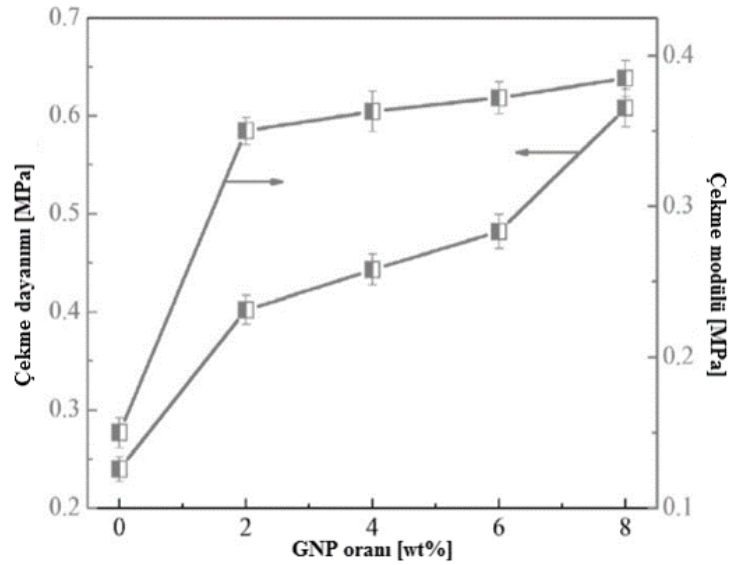
**Grafen nanoplakaları** (Şekil 2.6 b), çok katmanlı grafitin ince ince kesilmesinden üretilmektedir. Bu türlü nanodolgunların ucuz, hem de az yoğunluklarda kullanılmasının verimli olduğu ispat edilmiştir (Sadasiyuni ve ark. 2014, Sengupta ve ark. 2011).

Daha önce söylediğimiz gibi, bir dolgunun takviyesi dolgunun sağladığı etkileşim yüzeyine bağlıdır. Grafen nanoplakaları etkileşim merkezleri gibi rol almakta (Park ve ark. 2013), bu nedenle daha fazla miktarda dolgu maddesi daha fazla etkileşim alanı ve daha fazla güçlendirme anlamına gelir.

Daha fazla dolgu maddesi içermesi, takviye ağının stabilitesi ve nanokompozitin dayanımını artırır, bu da çekme dayanımı ve modülünün eşzamanlı olarak iyileşmesiyle sonuçlanır (Kim ve ark. 2012) (Şekil 2.8). Bu sonuç grafen nanoplakaların kauçukta iyi dağılım yapabildiği düşüncesini oluşturmaktadır (Şekil 2.7).

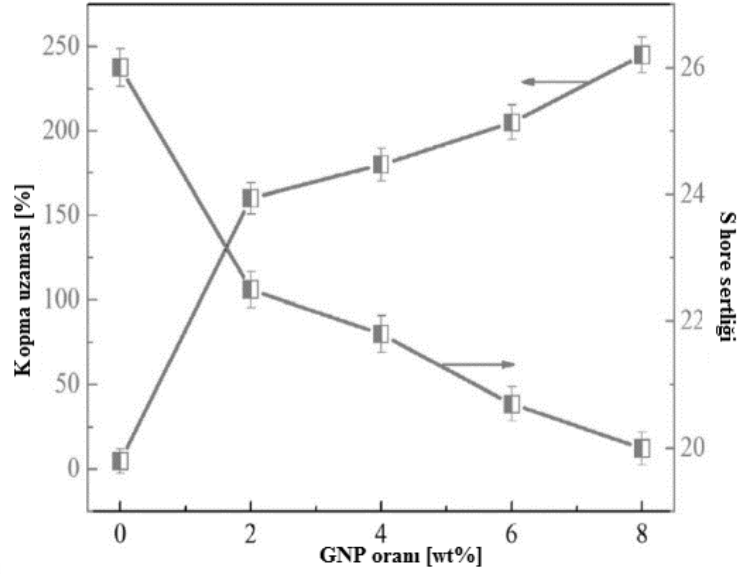


Şekil 2.7. Silikon kauçuğu (metil-vinil-silikon kauçuğu; MVQ)'nun grafen nanoplakaları dağılımının SEM görüntüsü, (Song ve ark. 2015)



Şekil 2.8. GNPs/MVQ kompozitinin dolgu oranının çekme dayanıklılığı ve modülünün üzerindeki etkisi, (Song ve ark. 2015)



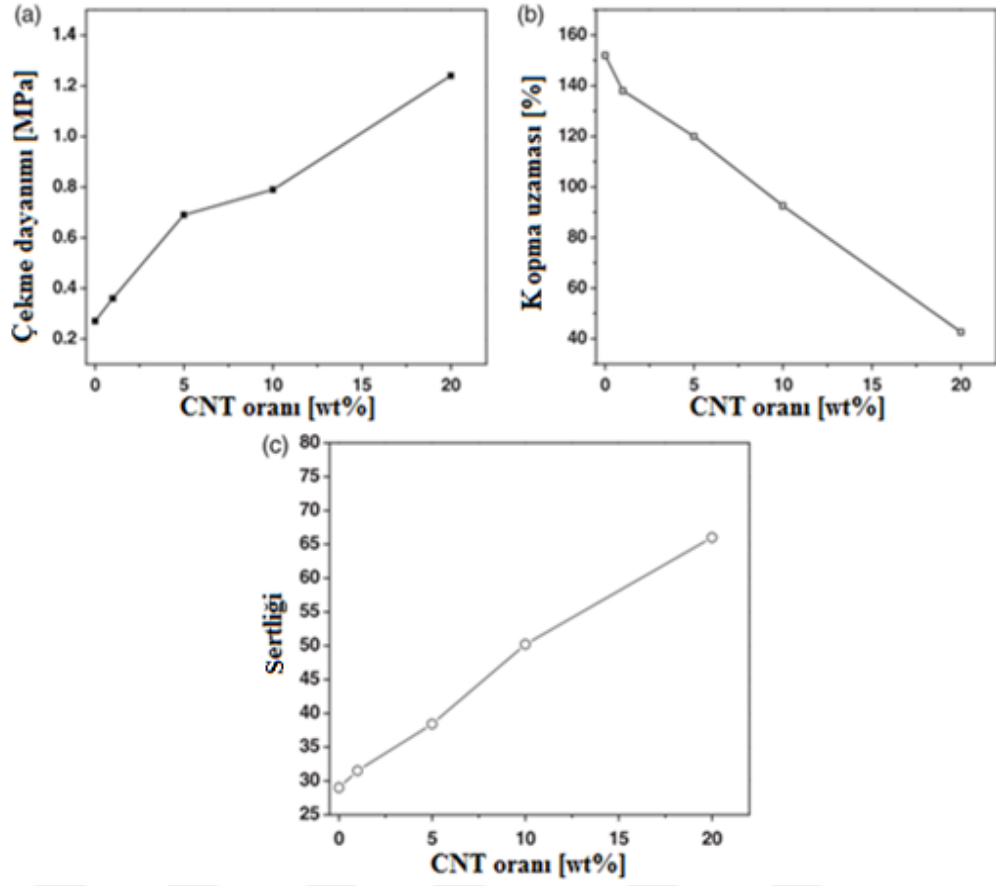


**Şekil 2.9.** GNPs/MVQ kompozitinin dolgu oranının birim uzama ve sertliği üzerindeki etkisi, (Song ve ark. 2015)

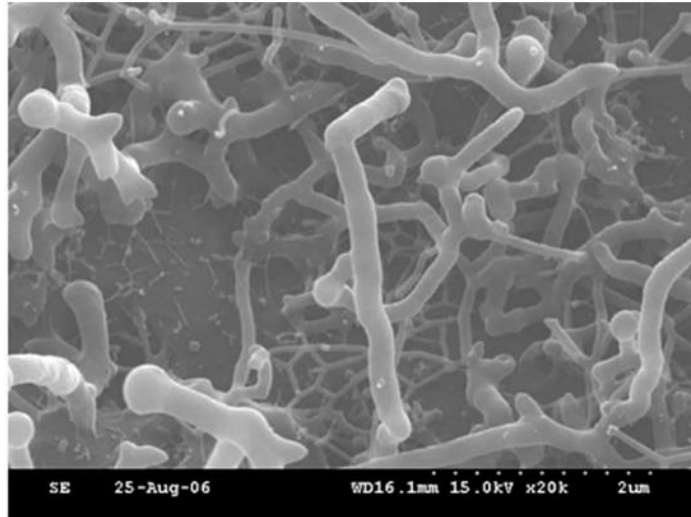
**Tek grafen plakası** (Şekil 2.6 c), Bu iki boyutlu tek karbon atomunun kalınlığında olan plaka olağanüstü mekanik özellikler ve elektrik iletkenliği sunmaktadır. Fiyatı yüksek ve kullanımı zor olması nedeniyle, bu dolgu partiküllerin elastomer nanokompozitleri ile kullanılması üzerinde çok az makaleye rastlanılmaktadır (Ozbas ve ark. 2012).

**Carbon nanotubes CNT**, Elastomerik malzemeleri takviye edilmesi için en önemli karbon esaslı nanodolgu maddesi, yapı olarak haddelenmiş bir grafen tabaka olarak tanımlanabilen karbon nanotüplerdir (CNT). Tek tek silindirler (tek duvarlı karbon nanotüpler SWCNT, Şekil 2.6 ç) veya eşmerkezli tüpler (çok duvarlı karbon nanotüpler MWCNT, Şekil 2.6 d) olarak birleştirilebilirler.

CNT özellikle, büyük en-boy oranı, nano mertebesindeki çapı ve tüp eksen boyunca yüksek elektrik iletkenliği nedeniyle nanodolgularda öne çıkmaktadır (Sinnott 2002). Örneğin, MWCNT dolgulu silikon kauçuğun (SiR) gerilme dayanımı, dolgusu %20 gibi düşük bir değerde olduğunda bile 1.25 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, dolgusuz SiR'inkinden dört kat daha yüksektir (Şekil 2.10 a) (Katihabwa ve ark. 2011).



Şekil 2.10. CNT/SiR kompozitinin dolgu oranının mekanik özelliklerinin üzerindeki etkisi: (a) dayanıklılık, (b) birim uzama, (c) sertlik, (Katıhabwa ve ark. 2011)



Şekil 2.11. CNT dolgulu kauçuğun 7 phr oranında CNT dağılımının SEM görüntüsü, (Nah ve ark. 2010)

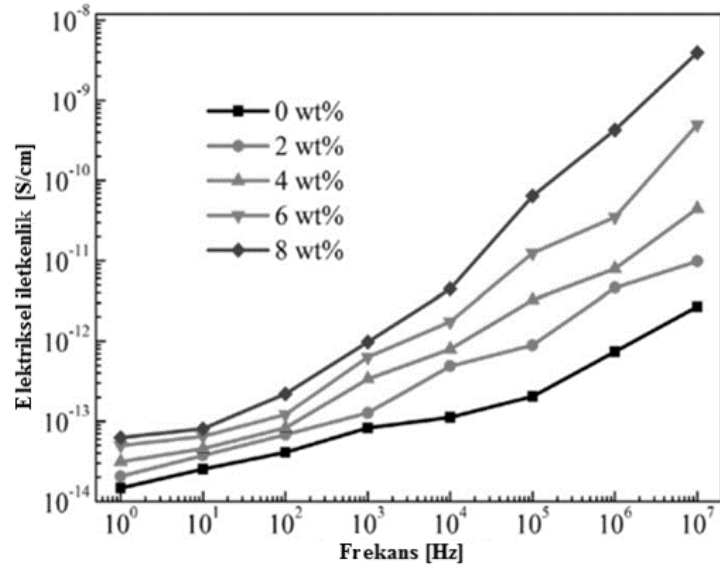
### **2.2.6. Hiperelastik nanokompozitlerin elektriksel özellikleri:**

Nano dolgu maddeleri kompozitlerde iletken katkı olarak rol alır. Nano dolgu maddeleri özellikle karbon esaslı olanlar iletken ağ oluşturarak nanokompozitlerin elektriksel özelliklerini sağlamaktadır.

Nanodolguları ekledikten sonra nanokompozit karışımlarının elektrik iletkenliğini iki önemli faktör etkilemektedir. Bunlar en-boy oranı ve karışımdaki nano dolgu maddelerinin dağılım kalitesidir (Bokobza 2017).

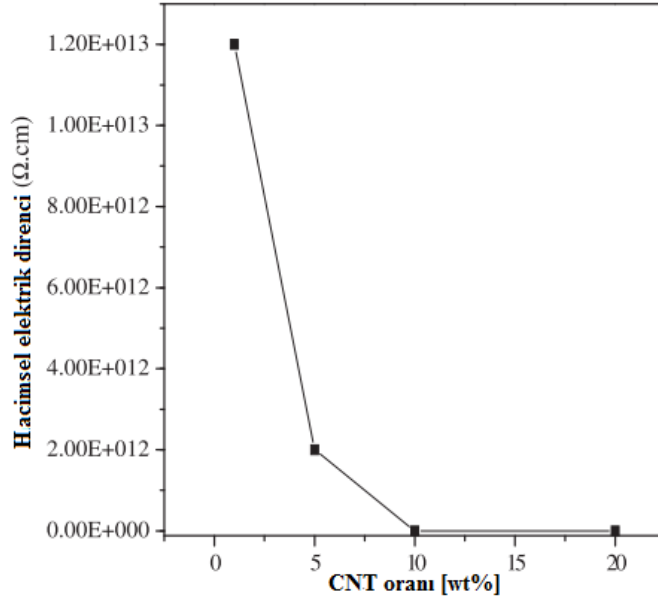
Yüksek en-boy oranı ve dolayısıyla nanodolguların verimli dağılım kabiliyeti nedeniyle, geleneksel dolgularla karşılaştırıldığında, katılımı düşük oranlarda olsalar bile elektrik iletkenliğini sağlarlar. Bu sızıntı eşiği (elektriksel perkolasyon) terimi ile tespit edilir. Yani izolator polimerik malzemelerde iletken ağ oluşturmak için gereken en düşük dolgu oranı (örneğin, MWCNT dolgulu nanokompozitlerin sızıntı eşiği 0.5 phr'dır, Bokobza 2012), ile yansıtılmaktadır. Kompozitlerde nanodolgu kullanılması, geleneksel dolgulu kompozitlere göre, karışımın sızıntı eşiğinin ciddi oranda düşmesine yol açar.

Nanokompozitlerin elektriksel iletkenliği dolgu oranıyla önemli bir ilişki gösterir, dolgu maddesi oranı arttıkça grafen nanoplakalarla ile doldurulmuş SiR'in elektriksel iletkenliği artmıştır (Song ve ark. 2015) (Şekil 2.12).



**Şekil 2.12.** Farklı oranlarda dolgu içeren GNPs/MVQ kompozitlerin frekans ve elektriksel iletkenlik arasındaki ilişkisi, (Song ve ark. 2015)

Aynı gözlem MWCNT dolgulu SiR için de söylenebilir. En-boy oranı çok yüksek olması nedeniyle MWCNT oranının artmasıyla hacimsel elektrik direnci daha fazla iletken yolları oluşturarak ciddi bir düşüş yaşayabilir (Katihabwa ve ark. 2011) (Şekil 2.13).



**Şekil 2.13.** Dolgu oranının CNT/SiR kompozitinin elektriksel iletkenliği üzerindeki etkisi, (Katihabwa ve ark. 2011)

### **2.2.7. Çift dolgulu nanokompozitler:**

Bir karışımda iki farklı dolgu madde kullanılması, onlardan tek bir dolgu kullanılmasına kıyasen, dağılma niteliğini iyileştirdiği, daha iyi elektriksel iletkenliği ve daha da iyi mekanik özelliklere neden olduğu ispat edilmiştir. Özellikle bu iki dolgu maddesinden biri karbon esaslı olması durumunda, karışımda sürekli bir hibrit dolgu ağının oluşumunu desteklediği gösterilmiştir (Bokobza ve ark. 2009, 2008).

İki farklı türde dolguyla hibridize edilmiş nanokompozitler, araştırmacılar için çok ilginç bir konudur. Bu çalışmada, iki hibrid nanokompozit incelenmiştir. Bu iki karışımda ortak dolgu maddesi, genellikle yüksek miktarda kullanılan nanokarbon siyahıdır. İlave olarak az miktarda birinci karışıma MWCNT ve ikinci karışıma grafen nanoplakaları eklenmiştir.

### **2.3. Hiperelastik malzemelerde çatlak büyüme olgusu:**

#### **2.3.1. Kırılma mekaniğine klasik yaklaşımlar:**

Thomas (1994), 1940'ların sonlarından beri kullanılan yöntemlerle birlikte çatlak büyüme olgusunun anlaşılmasında yırtılma ile ilgili temel dayanım özelliklerini ölçebilmek için bir yöntem kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Aynı çalışmada (Thomas 1994), yırtılmanın gerçekleşmesi için, çatlak ucunda kritik bir birim uzama veya gerilme olabileceğini ve buna eşlik eden temel dayanım özelliğinin bulunmasını, uygun bir kriter olarak görmüştür.

Kritik gerilme kriteri, içsel bir kusur içeren bir numunenin gerilmeye maruz kaldığında, çatlağın ucuna yakın bölgedeki malzemenin daha büyük veya yoğunlaşmış bir gerilmeye maruz kaldığını belirtmektedir. Buna dayalı olarak, çatlağın ne zaman büyüyeceğini tahmin etmek için stres dağılımını ve içsel malzeme dayanımını bilmek gerekmektedir.

1940'ların sonlarında gerçekleştirdiği çalışmalarında Thomas, bu parametrenin ölçülebilir yırtılma kuvveti ile ilişkisinin belirlenmesinin zor olduğu sonucuna varmıştır. Bu zorluğun bir sonucu olarak, elastomer malzemeler için kabul edilen kırılma mekaniği yaklaşımı 1950'lerden beri bir enerji kriterine dayanmaktadır.

#### **2.3.2. Kırılma mekaniği ve enerji kriteri:**

Çatlak büyüdükçe, elastik enerjinin salınımı, elastomerlerde çeşitli olayların anlaşılmasında yardımcı bir etken olduğu kabul edilmiştir.

Thomas'ın geliştirdiği bu yaklaşım, Griffith'in (1921) yürüttüğü çalışmalardan esinlenmiştir. Griffith serbest bırakılan elastik enerjinin, gerilmiş cam plakada yeni bir çatlak yüzeyi oluşturmak için gereken serbest enerjiden daha büyük olması durumunda, çatlağın büyüdüğünü göstermiştir. Griffith'in ortaya koyduğu bu teori aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$2S_E = -\frac{1}{t} \left( \frac{\partial U}{\partial c} \right)_l \quad (2.13)$$

$S_E$  alan biriminin başına serbest enerjisi,  $t$  numunenin kalınlığını,  $U$  depolanmış yer değiştirme enerjisini ve  $c$  çatlak uzunluğunu ifade eder,  $l$  harfi ise belirli bir birim uzama boyunda gerçekleştiğini gösterir.

Rivlin ve Thomas (1953), Griffith'in kırılma malzemelerinin üzerinde ortaya koyduğu bu teoriyi elastomerlere uygulamış ve elastomerler üzerinde çalışıp çalışmadığını görmek için genelleştirmiştir. Daha açık ifade ile teoriyi, çatlak ucunun çevresindeki aşırı gergin bölgelerde meydana gelen geri kazanılmayan ya da dağılmış enerjiyi dikkate alarak değiştirmişlerdir (Grellmann ve ark. 2013).

Dağılan enerji miktarı üç faktöre bağlıdır:

- Elastomerin viskoelastik özellikleri.
- Belirli bir global birim uzamaya eşlik eden çatlak ucu bölgesindeki gerilme.
- Çatlak ilerlemesi için gereken yer değiştirme enerjisi salınımı.

Bu faktörleri dikkate alarak, belirli bir birim uzamada bir çatlak ilerlemesi için gereken malzeme özelliklerinden biri olan bu enerji, hem elastik enerjinin salınımı hem de yırtılma enerjisi  $T$  olarak tanımlanır.

$$T = -\left( \frac{\partial U}{\partial A} \right)_\Delta = -\frac{1}{t} \left( \frac{\partial U}{\partial a} \right)_\Delta \quad (2.14)$$

$A$  tek bir çatlak yüzeyinin alanıdır.

### 2.3.3. Elastomerin yırtılma parametreleri:

Özel performansı nedeniyle elastomerler, genelde yarı-statik ve dinamik yükleme koşullarında çalışan lastik endüstrisinde ve titreşim sönümlenme elemanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bununla birlikte, yukarıdaki gibi yarı-statik ve dinamik yükleme şartları altında, kauçuk gibi elastomerlerde mikro çatlaklar kolayca oluşmakta (çatlak çekirdeklenmesi) daha sonra yükün tekrarı nedeni ile ilerlemekte (çatlak büyümesi) ve sonunda kauçuğun hasara uğramasına neden olmaktadır (Zarrin-ghalami ve Fatemi 2012).

### **J-integral testi:**

Son zamanlarda, *J-integral* (Yırtılma enerjisi) teorisinin (Dong ve ark. 2016) elastomer alanında deneysel uygulamaları sayesinde, kauçuk malzemelerin yırtılma direncini değerlendirmek için kabul edilebilir bir yaklaşım ortaya konmuştur ve örnek olarak bazı başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Agnelli ve ark. 2012b, Ait ve ark. 2007, Dong ve ark. 2016, 2014, Ramorino ve ark. 2010).

*J-integral* ve yırtılma enerjisi  $T'nin$ , elastomerin tek kenar kesikli numuneler ile yapılan deneyler (SENT) ile eşdeğer sonuçları verdiği kanıtlanmıştır (Lee ve Donovan 1987).

Yeni kırılma yüzeyi oluşturmak için birim alan başına gereken kritik enerjisi anlamına gelen kritik *J-integral*'inin içsel bir özellik ve elastomerler için geçerli bir yırtılma kriteri olarak değerlendirilebileceği ortaya konmuştur (Chow ve ark. 1988).

Dong ve ark. (2014), Silica \ CB'ın kauçuktaki katkı oranının mekanik ve yırtılma direnci özelliklerine etkisini incelemek için enerji kriterini veya *J-integral* teorisini uygulamışlardır . Silika oranının artırılmasının hem mekanik hem de yırtılma direnci özelliklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmada, numuneleri karşılaştırmak için çeşitli faktörler esas alınmıştır. Bu faktörler:

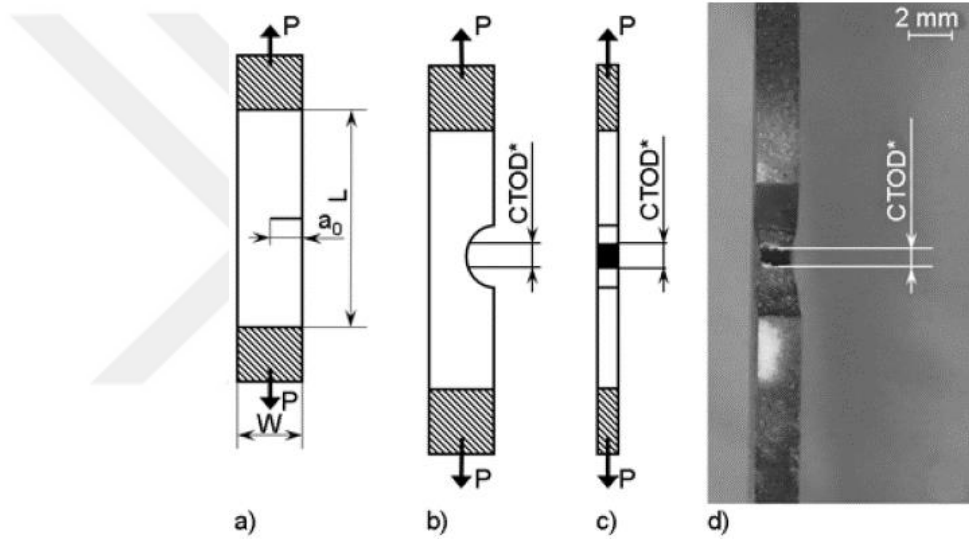
1. Yeni kırılma yüzeyi oluşturmak için birim alan başına gereken kritik enerji ( $J_{IC}$ ): Bu faktör çatlak oluşma aşamasında yırtılma direncini tanımlamak için kullanılmıştır.
2. İlerleme aşamasında yırtılma direncini tanımlayan yırtılma modülü ( $T_R$ ),
3. Yer değiştirme enerjisi yoğunluğudur.

Daha sonraki bir çalışmalarında ise (Dong ve ark. 2016), lokal birim uzama dağılımından faydalanarak;



4. Çatlak ucundaki birim uzama miktarı (büyüklüğü) ve çatlak ucuna yakın alanda birim uzama miktarının (büyüklüğünün) etkisi olmak üzere iki faktör eklemiştir.

