

**CFRP KOMPOZİT MALZEMELERİN
ELEKTRİKSEL VE TERMAL DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Yelda AKÇİN ERGÜN

Danışman
Prof. Dr. Şükrü TALAŞ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Haziran 2017

Bu tez çalışması 284562 numaralı proje ile Avrupa Birliği tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

CFRP KOMPOZİT MALZEMELERİN
ELEKTRİKSEL VE TERMAL DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Yelda AKÇİN ERGÜN

Danışman
Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Haziran 2017

TEZ ONAY SAYFASI

Yelda Akçin Ergün tarafından hazırlanan “CFRP Kompozit Malzemelerin Elektriksel ve Termal Davranışlarının Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi.” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 22/06/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Prof.Dr.Şükrü TALAŞ

Başkan : Prof.Dr. Adem KURT

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi,

Üye : Prof.Dr.Şükrü TALAŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Prof.Dr.Selçuk AKTÜRK

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Fakültesi

Üye : Prof.Dr.Yılmaz YALÇIN

Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Üye : Yrd.Doç.Dr.Ahmet ÇETKİN

Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi



Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR

Enstitü Müdürü

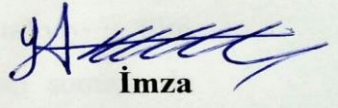
BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

**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 yararlanılması 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.

22/062017



İmza

Yelda AKÇİN ERGÜN

ÖZET
Doktora Tezi
CFRP KOMPOZİT MALZEMELERİN ELEKTRİKSEL VE TERMAL
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Yelda AKÇİN ERGÜN
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

Bu çalışmada, çok duvarlı karbon nanotüp takviyesinin tek doğrultulu karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) bir malzeme olan T800/M21 karbon fiber/epoksi kompozit malzemesinin elektriksel ve termal özellikleri üzerine etkisi deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Karbon nanotüp ilavesiz ve ilaveli kompozit malzemelerin fiber doğrultusunda, fibere dik doğrultuda ve kalınlık doğrultusunda elektriksel iletkenlikleri ölçülmüş, malzemenin elektriksel iletkenliğindeki değişim incelenmiştir. Karbon nanotüp ilavesinin elektriksel iletkenliği tüm doğrultularda arttırdığı görülmüştür. Kompozit malzemelerin termal davranışlarının araştırılması için numunelere; DSC (Differential scanning calorimetry) ve TG (Thermogravimetric analysis) analizleri uygulanmıştır. Daha sonra numunelerin termal iletkenliği, spesifik ısıları ve termal genişleme katsayıları da belirlenerek karbon nanotüp takviyesiz ve takviyeli tüm numuneler için detaylı bir termal analiz çalışması yapılmıştır. Bulunan sonuçlarda takviyenin termal özelliklere olumlu ve olumsuz etkileri görülmüştür. Son olarak Abaqus 6.14 sonlu elemanlar analiz programı ile, T800/M21 karbon fiber/epoksi kompozit malzemesinin elektriksel ve termal iletkenlikleri üzerine çalışmalar yapılarak çeşitli modeller önerilmiştir.

2017, xi + 126 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzemeler, Karbon nanotüp, Elektriksel iletkenlik, Termal davranışlar, Sonlu Elemanlar

ABSTRACT
PhD Thesis

EXPERIMENTAL DETERMINATION AND MODELING OF ELECTRICAL AND
THERMAL BEHAVIOUR OF CFRP COMPOSITE MATERIALS

Yelda AKÇİN ERGÜN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Şükrü TALAŞ

In this study, the effect of multi-walled carbon nanotube reinforcement on electrical and thermal properties of T800/M21 carbon fiber/epoxy composite material which is a carbon fiber reinforced plastic material is studied experimentally. The electrical conductivity of the composite materials with/without carbon nanotube is measured in the fiber direction, perpendicular to fiber direction and thickness direction and then the changes occurred in the electrical conductivity of the composite materials are investigated. It is found that the addition of carbon nanotube increases the electrical conductivity in all directions. In order to investigate thermal behavior of the composite materials, DSC (Differential Scanning Calorimetry) and TGA (Thermogravimetric Analysis) analyses are performed on the specimens. Later, the detailed thermal analysis is conducted for with/without carbon nanotube reinforced material to obtain the thermal conductivity, specific heat and thermal expansion coefficient of samples, In the results, it is seen that the carbon nanotube reinforcement has both positive and negative effects on the thermal properties. Finally, various models have been proposed by studying the electrical and thermal conductivities of T800 / M21 carbon fiber/epoxy composites with Abaqus 6.14 finite element analysis program.

2017, xi + 126 pages

Keywords: Composite materials, Carbon nanotube, Electrical conductivity, Thermal behavior, Finite Elements

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, bilgi birikimi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan, en umutsuz olduğum durumlarda desteği ile çıkış yolu bulmama yardım eden çok değerli danışmanım Prof. Dr. Şükrü TALAŞ'a ve üzerimde emeği olan, adını sayamadığım tüm hocalarıma çok teşekkür ederim.

Daha önce tanışmamış olmamıza rağmen yardım istediğimde, bana vakit ayırarak çalışmalarında çok önemli bir yol almama sebep olan sayın Arş. Gör. Dr. Emre AKARSLAN hocama ne kadar teşekkür etsem azdır.

Doktora süresince en büyük şanslarımdan bir tanesi çalışma arkadaşlarımdır. Her konuda gerek önerileriyle gerek bizzat yardım ederek yanımda olan ve çalışmam için benim yapmam gereken işleri bile üstlenen Arş. Gör. Melih ÖZÇATAL, Arş.Gör.Sinan ATLI, Arş. Gör. Faruk Emre AYSAL ve Arş. Gör. Mehmet Ali UĞUR arkadaşlarım... İyi ki varsınız.

Sevgili eşim, İzzet ERGÜN, desteğini hissetmek, bana olan inancını bilmek ve sana her konuda güvenebilmek en zor şeyleri bile yapılabilir kılıyor. Teşekkür ederim...

Canım ailem.. Annem, Babam, Abim, Ayla..Size teşekkür etmek adına ne söylesem eksik kalır. İyiki sizin kızınız ve kardeşinizim. Teşekkür ederim maddi, manevi desteğiniz, dahası varlığınız için.

Ve bu kadar minnettar olduğum insan arasında tezimi ithaf etmek isteğim tek kişi: İ.Çağan AKÇİN... Halacım.... Teşekkür ederim hayatımı güzelleştirdiğin için. Mutlu bir ömrün olur inşallah..

Yelda AKÇİN ERGÜN
AFYONKARAHİSAR, 2017

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1.GİRİŞ	1
2. KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLER	7
2.1 Karbon Fiberler	9
2.2 Polimer Matrisler	15
3. LİTERATÜR BİLGİLERİ	19
4. MATERYAL ve METOT	27
4.1 Deneysel Çalışmalar	27
4.1.1 Termal Deneyler	31
4.1.1.1 Termal İletkenlik Deneyi	31
4.1.1.2 DSC-TG Analizleri ve Spesifik Isı	31
4.1.1.3 Dilatometre Analizi	32
4.1.2 Elektriksel İletkenlik Deneyleri	32
4.2 Modelleme Çalışmaları	33
5.BULGULAR	35
5.1 Termal Deney Sonuçları	37
5.1.1 Termal İletkenlik Deney Sonuçları	37
5.1.2 DSC-TG ve Spesifik Isı Analiz Sonuçları	39
5.1.3 Dilatometre Analiz Sonuçları	48
5.2 Elektriksel İletkenlik Deney Sonuçları	51
5.3 Modelleme Sonuçları	59
5.3.1 Elektriksel İletkenlik Modelleme Çalışmaları ve Sonuçları	59
5.3.1.1 Hexagonal Model	61
5.3.1.2 Düzenli Fiber Modeli	69
5.3.1.3 Mikroyapı Görüntüsü Modelleme	72
5.3.2 Termal İletkenlik Modelleme Çalışmaları ve Sonuçları	92

5.3.2.1 Hexagonal Model.....	93
5.3.2.2 Mikroyapı Modelleme.....	99
6. TARTIŞMA ve SONUÇ	108
7. KAYNAKLAR.....	114
ÖZGEÇMİŞ.....	124

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

σ	İletkenlik
v_f	Fiber Hacim Oranı
v_m	Matris Hacim Oranı
Q	Isı akısı
λ	Termal iletkenlik katsayısı
C_p	Spesifik Isı
d	Yoğunluk
α_c	Kompozit malzemenin termal genleşme katsayısı
α_m	Matris malzemenin termal genleşme katsayısı,
α_f	Fiberin termal genleşme katsayısı,
ρ	Özdirenç

Kısaltmalar

CFRP	Karbon fiber takviyeli polimer
FRP	Fiber takviyeli polimerler ise
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
CNT	karbon nanotüp
SARISTU	Smart Intelligent Aircraft Structures
TAI	TUSAŞ Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
FEM	Sonlu Elemler Metodu
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
TGA	Termogravimetrik Analiz
ICP-MS	İndüktif Olarak Birleştirilmiş Plazma Kütle Spektrometresi
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
HRTEM	Yüksek Çözünürlüklü Elektron Mikroskobu
X doğrultusu	Fiber doğrultusu
Y doğrultusu	Fibere dik doğrultu
Y doğrultusu	Kalınlık doğrultusu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Boeing 787 nin Malzeme Dağılımı	2
Şekil 1.2 Nakliyat uçakları için malzeme gereksinimleri	3
Şekil 1.3 Kompozit uçak yüzeyinde elektrik iletkenliği için yapılan metal kaplama işleminin şematik görüntüsü	4
Şekil 1.4 Kompozit uçak yüzeyinde elektrik iletkenliği için yapılan statik kaplama işleminin şematik görüntüsü	5
Şekil 2.1 Fiber takviyeli kompozit malzeme çeşitleri: a) kısa fiber takviyeli; b) tek doğrultulu; c) dokumalı; d) tabakalı.	7
Şekil 2.2 Tek bir karbon fiberin SEM görüntüsü	10
Şekil 2.3 Akrilik öncüllerin (PAN) üretim metodu	11
Şekil 2.4 Zift tabanlı öncüllerin üretim metodu	12
Şekil 2.5 Grafitin atom yapısı	13
Şekil 2.6 Sıcaklık arttıkça karbon fiberin atom yapısında meydana gelen değişiklik....	13
Şekil 2.7 Termoplastik ve Termoset Polimerlerde Bağ yapısı	16
Şekil 3.1 Fiberler arasında olan kontaklar tarafından oluşturulan iletken yolun şematik gösterimi	23
Şekil 4.1 Termoplastik (TP) taşıyıcı malzemenin sıcaklık etkisiyle reçine içinde parçalanması ve CNT'lerin serbest kalışının şematik gösterimi	29
Şekil 4.2 Üretilen CNT takviyeli kompozit malzemenin şematik görüntüsü	29
Şekil 4.3 Elektriksel iletkenliğin ölçülmesi için hazırlanan deney düzeneği	33
Şekil 5.1 CNT ilaveli ve ilavesiz T800\M21 epoksi kompozit malzemelerin kırık yüzeyden alınan farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri; a, c, e: T800\M21 epoksi kompozit malzeme; b, d, f, g, h: CNT takviyeli T800\M21 epoksi kompozit malzeme.....	36
Şekil 5.2 CNT katkılı polimer matriste aglomerasyon görüntüsü.....	37
Şekil 5.3 Ekzotermik bir DSC diyagramı örneği ve $T_{başlanıç}$, $T_{bitiş}$, T_{pik} ve ΔH 'yi belirlemek için kullanılan analitik yöntem	40
Şekil 5.4 T800/M21 numunelerin farklı ısıtma hızlarındaki DSC diyagramları.....	41

Şekil 5.5 CNT katkılı T800/M21 numunelerin farklı ısıtma hızlarındaki DSC diyagramları.....	42
Şekil 5.6 T800/M21 numunelerin farklı ısıtma hızlarında TG diyagramları	43
Şekil 5.7 T800/M21 numunelerin 5 ⁰ C/dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları	43
Şekil 5.8 T800/M21 numunelerin 10 ⁰ C/ dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları	44
Şekil 5.9 T800/M21 numunelerin 20 ⁰ C/ dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları	44
Şekil 5.10 CNT katkılı T800/M21 numunelerin farklı ısıtma hızlarında TG diyagramları	45
Şekil 5.11 CNT katkılı T800/M21 numunelerin 5 ⁰ C/ dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları	46
Şekil 5.12 CNT katkılı T800/M21 numunelerin 10 ⁰ C/dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları.....	46
Şekil 5.13 CNT katkılı T800/M21 numunelerin 20 ⁰ C/dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları.....	47
Şekil 5.14 CNT ilaveli/ilavesiz T800/M55 numunelerin spesifik ısı sonuçları.	48
Şekil 5.15 CNT ilavesiz/ilaveli T800/M21 numunelerin X doğrultusunda termal genişleme katsayıları.	49
Şekil 5.16 CNT ilavesiz/ilaveli T800/M21 numunelerinY doğrultusunda termal genişleme katsayıları	50
Şekil 5.17 CNT ilavesinin farklı doğrultularda elektriksel iletkenlik üzerine yaptığı etki	58
Şekil 5.18 -100 +160 ⁰ C aralığında CNT ilaveli ve ilavesiz numunelerin elektriksel iletkenlik ölçümleri.....	59
Şekil 5.19 Schmidt ve arkadaşı tarafından önerilen modeller: a)perkolasyon görülmeyen durum; b)perkolasyon durumu	60
Şekil 5.20 Elektriksel iletkenlik için oluşturulan iki boyutlu hexagonal model,uygulanan yük ve sınır şartı.....	62
Şekil 5.21 Modellenen homojen malzemenin analiz sonucunda elde edilen potansiyel farkı.....	62
Şekil 5.22 3D Hexagonal model	64
Şekil 5.23 3D Hexagonal modelin analiz sonucu	64
Şekil 5.24 Homojen CNT ilavesi ile yapılan modelin analiz sonucu.....	65

Şekil 5.25 Partikül şeklinde CNT takviyesi yapılmış farklı modellerin analiz sonuçları	66
Şekil 5.26 Partikül şeklinde CNT takviyesi yapılmış ve aglomerasyon oluşmuş modelin analiz sonucu	67
Şekil 5.27 Çubuk şeklinde CNT'lerin homojen dağılıma sahip olduğu analiz sonuçları	68
Şekil 5.28 Çubuk şeklinde CNT takviyesi yapılmış ve aglomerasyon oluşmuş modelin analiz sonucu	68
Şekil 5.29 T800/M21 Karbon fiber epoksi kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü a; 100X, b)500X	69
Şekil 5.30 CNT takviyesi yapılmış düzenli fiber modeli ve analiz sonucu	71
Şekil 5.31 MATLAB'dan alınan mikro yapı görüntüleri.....	72
Şekil 5.32 500 büyötmeye sahip mikro yapı görüntüsünden elde edilen model.....	73
Şekil 5.33 62245 eş üçgen parçaya bölünmüş 500 büyötmeye sahip mikroyapı görüntüsü modeli.....	73
Şekil 5.34 500 büyötmeye sahip mikro yapı resimlerinin temsili alınış şekli.....	74
Şekil 5.35 Seri bağılı devre	75
Şekil 5.36 MATLAB'dan alınan 200X mikroyapı görüntüsü.....	84
Şekil 5.37 Hexagonal model,uygulanan yük ve sınır şartı	93
Şekil 5.38 Hexagonal model analiz sonucu.....	94
Şekil 5.39 Dairesel partiküller şeklinde % 1 CNT ilavesi yapılmış modellerin analiz sonuçları.....	95
Şekil 5.40 Farklı miktarlarda aglomerasyon içeren modellerin analiz sonucu: a)%50 aglomerasyon, b)%82 aglomerasyon, c) %95 aglomerasyon.....	96
Şekil 5.41 Farklı miktarlarda CNT ilavesi yapılmış modellerin analiz sonuçları: a) %1,5 miktarında; b)%3 miktarında, c)%4 miktarında, d)%5 miktarında,e)%7 miktarında, f) %10 miktarında.....	97
Şekil 5.42 Farklı miktarlarda CNT ilavesi yapılmış modellerin analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	98
Şekil 5.43 %10 CNT ilavesi yapılmış ve aglomerasyon oluşmuş modelin analiz sonucu	98
Şekil 5.44 Çubuk şeklinde %1 CNT ilavesi yapılmış modelin analiz sonucu	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Uçak yapısal malzemelerinin mekanik özellikleri.	2
Çizelge 2.1 Havacılık uygulamalarında genellikle kullanılan fiberler ve özellikleri.....	14
Çizelge 2.2 Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan polimer matrisler	17
Çizelge 3.1 Hibrit kompozitlerin ısı ve elektrik iletkenliği.....	24
Çizelge 4.1 T800/M21 karbon epoksi prepreg malzemenin özellikleri.	27
Çizelge 4.2 Kullanılan NANOCYL® NC7000™ serisi çok duvarlı karbon nanotüpün (MWCNT) Özellikleri.....	28
Çizelge 4.3 Termal İletkenlik İçin Test Matrisi.	30
Çizelge 4.4 Spesifik Isı ve TGA Analizi İçin Test Matrisi	30
Çizelge 4.5 Oda Sıcaklığında Elektriksel İletkenlik Test Matrisi.	30
Çizelge 4.6 -100 ve +160 ⁰ C sıcaklık aralığında Elektriksel İletkenlik Test Matrisi.....	30
Çizelge 5.1 Termal İletkenlik Deney Sonuçları.	39
Çizelge 5.2 CNT ilavesiz/ilaveli T800/M21 Numunelerin DSC Sonuçları.	42
Çizelge 5.3 CNT ilavesiz numunelerin oda sıcaklığında X (Fiber) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.....	52
Çizelge 5.4 CNT ilavesiz numunelerin oda sıcaklığında Y (Fibere dik) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.....	53
Çizelge 5.5 CNT ilavesiz numunelerin oda sıcaklığında Z (kalınlık) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.....	54
Çizelge 5.6 CNT ilaveli numunelerin oda sıcaklığında X (Fiber) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.....	55
Çizelge 5.7 CNT ilaveli numunelerin oda sıcaklığında Y (Fibere dik) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.....	56
Çizelge 5.8 CNT ilaveli numunelerin oda sıcaklığında Z (kalınlık) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.....	57
Çizelge 5.9 Düzenli fiber modellemesi için oluşturulan modeller ve analiz sonuçları. .	70
Çizelge 5.10 500 büyütme ile alınan mikro yapı görüntüleri.....	76

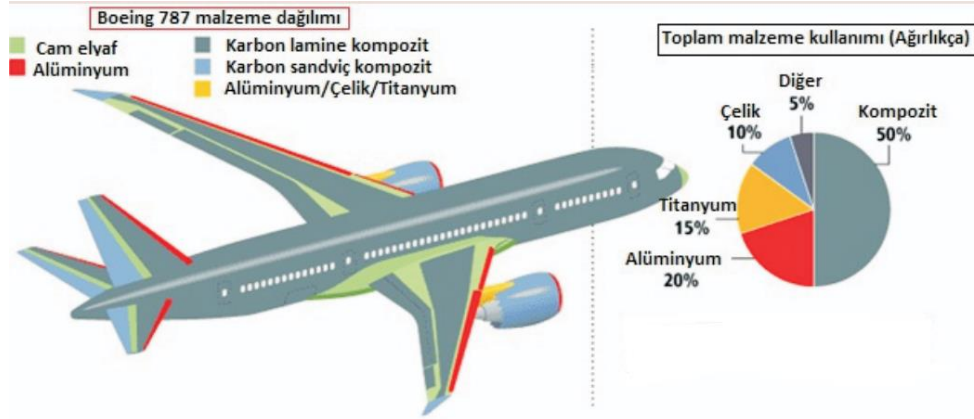
Çizelge 5.11 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.	85
Çizelge 5.12 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin termal iletkenlik analiz sonuçları.	100

1. GİRİŞ

En genel tanımı ile kompozit malzemeler, birbiri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde bir araya getirilmesi sonucu oluşan yeni malzemelerdir. Bu birleştirmedeki amaç, malzemelerin tek başına iken zayıf kalan yönlerini iyileştirmek ve istenilen doğrultuda üstün özellikler sağlayan yeni bir malzeme elde etmektir.

Polimerik kompozit malzemeler ağırlık, mukavemet, performans ve maliyet açısından diğer malzemelere göre üstün özellikleri olan malzemelerdir. Bu nedenle ağırlığın en önemli tasarım faktörlerinden biri olduğu havacılık sanayinde, polimer kompozit malzemelerin kullanım oranları giderek artmıştır. Ticari uçak gövdeleri genellikle dış kaplama, kiriş, çerçeve, ara duvar gibi parçaların montajlanması sonucunda ortaya çıkan yapıdır. Her bir parça özel olarak farklı bir görevi yerine getirmesi için tasarlanmıştır. Uçağın performansı ise toplam ağırlığa bağlıdır. Düşük ağırlık daha fazla yük, yakıt ve yolcunun taşınabilmesine imkân sağlamaktadır. Bir uçak gövdesinin tasarımı onun işlevsel şartları, dayanımı, rijitliği ve ömrü gibi etkenler göz önüne alınarak gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla yeni bir tasarım planlaması yapılırken tüm bu şartları sağlanması ve aynı zamanda da uçağın hafif olması hedeflenmektedir. Uçak gövdelerinde gerekli olan şartları sağlamak için yıllarca metalik malzemeler kullanılmıştır. Metalik malzemeler ve alaşımlar dayanım ve maliyet şartını yerini getirmekle beraber düşük ağırlık gereksinimini karşılayamadıkları için araştırmacılar zamanla yeni malzeme arayışına girmişlerdir. Bu aşamada kompozit malzemeler devreye girmiştir. Kompozit malzemelerin kullanımına II. Dünya Savaşı'ndan önce önemli derecede yüke maruz kalmayan gövde parçaları, motor kaplamaları, spoiler ve kanat firar kenarı sabit panelleri gibi ikincil yapısal parçalardan başlanmıştır. Günümüzde ise gövdede birçok kısımda termoset, termoplastik, seramik vb. elyafli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Örneğin 1995'te üretilen Boeing 777'lerde %50 Alüminyum, %12 kompozit kullanılmasına karşın, 2011'de hizmete giren Şekil 1.1'de verilen Boeing 787'nin tasarımında %50 kompozit, %20 Alüminyum kullanılmıştır (Kalanchiam and Chinnasamy 2012, İnkaya 2015,). Bu hali ile 787 geleneksel malzemeler ile imal edilmiş benzer boyuttaki uçaklardan 18 ton daha hafiftir.

Ayrıca % 20 daha fazla yakıt verimi ve %20 daha az emisyon üretmektedir (Harris 2011).



Şekil 1.1 Boeing 787 nin Malzeme Dağılımı (İnkaya 2015).

Uçak yapılarında geleneksel malzemelerin yerini alan kompozit malzemeler, düşük ağırlığa oranla yüksek mukavemet özelliğine sahiptirler. Çizelge 1.1’de uçak yapısı için malzeme seçiminde önemli bir ölçüt olan ve mekanik özelliğin yoğunluğa oranı ile ifade edilen, özgül mekanik özellik değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçta tek doğrultulu karbon / epoksi kompozitlerin geleneksel malzemelerden önemli oranda üstün oldukları görülmektedir (Kelly and Zweben 2000, İnt.Kyn.1 *et.al* 2004, Karcı 2009).

Çizelge 1.1 Uçak yapısal malzemelerinin mekanik özellikleri.