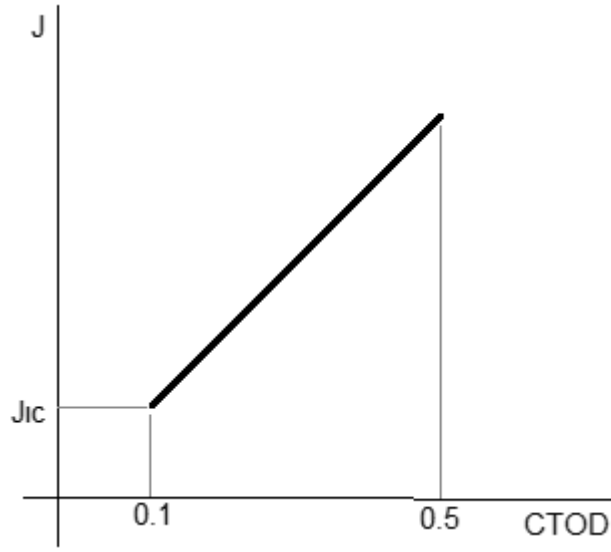
$J_{IC}$  ve  $T_R$  belirlemek için çatlak ucu açma deplasmanı (CTOD) tanımlamamız gerekmektedir (Şekil 2.14). CTOD'nin viskoelastik elastomerik malzemeler için çatlak ilerlemesinin endirekt bir yansıması olarak görülebileceği ifade edilmektedir (Agnelli ve ark. 2012a, b).  $J$ -integral teorisini CTOD konsepti ile birleştirerek, kritik  $J$ -değeri ( $J_{IC}$ ) ve  $T_R$  yırtılma modülünü hesaplanıp elastomerlerin çatlak oluşma ve ilerleme direnci değerlendirilmektedir (Grellmann ve ark. 2013).



**Şekil 2.14.** SENT numunesi: (a) deforme olmayan SENT numunesinin geometrisi; (b) (c) Yük altındaki numunenin sırasıyla yandan ve önden görünümü; (d) önden görünüme göre çatlak başlarken CTOD görüntüsü. (Agnelli ve ark. 2012b)

Bu tez çalışmasında CTOD'nin 0,1 mm'den daha düşük olarak yakalanması zor olduğundan  $CTOD=0,1$  mm olduğunda çatlak başladığı varsayılmıştır. Bundan dolayı CTOD'ye karşılık gelen  $J$ -değeri, kritik  $J$ -değeri ( $J_{IC}$ ) olarak belirlenmiştir. Erken gerilmeler de  $J$ -değeri ve CTOD eğrisinin eğimi (CTOD 0,1 mm ve 0,5 mm arasında)  $T_R$  yırtılma modülüne eşit olmasıyla belirlenir (Şekil 2.15).

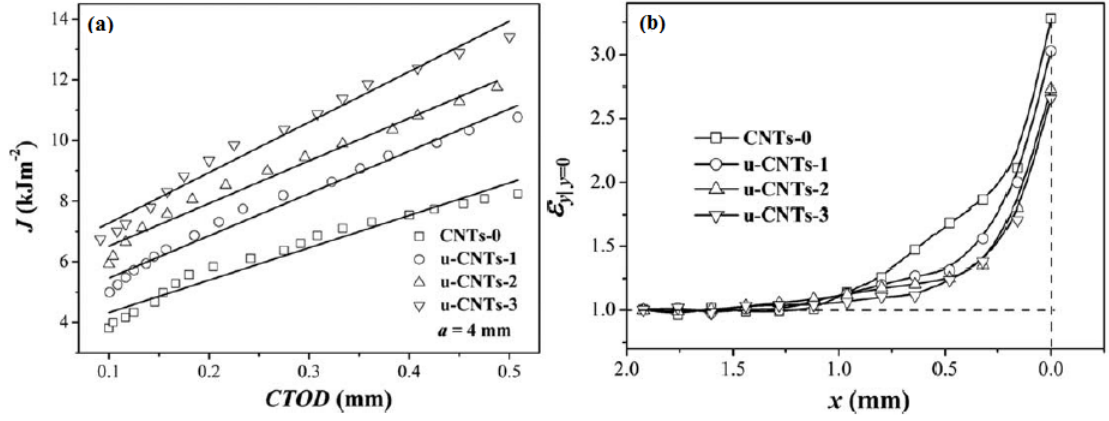
$$T_R = \frac{d(J - \text{değeri})}{d(CTOD)} \quad (2.15)$$



**Şekil 2.15.** Genel olarak kritik enerji ( $J_{IC}$ ) ile çatlak ucu açma deplasmanı (CTOD) arasındaki ilişki

Çatlak ucu bölgesine yakın lokal stres konsantrasyonunun, kauçuk kompozitlerin statik ve dinamik çatlak ilerleme davranışlarıyla yakın bir ilişkisi vardır (Hild ve ark. 2011). Yer değiştirme enerjisi yoğunluğu, çatlak ucundaki birim uzama büyüklüğü, ve çatlak ucuna yakın alanda birim uzama büyüklüğünün etkisi olmak üzere, lokal stres konsantrasyonuna kritik bir rol oynamaktadır.

Son zamanlarda, local birim uzama dağılımının durumunu ve yoğunlaşma faktörünü değerlendirmek için yeni yöntemler uygulanmaktadır. Dijital görüntü korelasyonu (DIC) metodu yeni metotlar arasında başı çekmektedir. Dong ve ark. (2016) MWCNT'nin hibrit kauçuğun yırtılma direnci üzerindeki dolgu oranı etkisini DIC tekniği ile araştırmıştır. Numuneler çatlak ucunda daha yüksek lokal birim uzamaya ve çatlak ucunun yanındaki alanda daha az deforme olabilirliğe sahip olduğunda, çatlak ucunun yanındaki alanın daha yüksek stres konsantrasyonuna maruz kalmasına yol açtığı görülmüştür. Bu durumda numuneler daha düşük  $J_{IC}$  ve  $T_R$  değerleri almışlardır. Dolayısıyla numunelerin daha düşük yırtılma direncine sahip oldukları gözlemlenmiştir (Şekil 2.16).



**Şekil 2.16.** (a) Farklı oranlarda CNT'ye sahip CNT/CB/SBR kompozitinin *J*-değeri ile CTOD ilişkisi, (b) CNT'nin farklı oranlarında çatlak eksenine boyunca birim uzama;  $x=0$  çatlak ucunun konumudur (Dong ve ark. 2016)

Not: yer değiştirme enerjisi yoğunluğu, gerilme-birim uzama eğrisi altındaki bulunan alandır (integrasyon) kesiksiz bir numuneyi test yaparak belirlenir (Dong ve ark. 2016).

### 2.3.4. Numune geometrileri:

Malzemelerin yırtılma özelliklerini incelemek için çeşitli numuneler kullanılmıştır. Son zamanlarda araştırmalarda çoğunlukla kullanılan iki numune geometri vardır.

#### Tek kenar kesikli numune:

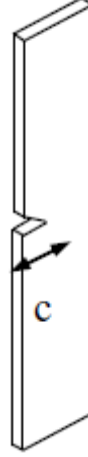
Genelde, yarı-statik testlerde çatlak ilerlemesini incelemek için kullanılmaktadır. Bu durumda, yırtılma enerjisi yada yer değiştirme enerjisi salınımının hesabı aşağıdaki denklemde yapılmaktadır.

$$T = 2kWc \quad (2.16)$$

$W$ , büyük gerilmelerde malzemenin kütesindeki depolanan yer değiştirme enerjisi yoğunluğudur,  $c$ , çatlak uzunluğu, ve  $k$ , aşağıdaki gibi değişen uzanma oranına bağlı bir terimdir.

$$k \approx \frac{\pi}{\sqrt{\lambda}} \quad (2.16a)$$

$\lambda$ , uzama oranıdır.



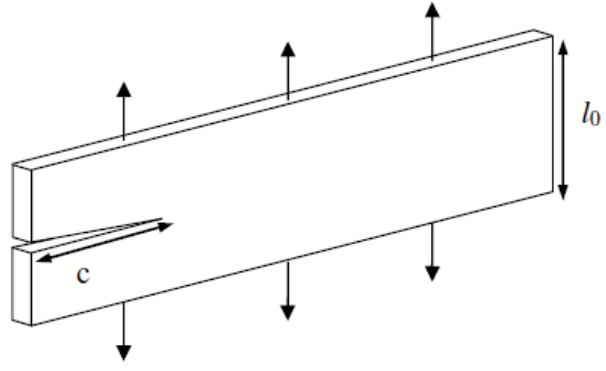
**Şekil 2.17.** Kesikli Çekme Testi'nin (SENT) tek kanarına kesik açılmış numunesi

**Düzemsel çekme (Basit kayma) numunesi:**

Dinamik veya tekrarlı yükleme testlerinde çatlak ilerlemesi için daha çok kullanılmaktadır, çünkü çatlak, sabit bir gerilme etkisiyle sabit bir oranda büyür, ve bu yer değiştirme enerjisi salınımının, çatlak ucundaki gerilme konsantrasyon etkilerinden kaynaklanan komplikasyonları gidererek hesaplanmasını sağlar. Bu durumda, yer değiştirme enerjisi salınımı:

$$T = WL_0 \quad (2.17)$$

olarak ifade edilir. Burada  $W$ , depolanmış yer değiştirme enerji yoğunluğu ve  $l_0$  test cihazının çeneleri arasındaki mesafedir.



**Şekil 2.18.** Düzemsel çekme (Basit kayma) deney numunesi



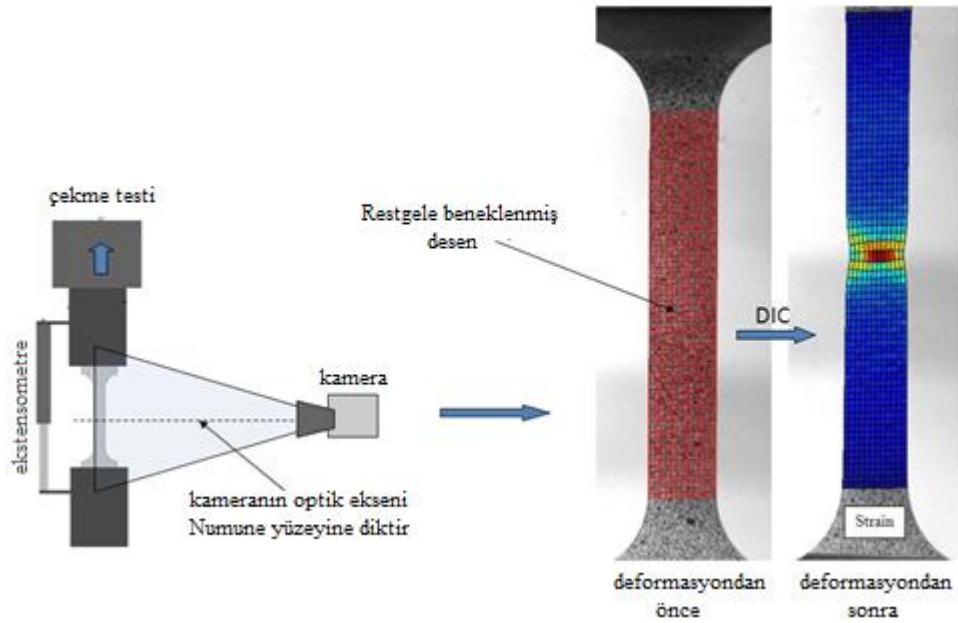
## 2.4. Dijital görüntü Korelasyonu (DIC)

### 2.4.1. DIC teknolojisi nedir?

Deplasman ve birim uzama mühendislik alanında kritik parametrelerdir. Bununla birlikte, bu parametrelerin laboratuvar ortamında veya çalışma koşullarında ölçülmesi, geleneksel teknikler kullanılmaya kalkıldığında zor bir süreçle karşılaşılır; çünkü doğruluk, basitlik ve maliyet dikkate alınarak ortak bir çözüm bulunması gerekmektedir.

Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC), malzemelerin yerel performansını incelemek için kullanılan en popüler yöntemlerden biridir. Optik ve temassız bir yöntemdir, deneysel işlemlerin mekanik veya ısıl davranışlarının daha iyi anlaşılmasını sağlar.

DIC, bir deformasyonun farklı aşamalarında bir eleman veya numunenin dijital fotoğraflarını karşılaştırma sistemine dayanır. Piksel bloklarını izleyerek, yüzey deplasmanlarını ölçebilir, ve tam alanın 2B veya 3B deformasyon vektörü ve deplasman dağılım haritalarını oluşturabilir.



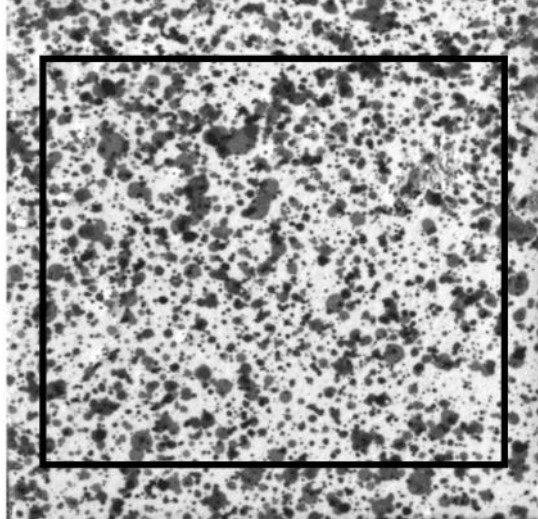
Şekil 2.19. DIC analizinin aşamaları (Fagerholt 2015'ten değiştirilerek alınmıştır)

## 2.4.2 Dijital görüntü korelasyonu tekniği nasıl uygulanır?

Genel olarak, 2D DIC yöntemi, aşağıdaki üç ardışık adımı kapsamaktadır:

(1) Benekleme: rastgele gri yoğunluk dağılımını göstermek için örnek yüzeye benekli desenleri püskürtmektir. DIC'nin etkili çalışması için, piksel bloklarının bir dizi kontrast ve yoğunluk seviyesiyle rastgele ve benzersiz olması gerekir (Nguyen ve ark. 2017), (Şekil 2.20).

Bu tez çalışmasında hiperelastik melzemeler incelendiğinden normal boya, numunelerin sahip olduğu hiperelastisiteye sahip değildir, bu nedenle beneklerin izlenmesinin, malzeme izlenmesini karşılamasından emin olmak için, kauçuk esaslı bir boya hazırlayıp ilgi bölgesine (ROI'ye) püskürtülmüştür. Beneklenme işlemi, ROI'nin her alt bölgesinde (alt kümesinde) benzersiz bir gri tonlama seviyesine ulaşabilmek için, rastgele ve farklı yoğunluklarda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yer alan deneyler de, boya, vulkanizasyon ile 45° C'nin altında 15 dakika boyunca kür edilerek elastomer yüzeyine çok iyi derece birleşimi sağlanmıştır.



**Şekil 2.20.** Beneklenmiş desen

(2) Fotoğraflama: deforme olmamış ve deforme olmuş şekilde yüzeyinin dijital görüntüleri kaydedilmesidir. Fotoğraflama, geleneksel CCD kamera, dijital kameralar, yüksek hızlı video (deneysel bölümde kullanılmıştır), mikroskoplar, elektron mikroskopları, taramalı elektron mikroskopları dahil olmak üzere çok çeşitli kaynaklardan elde edilebilir (Anonim 2019b).

(3) DIC analizi: tam alan deplasmanı ve deformasyonunu elde etmek için DIC yazılımı yardımı ile analiz gerçekleştirilmesidir. DIC'nin temel prensibi, deformasyondan önce ve sonra kaydedilen test numunesi yüzeyinin dijital görüntülerinde bulunan aynı noktaların izlenmesine dayanır.

#### **2.4.3. Dijital görüntü korelasyonu tekniğinin avantajları:**

Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC), ucuz, basit ve doğruluğu makbul bir ölçüm ve analiz yöntemi olduğundan, çatlak ilerlemesi ve malzeme deformasyonu araştırmaları için ideal bir tekniktir.

Dijital Görüntü Korelasyonu, birim uzama ve deplasmanı ölçmek için yenilikçi bir temassız optik tekniktir. DIC, benek interferometresi sayılarak diğer tekniklerle karşılaştırıldığında kullanımı basit, direkt uygulanabilen ve düşük maliyetlidir. Bu teknik sayesinde birçok ölçümü aynı anda yapmak mümkündür.

Malzeme bilimlerinde, kırılğan, esnek veya hiperelastik gibi malzemelerin yapılarında, bu teknik, numunenin zarar görüp görmediğini araştırmada kullanılır. Bu yöntem doğruca konumları ve görüntüleri kaydedilerek, referans ve mevcut görüntüler arasında karşılaştırmalar yapılmasına olanak tanır ve farklılıkların; yüzey değişikliği, deformasyon veya çatlak açılmasından mı kaynaklandığını belirlemeyi sağlar.

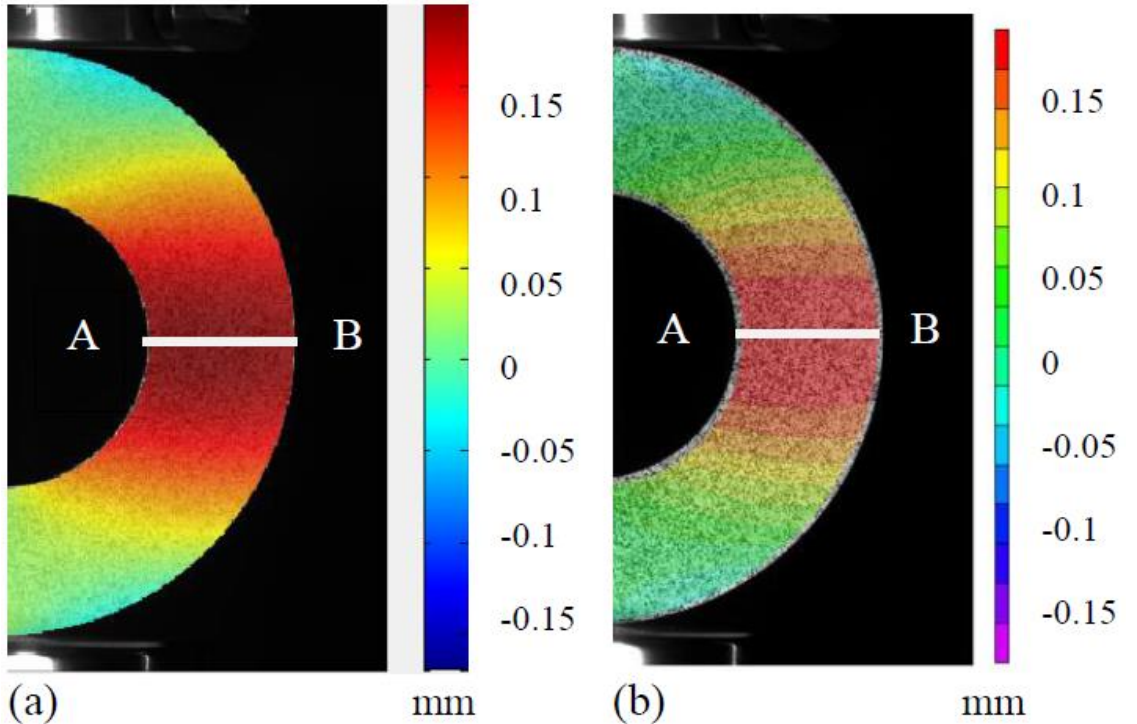
Son zamanlarda, DIC yönteminin, erişilmesi zor alanlardan hızlı bir şekilde veri (görüntüler) alabilen küçük uçan araçlar gibi, modern ekipmanlarla entegre edilmesi önerilmiştir.



#### 2.4.4. Ncorr yazılımı:

Bu çalışmada Ncorr yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, Georgia Institute of Technology'deki laboratuvarında Yüksek Lisans öğrencisi J. Blaber yüksek lisans tezi çalışması kapsamında geliştirilmiş, açık kaynak ve MATLAB ile korele edilen bir programdır. Daha fazla verimlilik için hesaplama algoritmaları C++ dilinde yazılmıştır ve MEL arayüzü ile MATLAB ile entegre edilmiştir (Anonim 2019b). Ncorr, başkalarıyla paylaşarak bilgi alışveriş yapmasıyla 2D DIC analizleri için sağlam bir araç haline getirilmiştir.

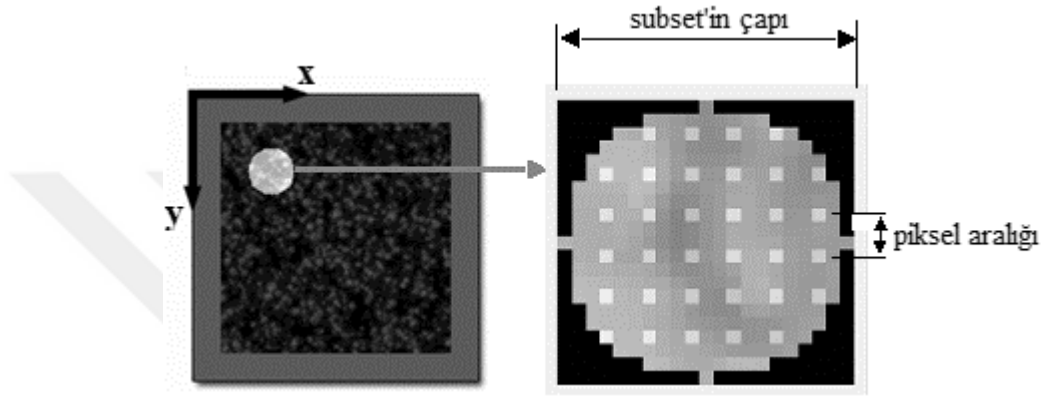
Ncorr'un sunduğu sonuçlar Harilal ve Ramji (2014) tarafından yapılan çalışma ile doğrulanmıştır. Yaptıkları çalışmada, özellikleri bilinen bir halka şeklinde epoksi malzemeden mamul bir numune üzerinde basma testleri uygulanmış ve Ncorr ve VIC-2D (ticari bir DIC paketi) ile elde edilen deplasman ve birim uzama sonuçlarını karşılaştırarak birbirine yakın oldukları gösterilmiştir. (Şekil 2.21)



**Şekil 2.21.** DIC tekniğinden elde edilen çapsal basmaya maruz kalan halka için yer değiştirme dağılımının haritası. (a) Ncorr (b) Vic 2D, (Harilal ve Ramji 2014)

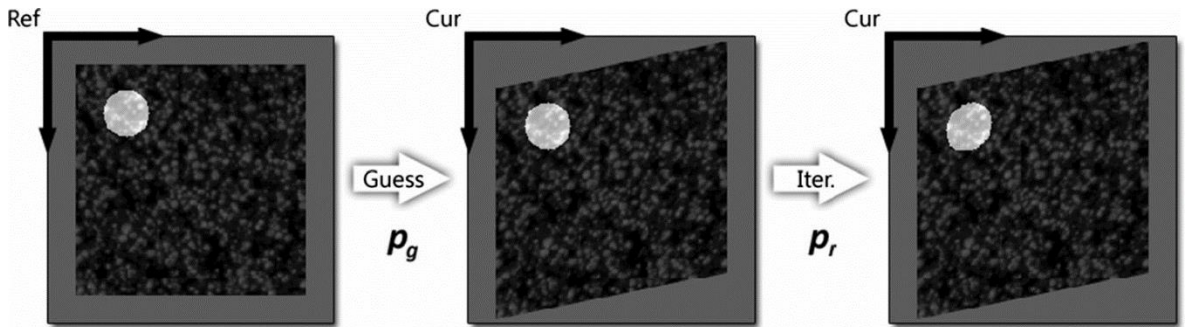
### Ncorr'un özü – temelleri ve kullandığı hesaplamalar:

Ncorr yazılımı, ilgili alanı birkaç altküme (subset)'e bölmektedir, her altküme yuvarlak alt piksel ağından oluşur (Şekil 2.22). Yazılım, bundan sonra her alt kümeyi alıp bir sonraki görüntüdeki benzer altkümeyle bağlamaktadır.



Şekil 2.22. Altküme (Subset)

Ncorr'da, ilk tahmin ( $P_g$ ) ve sonraki iyileştirme ( $P_r$ ) işlemleri iki sıralı görüntüden iki alt kümeyi ilişkilendirmek için kullanılan iki ardışık aşamadır (Blaber ve ark. 2015), (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. İki subset'in korele işlemi (Blaber ve ark. 2015)

Birinci aşamada referans ve mevcut görüntüler arasındaki benzerlik normalize edilmiş çapraz korelasyon (NCC) kullanılarak belirlenir.

$$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[ \frac{f(x_i, y_i)g(x'_i, y'_i)}{FG} \right] \quad (2.18)$$

f ve g, referans ve mevcut görüntülerin gri tonlama yoğunluğunu hesaplamak için kullanılan fonksiyonlardır.

$$f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_i)]^2} \quad (2.18a)$$

$$g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_i)]^2} \quad (2.18b)$$

İkinci aşamada ise, bu sonuçlar alt piksel çözünürlüğüyle iyileştirilip, mevcut görüntüde alt kümenin kesin konumu belirlenir.