Malzeme ve elyaf oryantasyonu	Çekme Muk. σ_c (GPa)	Elastik Modül E (GPa)	Özgül Çek. Muk. σ_c/d	Özgül E. Modül E/d	Yoğunluk d (gr/cm ³)
Karbon/Epoksi,0 ⁰	1,654	147	1,1	95	1,55
Karbon/Epoksi,90 ⁰	0,061	10	0,04	6,45	2,20
S Camı/Epoksi,0 ⁰	1,620	55	0,74	25	2,70
S Camı/Epoksi,90 ⁰	0,040	16	0,01	7,27	4,40
Alüminyum,2024-T4	0,454	72	0,17	27	
Titanyum,Ti6Al4V	1,102	110	0,25	25	

Polimer kompozit malzemelerin mukavemetli ve hafif olmalarının yanında şekillendirilebilme yetenekleri ve korozyon direnci gibi avantajlara sahiptir. Diğer

yandan esnek bir yapıya sahip olan polimer kompozit malzemeler, çatlak oluşumu görülmeden esneyebildikleri ve titreşimleri sönmüleyebildikleri için metallere göre yorulma olayına karşı daha dirençlidirler (Harris 2011). En önemli dezavantajı olarak maliyeti gösterilen kompozit malzemeden üretilen kısımlarda, parça ve bağlama elemanı sayısı azalmakta, üretilen parçanın dizaynı, bakım-onarımı, geliştirilmesi gibi aşamalarda da daha az parça kullanılmaktadır (Güler 2003, Harris 2011). Üretim maliyeti yüksek olan kompozit malzemelerin daha az işçilik gerektirdiği için toplam maliyeti azalttığı Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından onaylanmıştır (İnt.Kyn.2). Tüm bu avantajları nedeniyle günümüzde kompozit malzemelerin havacılık alanında kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır ancak bu malzemelerin neden olduğu bazı sorunların çözülmesi, malzemelerin iyileştirilmesi için çalışmalar halen sürmektedir. Şekil 1.2’de Boing firması tarafından NASA için hazırlanmış olan bir sunumdan alınmıştır ve “nakliyat uçakları için malzeme gereksinimleri” bulunmaktadır.

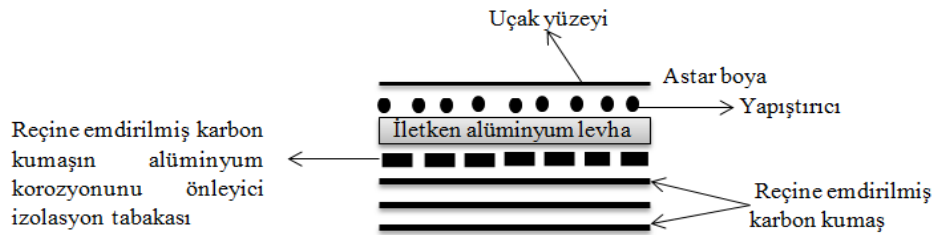


Şekil 1.2 Nakliyat uçakları için malzeme gereksinimleri (Harris 2011).

Şekil 1.2 incelendiğinde Boeing firmasının NASA’ ya kompozit malzemelerden bekledikleri bazı özellikleri sunduğu görülmektedir. Bunlardan bir tanesi de neredeyse uçağın tüm dış kısmında kullanılan bu polimer kompozit malzemelerin elektriği

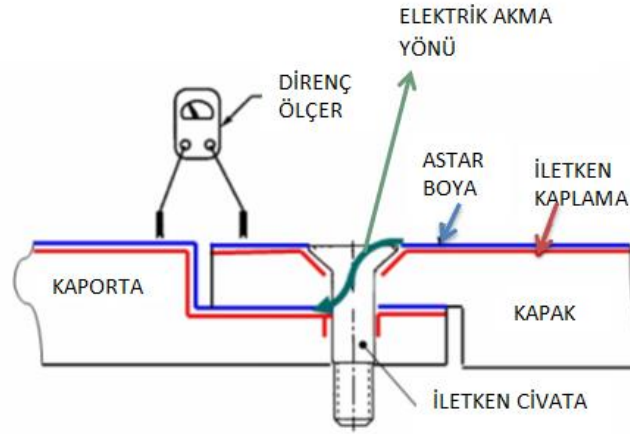
iletmesidir. Uçak tasarımlarında uçağın üzerinde oluşan elektriğin herhangi bir zarar vermeden uçağın üzerinde geçip gitmesi oldukça önemli bir konudur. Yıldırım düşmesi sonucu oluşan elektrik, elektronik cihazların oluşturduğu statik elektrik veya uçak kar, buz, toz bulutu vb. gibi ortamlardan geçerken sürtünme sonucu meydana gelen statik elektrik uçak yüzeyinden iletken bir yol bulup tekrar havaya aktarılamazsa oldukça büyük hasarlara neden olabilmektedir (Özel ve Töre 2011). Uçağın tipi, uçuş güzergâhı, hava durumu gibi etkenler uçağa yıldırım çarpması olasılığını değiştirmektedir. Ancak ticari uçaklarda bu oran her 10000 uçuştan 1'i olarak belirlenmiştir. Eğer uçuş yapılan iklim yıldırım oluşumu için elverişli ise olasılık her 1000 uçuştan 1'i olarak artmaktadır (İnce 2003). Daha önceki yıllarda uçak gövdelerinde ağırlıklı olarak metalik malzemeler kullanıldığı ve bu malzemeler elektriği iletmediği için bu duruma kendi içinde bir çözüm oluşmaktaydı. Son yıllarda yalıtkan polimerik kompozit malzemelerin uçak tasarımında daha fazla tercih edilmesi yıldırım çarpması veya statik elektriklenme sonucu oluşan elektriğin uçağın üzerinden akıp gitmesi ekstra önlemler alınmasını gerektirmektedir. Bunun için günümüzde uygulanan işlemler şunlardır:

1. Uçak yüzeyine iletken alüminyum folyo yapıştırmak
2. Yüzeyle iletken metal örgü (mesh) yerleştirmek
3. Yüzeyle anti statik iletken bir kaplama yapmak



Şekil 1.3 Kompozit uçak yüzeyinde elektrik iletkenliği için yapılan metal kaplama işleminin şematik görüntüsü (Özel ve Töre 2011).

Şekil 1.3'te kompozit uçak yüzeyini iletken bir hale çevirebilmek için yapılan iletken alüminyum folyo kaplama işleminin şematik görüntüsü verilmektedir. Şekil 1.4'te ise hem statik hem de metalik kaplama sonucunda elektrik akımının devamının sağlanması için kullanılan iletken civatalar görülmektedir.



Şekil 1.4 Kompozit uçak yüzeyinde elektrik iletkenliği için yapılan statik kaplama işleminin şematik görüntüsü (Özel ve Töre 2011).

Elektrik iletkenliğini sağlamak amacıyla kompozit malzemeler üzerine yapılan kaplamaları iki başlık altında incelemek doğru olacaktır. Bunlar yıldırım çarpması sonucu oluşan ve yaklaşık 200000 amperlik akımın iletilmesini sağlayan metal kaplamalar ve statik elektrik akışını sağlayarak elektronik aksamın zarar görmesini engelleyen kimyasal kaplamalardır. İki başlık arasındaki temel fark kaplamaların direncidir. Alüminyum folyo kaplamanın göstermesi gereken maximum direnç 0,15 ohm iken anti statik kaplamalar için kullanıldığı yere göre 0,1-100000 ohm arasında direnç değerine izin verilir (Özel ve Töre 2011, İnt.Kyn.3, İnt.Kyn.4). Şekil 1.3'ten de görüldüğü gibi yıldırım çarpmasına karşı uygulanan metalik kaplama işlemi zor bir işlemdir. Korozyona karşı korumak amacıyla yerleştirilen tabaka ve yapıştırma işlemi ağırlık artışına neden olmaktadır. Bu nedenle karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin üretimi aşamasında kompozit malzemelerin iletkenliğini sağlayabilmek ve aynı zamanda birçok termal yüke maruz kalan bu malzemelerin termal davranışlarını iyileştirebilmek için çalışmalar yürütülmektedir. Son yıllarda havacılık yapılarında karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerinin termal özelliklerinin ve elektriksel iletkenliklerinin hepsini aynı anda iyileştirmek için karbon nanotüpler ile çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Ancak karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemenin üretiminin zorluğu bu malzemenin ticarileşmesine olanak vermemiştir.

Bu çalışmada havacılık sektöründe kullanılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelere karbon nanotüp ilavesi sonucu elde edilen hibrit kompozitlerin elektriksel iletkenliği ve termal davranışları araştırılmıştır. Endüstriyel ölçekte üretime olanak sağlaması ve geleneksel sıvı enjeksiyon proseslerinde meydana gelen sorunların

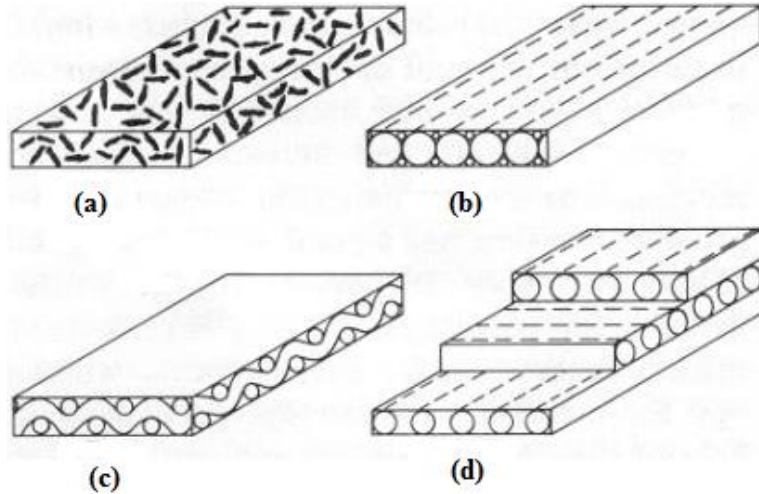
giderilmesi için yeni bir yöntem denenmiş ve püskürtme (spreyleme) yöntemi ile CNT takviyesi yapılmıştır. Tek doğrultulu kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliğini oda sıcaklığında, fiber doğrultusu (x), fibere dik doğrultu (y) ve kalınlık doğrultusu (z) olmak üzere üç doğrultuda da doğru bir şekilde belirleyebilmek için bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Ayrıca CNT'li ve CNT'siz numunelerin kalınlık doğrultusunda -100°C ve +160°C sıcaklık aralığında elektriksel iletkenlikleri araştırılmıştır. Termal davranışlar için DSC, TG analizleri yapılmış, ısı kapasiteleri, termal iletkenlik katsayıları ve termal genleşme katsayıları belirlenmiştir. En son olarak da CNT'li ve CNT'siz karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerin elektriksel ve termal iletkenlikleri ABAQUS sonlu elemanlar programı ile modellenmiş ve sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma Avrupa Birliği, Araştırma Teknolojik Geliştirme İçin 7. Çerçeve Programı tarafından finanse edilmiştir, proje no 284562.

2. KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLER

Bir kompozit malzeme istenilen özellikler doğrultusunda belirgin bir matris ile en az bir takviye elemanın makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulur. Fiber takviyeli polimerler ise (FRP) takviye elemanı olarak fiberlerin kullanıldığı polimer matrisli kompozit malzemelerdir. Şekil 2.1’de verildiği gibi fiberler kısa, uzun, tek doğrultulu veya dokumalı şekilde cam, karbon veya aramid olabilirler. Matris olarak ise polimer, seramik, metal malzemelerden biri veya bir kaçını aynı anda kullanılabilir. FRP’ler yaygın olarak havacılık, otomotiv, denizcilik ve inşaat endüstrilerinde kullanılır.

Farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle ortaya çıkan yeni bir malzeme olan kompozit malzemeler bileşenlerinden farklı ve daha üstün özellikler gösterirler. Malzeme içerisinde fiberlerin ve matrisin ayrı ayrı görevleri vardır. Fiberler; yükün büyük bir kısmını taşıırken yapıya sertlik, dayanım, termal kararlılık ve kullanılan fiberlere bağlı olarak diğer özellikleri kazandırır. Matrisin görevi ise, fiberleri bir arada tutarak kompozite uygulanan yükün fiberlere aktarılmasını sağlamaktır. Ayrıca kompozitin şeklini oluşturur ve iyi bir yüzeye sahip olmasını sağlar. Seçilen matrise göre süneklik, darbe direnci gibi özellikleri etkiler (Mazumdar 2001).



Şekil 2.1 Fiber takviyeli kompozit malzeme çeşitleri: a) kısa fiber takviyeli; b) tek doğrultulu; c) dokumalı; d) tabakalı.