Alt kümeleri eşleştirdikten sonra, iki bağlanmış altkümede koordinatları yan yana koyarak her alt pikselde deplasman değerleri hesaplanır,

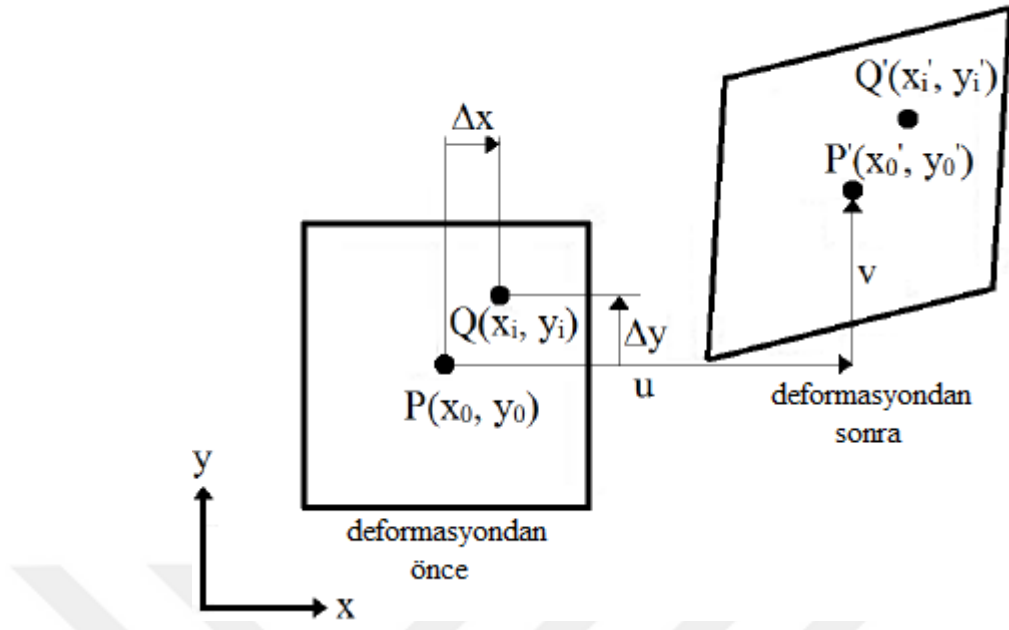
$$x'_i = x_i + \mu(x_i, y_i) \quad (2.19)$$

$$y'_i = y_i + \eta(x_i, y_i) \quad (2.20)$$

$\mu$  ve  $\eta$  şekil fonksiyonları

$$\mu(x, y) = u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (2.21)$$

$$\eta(x, y) = v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (2.22)$$



**Şekil 2.24.** DIC metodunun korelasyon temeli, (Pan ve ark. 2009)

Lagrangian birim uzama bileşenleri, deplasman gradyanlarını kullanarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned}
 E_{xx} &= \frac{1}{2} \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right) \\
 E_{yy} &= \frac{1}{2} \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \\
 E_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right)
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

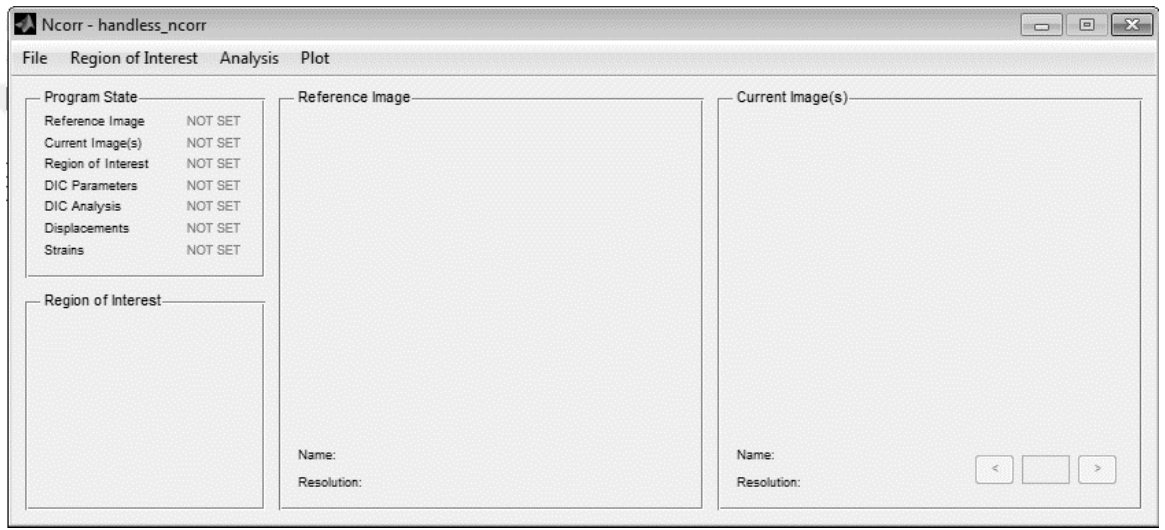
### **Ncorr'un Grafik kullanıcı arayüzü (GUI):**

Program MATLAB'taki komut yazma alanına (cmd) ‘‘handless\_ncorr = ncorr’’ yazarak başlamaktadır. Görülen ilk pencereyi Şekil 2.26 göstermektedir. Bu pencere üç bölümden oluşmaktadır:

1. Komut listeleri
2. Görüntü dizini gösterme alanı
3. DIC aşamalarının belirleme alanı

Ncorr yazılımı ile DIC analizi aşamaları:

1. Referans görüntüyü belirlemek
2. Güncel görüntüyü belirlemek
3. İlgi Bölgesi (ROI) belirlemek
4. DIC parametrelerini ayarlamak
5. DIC analizini yürütmek
6. Deplasman hesaplanmasını biçimlendirmek
7. Birim uzamayı hesaplamak



Şekil 2.25. Ncorr'un Grafik kullanıcı arayüzü (GUI)

### DIC analizi yürütülürken gereken tanımlar:

#### Referans görüntüsü:

Stres uygulanmadan önce örneğin ilk görüntüsü, jpeg, tiff, bnp, veya png gibi farklı uzantılı görüntü olabilir. Kenarları temiz ve keskin olması nedeniyle, bu çalışmada uzantısı tiff olan görüntüler hazırlanarak DIC analizinde kullanılmıştır.

### **Güncel görüntü dizisi:**

Bir dizi görüntü yüklenebilir, bu görüntüler sırayla adlandırılmalıdır ve **name\_#.ext** kalıbı almalıdır. # görüntünün sıra numarasıdır.

### **İlgi bölgesi (ROI):**

Bu alan belirlenirken iki not göz önünde bulundurulmalıdır. Bu alan, görüntü dizisinin analizde ilerlemesiyle görüş bölgesinden (ROV) çıkmamalıdır. Fotoğraftaki numenin kenarlarındaki yerel sonuçların hatalı çıkabilmesi nedeniyle, bu alan belirlenirken numenin kenarlarını kapsamaması daha münasip görülmektedir.

### **DIC parametreleri:**

#### **Altküme (subset):**

İki ardışık görüntüyü ilişkilendirmek için kullanılacak olan alan birimleridir. Bu altkümeler yarıçap ve içindeki her iki düğüm noktası arasındaki boşluk olmak üzere iki parametreye sahiptir. Deplasman ve birim uzama sadece düğüm noktalarında hesaplanacaktır (daha sonra bu gerçeği dikkate alarak kalibre sistemi kurulacaktır).

Parametrelerin daha kaliteli sonuçları elde etmek için, bilgisayar kabiliyetini de dikkate alarak hatalı sonuçların çıkmasına neden olmadan küçük seçilmesi tercih edilmektedir.

#### **Birim uzama analizi:**

Ncorr uygulaması, farklı iki koordinata göre, Green-Lagrange ve Eulerian-Almansi, birim uzama sonuçları verebilir.

Bu işlemde değiştirilebilen tek parametre birim uzama hesaplama alanının yarıçapı, bu alanda kuşatılan noktaların üzerinde regresyon uygulayarak uyumlu bir düzey sağlanmasıdır. İdeal bir alan yarıçapı seçimi, ideal alt-küme yarıçapının seçimi gibidir.

### **Tekrarlı çözüm kısıtları:**

Tekrarlı çözücünün çıkış kriterleri, fark vektörünün normu ve yinelemelerin sayısıdır.

### **İş parçalama aracı:**

Bu özellik ile, işlemcinin çekirdek sayısına bağlı olarak analizi hızlandırmak için birkaç çekirdek birlikte kullanılabilir. İşlemcinin sahip olduğu çekirdek sayısının yarısını kullanılması önerilir.

### **Yüksek Birim uzama Analizi:**

Yüksek birim uzama analizi, referans görüntüsünü ve ROI'yi de güncelleyip deplasmanları birbirine ekleyerek çalışmaktadır.

Bu seçenek aktifleştirilirse, güncellemenin devam edebileceği iki farklı yol vardır: “seed propagation” seçeneğinde, referans görüntüsü korelasyon katsayısı ve tekrarlama sayısına bağlı olarak güncellenecektir. Bunlar belirli değerleri aşarsa, referans görüntüsü güncellenir. “leapfrog” referans görüntüsünü güncellemeden önce kaç görüntü analiz edileceği elle seçilebilir.

### **Süreksiz Analiz:**

Bu seçim genellikle kırılma çalışmaları elde etmek için kullanılır, çatlak bölgesi çevresinde daha doğru sonuçlar verir.

Bu operasyonun nihayetinde deplasman ve birim uzama dağılım haritalarını sağlanacaktır.

### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. Giriş:**

Bu çalışmada, takviye edilmiş iki tür hibrid kauçuk (SVR 10 / SBR 1502 / CBR 1203) birbirlerinden ayrı bir şekilde incelenmiştir. İlk karışımda dolgu maddesi olarak grafen nanoplakaları, ikinci karışımda ise MWCNT kullanılmıştır. Her iki karışımda, dolgu matrisinin etkileşim özelliklerini geliştirmek için nano ölçekte karbon siyahı (FEF N.550) büyük miktarda eklenmiştir.

Dolgu oranında değişen nano dolgu matrisi hibrid kauçuk matrisiyle beraber üç farklı hiperelastik nanokompozit geliştirilmiştir. Bu malzemeler ile dolgu oranının nanokompozitin yırtılma ve elektriksel özelliklerine etkisi incelenmiştir.

#### **3.2. Malzemelerin hazırlanması:**

##### **3.2.1. Malzeme üretimi:**

Üç farklı kauçuk SVR, SBR ve CBR karışımı ile bir kauçuk matrisi oluşturuldu. Farklı katkı maddeleri ilave ederek iki ana karıştırma aşaması uygulandıktan sonra hiperelastik nanokompozit malzemeler üretildi.

İlk karıştırma işlemi, kauçuk karışımına CB ve birkaç katkı maddesi eklenip iç-dispersiyon mikser kullanılarak 30 dakika boyunca 110 ° C sıcaklıkta karıştırılarak gerçekleştirildi. İkinci karıştırma işleminde ise üç farklı oranda grafen nanoplaka (1, 4, 8 phr), kükürt ve birkaç farklı katkı maddesi eklenmiştir. 25 dakika boyunca 70 ° C'nin altında iki-karıştırıcı mikser kullanılarak, üç farklı dolgulu çapraz bağlanmaya uygun karışım hazırlanmıştır.

Sonra oda sıcaklığında 24 saat bekletildi. Numuneler tartıldı, daha sonra 165 °C sıcaklıkta 8 dakika boyunca basınç altında şekillendirme işlemi ile vulkanize edildi. Sonra 16 saat dinlendirildiler (Şekil 3.1). Şekil 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8 taramalı elektron



mikroskobu (SEM) ile üretilen kauçuk numunelerin mikroskobik yapılarını göstermektedir, içerikleri ise Çizelge 3.1’de verilmiştir (Kasım ve Yazıcı 2018).

MWCNT dolgulu nanokompozit oluşturulmak için aynı prosedür kullanıldı. Farklı olarak ikinci karıştırma aşamasında 1, 2, 3 phr oranlarında MWCNT eklenmiştir. Ayrıca, tüm kompozitlere sabit oranda grafit eklenmiştir (Çizelge 3.2) (Kasım ve ark. 2017).



**Şekil 3.1.** Malzemenin üretme aşamaları (Papageorgiou ve ark. 2015'ten değiştirilerek alınmıştır)

**Çizelge 3.1.** Grafen nanoplaka dolgulu kompozitin içerikleri; phr, her yüz partikülde nanodolgu partikül sayısı

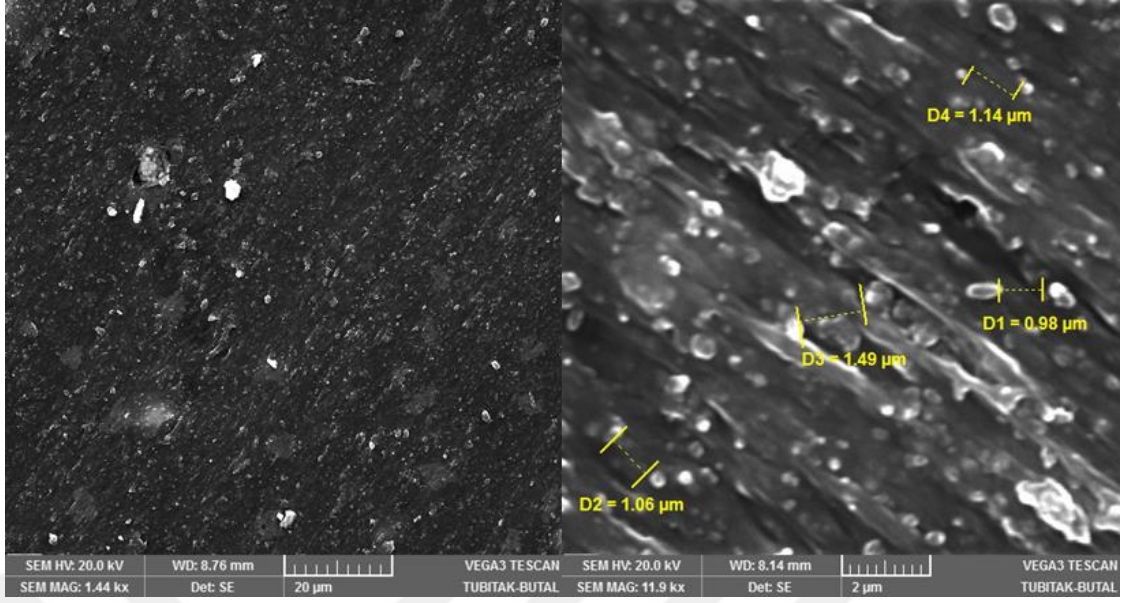
İçerikler		GNP-1	GNP-4	GNP-8
Kauçuk karışımı	SVR 10	37,7	37,7	37,7
	SBR 1502	28,8	28,8	28,8
	CBR 1203	33,9	33,9	33,9
dolgular	FEF N550	59,8	59,8	59,8
	Second FEF N550	7	4	0
	Graphene	1	4	8
Kimyasal katkıları	ZNO	2,2	2,2	2,2
	Stearic Acid	2	2	2
	IPPD	1	1	1
	Ozone Wax	1	1	1
	TMQ	1	1	1

**Çizelge 3.2.** Grafen nanoplaka dolgulu kompozitin içerikleri; phr, her yüz partikülde nanodolgu partikül sayısı (devam)

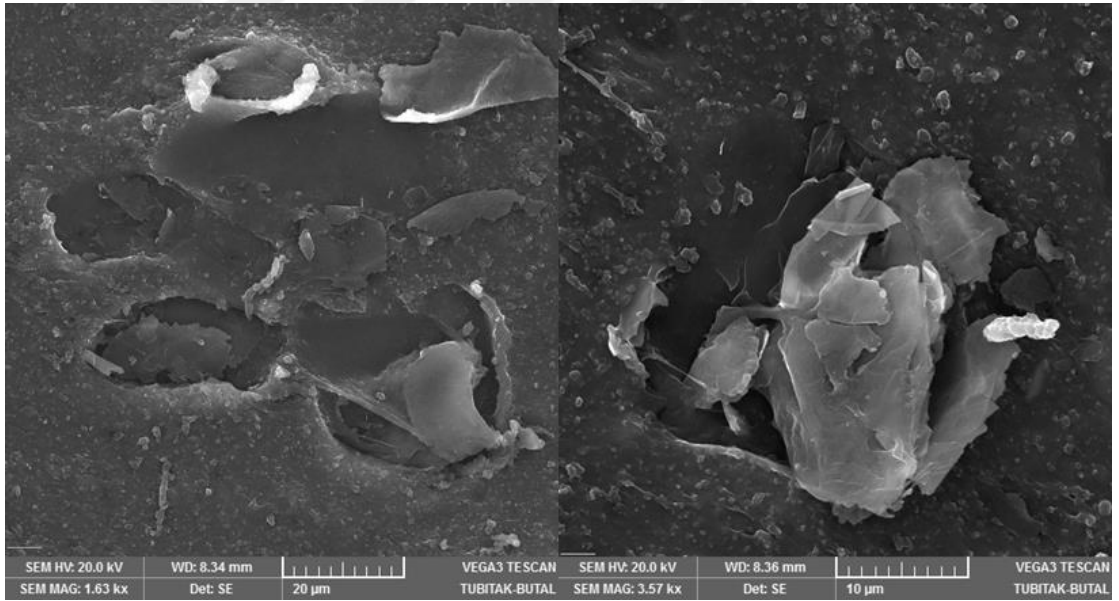
Yağ	Paraffinic Oil	20,34	20,34	20,34
Vulkanize katkıları	S80	2,03	2,03	2,03
	CBS	1,19	1,19	1,19

**Çizelge 3.3.** MWCNT dolgulu kompozitin içerikleri

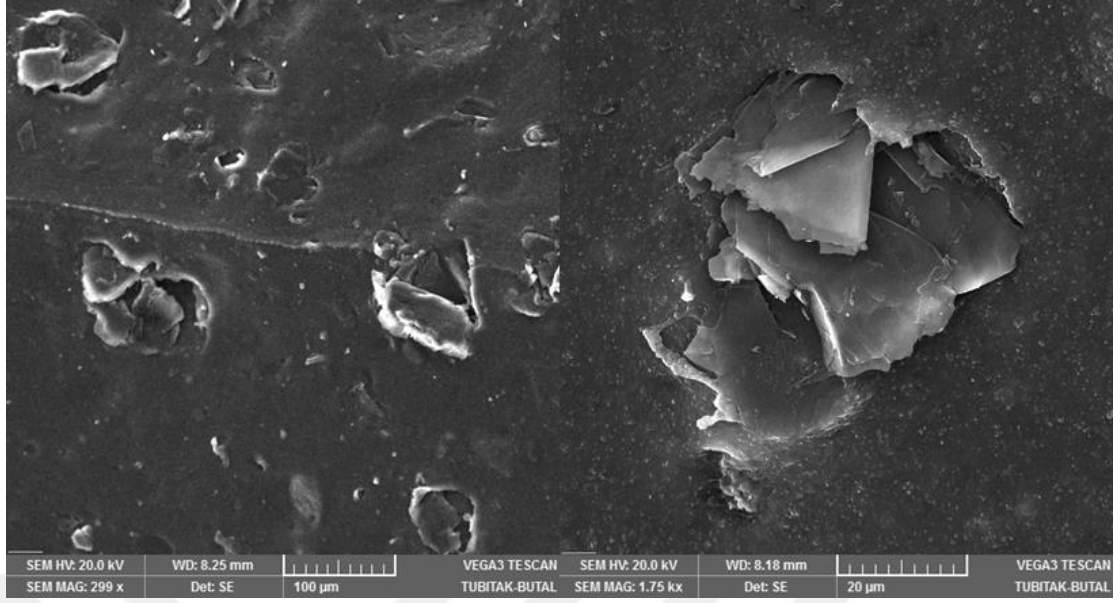
İçerik		MWCNT-1	MWCNT-2	MWCNT-3
Kauçuk karışımı	SVR 10	37,7	37,7	37,7
	SBR 1502	28,8	28,8	28,8
	CBR 1203	33,9	33,9	33,9
Dolgular	FEF N550	59,8	59,8	59,8
	Second FEF N550	6	5	4
	MWCNT	1	2	3
	Graphite	1	1	1
Kimyasal katkıları	ZNO	2,2	2,2	2,2
	Stearic Acid	2	2	2
	IPPD	1	1	1
	Ozone Wax	1	1	1
	TMQ	1	1	1
Yağ	Paraffinic Oil	20,34	20,34	20,34
Vulkanize katkıları	S80	2,03	2,03	2,03
	CBS	1,19	1,19	1,19



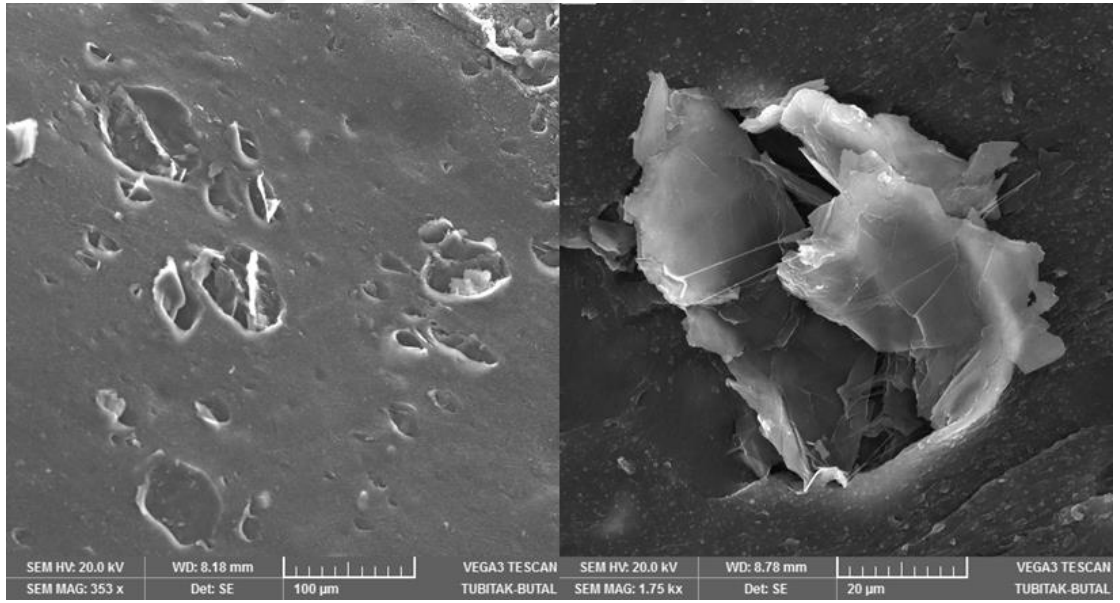
Şekil 3.2. Dolgusuz kauçuk karışımının SEM görüntüsü



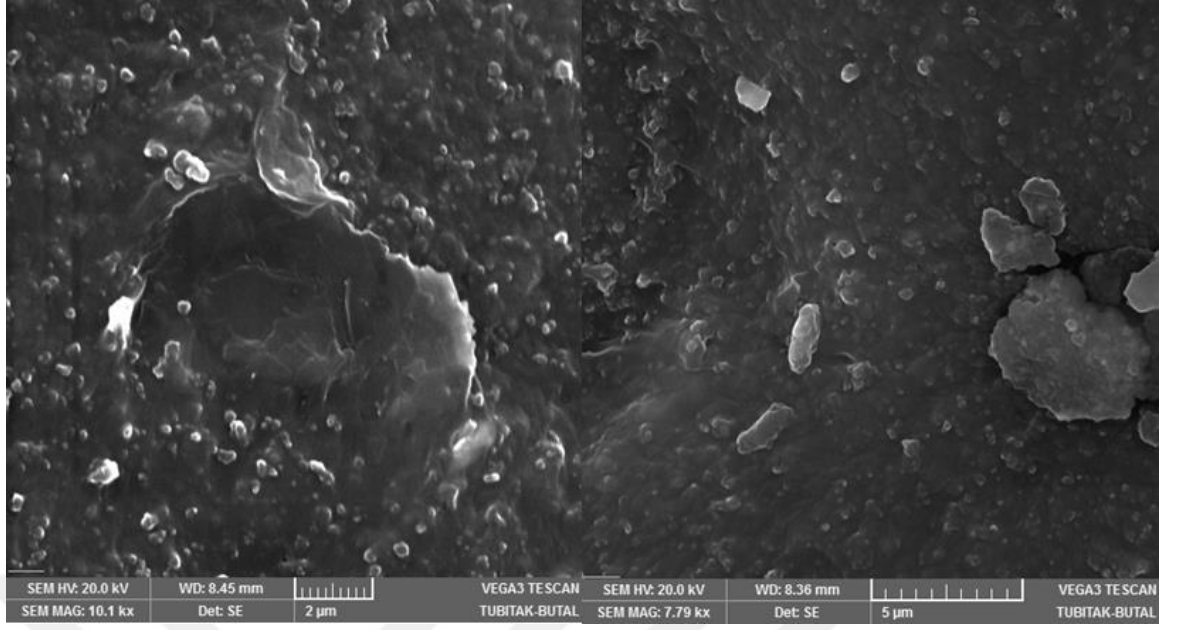
Şekil 3.3. 1 phr oranında grafen nanoplaka dolgulu nanokompozitin SEM görüntüsü