Polimer matrisli karbon fiber kompozit havacılıkta yaygın olarak kullanımının birincil nedeni, sağladıkları mukavemet ve rijitlik değerleri ile karşılaştırıldığında çok düşük

olan ağırlıklarıdır. Bir örnek ile açıklamak gerekirse, bir karbon fiber takviyeli kompozit, 1020 çelik muadili ile karşılaştırıldığında, çelikten beş kat daha güçlü ve beşte bir daha hafif olduğu görülmektedir. 6061 Alüminyum ile karşılaştırıldığında ise ağırlıklarının yakın olduğu ancak kompozitin iki kat modüle ve yedi katı kadar mukavemete sahip olduğu görülmektedir. Polimer matrisli kompozit malzemelerin diğer özelliklerini şöyle sıralayabiliriz:

Korozyon Direnci

Polimer kompozitler, korozif ortamlara karşı mükemmel korozyon dayanımı sağlayabilirler. Korozif bir ortamda çalışacak bir parça için tasarım yaparken uygun bir reçine sisteminin seçilmesi korozyon riskini en aza indirmektedir. Metalik malzemeler ve alaşımları korozyona ve yorulma hasarına uğrayabilecekleri gibi bu zayıf özelliklerini iyileştirmek pahalı işlemler gerektirir. Fiber takviyeli polimer kompozitlerden korozyon söz konusu değildir ve malzeme yorulması metallerdeki kadar hızlı ilerlemez.

Darbe Dayanımı

Darbe toleransı metallere daha iyidir. Ayrıca vibrasyon azaltıcı özellikleri nedeniyle çatlak ilerlemesini zorlaştırırlar.

Termal İletkenlik

Kompozitlerin ısı iletkenliği, ısı akışı koşullarını belirlemek için gereklidir. Yöne bağlı olarak değişkenlik gösteren termal iletkenlikleri, kullanılacağı yere göre hem sürekli hem de süresiz ısı akışı durumunda belirlenmelidir.

Termal Genleşme Katsayısı

Kompozitin termal genleşme katsayısı fiber ve reçinenin termal genleşme katsayıları birbirinden çok farklı olduğu için yöne bağımlılık göstermektedir. Polimer matris ısı karşısında oldukça fazla genişirken, karbon fiberler negatif termal genleşme katsayısına sahiptir.

Elektrik İletkenliği

Çoğu polimer kompozit elektrik iletmez. Metal, karbon parçacıkları veya iletken lifler eklenerek bir derece elektrik iletkenliği elde etmek mümkündür. Elektriksel iletkenlik de yöne göre değişiklik gösterir.

Yöne Bağlılık

Özellikle tek doğrultulu kompozitlerin özellikleri izotropik malzemelerden oldukça farklıdır. Tek doğrultulu kompozitler son derece anizotropiktir. Fiber doğrultusunda olağanüstü özelliklere sahipken fibere dik ve kalınlık doğrultularında daha vasat özellik gösterirler. Metal malzemelerde böyle bir durum söz konusu değildir.

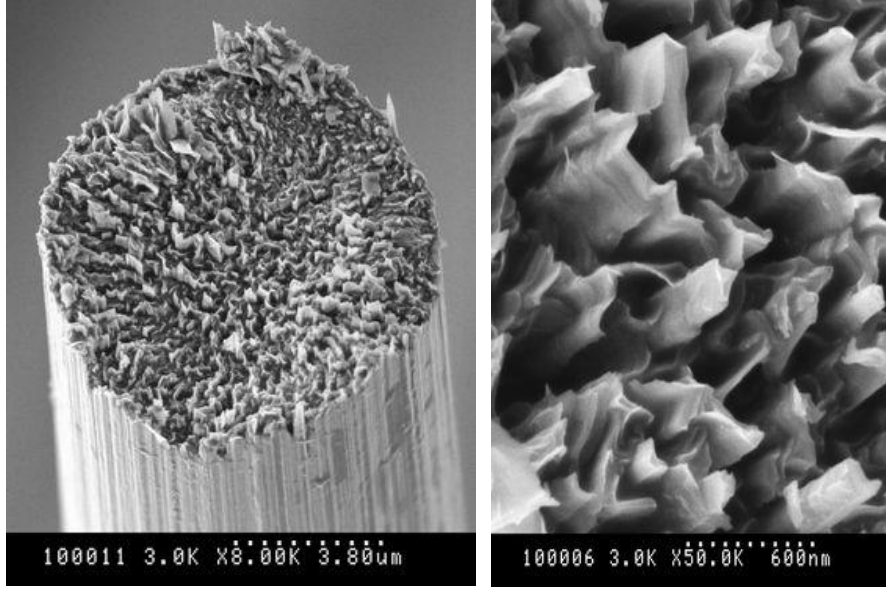
Hava çıkışı

Bazı polimer matrisler işleme ve uygulama esnasında nem tutabilirler. Bu durum hava boşluklarına ve fiber sıyrılmalarına neden olabilir.

Çok çeşitli fiber ve matris malzemesi olsa da havacılık sektöründe en fazla karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler kullanılmaktadır (İnt.Kyn.1). 1940'lı yıllarda öncelikle küçük uçaklarda kullanılmaya başlanılan fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin kullanımı ilerleyen yıllarda artan bir ivme göstermiştir.

2.1 Karbon Fiberler

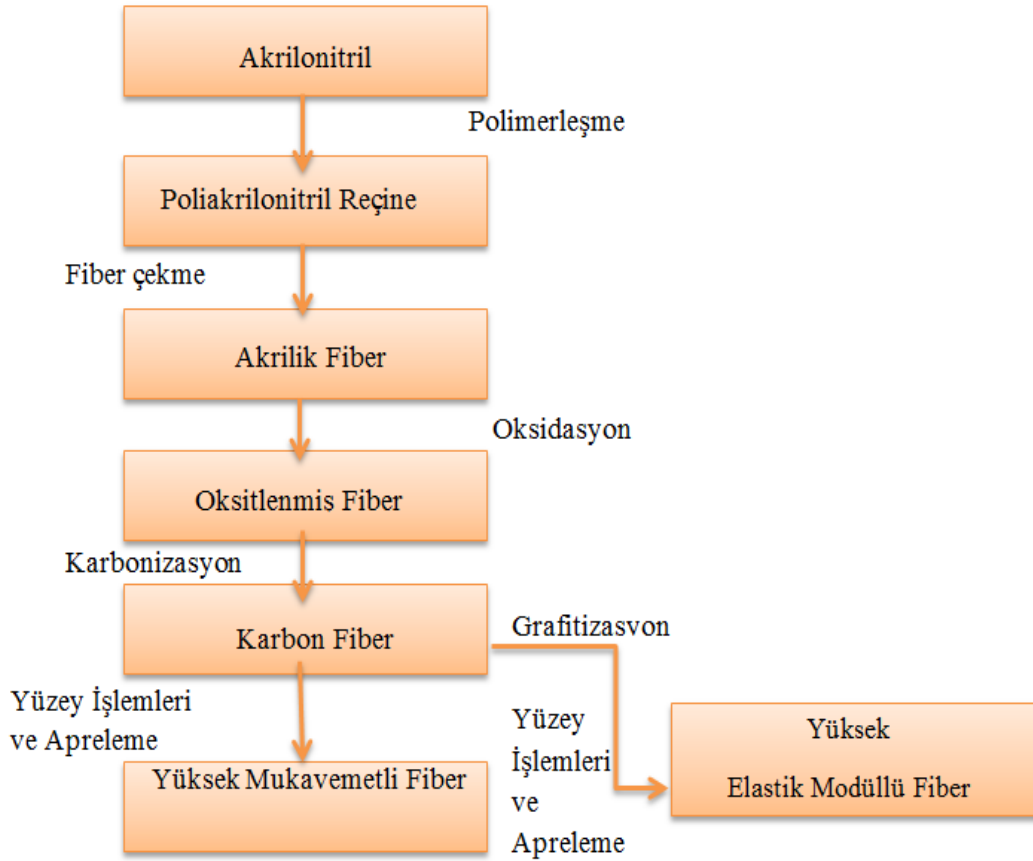
Karbon fiberler mikro grafit kristalleri içeren yeni nesil lifli, yüksek performanslı, karbon malzemelerdir. Uygun elyafların kontrollü piroliz işlemi sonucunda en az %90 oranında karbon içeren elyaflara dönüştürülmesiyle elde edilirler. Edison 1879 yılında karbon fiberlerin lambalar içerisinde karbon filamentler olarak kullanılabilceğini keşfetmiştir. Karbon fiberler Edison'un ilk çalışmalarından itibaren, mükemmel çekme özellikleri, düşük yoğunlukları, oksitleyici ortam olmadığında yüksek termal ve kimyasal stabiliteleri, iyi termal ve elektrik iletkenlikleri ve mükemmel sürünme dirençleri nedeniyle yoğun şekilde araştırılmış ve kullanılmıştır.



Şekil 2.2 Tek bir karbon fiberin SEM görüntüsü (İnt.Kyn.5).

Şekil 2.2’de SEM görüntüleri verilen karbon fiberlerin pazarı son yıllarda, havacılık (uçak ve uzay sistemleri), askeri, türbin bıçakları, inşaat, hafif silindirler ve basınçlı kaplar, tıbbi, otomobil ve spor malzemeleri gibi farklı uygulamalardan kaynaklanan talepleri karşılamak için istikrarlı bir şekilde büyümektedir. Ancak karbon fiber kullanım miktarı karbon fiber üretimi için kullanılan öncül malzemelerle de direkt olarak ilgilidir. Karbon fiberlerin üretilmesi için birçok öncül malzeme incelenmiştir. Öncül malzemelerden istenilen ideal özellikler kolay bir şekilde karbon fibere dönüşebilmeleri, düşük maliyetli işlem gerektirmeleri ve karbon verimlerinin yüksek olmasıdır. Bu kriterler göz önüne alındığında aşağıdaki üç çeşit öncül yaygın şekilde kullanılmıştır:

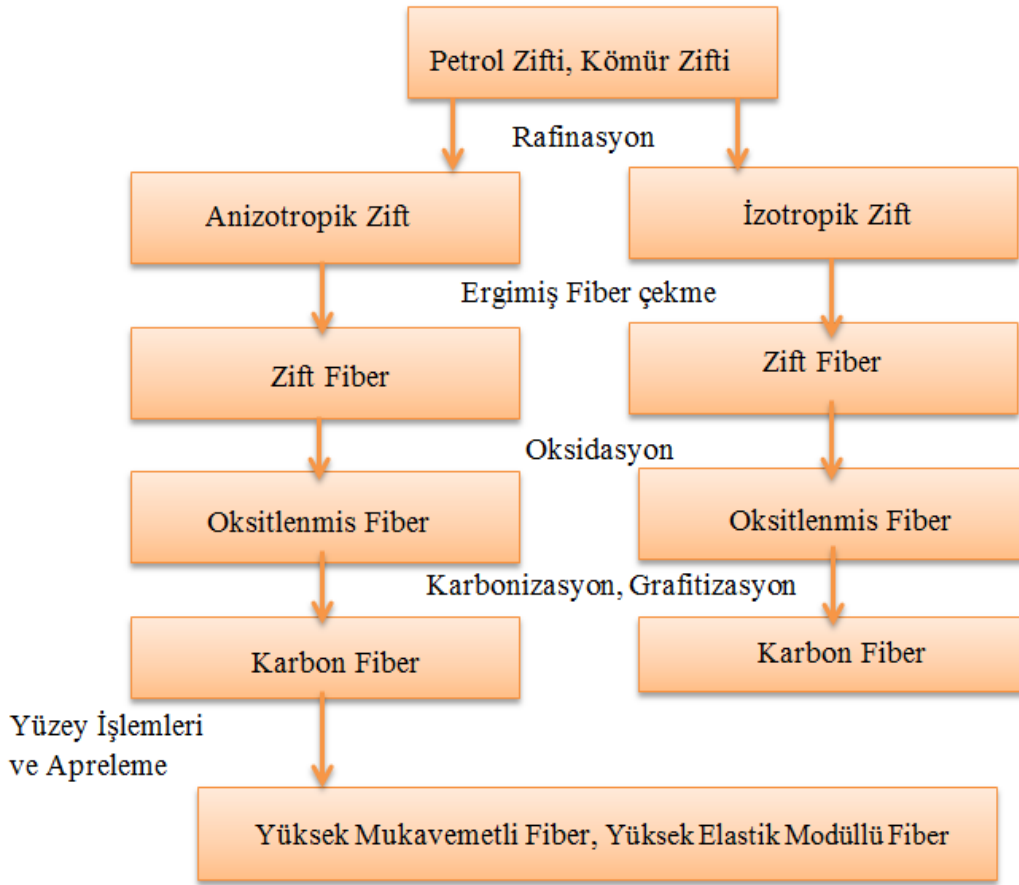
- 1. Akriklik öncüller:** Karbon fiber üretimi için başarıyla birçok üretici tarafından kullanılmaktadır. Akriklik öncüller %85 ten fazla akrilonitril (AN) monomer içerir. Özellikle, poliakrilonitril (PAN), en popüler akriklik ön maddesi olup, karbon fiber üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.
- 2. Selülozik öncüller:** % 44,4 karbon içerirler. Ancak reaksiyon sonucu karbon verimi sadece yaklaşık % 25-30 civarında olmaktadır.
- 3. Zift bazlı öncüller:** % 85’lik bir verime sahiptirler ve bu öncüllerden elde edilen karbon fiberler, daha grafitik olan yapıları nedeniyle yüksek bir modüle sahiptir.



Şekil 2.3 Akrlık öncüllerin (PAN) üretim metodu (İnt.Kyn.4).

Zift tabanlı karbon fiberlerin enine olan özellikleri PAN esaslı karbon fiberlere kıyasla daha düşüktür. En fazla verime sahip akrilik ve zift tabanlı öncüllerin üretim metotları Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te verilmiştir. Şekil 2.3'te PAN tipi karbon fiberin üretim akış şeması verilmiştir. Buna göre öncelikle akrilonitriller küçük miktarlarda uygun komonomerler ile kopolimerleşme reaksiyonu gösterirler ve oluşan bu reçineden akrilik fiberler çekilir. Poli (akrlonitril) birbirine bağlı karbon zincirlerine sahip bir polimerdir. Karbon fiberleri yapmak için polimer, sonunda elyafın ekseni olacak paralel doğrultuda gerilir. Daha sonra bu fiberlerden yüksek kaliteli karbon fiberler elde etmek için oksidasyon işlemi uygulanır. Oksidasyon işlemi PAN tabanlı öncül fiberlerin daha sonraki işlemlerde uygulanacak yüksek sıcaklıklara erime ya da bozulmaya uğramadan dayanabilmesi için, 200-300⁰C aralığında, kontrollü fırınlarda ve hava ortamında stabil duruma getirilmesi işlemidir. Daha sonra termal olarak stabil hale getirilmiş bu fiberler, karbonlaştırma ve grafitleştirme işlemleri için azot (N₂) veya argon (Ar) gazı altındaki inert atmosfer ortamına taşınırlar. Burada sıcaklık artırılarak karbon fiber en az %92

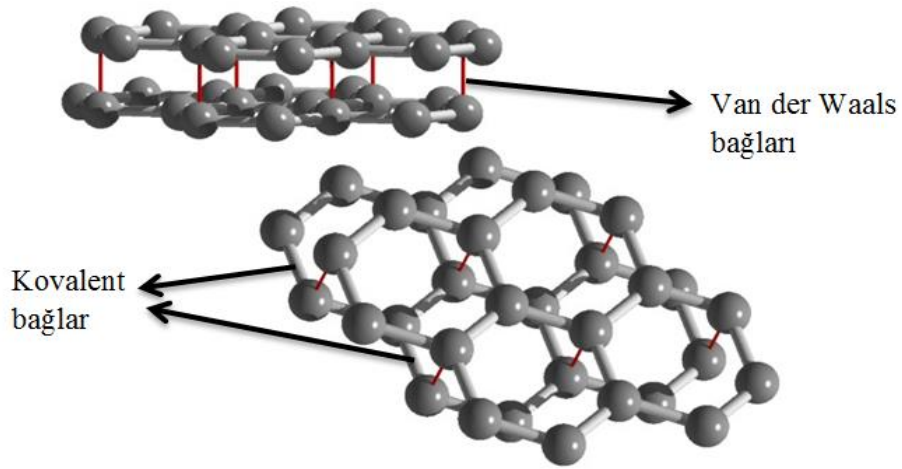
karbondan oluşana kadar uçucu ürünler uzaklaştırılır. Yüksek mukavemetli fiberler için 1500-1600⁰C aralığındaki karbonizasyon sıcaklığı tercih edilir; çünkü 1600⁰C'nin üzerindeki sıcaklıklarda gerilme mukavemetinde düşüş meydana gelir. Diğer yandan, karbon fiberlerde yüksek modül elde etmek için 1600-1800⁰C 'nin üzerinde ve 3000⁰C 'ye kadar ilave bir ısıl işlem gereklidir. Buna grafitleştirme işlemi denir. Azot, siyanojen oluşturmak için karbonla reaksiyona girdiğinden dolayı 2000⁰C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılamaz.



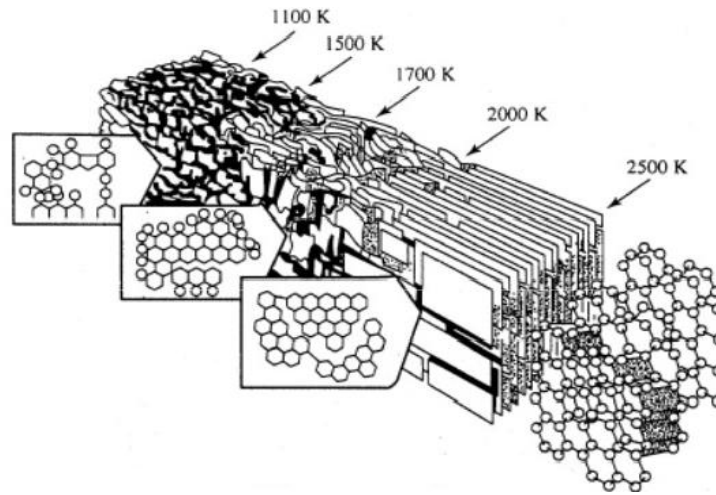
Şekil 2.4 Zift tabanlı öncüllerin üretim metodu (İnt.Kyn.4).

Grafitin atom yapısı, Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tabakalar içindeki kovalent bağlar çok güçlüdür, ancak tabakalar arasındaki van der Waals bağları daha zayıftır ve kolayca kırılabilir. Bu bağlar kırıldığında grafit yaprakları birbiri üzerinde kaymaya başlar ve bu durum grafitin neden iyi bir yağlayıcı olduğunun cevabıdır. Karbon fiberlerin atom yapısı da grafitin atom yapısı gibi altıgen şeklinde düzenlenmiş karbon atomlarının oluşturduğu tabakalardan meydana gelir ancak grafit ve karbon fiber arasındaki temel fark, karbon fiberlerde bu levhaların iç içe geçmiş

şekilde bağlanmasıdır. Karbon fiberlerin olağanüstü mekanik özellikleri bu tabakaların birbiri ile kenetlenmesi ve katlanmasının bir sonucudur. Grafitin mükemmel kararlılığı ise bağ yapısı ile ilgili bir durumdur. Birbirine bağlı altıgen tabakalardaki her bir karbonun üç karbon atomuna bağlı olduğu görülmektedir. Yapıdaki tek ve çift karbon atomu bağlarından kaynaklanan yoğun rezonans dengesi nedeniyle yapı oldukça stabildir. Bu nedenle karbon fiberlere grafitleştirme işlemi uygulanmaktadır. Şekil 2.6'da grafitleştirme işlemi sırasında karbon fiberin atom yapısında meydana gelen değişiklik şematik olarak gösterilmiştir (İnt.Kyn.5).



Şekil 2.5 Grafitin atom yapısı (İnt.Kyn.6).



Şekil 2.6 Sıcaklık arttıkça karbon fiberin atom yapısında meydana gelen değişiklik (İnt.Kyn.5).

Çizelge 2.1 Havacılık uygulamalarında genellikle kullanılan fiberler ve özellikleri.

Fiber	Yoğunluk (gr/cm³)	Modül (GPa)	Mukavemet (GPa)	Uygulama Alanı
Cam				
E-Cam	2,55	65-75	2,2-2,6	Küçük yolcu uçaklarının klimalarında, uçakların iç aksamalarında, ikincil parçalarında, reflektörlerin kaportasında, roket motoru kılıflarında.
S-Cam	2,47	85-95	4,4-4,8	Küçük yolcu uçakları klimalarının daha fazla yüke maruz kalan kısımlarında.
Aramid				
Düşük Modüllü	1,44	80-85	2,7-2,8	Yük taşımayan parçaların kaplamalarında
Orta Modüllü	1,44	120-128	2,7-2,8	Reflektörlerin kaportasında, roket motoru kılıflarında, bazı yapısal kısımlarda.
Yüksek Modüllü	1,48	160-170	2,3-2,4	Yüksek yük taşıyan parçalarda.
Karbon				
Standart Modüllü	1,77-1,80	220-240	3-3,5	Klimaların parçalarında, uydularda, reflektör yüzeylerinde, füzelerde vb.
Orta Modüllü (Yüksek Muk.)	1,77-1,81	270-300	5,4-5,7	Yüksek performanslı uçakların birincil yapısal parçalarında
Yüksek Modüllü	1,77-1,80	390-450	2,8-3 4-4,5	Uzay araçlarında, klimaların kontrol yüzeylerinde
Ultra Yüksek Muk.	1,80-1,82	290-310	7-7,5	Yüksek performanslı avcı uçakların birincil yapısal parçalarında, uzay araçlarında

En son işlem olan yüzey işlemleri ve apreleme işlemi karbon fiberlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için gerçekleştirilir. Birçok şirkette, yüzey işleme metodu hâlâ gizli tutulmaktadır. En sık kullanılan yüzey işleme yöntemleri sıvı ve gaz oksidasyon olarak kategorize edilebilir. Sıvı tipteki oksidasyon yöntemleri arasında, ticari karbon anodik oksidasyon yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır, çünkü ucuz, hızlı ve etkilidir. Karbon fiberlerin kırılganlıklarını azaltmak ve kullanım kolaylığı sağlamak amacıyla yağlanması işlemine de apreleme işlemi denilmektedir (Park and Heo 2014). Zift tabanlı karbon fiber üretiminde akrilik fiber üretiminden farklı olarak rafinasyon prosesi bulunmaktadır. Burada fiber eldesi için ya katran veya ağır petrol yağları ya da istenilen karakteristikte sentezlenmiş zift kullanılmaktadır. Çizelge 2.1’de havacılık endüstrisinde kullanılan fiberler, özellikleri ve kullanım yerleri verilmiştir (Nayak 2014). Modül ve mukavemetlerine göre sınıflandırılan bu fiberler kullanılacağı yerlerde beklenen performansa göre seçilmektedir.

2.2 Polimer Matrisler

Polimer kompozitler, içinde liflerin veya parçacıkların gömülü olduğu plastiklerdir. Plastik içerisinde dağılmış olarak bulunan fiber veya parçacıklardan oluşan takviye elemanlarını bir arada tutan ise matristir. Takviyeler genellikle matristen daha rijittir böylece kompozit malzemeyi daha rijit bir hale getirir. Bu takviye elemanları genellikle matris içinde belirli bir doğrultuda yönelirler. Böylece elde edilen kompozit malzeme farklı yönde farklı özelliklere sahip olmaktadır. Malzemenin bu karakteristik özelliği genellikle tasarımı optimize etmek için kullanılır.

Kompozit malzeme imalatında kullanılabilen çok sayıda polimer sınıfı vardır. Üretim için seçilen polimer matris, uygulama, maliyet, lif türü, imalat yöntemi, arz vb. dâhil birçok ögenin bir fonksiyonudur. Matrisleri termoset ve termoplastik matrisler olarak sınıflandırmak mümkündür.

Termoset matris malzemeleri şunlardır:

- Polyester
- Vinil ester
- Epoksi
- Fenolik

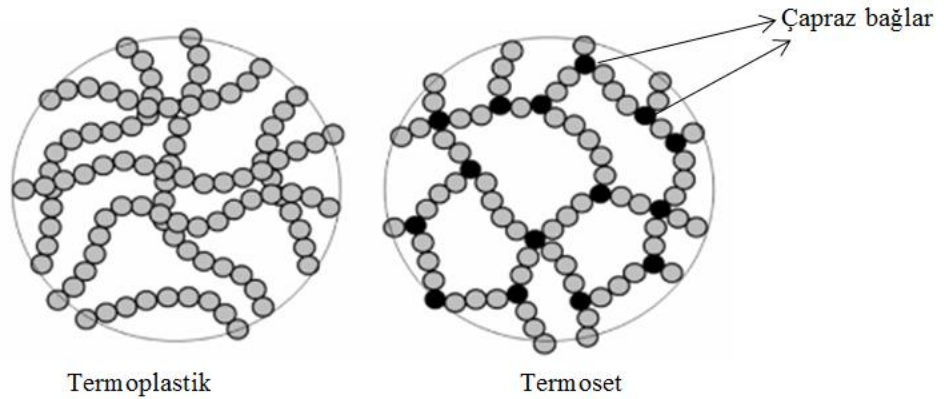
➤ Poliimid

Termoplastik matris malzemeleri şunlardır:

- Polietereterketon (PEEK)
- Polieterimid (PEI)
- Polifenilen sülfür (PPS)
- Poliamid (PA)

Termoset polimerler, oda sıcaklığında sıvı veya katı olabilen, ısı, katalizörler veya ultraviyole ışığı ile kürlendiğinde, çapraz bağlar oluşturduğu için geri döndürülemez kimyasal değişimlere uğrayan polimerlerdir. Çapraz bağlar, kür sonrası moleküler zincirlerinin eğme ve dönme hareketini engellediği için sert ve aynı zamanda oldukça gevrek malzemelerdir.