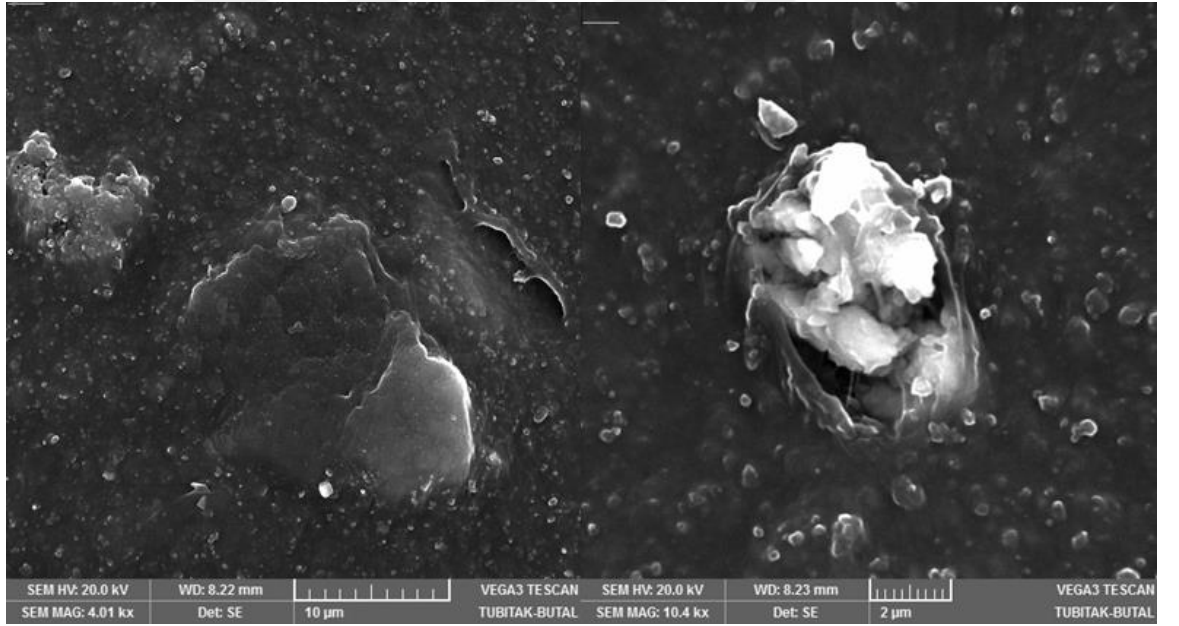
Şekil 3.4. 4 phr oranında grafen nanoplaka dolgulı nanokompozitin SEM görüntüsü



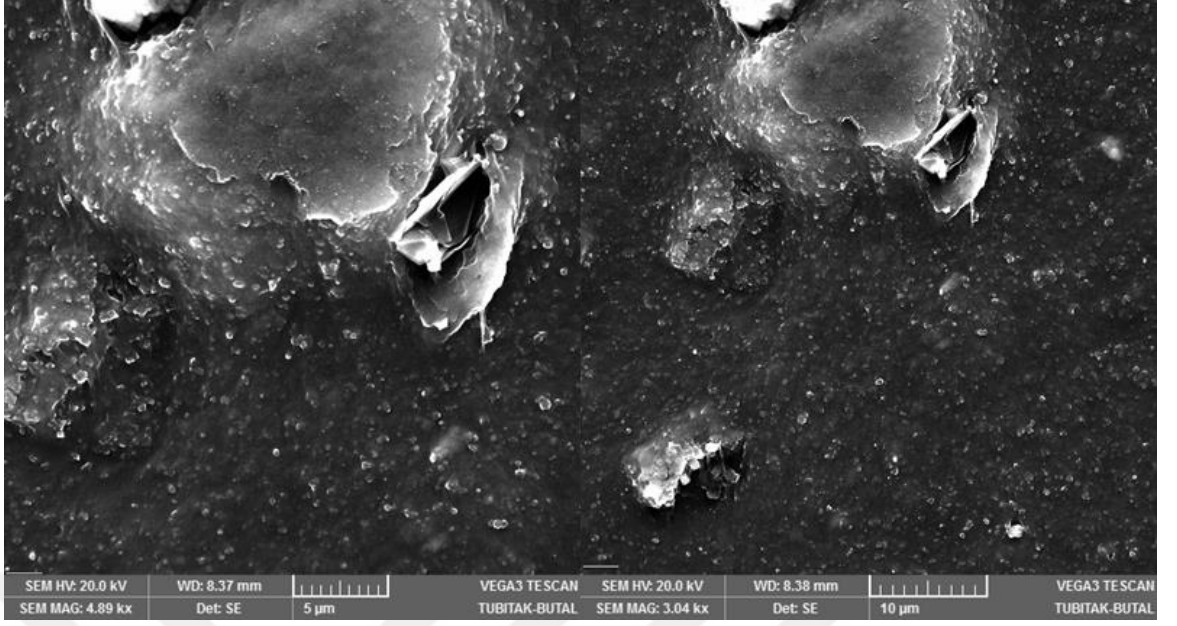
Şekil 3.5. 8 phr oranında grafen nanoplaka dolgulı nanokompozitin SEM görüntüsü



Şekil 3.6. 1 phr oranında MWCNT dolgulı nanokompozitin SEM görüntüsü



Şekil 3.7. 2 phr oranında MWCNT dolgulı nanokompozitin SEM görüntüsü

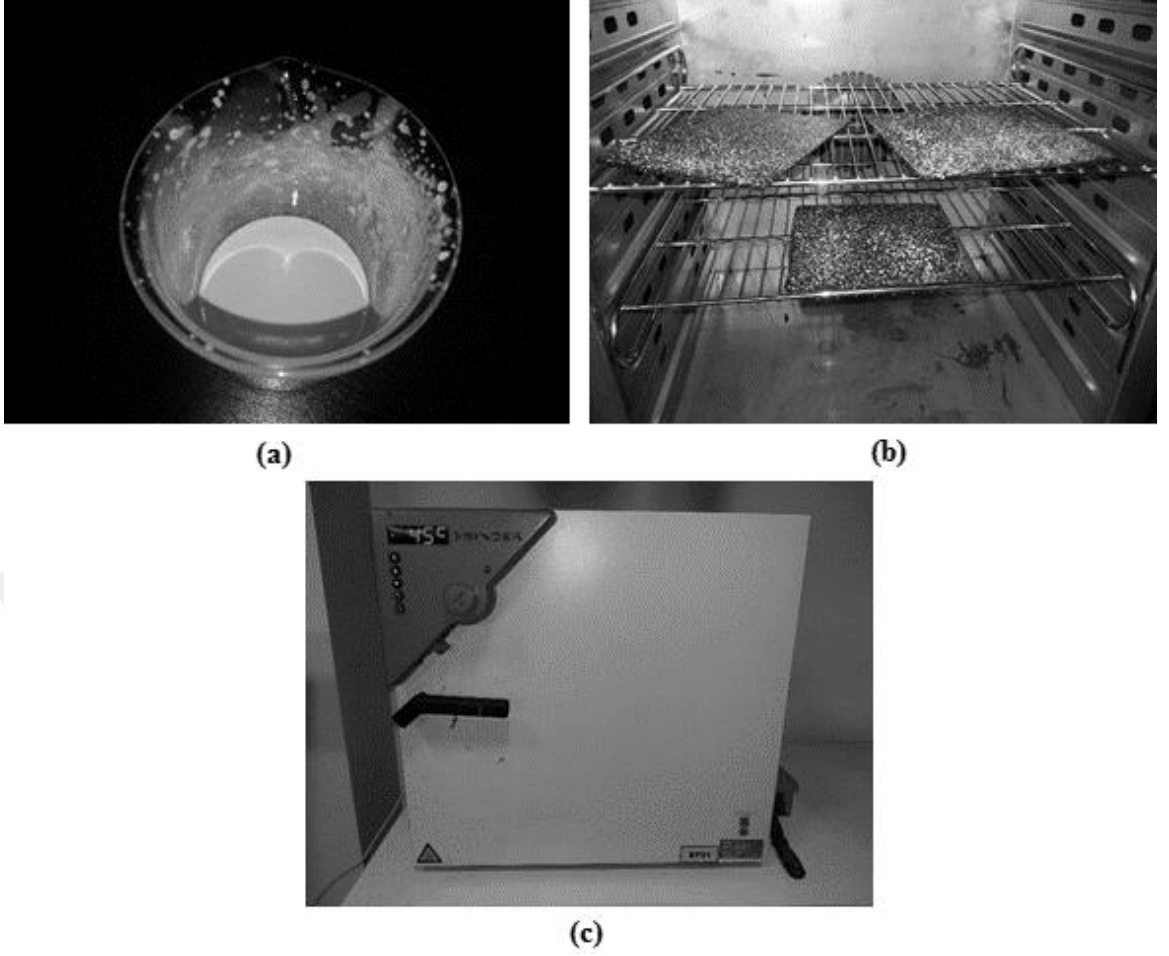


**Şekil 3.8.** 3 phr oranında MWCNT dolgulı nanokompozitin SEM görüntüsü

### **3.2.2. Benek deseninin hazırlanması:**

DIC analizlerinin uygulanması, ilgi bölgesi (ROI) üzerinde uygun bir benekleme operasyonu gerektirir. Normal boya, numuneleri hiperelastisiteye sahip değildir, bu nedenle test sırasında benekler kayacaktır. Beneklerin izlenmesinin, malzeme izlenmesini karşılamasından emin olmak için, kauçuk esaslı boya hazırlandı ve ROI'ye püskürtüldü. Beneklenme işlemi, ROI'nin her bir alt alt kümesinin sahip olması gereken gri tonlama seviyesinin tekliğini tahsis etmek için, rastgele ve farklı yoğunlukta gerçekleştirildi. Boya 15 dakika 45 ° C'nin altındaki vulkanizasyon ile yüzey ile çapraz bağ yapması sağlanarak kauçuk numunelerden ayrılmadan aynı davranışı göstermesi temin edildi.



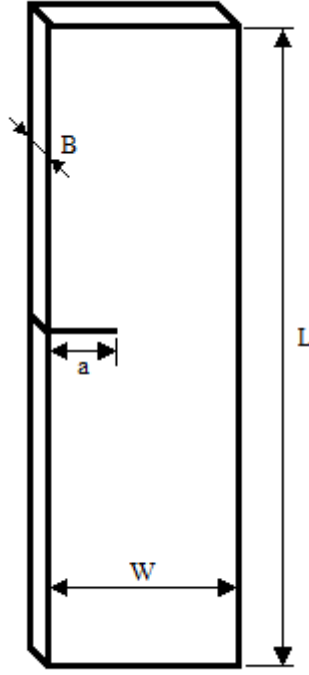


**Şekil 3.9.** Benek deseninin hazırlanma aşamaları: a) kauçuk esaslı boya hazırlanması, b) benek deseni hazırlanması, c) 45°C altında 15 dk boyunca beneklerin vulkanizasyonu

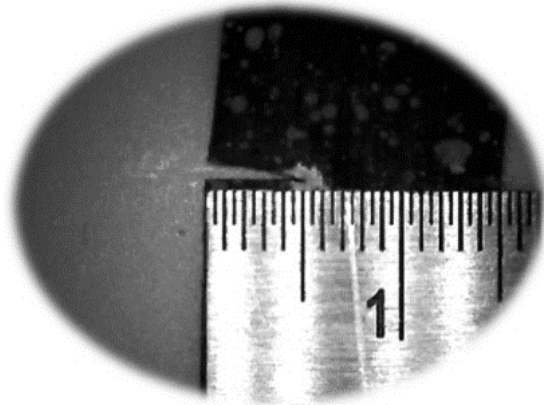
### 3.2.3. Tek kenar kesikli numune geometrisi:

Daha önce anlatıldığı gibi, farklı oranlarda grafen nanoplaka ve MWCNT içeren, üçer tip nanokompozit numuneler hazırlanmıştır. Şekil 3.10'da gösterildiği gibi numunelerin uzunluğu  $L = 100$  mm, genişlik  $W = 15$  mm ve kalınlık  $B = 1,95$  mm (MWCNT dolgulu numuneler için 2 mm) olarak belirlenmiştir. Ölçme uzunluğu ise (test makinesinin çeneleri arasında mesafe) 76 mm'dir (MWCNT dolgulu numuneler için 70 mm).

Her malzeme için 1, 3, 5, 7 ve 10 mm uzunluğunda numunelere keskin bir neşterle düz kesik açıldı (Şekil 3.11). Hazırlanan numuneler Şekil 3.12 a, b'de gösterilmektedir.

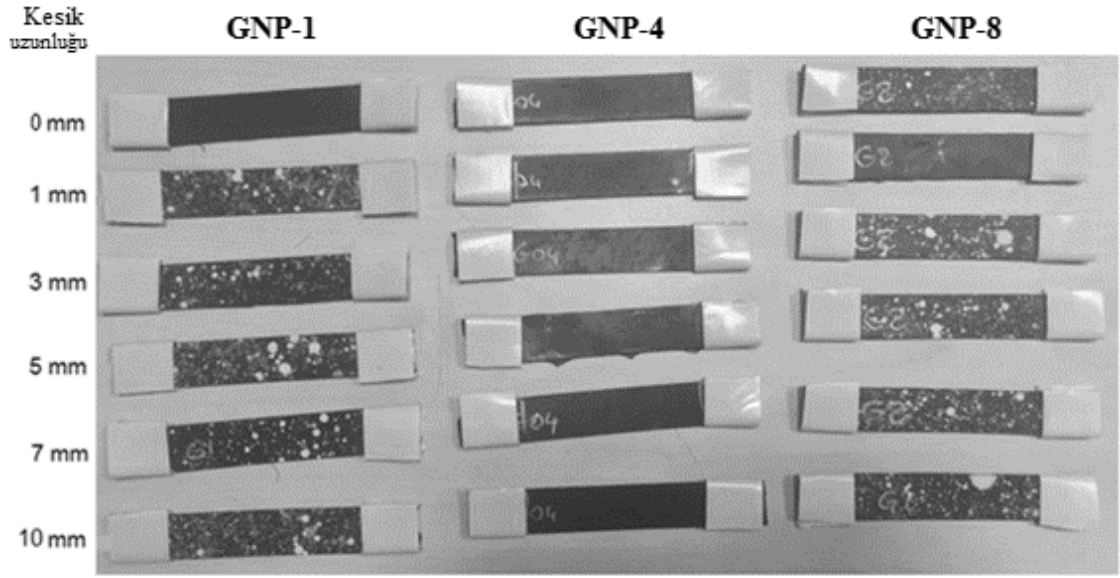


Şekil 3.10. Tek kenar kesikli örneğin geometrisi

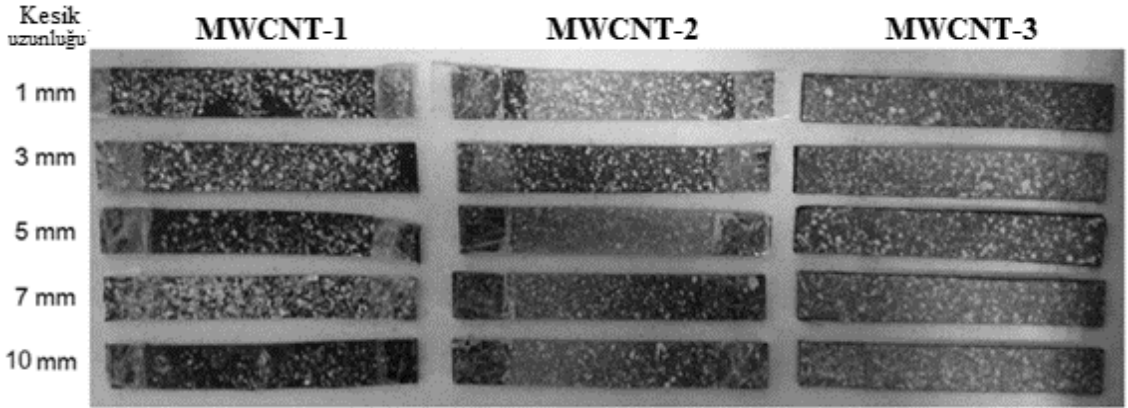


Şekil 3.11. Kesik açılma işlemi





(a)



(b)

**Şekil 3.12.** Hazırlanan örnekler: a) grafen nanoplaka dolgulu kauçuk, b) MWCNT dolgulu kauçuk; malzemeyi tanımlayıcı ifadenin harflerle ifade edilen kısmı dolgu malzemesini (MWCNT-1 vb) ve sağındaki sayı da dolgu malzemesi oranının phr değerini gösterir

### 3.3. 2D-Ncorr uygulamasının doğruluğu:

Ncorr yazılımı vasıtasıyla beneklerin izlenmesinin, malzeme davranışının izlendiğini doğrulamak için, yüzeyi beneklendirilmiş malzeme numunesi, Zwick / Roell Z010 çekme testi cihazı kullanarak 20 mm/dak hızda ve oda sıcaklığında test edilmiştir. Test esnasında dijital kamera ile ölçüm bölgesinin video kaydı alınmıştır. Testten elde edilen Gerilme-

Birim Şekil Değişirme eğrisi, Ncorr yazılımı yardımı ile yapılan analizlerden elde edilen Gerilme-Birim Şekil Değişirme eğrileri karşılaştırılmıştır.

Ncorr yazılımı, serinin her görüntüsü için Lagrangian-Green koordinat sistemine göre lokal yer değiştirme ve lokal birim uzama dağılımı sağlamaktadır. Lakin bu yazılım global mühendislik birim uzamasının sonuçlarını direkt vermez. Bundan dolayı, yazılım kılavuzunun sağladığı kodları kullanarak ve Lagrangian-Green birim uzaması ile mühendislik birim uzamasını bağlayan ilişkileri (Nguyen ve ark. 2017) dikkatte alarak MATLAB ile bir ek-kod hazırlanmıştır (EK 2).

$$E_{true} = \ln(1 + E_{eng}) \quad (3.1)$$

$$E_{eng} = -1 + \sqrt{2E_{lag} + 1} \quad (3.1a)$$

Birim uzama dağılımındaki her bir lokal değerden lokal mühendislik birim uzamayı hesapladıktan sonra, birim uzama dağılımındaki tüm lokal mühendislik değerlerinin ortalaması hesaplanarak spesifik bir görüntünün global mühendislik birim uzaması elde edilmektedir (Nguyen ve ark. 2017).

$$E_{ave.} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M E(i, j) \quad (3.2)$$

Deneysel veriler toplanırken eş zamanlı olarak Sony α6000 dijital kamera ile deney videoya kaydedildi (daha sonra bu videodan bir görüntü dizisi çekildi). bu iki icra eş zamanlı yapılması dolayısıyla, temeli zaman olan bir korelasyon işlemi yapıldı, bu deneysel sonuçların Ncorr yazılımından elde edilen sonuç ile ilişkilendirilmesini mümkün kıldı.

#### **3.4. Yırtılma direncinin araştırılması:**

Genellikle, kauçuk benzeri malzeme hiperelastikliği nedeniyle, tekrarlı yük altında sönümleyici bir malzeme olarak çalışır. Bu, çalışma sırasında kauçuk malzemede çatlak

oluşumları başlar. Dolayısıyla, çatlakların oluşumu, ilerlemesi ve bunlara dolgu oranının etkisinin incelenmesi, daha verimli ve yüksek performansla daha uzun süre hizmet verebilir bir malzemenin üretilmesi için yüksek öneme sahiptir.

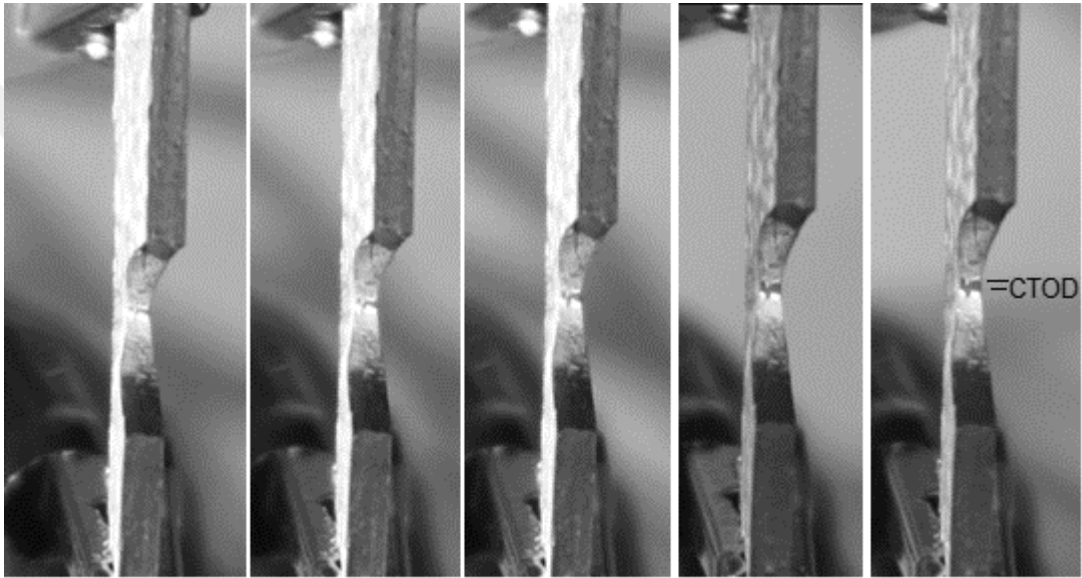
2.3 bölümünde belirtildiği gibi, çatlağın oluşumu ve ilerlemesinde yırtılma direncinin, J-integral testiyle belirlenen kritik J-değeri ( $J_{IC}$ ) ve yırtılma modülü ( $T_R$ ) ile yakın bir ilişkisi vardır.

Ayrıca, çatlak ucuna yakın alandaki malzemenin lokal performansının araştırılması ve aynı andaki eşlik eden yer değiştirme enerjisinin yoğunluğu, o alandaki stres konsantrasyonunu belirleyerek J-integral testinden çıkan sonuçlarını destekleyebilir veya açıklayabilir.

Çatlak oluşumu ve ilerlemesi sırasında yırtılma direncini değerlendirmek için kullanılan prosedür, J-integral testi uygulanması ile başlar. Böylelikle kesik uzunluğunda farklı her numune için SENT testi ile Kuvvet-Yer değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Daha sonra, her bir numune için belirli bir yer değiştirmeye kadar depolanan yer değiştirme enerjisi-çatlak uzunluğu eğrisi çizilmiştir (depolanan yer değiştirme enerjisi kuvvet - yer değiştirme eğrisi altındaki alandır; entegrasyon ile hesaplanır). Daha sonra, her yer değiştirme enerjisi - çatlak uzunluğu eğrisi için ikinci mertebeden bir regresyonu yapıp bu eğrinin matematiksel modeli elde edilmiştir (korelasyon katsayısı  $R^2$ , 0,95'in üzerinde idi; mükemmel regresyon). 2.3. bölümde belirtilen yırtılma enerjisi (J-değeri) denklemini kullanarak, elde edilen model türetildi. Farklı kesiklere sahip olan bütün diğer numuneler için diğer yer değiştirme değerlerine kadar aynı işlem uygulandıktan sonra dolgu oranında farklı bir numune için J-değeri - Yer değiştirme eğrisi elde edilmiştir (bkz. Şekil 4.7).

Yukarıda açıklanan işlem, her bir numune için binlerce entegrasyon ve hesaplamayı kapsar, bu nedenle, bu hesaplamaları gerçekleştirmek için MATLAB ile SENT testi sonucundan başlayarak J-değeri - Yer değiştirme eğrilerini vermesiyle sona eren bir kod hazırlanmıştır (EK 3).

Ardından, yırtılma parametrelerini belirlemek için önemli olan CTOD değeri, eşzamanlı olarak test sırasında numunenin ön tarafından Sony α6000 dijital kamerayla çekilen video kullanılarak Photoshop yazılımı kullanılarak elde edildi. Çatlak ucunun civarındaki alan, CTOD'u kolayca gözlemlemek için gümüş kalemle boyandı (Şekil 3.13). CTOD 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 mm olduğu anlardaki zaman değerleri alındı. Ardından aynı zamanlardaki global yer değiştirmeler ilgili test sonuçlarından alınmıştır (zaman esaslı bir korelasyon). Bu yer değiştirmeleri, J-değeri - Yer Değiştirme eğrisine verip, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 mm'lik CTOD değerlerine karşı gelen J-değerleri belirlendi.



**Şekil 3.13.** Soldan sağa 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 mm'lik çatlak ucu açma deplasmanı (CTOD)

Böylece *J-değeri* - CTOD eğrisinin çizilmesi mümkün oldu, 2.3. bölümünde belirtildiği gibi, CTOD'un 0,1 mm'ye karşı gelen *J-değeri*  $J_{IC}$ ; ve eğrinin eğimi  $T_R$ 'dir (bkz. Şekil 2.16).

Daha önce açıklanan prosedür, dolgu maddesi oranı farklı her numuneye uygulandıktan sonra karşılaştırma yapılabilir (bkz. Şekil 4.10). 2.3. bölümde belirtildiği gibi, daha yüksek bir  $J_{IC}$  değeri, çatlak oluşumuna karşı daha fazla yırtılma direnciyken; daha yüksek bir  $T_R$  değeri ise çatlak ilerlemesine karşı daha fazla yırtılma direnci anlamına gelir.

Çatlak ucuna yakın olan alan ( $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ) incelenmiştir. Bölüm 2.3'te belirtildiği gibi, çatlak ucundaki lokal birim uzama büyüklüğü ve onun yakın alanı üzerindeki etkisi ve de yer değiştirme enerjisi yoğunluğu, yırtılma direncinde önemli bir etkiye sahiptir.

Bu nedenle, SENT testi sırasında Sony  $\alpha 6000$  dijital kamera kullanılarak numunenin yan tarafından bir video kaydedildi, ve ardından Photoshop yazılımı yardımıyla bir görüntü dizisi bu videodan çıkarıldı. Bu görüntü serisi DIC tekniği (Ncorr 2D yazılımı) ile analiz edilip, belirli bir global birim uzamada (yani bu birim uzamaya karşılık gelen görüntüde) çatlak ucuna yakın alandaki lokal birim uzama dağılımı elde edildi (bkz. Şekil 4.11).

Çatlak ucu her zaman en yüksek birim uzama değerine sahiptir (Reu ve ark. 2007), bu bilgiden faydalanarak çatlak ucundan başlayan x yönü boyunca lokal dikey birim uzama dağılımı veren bir kod hazırlanmıştır (EK 4) (bkz. Şekil 4.12).

X yönü boyunca lokal dikey birim uzama dağılımı, çatlak ucundaki dikey birim uzama büyüklüğünü ve onun etkisinin çatlak ucundan nereye kadar uzanabildiğini verir. Böylece bu alanın deforme olabilirliği açıklanmaktadır. Dong ve ark. (2016)'a göre, çatlak ucuna yakın alanın fazla deforme olabilirliğe sahip olması lokal yırtılma enerjisinin daha fazla dağılmasına neden olur, dolayısıyla malzeme yırtılma direncini olumlu bir şekilde etkiler. Bu bilgi farklı malzemelerin karşılaştırılmalarını mümkün kılar.

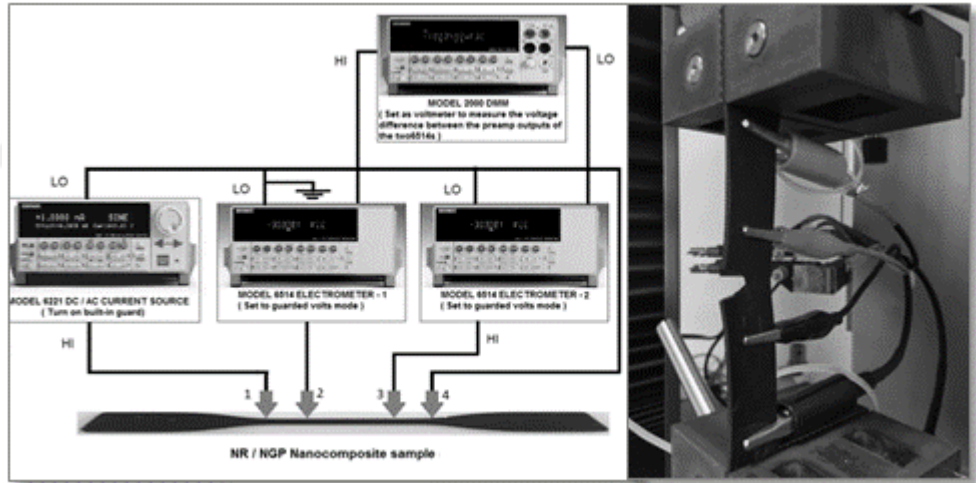
Belli bir birim uzamaya kadar depolanan yer değiştirme enerjisi yoğunluğu da belirlenmiştir. Yer değiştirme enerjisi yoğunluğu gerilme - birim uzama eğrisi altındaki alana eşittir (bir entegrasyonla hesaplanır). Bu test, çekme test cihazı Zwick / Roell Z010 ile kesiksiz bir numune üzerinde gerçekleştirildi.

Çatlak ucuna yakın alanın daha fazla deforme olabilirliği ve buna eşlik eden daha düşük bir yer değiştirme enerjisi yoğunluğu, çatlak ucuna yakın alandaki stres konsantrasyonuna olumlu bir şekilde etki eder, dolayısıyla yırtılma direnci artar (Dong ve ark. 2016).

### 3.5. Elektriksel özelliklerin araştırılması:

SENT testi sırasındaki elektriksel direnç değişimi dört problu ölçme yöntemi uygulanarak kaydedildi (Şekil 3.14), Dış problar 100 mA sabit bir DC'ye sahiptir ve voltaj iç problar kullanılarak ölçülür. Her iki kayıt arasında aralık süresi 0.25 saniyedir, Ohm kanununa göre elektrik direnci belirlenir.

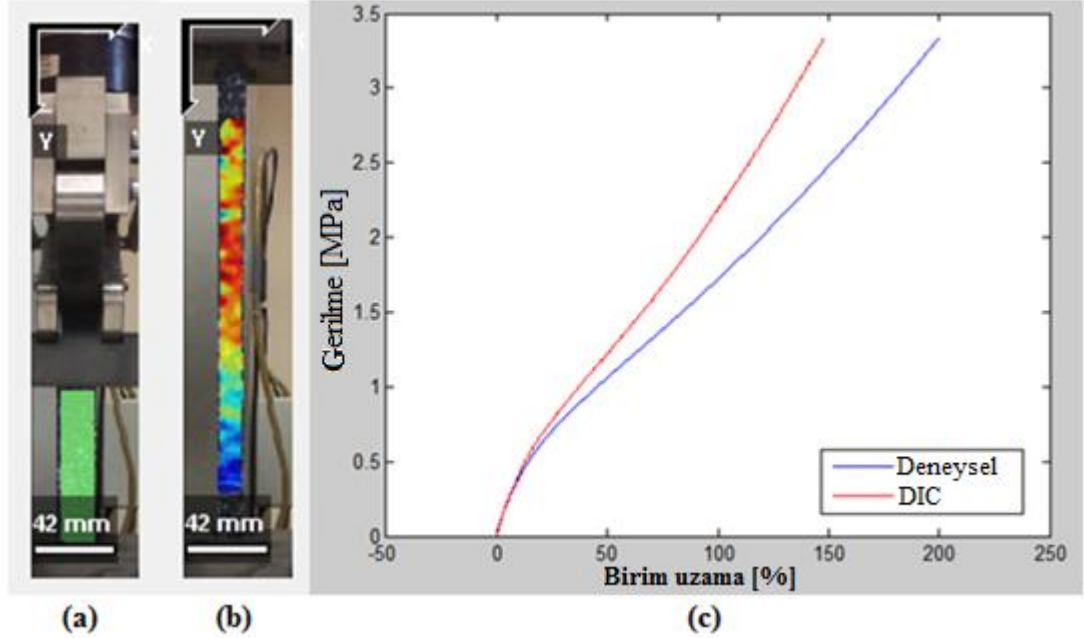
SENT testi sırasında, numune yırtılma noktasına kadar gerildi. Elektriksel direnç değişimi ölçmek için yenilikçi bir yöntem kullanıldı. Çatlak ilerlemeye başladığında (CTOD 0.1 mm'ye eşitken) elektriksel direnç ( $R_{op}$ ) ölçüldü; bu, belirli bir çatlak uzunluğuna veya CTOD'ye karşılık gelen elektriksel direncin kesin bir şekilde ölçümlenmesine olanak tanıdı. Farklı kesik uzunluğunda diğer örnekler için de  $R_{op}$  ölçüldü. Ve böylece çatlak ilerlemesi ile elektriksel direnç değişiminin ilişkisi belirlendi.



Şekil 3.14. Dört problu elektriksel direnç ölçme yöntemi

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. 2D-Ncorr uygulamasının doğruluğu:



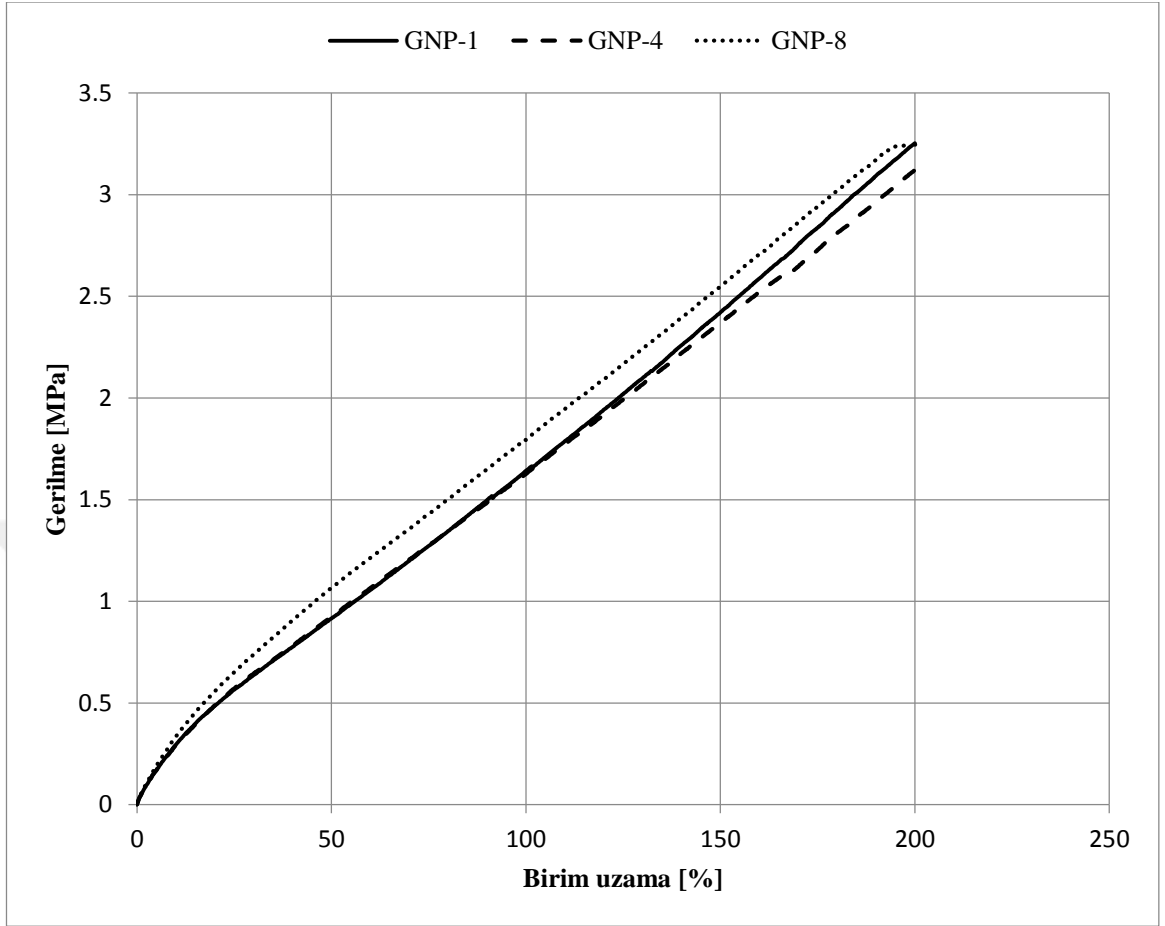
**Şekil 4.1.** Deneysel çekme testi ile Ncorr uyumluluğu: a) deforme olmayan numune, b) %200 birim uzama göstermiş numune, c) %200'e kadar olan birim uzamada gerilme – birim uzama eğrisi

Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, deney sonuçlarına Ncorr yazılımı tarafından elde edilen sonuçlar %50 birim uzamaya kadar iyi bir uyum gösterdi. Lakin daha sonra zayıf vulkanizasyon nedeniyle, boya benekleri numunenin yüzeyinden ayrılmaya başladı. Bu gözlem sonucu boya ve benekleme prosesi ile ilgili iyileştirmelere gidilmiştir.

### 4.2. Yırtılma direncinin araştırılması:

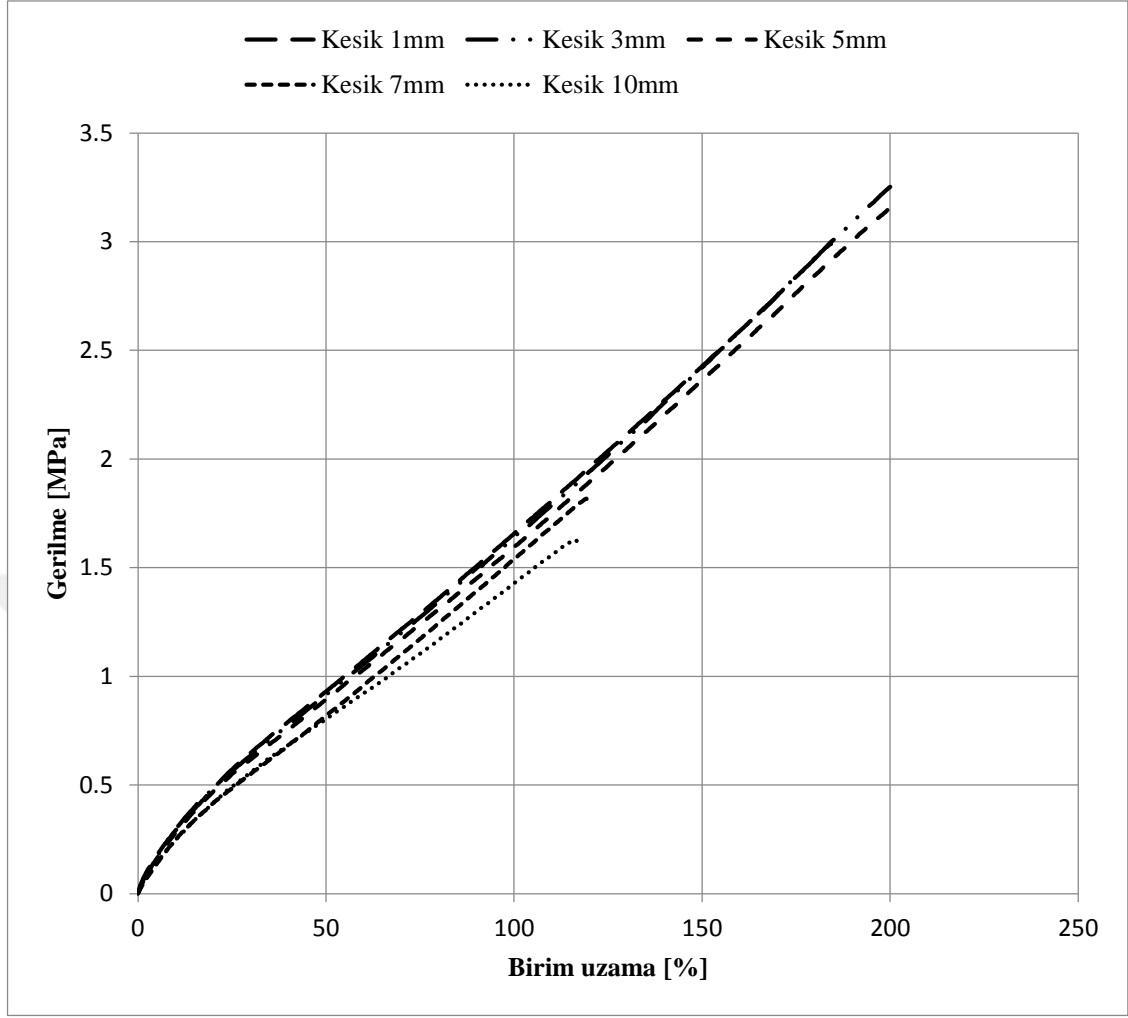
#### 4.2.1. Grafen nanoplaka dolgulu nanokompozit:

Örnek olarak, 3 mm kesikli numuneler deneysel gerilme-birim uzama eğrilerini göstermek için seçildi. Üç grafen nanoplaka dolgulu kompozit ile ilgili eğriler için deneysel sonuçlar Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

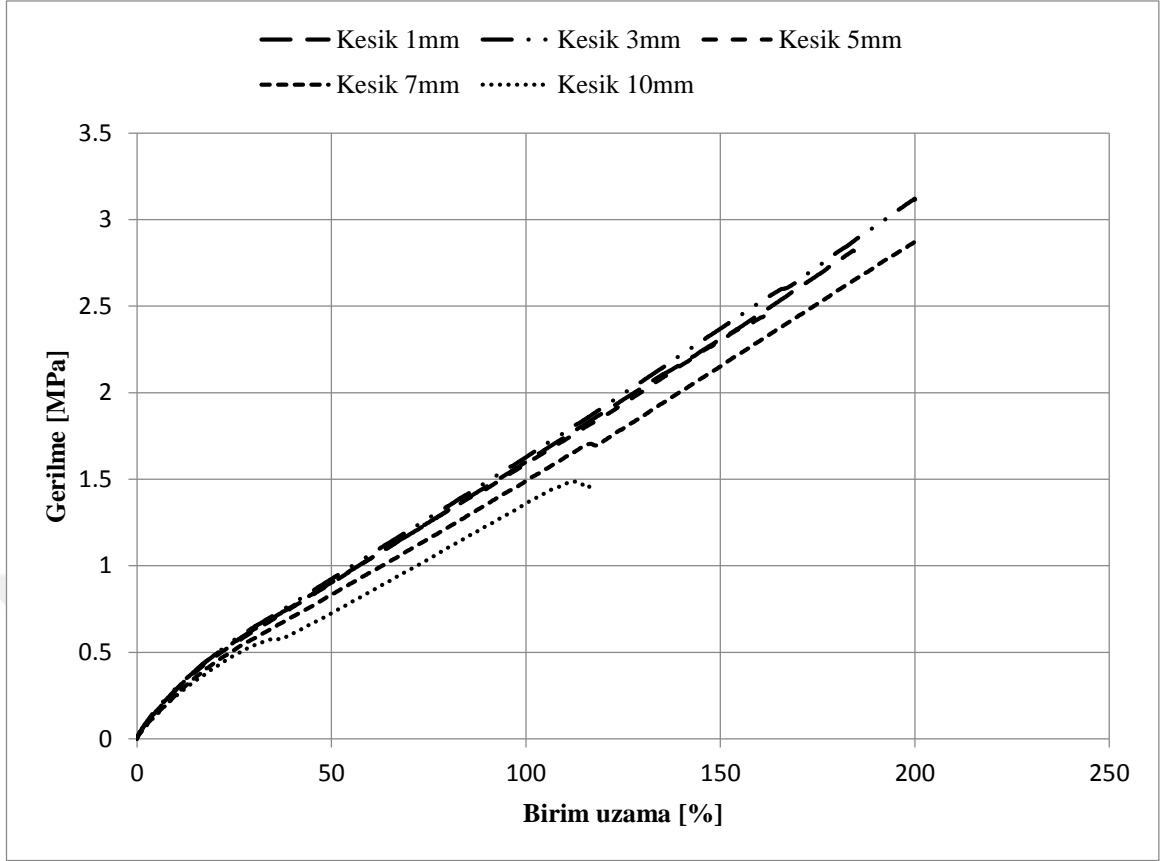


**Şekil 4.2.** Farklı grafen nanoplaka dolgulu nanokompozitlerden seçilmiş 3 mm kesikli numunelerin mekanik performansı

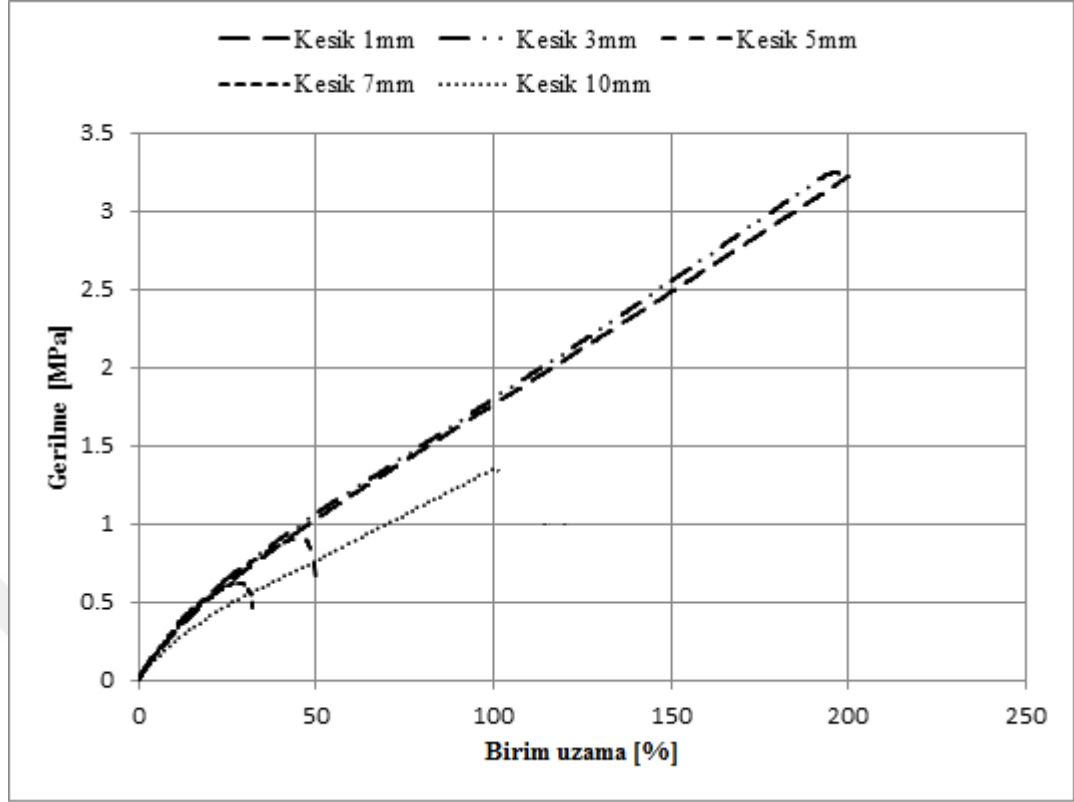




Şekil 4.3. GNP-1'in farklı kesik boylarındaki numunelerinin mekanik performansı



Şekil 4.4. GNP-4'in farklı kesik boylarındaki numunelerinin mekanik performansı

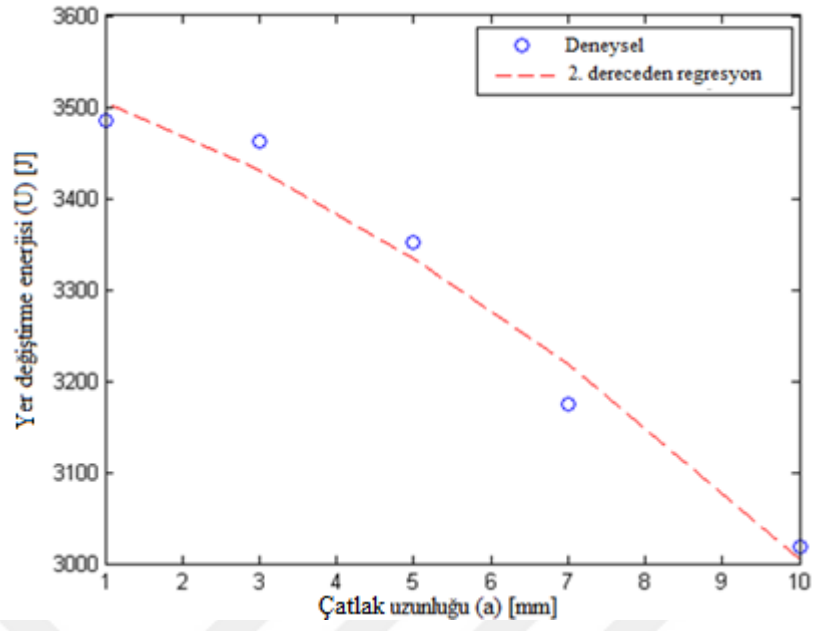


**Şekil 4.5.** GNP-8'in farklı kesik boylarındaki numunelerinin mekanik performansı

Örnek olarak, GNP-1 numunesinin 100 mm uzanmasına kadar depolanmış yer değiştirme enerjisi – çatlak uzunluğu (kesik uzunluğu) eğrisi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Denklem 2.14'e göre daha sonra türetilcek modeli oluşturmak için bu deney noktalarının üzerinde 2. dereceden enterpolasyon (regresyon) yapıldı. Elde edilen matematiksel Model aşağıda verilmektedir:

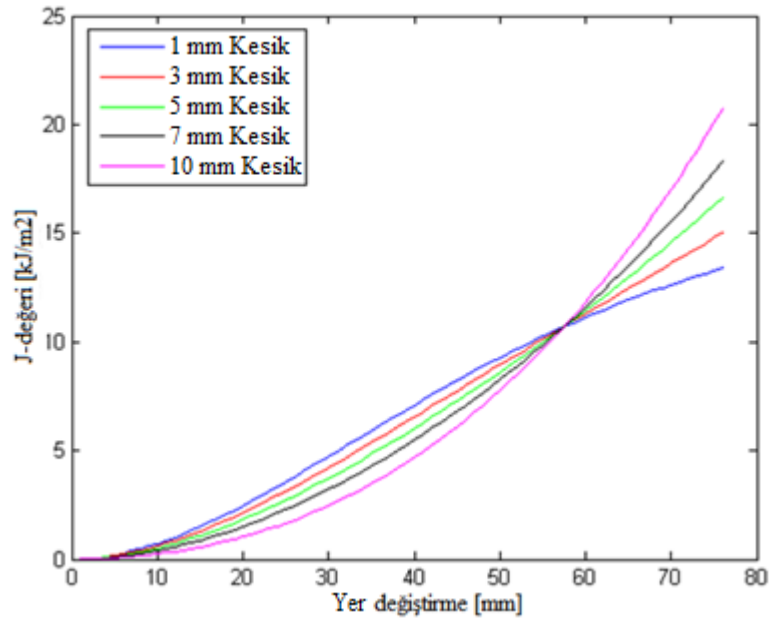
$$U = - 0,0026 a^2 - 0,0268 a + 3,5341 \quad (4.1)$$

Korelasyon katsayısı  $R^2 = 0,98$  çıktı; buna göre yapılan korelasyon mükemmel sayılmaktadır.