Termoplastik polimerler, lineer ve dallı bir yapıya sahip, ısıtıldığında bağlar zayıfladığı için yumuşayan ve şekillendirilebilir hale gelen, soğutulduğunda ise sertleşen bir polimerik malzemelerdir. Bu işlem, malzemeyi kimyasal bir değişime uğratmadan defalarca tekrarlanabilir. Termosetlere göre oldukça sünek bir yapıya sahiptirler.



Şekil 2.7 Termoplastik ve Termoset Polimerlerde Bağ yapısı.

Çizelge 2.2 Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan polimer matrisler (Nayak 2014).

Termostler		Termoplastikler		
Sıcaklıkla polimerizasyon kürlenmesi sırasında çapraz bağlı ağ oluşturanlar		Kimyasal değişim göstermeyenler		
Epoksiler	Fenolikler	Polyesterler	Poliimidler	PPS, PEEK
-En popüler reçine	-Ucuz			
-Toplam kullanılan kompozitlerin %80 inde kullanılır	-Düşük viskozite	-Ucuz	-Yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun (300°C)	-İyi hasar toleransı
-Kısmen yüksek sıcaklıklara dayanıklı	-Kolay kullanım	-Kolay kullanım	-Oda sıcaklığındaki uygulamalar için popüler	-300- 400 °C' de işlem gerektirdiği için işlem zorluğu
-Nispeten pahalı	-Yüksek sıcaklıklarda kullanım imkanı		-İşlem zorluğu	
	-İyi özelliklere sahip kompozit üretimini zorlaştırma		-Kırılgan	
-Düşük büzülme (%2-3)	-Fazla büzülme			
-Kürlenme sırasında uçucu madde salınımı yapmaz	-Kürleme sırasında gaz çıkışı	-Aşırı büzülme (%7-8)		
-Yapıya çok farklı değişkenlik, morfoloji ve özellikler verecek çeşitli şekillerde polimerleşebilme	-Termal oksitlenme göstermez	-Yüksek kimyasal direnç		
	-Alevlenme ve yanma olayını geciktirir	-Kırılgan		
	- Kırılgan	-Düşük Tg		
		-Epoksiden düşük özellikler		
-Prepreg imalatı için iyi bir depolanma kararlılığı	-Prepreg için daha az depolanma stabilitesi	-Prepreg üretimi zor		-Sonsuz depolama ömrü, prepreg üretme zorluğu
-Nemin neden olduğu (%5-6) yüksek sıcaklıkta şişme ve bozunma	-Nem absorbe etse de çalışma şartlarında bu durumun önemli bir etkisi olmaz	-Neme karşı epoksiden daha az duyarlı		-Nem absorbe etmez
- Uzun vadede ultra viyola bozunması				

Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'ten de görüldüğü gibi havacılık alanında kullanılmaya en uygun fiber karbon fiber, en uygun matris ise epoksilerdir. Karbon fiberlerin yüksek olan rijitlik\ağırlık ve mukavemet\ağırlık oranları ile epoksilerin diğer özelliklerinin yanı sıra seri üretim için gerekli olan prepreg üretimine imkan tanınması bu malzemeleri havacılık alanında en çok kullanılan malzemeler konumuna getirmiştir.

3. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler, metallere kıyasla daha yüksek olan dayanım/kütle ve rijitlik/kütle oranlarından dolayı üretimde önemli miktarda kütle kazancı sağlamaktadır. Taşıma araçlarının hafif olması enerji tasarrufuna ve verimliliğin artmasına neden olduğu için son yıllarda polimer kompozit malzemelerin uygulamaları özellikle havacılık sektöründe artmıştır. Ayrıca çevreye dost bir şekilde üretilebilmeleri sonucu ekolojik gereklilikleri karşılamaktadırlar (Florez *et al.* 2016). Tüm bu avantajları, karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin (CFRP), yüksek dayanım/kütle gerektiren uygulamalarda Al-Zn-Mg alaşımlarının yerini almaya başlamasına neden olmuştur. Ancak Al-Zn Mg alaşımları izotropik elektriksel ve ısıl iletkenliğe sahipken, CFRP malzemeler son derece anizotropiktir. Anizotropi, karbon fiberlerin ekstrüzyon teknikleri içeren üretim şekilleri sonucunda kendilerine ve dolayısıyla kompozitlerine, doğal bir yönsellik kazandıran üretim sürecinin bir sonucudur. Bu etki özellikle de elektrik ve ısı iletkenliklerinde görülür. Bir çok fiberle uyum gösterdiği için matris olarak en çok kullanılan epoksi polimerler, amorf ve çapraz bağlı yapısı; yüksek modül, yüksek hasar dayanımı, düşük sürünme, yüksek sıcaklıklarda yapısını koruyabilme gibi avantajlar sağlamaktadır. Ancak elektriksel iletkenliği çok düşük olan epoksiler, tek başına çok iletken olan karbon fiberler ile birleştirildiğinde dahi özellikle kalınlık doğrultusunda havacılık yapılarında gerekli olan iletkenliğe ulaşamamaktadır. Karbon fiberler yaklaşık 1×10^4 S/m elektriksel iletkenlik değerine sahip bir iletken iken, polimerler $\sim 1 \times 10^{-13}$ S/m elektrik iletkenliğine sahiptir. Bu iki bileşenden oluşan kompozitler ise x doğrultusunda ~ 10 -30 S/m, y doğrultusunda $\sim 10^{-1}$ - 10^{-3} S / m ve z doğrultusunda ise $\sim 10^{-1}$ - 10^{-4} elektriksel iletkenliğe sahiptir (Schmidt and Banerjee 2013). Termal iletkenlikleri ise literatürde x, y ve z doğrultusunda sırayla 11,8; 0,6 ve 0,6 şeklinde verilmiştir (Ogasawara *et al.* 2010). Bu anizotropiklik, CFRP kompozitlerinin tasarım, geliştirme ve uygulamaları için mühendislik zorlukları yaratmaktadır. Uçak yapılarının ESD (Electro-Statik Boşalma), elektriksel irtibat, EMI (Elektro-Manyetik Girişim) kalkanı ve yıldırım çarpmalarına karşı koruma etkinliği gibi elektriksel fonksiyonları, elektriksel iletkenlikle doğrudan ilgilidir. Örneğin uçaklara yıldırım isabet etmesi durumunda yapının gerekli elektrik iletkenliğe sahip olması, olası bir elektronik veya yapısal hasarı önlemektedir. Uçaklar, farklı yıldırım akımları ve süreleri göz önüne alınarak yıldırım çarpmasına karşı MIL-STD-1757A ve SAE ARP-

5414 standartlarına uygun bir şekilde tasarlanmaktadır (MIL-STD-1757A 1983). Günümüzde iletkenliği düşük CFRP uçakların yüzeyleri, yıldırım hasarına karşı metal hasır veya genişletilmiş alüminyum ve bakır malzemeler ile kaplanarak koruma sağlanmaya çalışılmaktadır. Böylece yıldırım çarpması sırasında uçağa verilen enerji yüzey üzerinde dağılırarak tekrar havaya iletilmektedir ve altındaki kompozit malzemenin hasarı önlenmektedir. Ancak yapıya ilave bir kütle eklenmesi, yapının ağırlığını artırarak uçağın performansını düşürür. Eğer üretim sonrası yüzey kaplamaya gerek duyulmadan doğrudan iletken bir malzeme üretilebilirse elektriksel iletkenlik ağırlık kurulum maliyeti ortadan kalkacaktır. Diğer yandan CFRP'de kullanılan polimerlerin termal davranışları da elektriksel özellikler kadar önemlidir, çünkü uçak yapıları termal yüklerle maruz kalmaktadır. Yıldırım çarpması veya elektrik boşalması sırasında kompozit malzemelerin zayıf termal iletkenliği veya yüksek elektrik direnci nedeniyle reçine erimesi, buharlaşması ve delaminasyon gibi problemler oluşabilir. Ayrıca termal etkiler sonucu boyut kararlılığı bozulan polimerleri daha stabil bir duruma getirmek de önemli bir konudur. Literatüre bakıldığında epoksi reçinenin elektriksel iletkenliğini ve termal özelliklerini iyileştirmek için yapılan, reçineye kısa karbon fiber, karbon nano lif ve karbon nano tüp gibi dolgu maddelerinin ilave edildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Hepsinin ortak sonucu, bu dolgu maddelerinin, reçinenin elektriksel iletkenliğini iyileştirdiği yönündedir (Allaouia *et al.* 2002, Feller *et al.* 2002, Ball 2010, Ayatollahi *et al.* 2011, Rios *et al.* 2013), termal iletkenlikte ise elektriksel iletkenliğe göre daha az bir artışa neden olmaktadır (Gojny *et al.* 2006, Moissala *et al.* 2006, Gardea and Lagoudas 2014). Son yıllarda ise, havacılık yapılarında kullanılan ve çeşitli termal yüklerle maruz kalan karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerinin mekanik, termal ve elektriksel iletkenlik davranışlarının hepsini aynı anda iyileştirmek için bu malzemelere karbon nano tüp (CNT) takviyesi yapılması üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Yapılan birçok araştırmaya göre, bu malzemelerin elektriksel, termal ve mekanik özelliklerinin iyileşmesi CNT' ün matris içerisindeki dağılımı ile doğrudan ilişkilidir (Lonjon *et al.* 2012, Park *et al.* 2012, Kim *et al.* 2012, Lin *et al.* 2014). Ancak nano ölçeğe inildiğinde parçacıkları en çok etkileyen kuvvet yerçekimi kuvveti değil, birbirleri ile aralarındaki van der Waals etkileşimleridir. Bu durum matris içerisine ilave edilen nano parçacıkların bir araya gelerek topaklanma yapma eğiliminde olmasına ve malzemenin istenilen sonuçların alınamamasına neden olmaktadır. Aglomerasyonu engellemek için

karbon nano tüplerin matris içerisinde çok iyi karıştırılması gerekmektedir. Reçine içerisine CNT'lerin ilave edildiği sıvı enjeksiyon teknolojileri (infüzyon, reçine transfer yöntemi) ile geleneksel CFRP üretimlerinde sıkça problemlerle karşılaşmaktadır. Reçine ile etkileşime giren CNT'ler viskoziteyi artırarak reçine akışını zorlaştırmakta fiberin reçine emilimini etkilemektedir. Proses sıcaklığı artırılarak viskozite düşürülebilmektedir ancak bu durumda CNT'ler topaklanma eğilimi göstermektedir. Diğer yandan infüzyon prosesi sırasında karbon fiberlerin etrafında toplanan CNT'ler kusurlu tabakaların oluşmasına sebep olabilmektedir (Florez *et al.* 2016). Üretim sırasında CNT'lerin iyi dağılıp dağılmaması elektriksel ve termal iletkenlik sonuçlarını doğrudan etkilediği için bu konuda literatürde yapılan deneysel çalışmalar farklı sonuçlar göstermektedir.