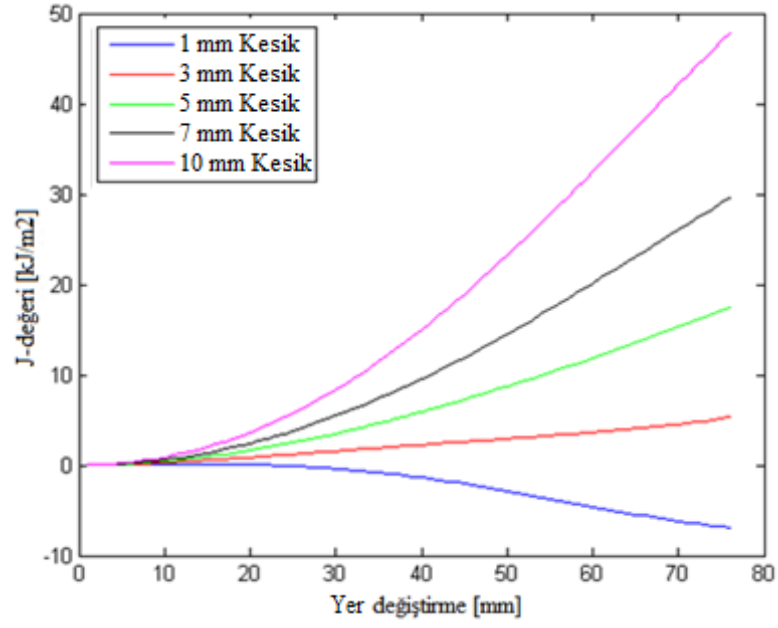


**Şekil 4.6.** GNP-1 numunesinin 100 mm uzanmasına kadar depolanmış yer değiştirme enerjisi – çatlak uzunluğu eğrisi

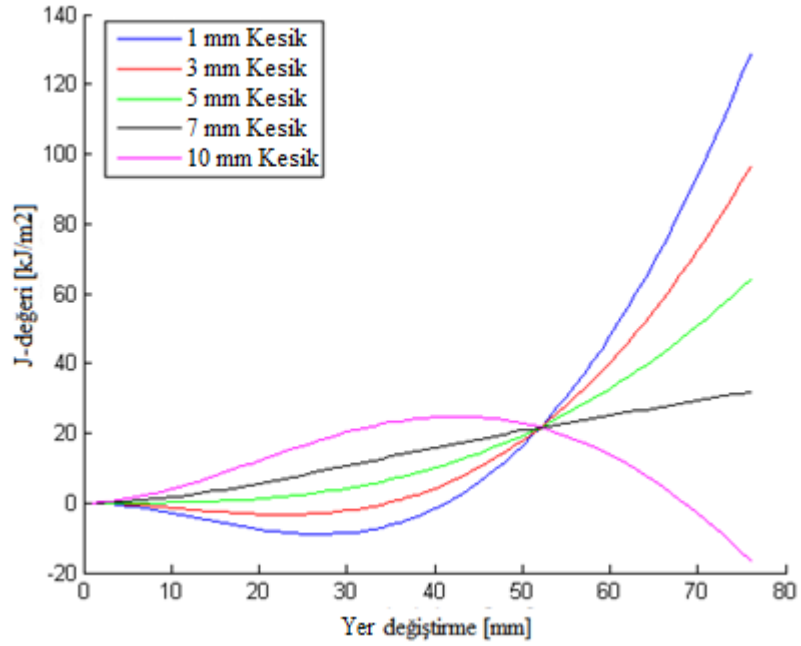
Farklı GNP dolgulu nanokompozitler için J-değeri-yer değiştirme eğrileri aşağıda gibi elde edilmiştir.



**Şekil 4.7.** GNP-1'in J-değeri-yer değiştirme eğrisi



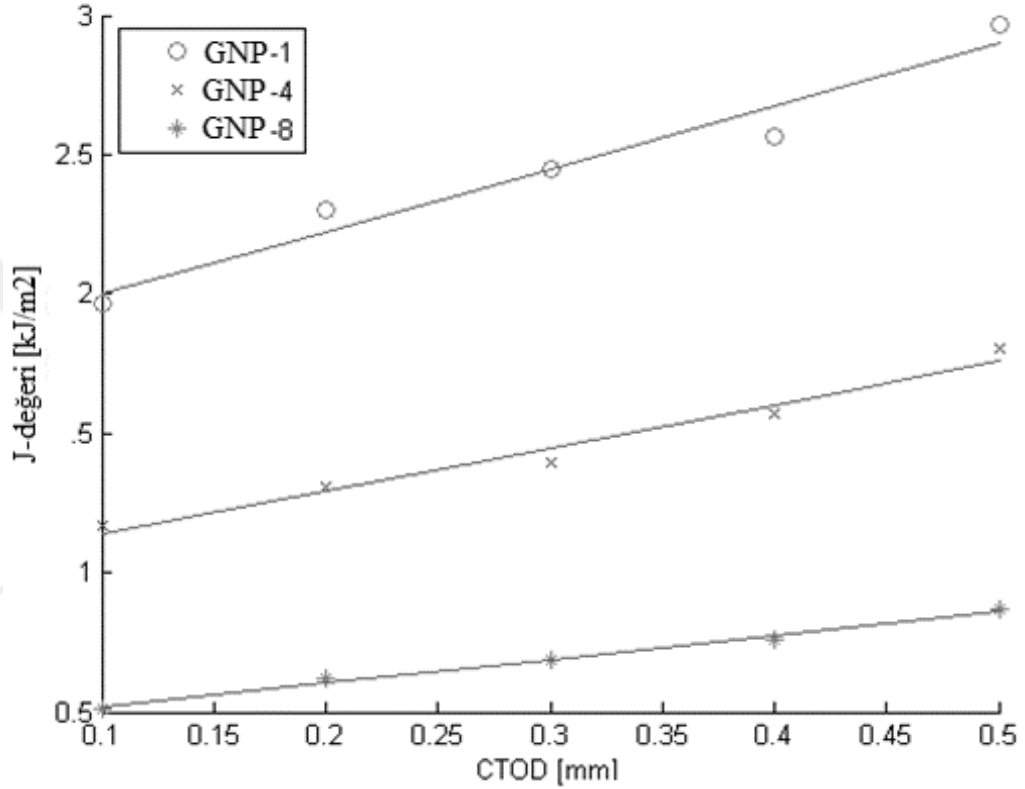
Şekil 4.8. GNP-4'in J-değeri-yer değiştirme eğrisi



Şekil 4.9. GNP-8'in J-değeri-yer değiştirme eğrisi

Farklı nanokompozitlerin yırtılma direncinin karşılaştırılması için, her bir kompozitin numunelerinden 3 mm kesikli olanlar seçildi, her bir numunenin J-değeri - CTOD eğrisi Şekil 4.10'da verildi.

Çizelge 4.1’de yer alan sonuçlar,  $J_{IC}$  ve  $T_R$  değerlerinin, GNP oranı artırıldığında azaldığını göstermektedir. Diğer bir deyişle, GNP oranı hem çatlak oluşma hem de ilerleme aşamalarındaki yırtılma direncini olumsuz olarak etkilemektedir. Bu, GNP’ler yüzünden nispeten az birim uzamalarda çatlak önündeki alanda ortaya çıkan kavilyasyonlara (Yan ve ark. 2013), ve GNP’lerin keskin kenarlarına atfedilebilir.

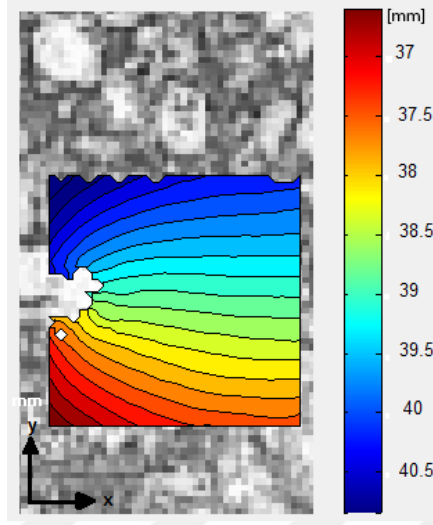


Şekil 4.10. Farklı GNP dolgulı nanokompozitlerin J-değeri – CTOD eğrisi

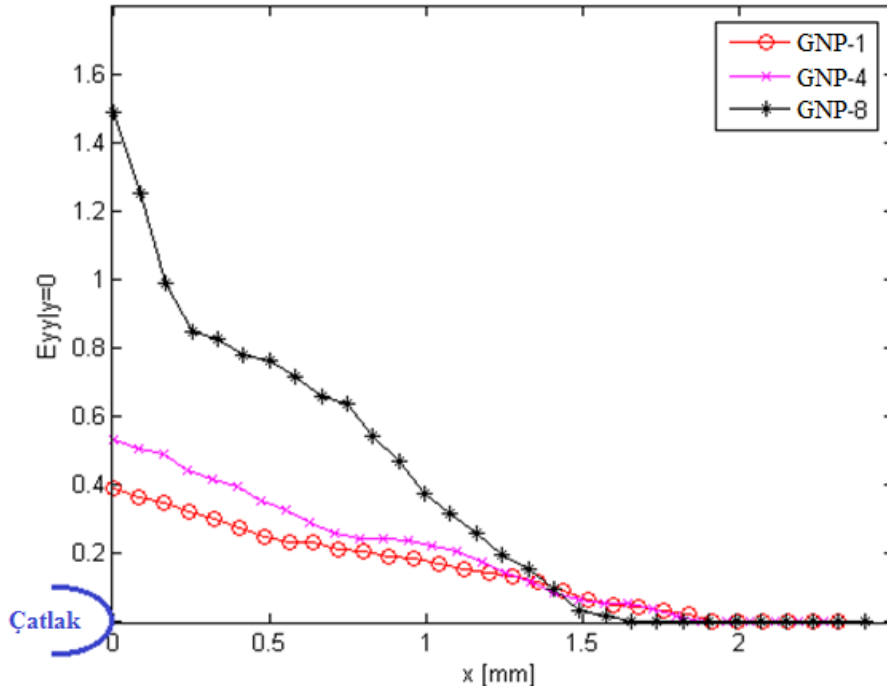
Çizelge 4.1. Farklı GNP dolgulı nanokompozitlerin yırtılma parametreleri

CTOD [mm]	$J$ -değeri [ $\text{KJ/m}^2$ ]					$T_R$ [MPa]
	0,1 (JIC)	0,2	0,3	0,4	0,5	
GNP-1	1,97	2,30	2,45	2,56	2,96	2,26
GNP-4	1,17	1,30	1,40	1,57	1,81	1,54
GNP-8	0,51	0,62	0,69	0,76	0,87	0,86

#### DIC analiz sonuçları:



**Şekil 4.11.** %100 global birim uzamada çatlak ucuna yakın alandaki ( $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ) Ncorr-2D ile elde edilen lokal dikey birim uzama dağılım haritası; Konturların paralel hale geldiği nokta, çatlak ucundaki lokal birim uzamanın etkisinin sona erdiğini gösterir



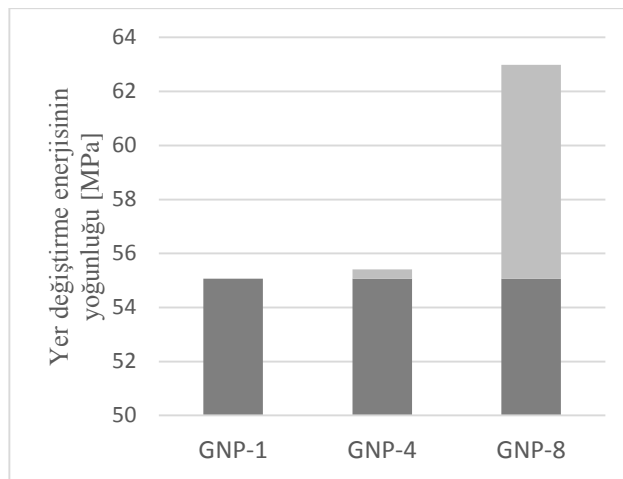
**Şekil 4.12.** Global birim uzamanın %100 olduğundaki farklı GNP kompozitleri için çatlak ucundan başlayarak x yönü boyunca lokal dikey birim uzama dağılımı. Karşılaştırmak için her kompozitten kesiği 3 mm olan numune seçildi

Çizelge 4.2, çatlak ucundaki dikey birim uzamadan etkilenen alanın uzunluğunun, karışıma daha fazla GNP eklerken, x yönünde kısalacağını göstermektedir. yani, karışımdaki GNP oranının artması, çatlak ucuna yakın olan alanın deforme olabilirliğini azaltmaktadır. Ayrıca, çatlak ucundaki dikey birim uzamanın kendisi de GNP oranı artarken yükselmektedir. Daha önce açıklanan her iki gözlem, çatlak ucuna yakın alanın daha fazla gerilme yoğunlaşmasına sahip olacağı anlamına gelir, bu nedenle bu şartlardaki numune daha erken yırtılmaya yatkın olur.

**Çizelge 4.2.** Çatlak ucuna yakın olan alanın parametreleri

	GNP-1	GNP-4	GNP-8
Çatlak ucundaki dikey birim uzama ( $E_{yy}$ ) [%]	0,39	0,53	1,49
Çatlak ucundaki dikey birim uzamanın etkisi [mm]	1,92	1,89	1,66

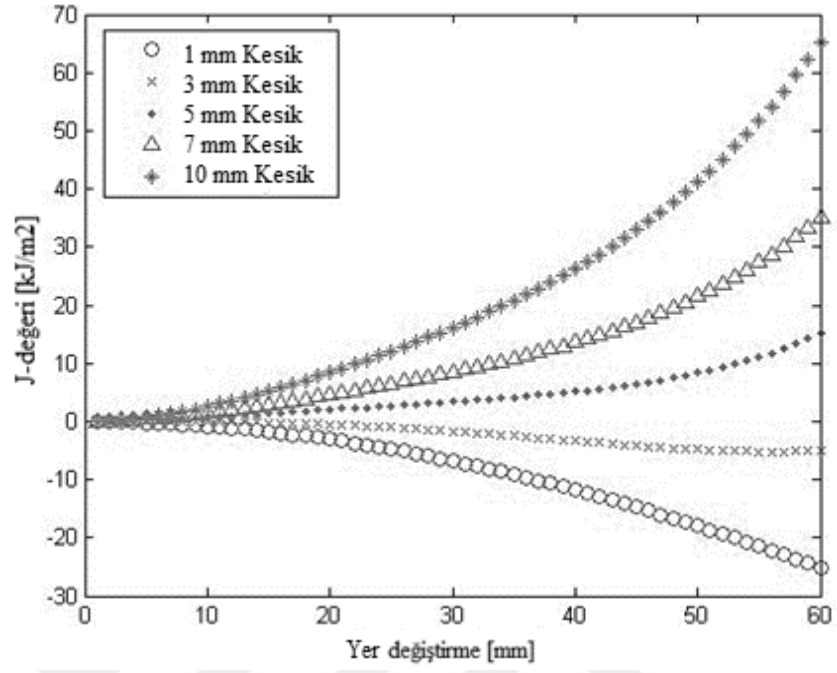
Her bir GNP nanokompozitin %100 uzanmasına kadar depolanan yer değiştirme enerjisinin yoğunluğu belirlenmek için, 3 mm kesikli numune seçildi (Şekil 4.13). Sonuçlar, numunenin, karışımdaki GNP oranı yükseldiğinde hacim biriminde daha fazla yer değiştirme enerjisini depoladığını gösterdi. GNP-1 ve GNP-4 karışımlarına kıyasen, GNP-8 karışımının hacim biriminde depoladığı yer değiştirme enerjisinin büyük artışı dikkat çekti.



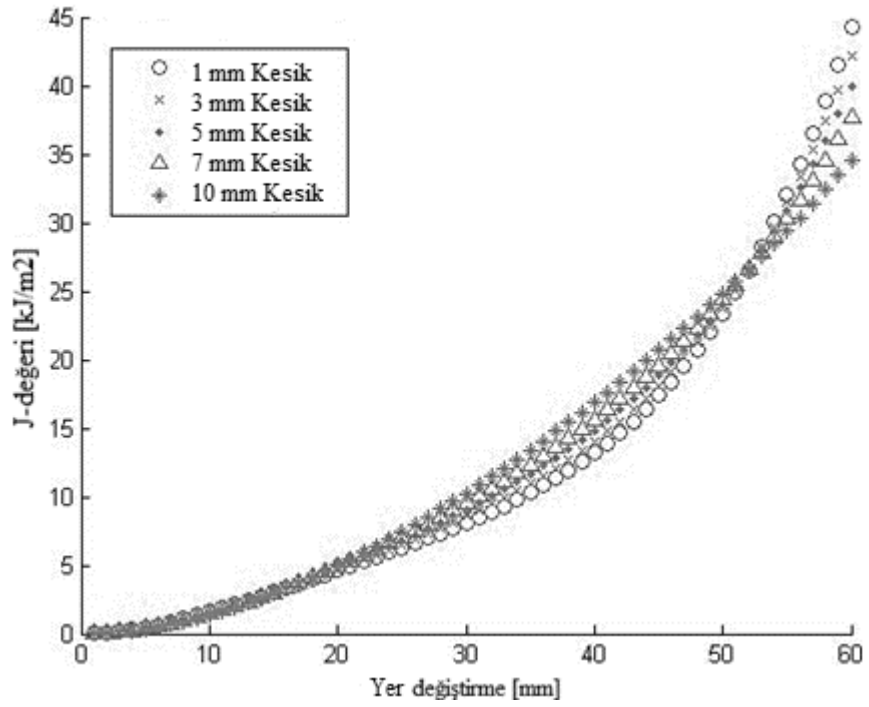
**Şekil 4.13.** Nanokompozitlerin %100 uzanmalarına kadar depolanan yer değiştirme enerjisinin yoğunluğu



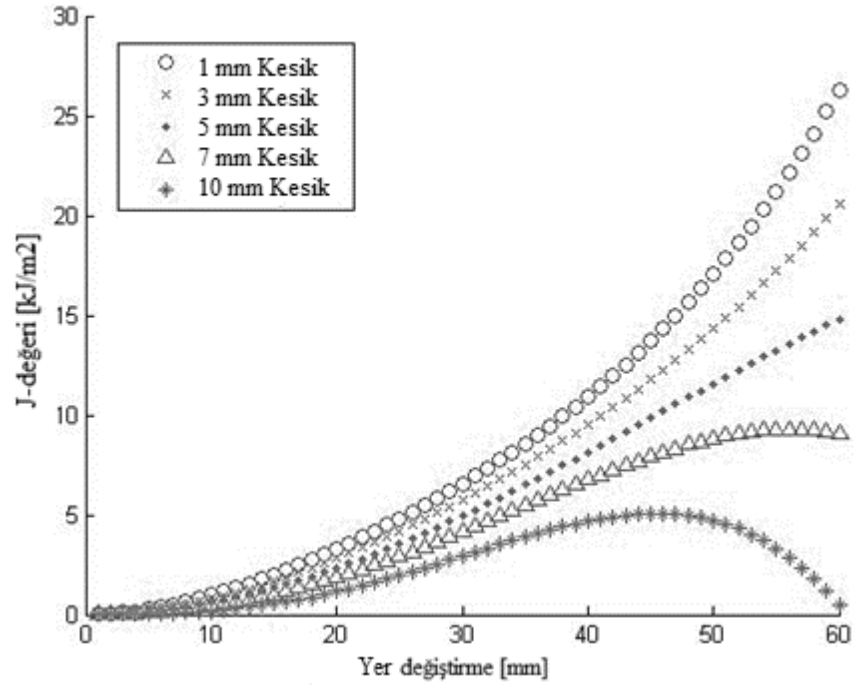
#### 4.2.2. MWCNT dolgulu nanokompozit:



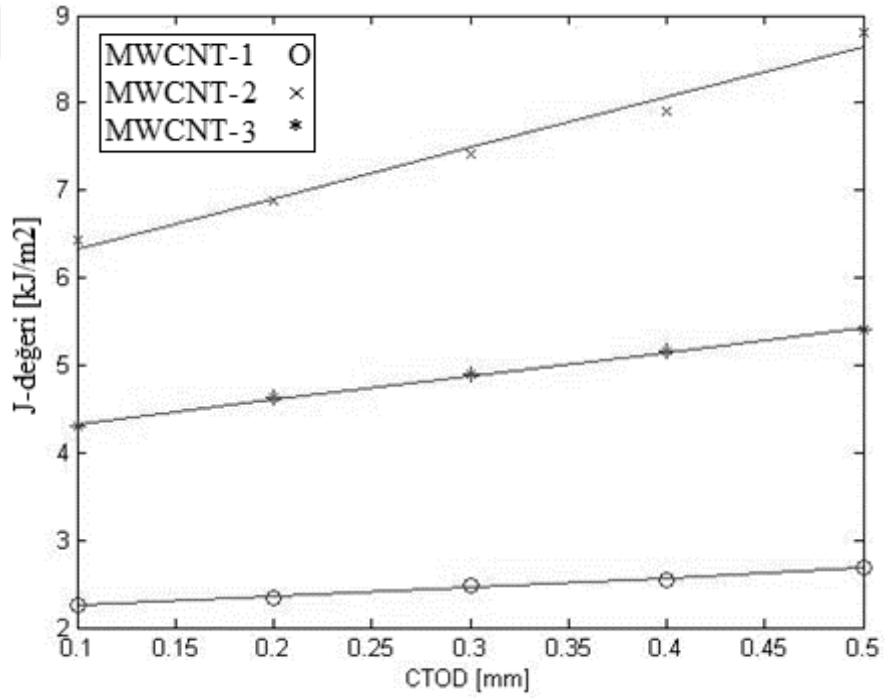
şekil 4.14. MWCNT-1'in J-değeri-yer değiştirme eğrisi



şekil 4.15. MWCNT-2'in J-değeri-yer değiştirme eğrisi



Şekil 4.16. MWCNT-3'ün J-değeri-yer değiştirme eğrisi



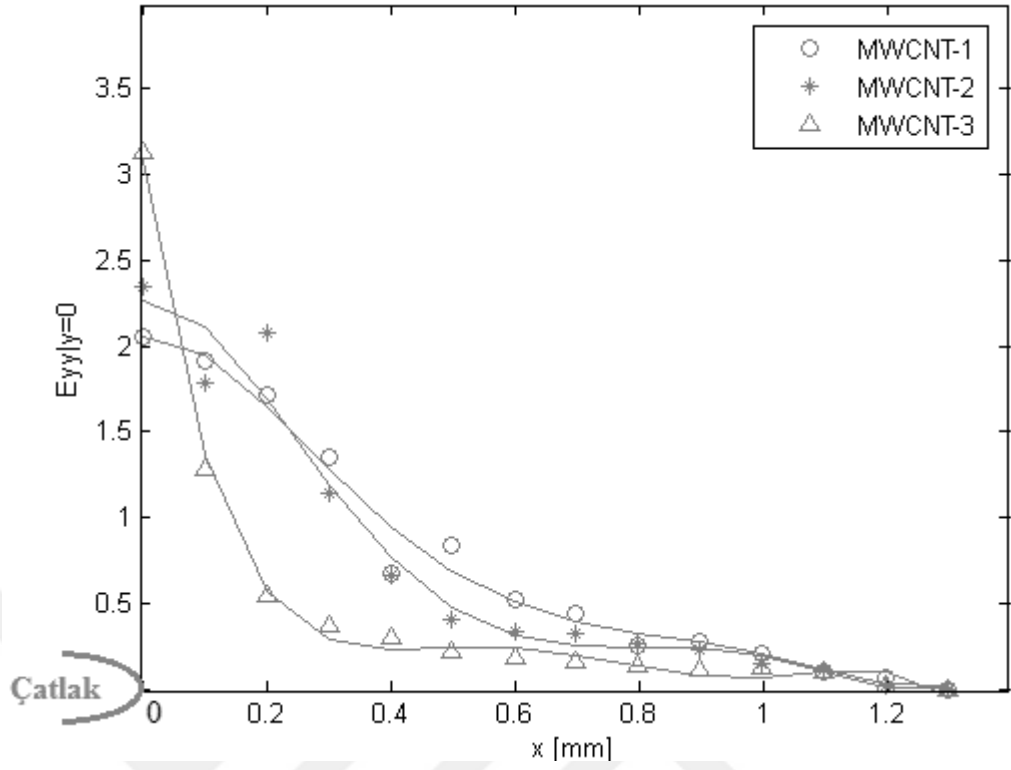
Şekil 4.17. MWCNT dolgulu nanokompozitin J-değeri – CTOD eğrisi; her nanokompozitten keşiği 5 mm olan numune seçildi

Çizelge 4.3'te açıklanan sonuçlar,  $J_{IC}$  ve  $T_R$  değerlerinin MWCNT-1'dekine göre MWCNT-2 ve MWCNT-3'te geliştirildiğini gösterir. Bu, çatlak oluşma ve ilerleme aşamalarında yırtılma direncinin etkin bir şekilde gelişmesinin sebebi MWCNT'nin karışımdaki oranının artmasına bağlanmaktadır. Ancak, MWCNT-3'ün yırtılma direnci, MWCNT-2'ninkine kıyasen azalmıştır, çünkü karışımda MWCNT oranının 2 phr'nin üzerine çıkarılması, karbon nanotüplerin bazı alanlarda topaklanmasına fırsat vermektedir. Bu artış dolayısıyla oluşan topaklanma, karışımın homojenliğine zarar vermiş; böylece  $J_{IC}$  ve  $T_R$  değerlerini düşürüp yırtılma direnci azalmasına sebep olmuştur.