Tek bir karbon fiberin veya karbon fiber demetinin uzunlamasına elektrik direnci (daha çok PAN fiberler için) karbon fiber üreticileri (İnt.Kyn.7, İnt.Kyn.8) ve önceki araştırmacılar tarafından yaklaşık olarak 10^{-5} Ω m olarak belirtilmiştir (Zhang *et al.* 2000, Tunakova and Gregr 2010). Fiber demetinin enine elektrik direnci / iletkenliği ise bilinmemektedir. Geleneksel karışım kuralı modeli, fiber yönü boyunca kompozit bir malzemenin iletkenliğinin tanımlanmasında doğru sonuçlar verirken, enine veya kalınlık doğrultusunda elektriksel özellikleri tanımlamakta başarısızdır. Bu duruma bir çözüm bulmak için CFRP kompozitlerinin elektrik ve termal özellikleri konusunda sonlu elemanlar metodu (FEM) ile modelleme çalışmaları yapılmaktadır. Özellikle kompozit malzemelerde ısının taşınımını incelemek için iki boyutlu (2D) düzenli veya rastgele dağılmış fiber modelleri kullanılmıştır (Gutowski and Dillon 1992, Allen *et al.*, Jones and Boyd 1994, Raghavan *et al.* 2001, Marcos-Gómez *et al.* 2010). Dong vd. (2016) ise üç boyutlu (3D) modelleme tek doğrultulu ve dokumalı CFRP kompozit malzemelerinin termal iletkenliklerini araştırmıştır ve tek doğrultulu kompozitler için hexagonal model önermiştir. Ancak sonuçta önerdiği modelleri karşılaştırdıklarında dokumalı kompozitlerde daha iyi sonuçlar alındığı belirtilmiştir. Yaygın olarak kullanılan bir başka modelleme yönteminde ise kompozitlerin termal ve elektriksel iletkenlik davranışlarını incelemek için kullanılan direnç ağı modelidir. Bu modelde, kompozitlerin hasarının tespiti için, yapısal hasar sonrası kompozitlerin fiber doğrultusunda elektrik direncinin değişmesi prensibi kullanılırken, kalınlık boyunca

olan direnç değişimi hiç dikkate alınmamıştır (Todoroki *et al.* 2002, 2010, Wen *et al.* 2011, Huang *et al.* 2012). Örneğin Huang vd. (2012) tek doğrultulu CFRP'nin fiber doğrultusunda yük altında elektrik direncinin değişimini modellemek için, mekanik yüklemeyi içeren bir direnç ağı modeli oluşturmuştur. Modellerinde karbon fiberlerin hexagonal olarak dizildiğini varsaymışlardır. Fiber doğrultusunca elektrik direncindeki değişimin kompozit yapısal hasarın belirlenmesinde daha faydalı olduğu düşünölmüştür. Ancak bu model yıldırım çarpmasına maruz kalmış kompozit paneller veya CFRP'nin elektromanyetik koruma özelliğinin karakterizasyonu için çok önemli olan kalınlık doğrultusundaki elektrik direncini dikkate almamaktadır.

Wen vd. (2011), CFRP'nin enine elektrik iletim davranışı için, fiber doğrultusunca direnç modellemesine benzer bir yaklaşım benimsemişlerdir. Hexagonal ve kare dizilim olarak iki farklı model üzerinde çalışmışlardır. Rastgele fiber-fiber temasları oluşturularak, üniform fiber-fiber temas dağılımlarıyla karşılaştırma yapmışlardır. İdeal periyodik dizilimli modellerle hesaplamaları basitleştirmiştir ancak rasgele fiber dağılımında elde edilen özellikler ile oluşturulan düzenli modellerin sonuçları uyuşmamıştır.

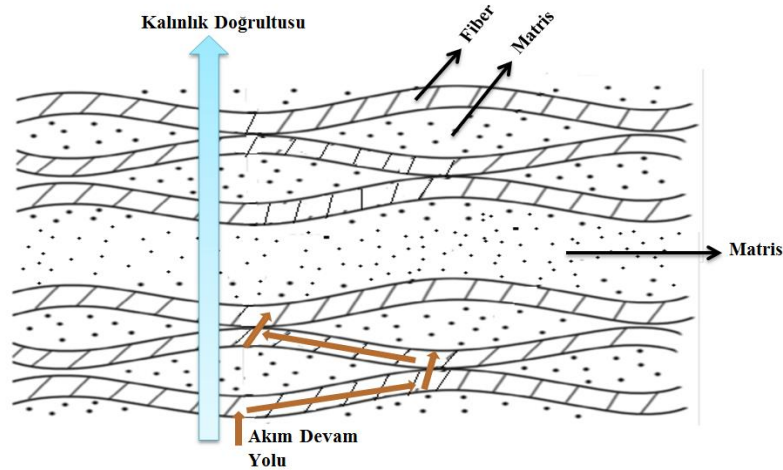
Todoroki vd. (2002, 2010) ölçölen ortotropik elektrik iletkenliğinin delaminasyona olan etkisini incelemek için FEM kullanmışlardır. Ogasawara vd. (2010), ise FEM ile yıldırım akımına maruz kalan CFRP'nin termal-elektriksel davranışını modellemişlerdir. Bu modellerde, kompozitlerin özellikleri malzemelerin mikro yapıları dikkate alınmadan oluşturulmuştur. Dolayısıyla bu modeller, CFRP'nin elektriksel davranışı hakkında genel bilgi sunarken, mikro yapıya bağlı olan etkin elektriksel ve termal özellikleri doğru bir şekilde tahmin edemezler. Makroskopik elektrik iletim davranışının doğru bir tahmini ancak, modelin temelini oluşturan materyalin mikro yapısını yakalayarak başarılabilir. Mikro yapıya dayalı bir modelin bir diğer avantajı da, termoelektrik-mekanik etkileşimler gibi çoklu fizik simölasyonunun lokal olarak da ele alınabilmesidir.

Elektrik ve termal iletkenliğin kalınlık yönünde doğru olarak modellenmesi için fiberler arasındaki temasın, fiber dalgalanmasının ve tek fiber özelliklerinin göz önünde

bulundurulması gerekmektedir. Bu mekanizmalardan lifler arasındaki temas en önemli noktadır çünkü kalınlık yönünde sürekli iletim yolunu etkiler ve dolayısıyla kalınlık yönünde CFRP'nin genel elektriksel ve termal iletkenliğini belirler. CFRP malzemelerde fiberler ile polimer matrisin elektriksel ve termal iletkenliği arasında oldukça büyük bir fark bulunmaktadır. Böyle bir kompozit sistemde polimer matris yalıtkan olarak kabul edilebilir ve kompozitlerin elektrik ve termal iletimine katkıda bulunmadığı varsayımı yapılabilir. Fiber yönü boyunca, akım fiber temas noktalarından akar ve karbon fiberler seri direnç olarak kabul edilebilir. Tek doğrultulu karbon fiber/polimer kompozit malzemenin direnci fiberlerin öz direncine ve fiber hacim oranına bağlıdır. CFRP'nin fiber doğrultusunda olan iletkenliği (σ_L), fiber hacim oranı (v_f) ile fiberlerin boyuna elektriksel iletkenliğinin kullanıldığı karışımın kuralıyla hesaplanabilir:

$$\sigma_L = v_f * \sigma_{Fiber} \quad (3.1)$$

CFRP kompozitlerin kalınlık boyunca veya enine olan iletiminde ise karbon fiberlerin birbirleri ile arasında oluşan rastgele kontaklar iletim mekanizmasını sağlar. Bu durum CFRP kompozit malzemelerdeki elektriksel ve termal iletkenlikteki anizotropiyi açıklar.



Şekil 3.1 Fiberler arasında olan kontaklar tarafından oluşturulan iletken yolun şematik gösterimi.

Şekil 3.1'de rastgele oluşan fiber temaslarının oluşturduğu akım yolu görülmektedir. Fiberler arasında oluşan kontaklar iletimin devamını sağlamakla birlikte akım matris bölgesine geldiğinde yalıtkan olan polimer içerisinde ilerleyecek bir yol

bulamamaktadır. Böylece FRP kompozit malzemelerde kalınlık ve fibere dik doğrultuda elektriksel iletkenlik kesintiye uğramaktadır.

Çizelge 3.1 Hibrit kompozitlerin ısı ve elektrik iletkenliği.

CNT Tipi, Konsantrasyonu	Fiber-Matris Sistemi	İletkenlikteki Artış
Kristal MWCNT, %7 (Kim, et al. 2007)	Karbon fiber-fenolik reçine	Termal iletkenlik 290 W/mK' den 393 W/mK' e çıkmıştır. Enine elektrik direnci 10^7 - 10^8 Ohm mm ve kalınlık boyunca elektrik direnci 10^9 ohm mm olan malzemede CNT ilavesi sonucu bu değerler 10^1 - 10^2 ohm mm civarına düşmüştür. Y doğrultusunda elektrik iletkenliği, SWCNT ilavesi ile 2 kat,MWCNT ilavesi ile %30 artmıştır.
Hızalanmış CNT, %1-3 (Garcia et al. 2008)	Alüminyum fiber-Epoksi reçine	Elektriksel iletkenlik 0.034 S/m den 0.202 S/m ye ve ısı iletkenlik 0.193 W/mK den 0.343 W/m K e çıkmıştır.
SWCNT ve MWCNT, %0,25 (Bekyarova et al. 2007)	Karbon fiber-epoksi reçine	Elektriksel iletkenlik 0.034 S/m den 0.68 S/m ye ve termal iletkenlik 0.193 W/m K'den 0.205 W/mK e çıkmıştır.
SWCNT, %1 (Rana et al.2011)	Karbon fiber-epoksi reçine	Isı iletkenliği %93 artmıştır.
VCNF, %0,5 (Rana et al.2011)	Karbon fiber-epoksi reçine	Isı iletkenliği %90 artmıştır.
SWCNT,%1 (Diez-Pascual et al. 2011)	Cam Fiber-PEEK	
MWCNT,%1 (Shen et al. 2009)	Cam Fiber-PA-6	

Kompozit malzemede bulunan “reçine zengin” bu bölgede iletimin devamı için CNT ‘ün matris içerisine karıştırılarak iletken (elektriksel veya termal) yollar oluşturabileceği yapılan birçok çalışma ile görülmüştür ve bu çalışmalardan bazıları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Yüksek elektrik iletkenliğine sahip olan CNT'ler çok düşük dolgu konsantrasyonunda bile iletken olmayan matrislerde bir perkolasyon ağı oluşturabilir. Perkolasyon eşiği olarak da adlandırılan bu durum, iletken katkı malzemesinin belirli bir kritik hacim konsantrasyonunda kompozitin iletkenliğinde ani bir artış gösterdiği eşiktir. Termal iletkenlik için de benzer bir durum söz konusudur. Sonuçta, iletken

olmayan bir matrise sahip çok bileşenli kompozitler söz konusu olduğunda, iletkenliğin artırılması esas olarak matris iletkenliğinin artırılmasıyla mümkün olabilir.

Çok bileşenli kompozitlerin termal ve elektrik iletkenliği çeşitli üretim parametrelerine bağlıdır. Dolgu malzemelerinin dispersiyonu, bu kompozitlerin iletkenliğini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. CNT gibi dolgu malzemeleri matriste iyi dağıldığında, özellikle matris zengin bölgede iletken ağ oluşumu kolaylaşmaktadır.

Teknoloji hazırlık düzeyini ilerletmek ve bilimsel olarak fayda sağladığı kanıtlanmış olan nano modifikasyon teknolojilerini ilerletmek için endüstriyel ölçekli üretim ortamı ile uyumlu çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Başka bir deyişle karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) kompozit malzemelere nano parçacık takviyesi ile ilgili halihazırda mevcut üretim tesislerinde kurulmuş proses ve imalat teknolojilerini hesaba katarak kesintisiz bir üretim sağlamak için yöntem önermek gerekmektedir.

Bu tez çalışması, uçaklarda hasar toleransı, elektrik iletkenliği ve ağırlık azalması konularında önemli gelişmeler sağlamayı amaçlayan “Smart Intelligent Aircraft Structures” (SARISTU) projesinin bir parçasıdır. 64 tane ortağı bulunan SARISTU projesi kapsamında, CFRP kompozit malzemelerin hasar toleransını ve elektriksel iletkenliğini arttırmak için, CNT katkılı örtü, CNT katkılı bağlayıcı, CNT ile muamele edilmiş prepreg vb. gibi çeşitli en son teknoloji ve yenilikçi çözümler üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçların yanı sıra endüstriyel ölçekte kompozit malzemelerin üretilebilirliği de önemli bir faktör olarak dikkate alınmıştır. Çalışmaların sonuçlarına göre (i) CNT katkılı termoplastik örtü ve (ii) püskürtme yöntemi ile CNT takviye edilmiş prepreg, laboratuvar ölçeğinden uygulama aşamasına ve dolayısıyla endüstriyel ölçekte üretimini incelemek üzere seçilmiştir. Termoplastik örtü ile üretim infüzyon ve reçine transfer gibi yöntemler için uygunken, püskürtme yöntemi prepreg ile üretim için uygundur (Wölcken and Papadopoulos 2015). Pre-preg teknolojileri ise kompozit üreticilerin çoğunluğu için ilk tercih olmayı sürdürmektedir. Önceden reçine emdirilmiş elyaf takviyeleri (pre-preg) diğer çözümlere kıyasla kolay üretim, düzgün fiber dağılımı, reçine içeriğinin doğru kontrolü, karmaşık şekillere uyma kabiliyeti, optimum polimerik

kompozit entegrasyonu ve nihai üründe çok düşük boşluk içeriği gibi önemli yararlar sağlamaktadır.