**Çizelge 4.3.** Farklı MWCNT dolgulı nanokompozitlerin yırtılma parametreleri

CTOD [mm]	$J$ -değeri [ $\text{kJ/m}^2$ ]					$T_R$ [MPa]
	0,1 ( $J_{IC}$ )	0,2	0,3	0,4	0,5	
MWCNT-1	2,25	2,34	2,45	2,55	2,69	1,08
MWCNT-2	6,42	6,88	7,42	7,91	8,81	5,81
MWCNT-3	4,30	4,63	4,89	5,15	5,40	2,76

Çatlak ucuna yakın alanın araştırılmasının sonuçları Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Sonuçlar 5 mm kesikli numunelerin %50 birim uzamaya sahip olduğu durumda elde edildi. MWCNT oranının, çatlak ucundaki birim uzama büyüklüğünün x-yönü boyunca etkisine ciddi bir tesiri olmamıştır (yani, büyüklüğün etkisi tüm numuneler için çatlak ucundan yaklaşık 1,3 mm'ye kadar devam etmektedir; Şekil 4.18). Lakin, MWCNT-1 ve MWCNT-2' ile karşılaştırıldığında MWCNT-3'te çatlak ucundaki birim uzama büyüklüğünde ciddi bir artış görülmüştür, tabi bunun etkisi çatlak ucuna yakın olan alanın deforme olabilirliğine yansımıştır. Kısacası, MWCNT oranı 1 phr'den 2 phr'a yükseldiğinde hibrid kauçuğun deforme olabilirliğinde ciddi bir kayıp olmamış, ancak bu düşüş MWCNT oranı 3 phr'a çıktığında oldukça büyük değerde elde edilmiştir.



**Şekil 4.18.** Global birim uzama %50 olduğunda farklı MWCNT kompozitleri için çatlak ucundan başlayarak x yönü boyunca lokal dikey birim uzama dağılımı; Karşılaştırmak için her kompozitten kesiti 5 mm olan numune seçildi

%50 birim uzamaya kadar depolanan yer değiştirme enerjisi yoğunluğu da hesaplanmıştır (Çizelge 4.4). Sonuçlar, MWCNT-2 numunesinin MWCNT-1'e kıyasen hacim biriminde daha fazla enerjiyi depolayabildiğini göstermiştir. Ancak MWCNT-2'ye kıyasen MWCNT-3'te ciddi bir artış ortaya çıkmadı.

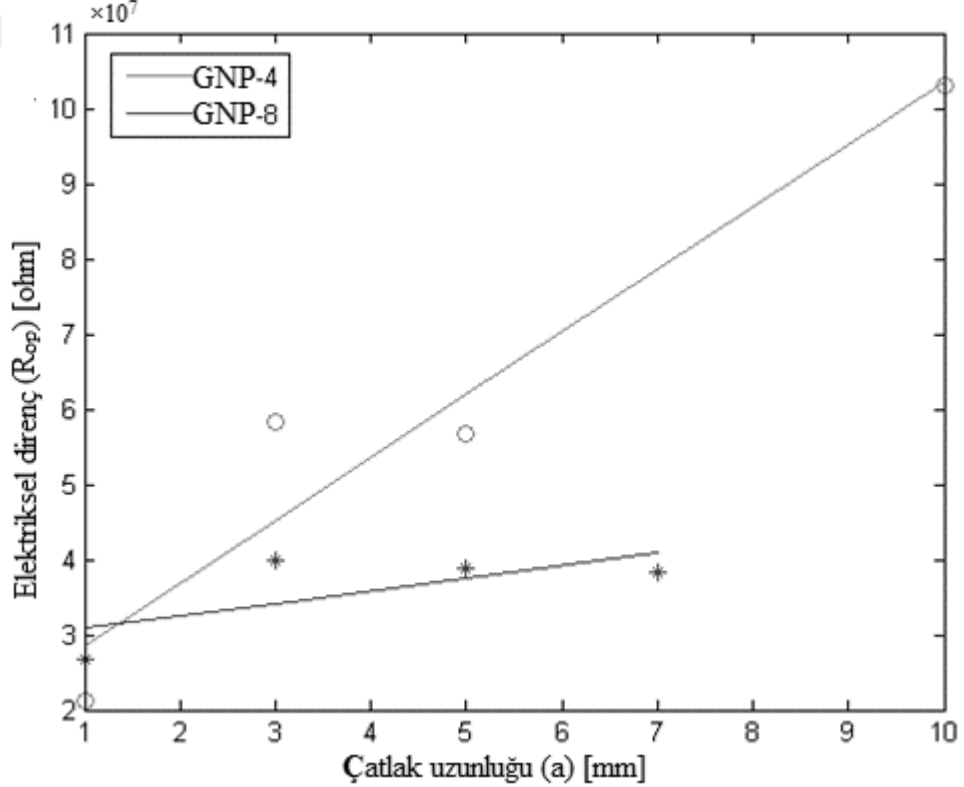
**Çizelge 4.4.** %50 birim uzamaya kadar depolanan yer değiştirme enerjisinin yoğunluğu

	MWCNT-1	MWCNT-2	MWCNT-3
Yer değiştirme enerjisinin yoğunluğu [MPa]	28,96	33,84	34,98

### 4.3. Elektriksel özelliklerin araştırılması:

#### 4.3.1. Grafen nanoplaka dolgulu kauçuğun elektriksel özellikleri:

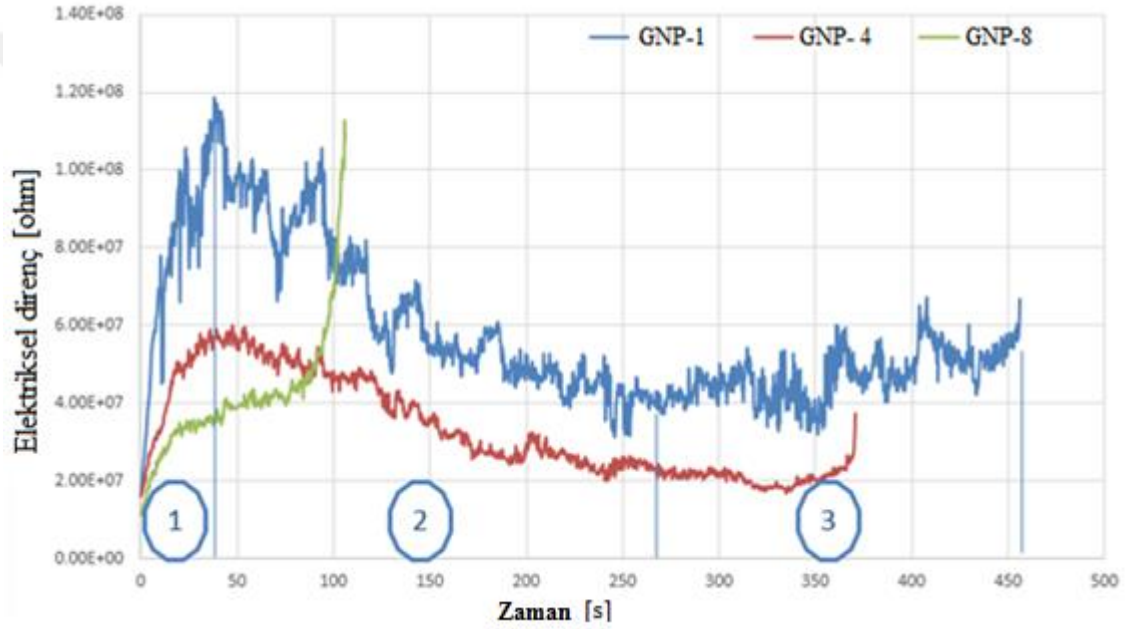
Çıkan sonuçlardan, Şekil 4.19, elektriksel özelliklerin, GNP'lerin yüksek birim uzamalarda oluşturduğu iletken ağ nedeniyle dolgu maddesi arttırıldığında geliştiği görüldü. Dolgu oranı düşük olduğunda elektriksel direnç değerleri karmaşık olarak elde edildiğinden GNP-1'in elektriksel özelliği grafiksel olarak tanımlanmadı. Her numune için çatlak ilerlemesi sırasında elektriksel direnç değişimi Çizelge 4.5'te gösterilmektedir. SENT testi sırasında, üç aşama gözlenmiştir (Şekil 4.20). Elektriksel direnç 1. aşamada, GNP'lerin arasındaki mesafenin artmasına sebep olan birim uzama nedeniyle artmaktadır. Daha sonra, elektriksel direnç dolgu maddesinin oluşturduğu iletken ağ nedeniyle, nanokompozitin iletkenliğinin artması yüzünden 2. aşamada düşmektedir. 3. Aşamada, çatlak yanındaki alanın en kesitinin daralması nedeniyle direnç tekrar yükselişe geçmiştir.



Şekil 4.19. Elektriksel direnç - Çatlak ilerlemesi eğrisi

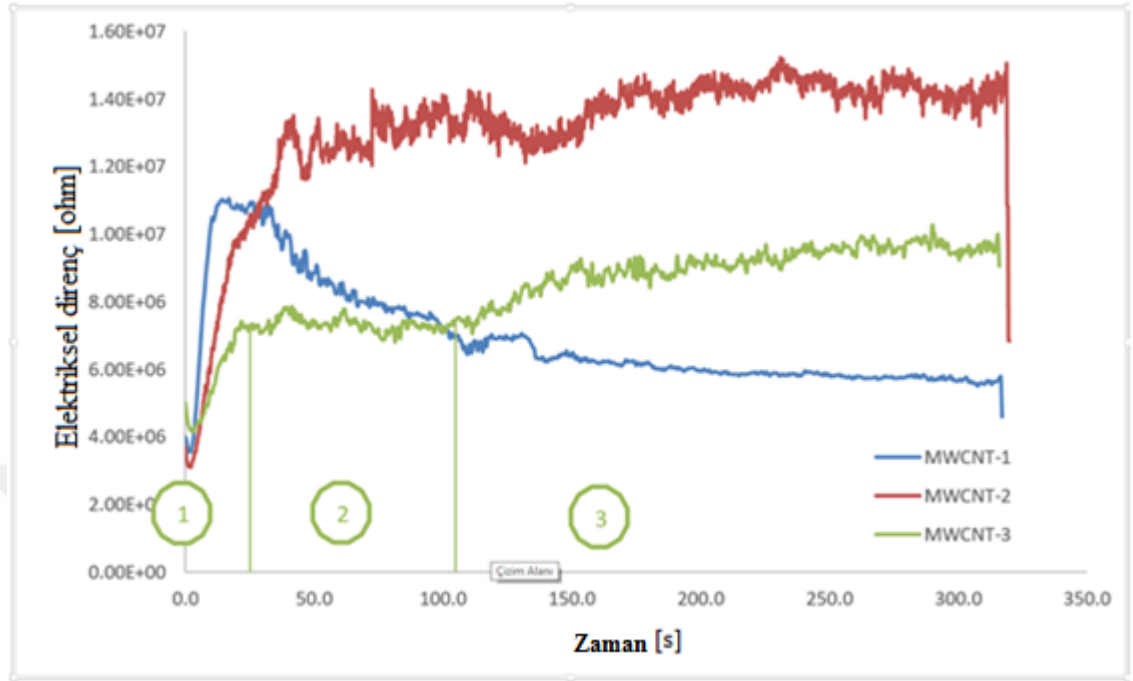
Çizelge 4.5. Çatlak ilerlemesinin elektriksel direnç ile ilişkisi

Kesik uzunluğu [mm]	Elektriksel direnç ( $R_{op}$ ) [ohm]				
	1	3	5	7	10
GNP-1	1,01E+08	2,12E+07	9,59E+07	over flow	over flow
GNP-4	2,12E+07	5,84E+07	5,67E+07	over flow	1,03E+08
GNP-8	2,67E+07	3,89E+07	3,88E+07	3,82E+07	over flow



Şekil 4.20. GNP dolgulu nanokompozitin test boyunca elektriksel direncinin değişimi

#### 4.3.2. MWCNT dolgulu kauçuğun elektriksel özellikleri:



Şekil 4.21. MWCNT dolgulu nanokompozitin test boyunca elektriksel direncinin değişimi

## 5. SONUÇ

1- Ncorr-2D yazılımı, genel olarak tüm malzemelerin yerel performansını ve özellikle hiperelastik materyalleri araştırmak için geçerli bir programdır.

2- J-Integral testi, çatlak başlatma ve yayılma aşamalarında malzemelerin yırtılma direncini belirlemek için güvenilir bir testtir.

3- Hiperlastik malzemelere nanodolgu maddesi eklemek, takviye malzemesinin türüne bağlı olarak yırtılma direncini olumlu veya olumsuz yönde etkileyebilir.

4- Oranları değişik üç farklı grafen nanoplaka dolgulu kauçuk araştırılmıştır. SVR 10 / SBR 1502 / CBR 1203 kauçuk karışımındaki GNP oranının arttırılması,  $J_{IC}$  ve  $T_R$  değerlerinin düşmesine neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle çatlak oluşma ve ilerleme direncinde azalma tespit edilmiştir. Bu sonuçları desteklemek için iki çalışma yapıldı. Birinci çalışmada çatlak ucuna yakın alandaki lokal dikey birim uzama dağılımı araştırıldı. GNP oranının arttırılmasıyla, çatlak ucundaki birim uzama büyüklüğü arttı, ve ondan etkilenen bölgenin uzunluğu azaldı. İkinci çalışmada numunenin %100 birim uzamaya kadar depoladığı yer değiştirme enerjisinin yoğunluğu belirlendi. Enerji yoğunluğu GNP oranı artmasıyla arttı. Bu iki faktör, çatlak yanındaki alanda stres konsantrasyonun artmasına sebep oldu ve sonuç olarak yırtılma direncinin azalmasına yol açtı.

5- Aynı prosedür uygulanarak, MWCNT oranının yırtılma direncine etkisini açıklamak için farklı MWCNT oranlarında  nanokompozit incelendi. Kauçuk karışımında MWCNT oranının artması, MWCNT-2 ve MWCNT-3'n MWCNT-1'inkine göre çatlak oluşma ve ilerleme direncinin gelişmesine neden oldu. Lakin, MWCNT-3'n MWCNT-2'ye göre aynı global birim uzamadayken çatlak ucundaki yüksek birim uzama büyüklüğü ve ona eşlik eden çatlak ucuna yakın alandaki deforme olabilirliğinin azalması, MWCNT-3'n yırtılma direncinde bir düşüş yaşanmasına sebep oldu.



6- Her iki kompozitte, kompozitin elektriksel direnci tahmin edildiği gibi dolgu oranı yükseldiğinde azaldığı görölmüşür. SENT testi sırasında, testin başlamasından bir süre sonra nanodolgulardan etkili bir iletken ağ olduğu görölmüşür. Bu ağ elektriksel direnci azaltarak nanokompozitin iletkenliğini arttırdı.

Tahmin edildiği gibi, çatlak önündeki elektik akımının akmasına müsaade eden bölgenin kesiti daralmasına sebep olan çatlağın ilerlemesiyle, elektriksel direnci yükseldi. Uygulanan yenilikçi metodun, çatlak ilerlemesi sırasında elektriksel direnç değişimini belirlemek için geçerli ve kabul edilebilir bir yöntem olduğu görölmüşür.



## KAYNAKLAR

- Agnelli, S., Baldi, F., Riccò, T. 2012a.** A tentative application of the energy separation principle to the determination of the fracture resistance ( $J_{Ic}$ ) of rubbers. *Engineering Fracture Mechanics*, 90: 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.04.020>
- Agnelli, S., Ramorino, G., Passera, S., Riccò, T. 2012b.** Fracture resistance of rubbers with MWCNT, organoclay, silica and carbon black fillers as assessed by the J-integral: Effects of rubber type and filler concentration. *EXPRESS Polymer Letters*, 6(7): 581–587. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2012.61>
- Aït, A. H. N., Naït, H. M., Benseddiq, N. 2007.** Fracture of elastomers under static mixed mode: the strain-energy-density factor. *Int J Fract*, 144(2): 65–75. <https://doi.org/10.1007/s10704-007-9080-7>
- Anonim 2019a.** Abaqus 6.14 Documentation. <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/texis/search/?query=wetting&submit.x=0&submit.y=0&group=bk&CDB=v6.14>. Erişim tarihi: 15.5.2019.
- Anonim 2019b.** Ncorr - Open source 2D digital image correlation MATLAB software. <http://www.ncorr.com/>. Erişim tarihi: 15.5.2019.
- Arroyo, M., López-Manchado, M., Herrero, B. 2003.** Organo-montmorillonite as substitute of carbon black in natural rubber compounds. *Polymer*, 44(8): 2447–2453. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00090-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00090-9)
- Balberg, I., Binenbaum, N., Wagner, N. 1984.** Percolation Thresholds in the Three-Dimensional Sticks System. *Physical Review Letters*, 52(17): 1465–1468. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.52.1465>
- Blaber, J., Adair, B., Antoniou, A. 2015.** Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, 55(6): 1105–1122. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>
- Bokobza, L. 2012.** Enhanced electrical and mechanical properties of multiwall carbon nanotube rubber composites. *Polymers for Advanced Technologies*, 23(12): 1543–1549. <https://doi.org/10.1002/pat.3027>
- Bokobza, L. 2017.** Mechanical and Electrical Properties of Elastomer Nanocomposites Based on Different Carbon Nanomaterials. *C*, 3(2): 10. <https://doi.org/10.3390/c3020010>
- Bokobza, L., Leroy, E., Lalanne, V. 2009.** Effect of filling mixtures of sepiolite and a surface modified fumed silica on the mechanical and swelling behavior of a styrene-butadiene rubber. *European Polymer Journal*, 45(4): 996–1001. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2008.12.028>
- Bokobza, L., Rahmani, M., Belin, C., Bruneel, J.-L., El Bounia, N.-E. 2008.** Blends of carbon blacks and multiwall carbon nanotubes as reinforcing fillers for hydrocarbon rubbers. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 46(18): 1939–1951. <https://doi.org/10.1002/polb.21529>
- Bréchet, Y., Cavailé, J.-Y., Chabert, E., Chazeau, L., Dendievel, R., Flandin, L., Gauthier, C. 2001.** Polymer Based Nanocomposites: Effect of Filler-Filler and Filler-Matrix Interactions. *Advanced Engineering Materials*, 3(8): 571. [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(200108\)3:8<571::AID-ADEM571>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200108)3:8<571::AID-ADEM571>3.0.CO;2-M)
- Charlton, D. J., Yang, J., Teh, K. K. 1994.** A Review of Methods to Characterize Rubber Elastic Behavior for Use in Finite Element Analysis. *Rubber Chemistry and Technology*, 67(3): 481–503. <https://doi.org/10.5254/1.3538686>
- Chow, C. L., Wang, J., Tse, P. N. 1988.** Rubber Fracture Characterization Using J -

Integral. *Tire Science and Technology*, 16(1): 44–60. <https://doi.org/10.2346/1.2148797>

**Dong, B., Liu, C., Lu, Y., Zhang, L., Wu, Y. 2016.** Effects of Hybrid Filler Networks of Carbon Nanotubes and Carbon Black on Fracture Resistance of Styrene-Butadiene Rubber Composites. *Polym Eng Sci*, 56(12): 1425–1431. <https://doi.org/10.1002/pen>

**Dong, B., Liu, C., Wu, Y. 2014.** Fracture and fatigue of silica / carbon black / natural rubber composites. *Polymer Testing*, 38: 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.06.004>

**Fagerholt, E. 2015.** Digital Image Correlation. <https://slideplayer.com/slide/7008770/>. Erişim tarihi: 8.6.2019.

**Grellmann, W., Heinrich, G., Kaliske, M., Klüppel, M., Schneider, K., Vilgis, T. A. 2013.** Fracture Mechanics and Statistical Mechanics of Reinforced Elastomeric Blends, Springer Verlag GmbH, Heidelberg, Germany, 310 pp.

**Griffith, A. A. 1921.** The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 221(582–593): 163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>

**Hamed, G. R. 2000.** Reinforcement of Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 73(3): 524–533. <https://doi.org/10.5254/1.3547603>

**Harilal, R., Ramji, M. 2014.** Adaptation of Open Source 2D DIC Software Ncorr for Solid Mechanics Applications. 9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 1-6 November 2014, New Delhi, India.

**Hild, F., Creton, C., Mzabi, S., Berghezan, D. 2011.** A Critical Local Energy Release Rate Criterion for Fatigue Fracture of Elastomers. *Journal of Polymer Science Part B*, 49(21): 1518–1524. <https://doi.org/10.1002/polb.22338>

**Kasım, H., Yazıcı, M. 2018.** Electrical Properties of Graphene / Natural Rubber Nanocomposites Coated Nylon 6.6 Fabric under Cyclic Loading. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 63(1): 160–169. <https://doi.org/10.3311/ppch.12122>

**Kasım, H., Can, Y., Yazıcı, M. 2017.** Mechanical and electrical properties of multiwalled carbon nanotube/graphite/natural rubber hybrid nanocomposites through latex compounding. International Conference on Composite Structures, 4-7 September 2017, CNAM, Paris, France.

**Katihabwa, A., Wang, W., Jiang, Y., Zhao, X., Lu, Y., Zhang, L. 2011.** Multi-walled carbon nanotubes/silicone rubber nanocomposites prepared by high shear mechanical mixing. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(12): 1007–1014. <https://doi.org/10.1177/0731684410394008>

**Kim, B., Lee, S. B., Lee, J., Cho, S., Park, H., Yeom, S., Park, S. H. 2012.** A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for Chloroprene rubber. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(5): 759–764. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0099-y>

**Kumar, N., Rao, V. V. 2016.** Hyperelastic Mooney-Rivlin Model : Determination and Physical Interpretation of Material Constants. *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, 6(1): 43–46.

**Lee, R. F., Donovan, J. A. 1987.** J -Integral and Crack Opening Displacement as Crack Initiation Criteria in Natural Rubber in Pure Shear and Tensile Specimens. *Rubber Chemistry and Technology*, 60(4): 674–688. <https://doi.org/10.5254/1.3536150>

**Menderes, H. and Konter, A. W. A. 1999.** “Advanced FE Analysis of Elastomeric Automobile Components under Realistic Loading Conditions. The First European Conference on Constitutive Models for Rubber, 9-10 September 1999, Vienna, Austria.

**Mooney, M. 1940.** A Theory of Large Elastic Deformation. *Applied Physics*, 11: 582.

<https://doi.org/10.1063/1.1712836>

**Mushack, R., Lüttich, R. and Bachmann, W. 1996.** White fillers in elastomers. *European rubber journal*, 178(7): 24–29.

**Nah, C., Lim, J. Y., Cho, B. H., Hong, C. K., Gent, A. N. 2010.** Reinforcing Rubber with Carbon Nanotubes. *Journal of Applied Polymer Science*, 118(3): 1574–1581. <https://doi.org/10.1002/app>

**Nguyen, V., Kwon, S., Kwon, O., Kim, Y. 2017.** Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2D-Digital Image Correlation Method. *Procedia Engineering*, 184: 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.108>

**Ozbas, B., O’Neill, C. D., Register, R. A., Aksay, I. A., Prud’homme, R. K., Adamson, D. H. 2012.** Multifunctional elastomer nanocomposites with functionalized graphene single sheets. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 50(13): 910–916. <https://doi.org/10.1002/polb.23080>

**Pan, B., Qian, K., Xie, H., Asundi, A. 2009.** Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, 20(6): 17. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>

**Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., Young, R. J. 2015.** Graphene/elastomer nanocomposites. *Carbon*, 95: 460–484. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2015.08.055>

**Park, O.-K., Hwang, J.-Y., Goh, M., Lee, J. H., Ku, B.-C., You, N.-H. 2013.** Mechanically Strong and Multifunctional Polyimide Nanocomposites Using Amimophenyl Functionalized Graphene Nanosheets. *Macromolecules*, 46(9): 3505–3511. <https://doi.org/10.1021/ma400185j>

**Pu, Z., Mark, J. E., Jethmalani, J. M., Ford, W. T. 1997.** Effects of Dispersion and Aggregation of Silica in the Reinforcement of Poly ( methyl acrylate ) Elastomers. *Chem. Mater.*, 9(11): 2442–2447.

**Ramorino, G., Agnelli, S., Santis, R. De, Riccò, T. 2010.** Investigation of fracture resistance of natural rubber / clay nanocomposites by J -testing. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(10): 1527–1536. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.04.021>

**Reu, P. L., Rogillio, B. R., Wellman, G. W. 2007.** Crack Tip Growth Measurement Using Digital Image Correlation. *Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures : Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures.* Springer Netherlands, Dordrecht, Netherlands, 555–556 pp. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6239-1\\_275](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6239-1_275)

**Rivlin, R. S. 1956.** Large Elastic Deformations. *Rheology : Rheology*, Academic Press: 351–385. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-395694-1.50016-6>

**Rivlin, R. S., Saunders, D. W. 1951.** Large Elastic Deformations of Isotropic Materials. VII. Experiments on the Deformation of Rubber. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 243(865): 251–288. <https://doi.org/10.1098/rsta.1951.0004>

**Rivlin, R. S., Thomas, A. G. 1953.** Rupture of rubber. I. Characteristic energy for tearing. *Journal of Polymer Science*, 10(3): 291–318. <https://doi.org/10.1002/pol.1953.120100303>

**Sadasivuni, K. K., Ponnamma, D., Thomas, S., Grohens, Y. 2014.** Evolution from graphite to graphene elastomer composites. *Progress in Polymer Science*, 39(4): 749–780. <https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2013.08.003>

**Selvadurai, A. P. S. 2006.** Deflections of a rubber membrane. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 54(6): 1093–1119. <https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2006.01.001>

**Sengupta, R., Bhattacharya, M., Bandyopadhyay, S., Bhowmick, A. K. 2011.** A

- review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites. *Progress in Polymer Science*, 36(5): 638–670. <https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2010.11.003>
- Sinnott, S. B. 2002.** Chemical functionalization of carbon nanotubes. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 2(2): 113–123. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12908295>
- Song, Y., Yu, J., Yu, L., Alam, F. E., Dai, W., Li, C., Jiang, N. 2015.** Enhancing the thermal , electrical , and mechanical properties of silicone rubber by addition of graphene nanoplatelets. *JMADE*, 88: 950–957. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.064>
- Thomas, A. G. 1994.** The Development of Fracture Mechanics for Elastomers. *Rubber Chemistry and Technology*, 67(3): 50–67. <https://doi.org/10.5254/1.3538688>
- Treloar, L. R. G. 1973.** The elasticity and related properties of rubbers. *Reports on Progress in Physics*, 36(7): 755–826. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/36/7/001>
- Wu, Y., Wang, H., Li, A., Wu, Y., Wang, H., Li, A. 2016.** Parameter Identification Methods for Hyperelastic and Hyper-Viscoelastic Models. *Applied Sciences*, 6(12): 386. <https://doi.org/10.3390/app6120386>
- Yan, N., Xia, H., Zhan, Y., Fei, G. 2013.** New Insights into Fatigue Crack Growth in Graphene-Filled Natural Rubber Composites by Microfocus Hard-X-Ray Beamline Radiation a. *Macromol. Mater. Eng*, 298(1): 38–44. <https://doi.org/10.1002/mame.201200044>
- Yeoh, O. H. 1993.** Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 66(5): 754–771. <https://doi.org/10.5254/1.3538343>
- Zarrin-ghalami, T., Fatemi, A. 2012.** Material Deformation and Fatigue Behavior Characterization for Elastomeric Component Life Predictions. *Polymer Engineering and Science*, 52(8): 1795–1805. <https://doi.org/10.1002/pen>

## **EKLER**

- EK 1** Malzeme parametrelerinin belirlenmesi (uygulama).
- EK 2** 2D-Ncorr uygulamasının doğruluğunu isbat eden MATLAB kodu.
- EK 3** Malzemenin J-integral – yer değiştirme eğrisini sağlayan MATLAB kodu.
- EK 4** atlak ucundan başlayan x yonü boyunca lokal dikey birim uzama dağılımı veren MATLAB kodu.



### **EK 1: Malzeme parametrelerinin belirlenmesi (uygulama).**

Malzemeye üç farklı test yapılmıştır: Bunlar tek eksenli çekme testi, çift eksenli çekme testi ve düzlemsel çekme (basit kayma) testidir. Testlerin sonuçları nominal cinsinden verilmiştir. Malzemenin sıkıştırılmaz olarak kabul edildiği için onun üzerine hacimsel çekme testi gerçekleştirilmiştir. (Anonim 2019a).

Tek eksenli çekme testi

<b>Gerilme [Pa]</b>	<b>Uzama [%]</b>
0.054E6	0.0380
0.152E6	0.1338
0.254E6	0.2210
0.362E6	0.3450
0.459E6	0.4600
0.583E6	0.6242
0.656E6	0.8510
0.730E6	1.4268

Eş iki eksenli çekme testi

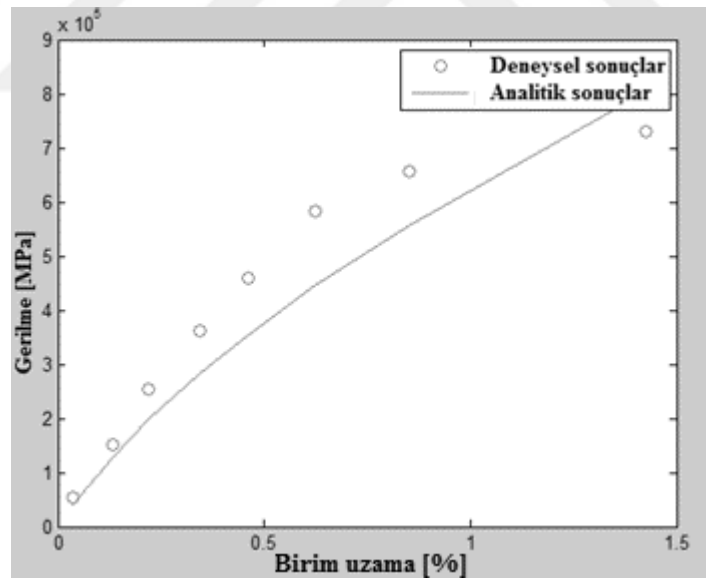
<b>Gerilme [Pa]</b>	<b>Uzama [%]</b>
0.089E6	0.0200
0.255E6	0.1400
0.503E6	0.4200
0.958E6	1.4900
1.703E6	2.7500
2.413E6	3.4500

Düzlemsel çekme (basit kayma) testi

Gerilme [Pa]	Uzama [%]
0.055E6	0.0690
0.324E6	0.2828
0.758E6	1.3862
1.269E6	3.0345
1.779E6	4.0621

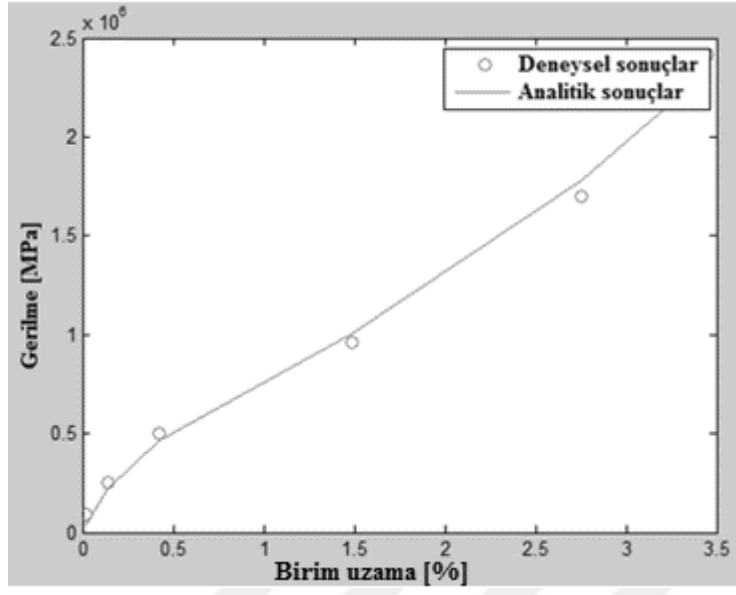
Mooney-Rivlin modeli seçilerek (bkz. denklem 2.3) Abaqus'le elde edilen çözüm ya da malzemenin parametreleri:  $C_1 = 176050$ ,  $C_2 = 4330$ 'dur.

Bu iki parametre, denklem 2.9, 2.10 ve 2.11'de yer almaktadır ve testler boyunca numunenin performansı aşağıda verilen şekillerdeki gibi elde edilmiştir.

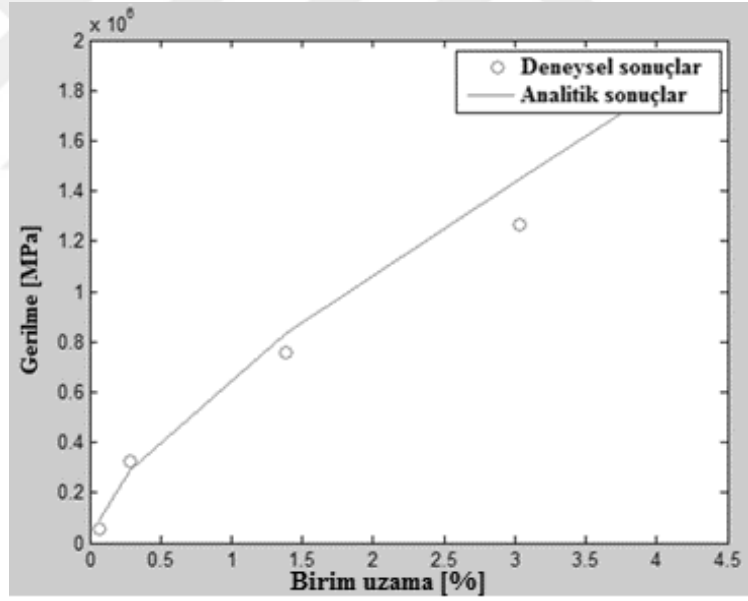


Tek eksenli çekme testi





Eş iki eksenli çekme testi



Düzlemsel çekme (saf kesme) testi

MATLAB'la hazırlanan kod aşağıdaki gibi ifade edilir.

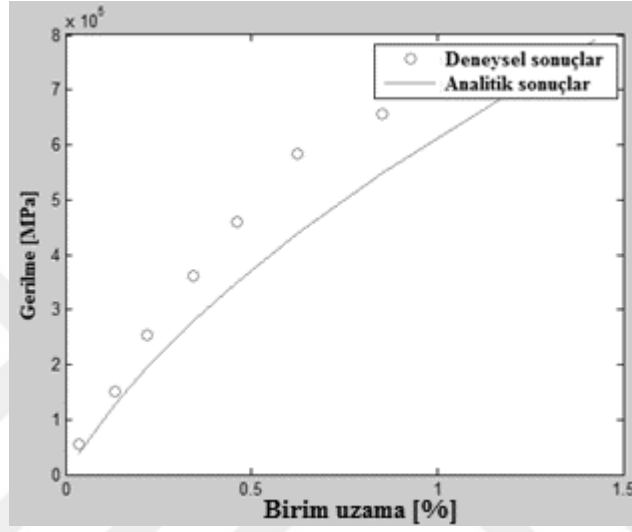
```
Objective=@(x) sum([ ymu-2*(1-
(1./(xmu.^3)))*((x(1).*xmu)+x(2))).^2; (ymb-2*(ymb-
(1./(ymb.^5)))*((x(1)+(x(2)*(ymb.^2))))).^2; (ymp-2*
((xmp-(1./(xmp.^3)))*((x(1)+x(2))))).^2]);
xo=[0,0];
A=[-1 -1;0 -1];
B=[0;0];
C=[];
Ceq=[];
LB=[];
UB=[];
x=fmincon(objective,xo,A,B,C,Ceq,LB,UB);
yu=2*((1-(1./(xmu.^3)))*((x(1).*xmu)+x(2)));
yb=2*((ymb-(1./(ymb.^5)))*((x(1)+(x(2)*(ymb.^2)))));
yp=2*((xmp-(1./(xmp.^3)))*((x(1)+x(2))));
error =sum([ymu-yu;ymb-yb;ymp-yp].^2);
s1=1/(error/(length(yu)-3));
s2=1/(error/(length(yb)-3));
s3=1/(error/(length(yp)-3));
objective=@(x) sum([s1*(ymu-2*(1-
(1./(xmu.^3)))*((x(1).*xmu)+x(2))).^2;s2*(ymb-2*...
((ymb-(1./(ymb.^5)))*((x(1)+(x(2)*(ymb.^2))))).^2;s3*(ymp-
2*((xmp-(1./(xmp.^3)))*((x(1)+x(2))))...
.^2]);
xo=[0,0];
A=[-1 -1;0 -1];
B=[0;0];
C=[];
Ceq=[];
LB=[];
```

UB= [] ;

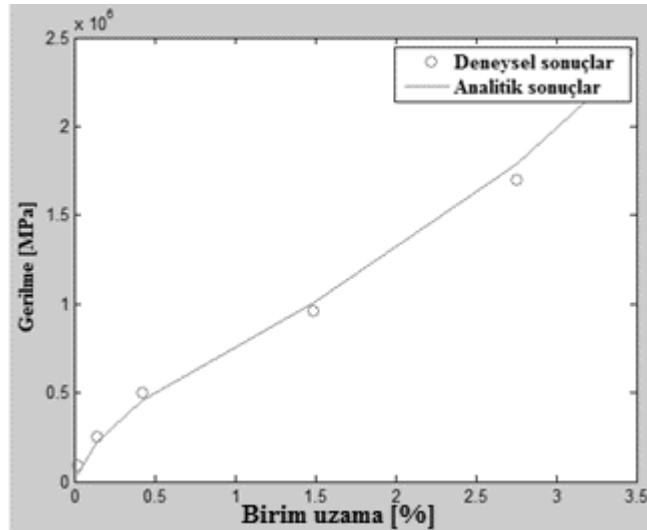
x=fmincon (objective , xo , A , B , C , Ceq , LB , UB) ;

x

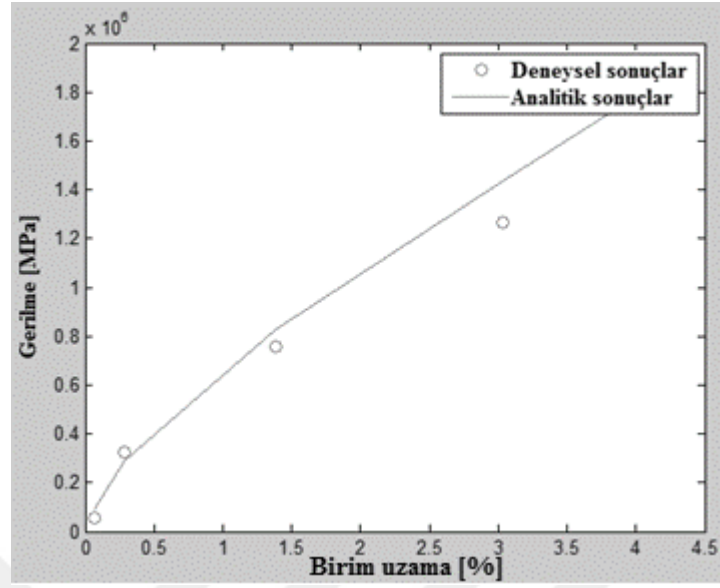
hazırlanan kottan çıkan çözüm:  $C_1 = 173740$ ,  $C_2 = 4590$ 'dır. Buna göre malzemenin performansı aşağıda gibi çizilir.



Tek eksenli çekme testi



Eş iki eksenli çekme testi



Düzlemsel çekme (saf kesme) testi

	Abaqus	Hazırlanan Cod
C <sub>1</sub>	176050	173740
C <sub>2</sub>	4330	4590
Mutlak hata	1,1757e+11	1,1090e+11

Yukarıdaki çizelgenin gösterdiği gibi, hazırlanan kod Abaqus'ten elde edilen sonuçlara yakın ve mutlak hatası daha düşük sonuçlar verdi.

## EK 2: 2D-Ncorr uygulamasının doğruluğunu isbat eden MATLAB kodu.

```
%This script calculates a vector of strain development
n=input('how many images in your series ? ')-1;
m=input('in which direction you need (Exx 1 Eyy 2) ? ');
s=input('in which coordinate system you need results to be
showed by (Lagrangian 1... eulerian 2) ? ');
strain_development_vector=[0];
if m==1
    if s==1
        for i=1:n
            strain_development_vector=[strain_development_vector
            straint(handles_ncorr.data_dic.strains(i).plot_exx_ref_for
matted)];
        end
    end
if s==2
    for i=1:n
        strain_development_vector=[strain_development_vector
        straint(handles_ncorr.data_dic.strains(i).plot_exx_cur_for
matted)];
    end
end
if m==2
    if s==1
        for i=1:n
            strain_development_vector=[strain_development_vector
            straint(handles_ncorr.data_dic.strains(i).plot_eyy_ref_for
matted)];
```

```

        end
    end
    if s==2
        for i=1:n

            strain_development_vector=[strain_development_vector
            straint(handles_ncorr.data_dic.strains(i).plot_eyy_cur_for
            matted)];
        end
    end
end
strain_development_vector

function average_of_true_strain=straint(a);
%This function gives the strain of selected image
%which is can be considered as a strain between the two
%holding tools of test machine
total=0;
counter=0;
[high wid]=size(a);
for i=1:high
    for j=1:wid
        if a(i,j)
            eng_strain=sqrt((2*a(i,j))+1)-1;
            true_strain=log(1+eng_strain);
            total=total+true_strain;
            counter=counter+1;
        end
    end
end
average_of_true_strain=total/counter;
end

```

### **EK 3: Malzemenin J-integral – yer değiştirme eğrisini sağlayan MATLAB kodu.**

```
function [all_J_integral
all_R2]=calculate_all_J_integral(all_strain_energy);
%This function calculates J integral vs displacement curve
%for [1 3 5 7 10] of crack length
%the output is a matrix look likes [J11 J12 J110;J21 J22
%J210]
% Jij where i is a displacement and j is a crack length.
%the B below is thickness of specimens
all_J_integral=[];
syms z;
all_R2=[];
B=1.95;
for i=1:100
    p=polyfit([1 3 5 7 10],all_strain_energy(i,:),2);
    fun1=@(z) (p(1)*(z.^2))+(p(2)*(z))+p(3);
    R2=calculate_R2(all_strain_energy(i,:),fun1([1 3 5 7
10]));
    all_R2=[all_R2 R2];
    %finding differentiation of p
    fun=(p(1)*(z.^2))+(p(2)*(z))+p(3);
    diff_fun=diff(fun);
    differential_values=vpa(subs(diff_fun,z,[1 3 5 7 10]));
    crack_length_vs_J=-differential_values/B;
    all_J_integral=[all_J_integral;crack_length_vs_J];
end

function [all_strain_energy
all_R2]=calculate_all_strain_energy(all_force_displacement)
;
%calculates the strain energy for each specimen from
```

```

%a displacement of 1 mm to 100 mm with step of 1 mm.
%the input is a matrix contains forces and displacements
%for each specimen [d1 f1 d2 f2 .....]. where d is the
%displacements ,f is forces and 1 ,2 etc. indicate to
specimen number.
all_strain_energy=[];
all_R2=[];
for i=1:2:(size(all_force_displacement,2)-1);
    [strain_energy
R2]=calculate_strain_energy(all_force_displacement(:,i),all
_force_displacement(:,i+1));
    all_strain_energy=[all_strain_energy strain_energy];
    all_R2=[all_R2 R2];
end
end

function [strain_energy R2]=calculate_strain_energy(x,y);
%calculates strain energy from a displacement of 1 mm to 100
%mm with step of 1 mm for fixed pre-cut length
strain_energy=[];
p=polyfitZero(x,y,3);
fun=@(z) (p(1)*(z.^3))+(p(2)*(z.^2))+(p(3)*z);
R2=calculate_R2(y,fun(x));
for i=1:100
    int=integral(fun,0,i);
    strain_energy=[strain_energy;int];
end

function R2=calculate_R2(y,yp)
%calculates the correlation coefficient (R2)
%where y is actual value yp is predicted ones
y_ave=sum(y)/length(y);
R2=1-(sum((y-yp).^2)/sum((y-y_ave).^2));

```



**EK 4: Çatlak ucundan başlayan x yönü boyunca lokal dikey birim uzama dağılımı veren MATLAB kodu.**

```
%Enter the number of photo you need to know the strain effect
in, hear 229 is the number of image corresponding with global
strain of 100% for the graphene filled rubber.
matrix_of_ystrain=handles_ncorr.data_dic.strains(229).plot
_eyy_ref_formatted;
[maximum_ystrain,I]=max(matrix_of_ystrain(:));
[yi,xi] = ind2sub(size(matrix_of_ystrain),I);
strain_amplitude_effect=[];
while xi
strain_amplitude_effect=[strain_amplitude_effect
matrix_of_ystrain(yi,xi)];
if matrix_of_ystrain(yi,xi-1)==0
    strain_amplitude_effect=[strain_amplitude_effect
matrix_of_ystrain(yi,xi-1)];
break;
end
xi=xi-1;
end
```

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmad NASER ALDEEN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Şam/Suriye 01/01/1991  
Yabancı Dil : Arapça, İngilizce.

### Eğitim Durumu

Lise : Andalus Lisesi/2005-2008  
Lisans : Şam Üni. – Otomotiv ve İş Makineleri Müh./2008-2013  
Yüksek Lisans : Uludağ Üni. – Otomotiv Müh. /2016-2019

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Araştırma Görevlisi - Şam Üni. /2013-2015

İletişim (e-posta) : ahmadengineer1990@gmail.com  
501525014@ogr.uludag.edu.tr

### Yayınları

**Kasım, H., Naser Aldeen, A., Can, Y., Yazıcı, M. 2018.** Investigation of the Crack Propagation Behavior of the Multiwalled Carbon Nanotube/Graphite/Natural Rubber Hybrid Nanocomposites using DIC Technique. 5<sup>th</sup> International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, 12-16 October 2018, Antalya Turkey.

**Yazıcı, M., Kasım, H., Naser Aldeen, A., Saraç, İ., Engin, B. 2018.** Investigation of the Crack Propagation in the Graphene/Elastomer Nanocomposite Materials with DIC Technique. 13<sup>th</sup> Fall Rubber Colloquium, 6-8 November 2018, Hannover, Germany.

**Kasım, H., Naser Aldeen, A., Can, Y., Yazıcı, M. 2019.** Investigation of the Crack Propagation Behavior of the Multiwalled Carbon Nanotube/Graphite/Natural Rubber Hybrid Nanocomposites using DIC Technique. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. (Kabul edilmiş)

**Yazıcı, M., Kasım, H., Naser Aldeen, A., Saraç, İ., Engin, B. 2019.** Investigation of the Crack Propagation in the Graphene/Elastomer Nanocomposite Materials with DIC Technique. *Composites Part B*. (upload edilmiş)