Bu çalışmada, SARISTU projesi kapsamında üretilebilirliği araştırılan püskürtme yöntemi ile üretilmiş CNT takviyeli tek yönlü karbon fiber / epoksi prepreg kompozit malzemenin elektriksel ve termal özellikleri deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Endüstriyel ölçekte üretime olanak sağlayan ve geleneksel sıvı enjeksiyon proseslerinde meydana gelen sorunları gidermeye yarayan spreyleme yöntemi ile CNT ilavesinin tek doğrultulu karbon fiber/epoksi kompozit malzemesinin elektriksel iletkenliği ve termal davranışları üzerine etkisi detaylı olarak araştırılmıştır. Tek doğrultulu kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliğini oda sıcaklığında, fiber doğrultusu (x), fibere dik doğrultu (y) ve kalınlık doğrultusu (z) olmak üzere üç doğrultuda da doğru bir şekilde belirleyebilmek için bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Ayrıca CNT'li ve CNT'siz numunelerin kalınlık doğrultusunda -100°C ve $+160^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında elektriksel iletkenlikleri araştırılmıştır. Termal davranışlar için DSC, TG analizleri yapılmış, ısı kapasiteleri, termal iletkenlik katsayıları ve termal genleşme katsayıları belirlenmiştir. Ayrıca tez çalışması kapsamında ABAQUS 6.14 sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak CFRP kompozit malzemelerin elektriksel ve termal iletkenliği modellenmiştir. Modelleme çalışmalarında hexagonal modelleme, düzenli fiber modellemesi, rastgele fiber modellemesi gibi literatürde de bulunan bazı yöntemler denemiştir. Ancak literatürden farklı olarak bu malzemelere CNT takviyesinin yaratacağı sonuçlar da araştırılmıştır. Ancak literatürde çok fazla bulunmayan ve bir başka modelleme yöntemi olan mikro yapı resimlerinden faydalanılarak yapılan modelleme bu tezin özgün değeridir. Modelleme sonuçları elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

4. MATERYAL ve METOT

4.1 Deneysel Çalışmalar

Tez çalışması için yapılan testler iki ana başlık altında toplanmaktadır. Bunlar termal testler ve elektriksel iletkenlik testleridir. Testler için tek doğrultulu T800/M21 karbon fiber epoksi prepreg malzeme Airbus-İspanya tarafından seçilmiştir. Hexcell firması tarafından üretilen M21 reçine, birincil havacılık yapılarında kullanılmak üzere üretilen yüksek performanslı, oldukça tok bir epoksi matristir. Özellikle yüksek enerjili darbelerde mükemmel hasar toleransı sergilemektedir. T800 karbon fiber ise PAN esaslı karbon elyaflarının üretiminde dünyada birinci sırada yer alan Toray firması tarafından üretilmiştir. Havacılık alanında çeşitli uygulamalarda kullanıma uygun olan T800/M21 karbon fiber epoksi prepreg malzeme hakkında detaylı bilgi Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1 T800/M21 karbon epoksi prepreg malzemenin özellikleri.

Özellikleri	Değerleri
Fiber Hacim Oranı	%57
Prepreg 'in alansal ağırlığı	198g/m ²
Kompozitin teorik yoğunluğu	1,58g/cm ³
Tipi	Tek doğrultulu
Kürlenmiş plaka kalınlığı	0,184 mm
Fiber tipi	T800
Fiber yoğunluğu	1,8 g/cm ³
Fiber çapı	5 µm
Reçine tipi	M21
Kürlenmiş reçinenin yoğunluğu	1,28 g/cm ³
Reçinenin camsı geçiş sıcaklığı	198 ⁰ C

SARISTU Projesi kapsamında, T800/M21 kompozit numunelerin termal ve elektriksel davranışlarının belirlenmesi ve yıldırım çarpması simülasyonlarının gerçekleştirilmesi ile yükümlü olan Afyon Kocatepe Üniversitesi'ne CNT takviyeli ve takviyesiz

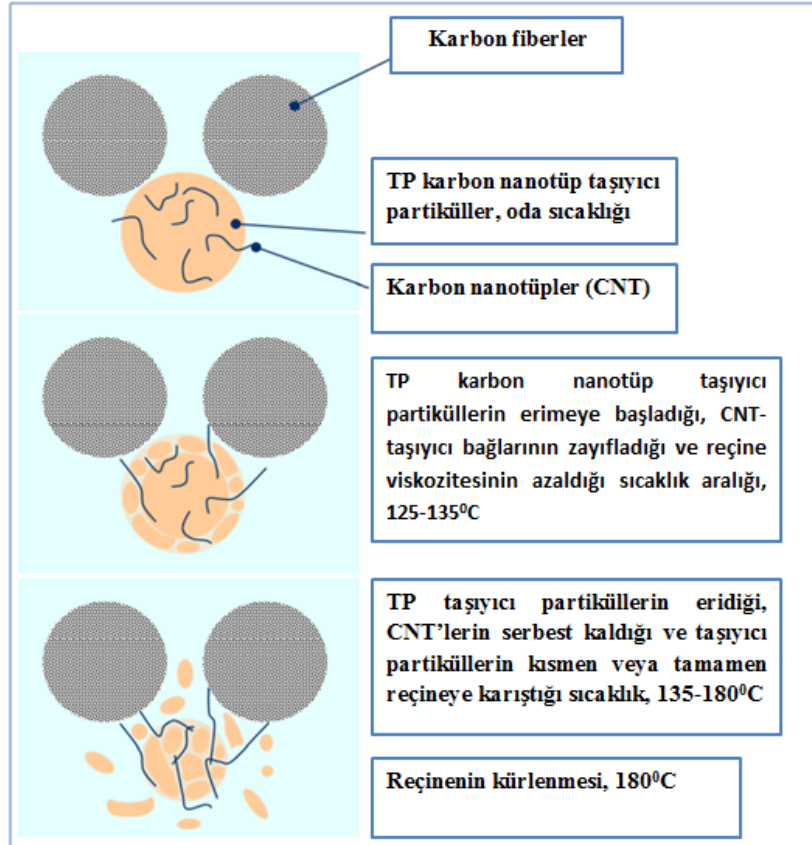
kompozit malzemeler diğer ortakları tarafından hazırlanarak gönderilmiştir. Prepreg olarak alınan T800/M21 kompozit malzemesine CNT takviyesi proje ortaklarından birisi olan Patras Üniversitesi tarafından yapılmıştır. Bir diğer proje ortağı olan Nanocyl firmasının ürettiği NC7000 MWCNT dolgulu termoplastik (PLASTICYLTM) granüller Patras Üniversitesi'nde öğütülerek 100-250 µm tane boyutu aralığında toz haline getirilmiştir. Daha sonra bu tozlar T800/M21 karbon epoksi prepreg malzemesi üzerine 2 g/m² olacak şekilde spreylenecek şekilde uygulanmıştır. Kullanılan CNT'ün özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Kullanılan NANOCYL® NC7000™ serisi çok duvarlı karbon nanotüpün (MWCNT) Özellikleri.

Özellik	Birim	Değer	Ölçüm Metodu
Ortalama çap	10 ⁻⁹ m	9,5	TEM
Ortalama Uzunluk	µm	1,5	TEM
Karbon Saflığı	%	90	TGA
Metal oksit geçişi	%	<%1	İndüktif Olarak Birleştirilmiş Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS)
Amorf karbon	-	yüzeyde pirolitik olarak çökelmiş karbon	HRTEM
Yüzey alanı	m ² /g	250-300	BET Yüzey Alanı Analizi
Hacimsel direnç	Ωcm	10 ⁻⁴	İç test yöntemi

Prepreglerin kürlenmesi sırasında CNT'lerin depolandığı termoplastik malzemenin ergiyerek reçineye karışması ve CNT'lerin serbest kalması için termoplastik malzemenin ergime aralığı kullanılan epoksi reçinenin camsı geçiş sıcaklığından bile aşağıda, 125-135⁰C arasında seçilmiştir. Kürlenme sırasında CNT'lerin serbest kalarak reçineye karışmasının şematik gösterimi Şekil 4-1'de verilmiştir. Sonuç olarak reçineye direk karıştırıldığında aglomere olma eğiliminde olan CNT'lerin topaklanması engellenmeye çalışılmış ve üretim kolaylığı sağlanmıştır. Patras Üniversitesi tarafından hazırlanan CNT takviyeli ve takviyesiz prep-reg malzemeler daha sonra diğer bir proje ortağı olan TAI' ye gönderilmiştir. Her bir test için CNT ilavesiz ve CNT ilaveli

T800/M21 karbon epoksi prepreg malzemeler TAI'de otoklav yöntemi ile 8 bar basınç altında 180°C sıcaklıkta 2 saat tutularak üretilmiştir. Elde edilen nihai karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerinin fiber hacim oranları %57, takviyeli olanlarda ise CNT hacim oranı %1'dir. Üretilen CNT katkılı kompozit malzemelerin şematik görüntüsü Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Termoplastik (TP) taşıyıcı malzemenin sıcaklık etkisiyle reçine içinde parçalanması ve CNT'lerin serbest kalışının şematik gösterimi.



Şekil 4.2 Üretilen CNT takviyeli kompozit malzemenin şematik görüntüsü.

Patras Üniversitesi tarafından üretilen prepregler TAI tarafından kürlenip kesildikten sonra Afyon Kocatepe Üniversitesi'ne elektriksel iletkenlik ve termal testleri yapılmak üzere gönderilmiştir. Test matrisi Çizelge 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Termal İletkenlik İçin Test Matrisi.

Doğrultu	Tabaka Açısı	Numune Sayısı	Ebatlar (mm) (genişlik × uzunluk × kalınlık)
X	[0] _n	3	50×50×4
Y	[0] _n	3	50×50×4
Z	[0] _n	3	50×50×4

Çizelge 4.4 Spesifik Isı ve TGA Analizi İçin Test Matrisi.

Tabaka Açısı	Numune Sayısı	Ebatlar (mm) (genişlik × uzunluk × kalınlık)
[0] _n	5	5×5×4

Çizelge 4.5 Oda Sıcaklığında Elektriksel İletkenlik Test Matrisi.

Doğrultu	Tabaka Açısı	Numune Sayısı	Ebatlar (mm) (genişlik × uzunluk × kalınlık)
X	[0] _n	3	25×50×4
Y	[0] _n	3	25×50×4
Z	[0] _n	3	25×50×4

Çizelge 4.6 -100 ve +160⁰C sıcaklık aralığında Elektriksel İletkenlik Test Matrisi.

Doğrultu	Tabaka Açısı	Numune Sayısı	Ebatlar (mm) (genişlik × uzunluk × kalınlık)
X	[0] _n	6	7,5×7,5×4
Y	[0] _n	6	7,5×7,5×4
Z	[0] _n	6	7,5×7,5×4

4.1.1 Termal Deneyleer

4.1.1.1 Termal İletkenlik Deneyi

Termal davranışlar için CNT ilaveli ve ilavesiz karbon\epoksi kompozitlerinin x, y ve z doğrultularındaki ısı iletkenlik katsayıları, oda sıcaklığında C-THERM / TCi marka ısı iletkenlik cihazı ile belirlenmiştir. Ölçümü yapılacak numunelerin yüzeyleri hazırlandıktan sonra cihazın sensörü ile temas ettirilerek ölçümler yapılmıştır. Cihazda ölçüm yapılabilmesi için, ölçüm yapılacak yüzeyin en az 25 mm genişliğe sahip olması ve yüzeyinin pürüzsüz olması gerekmektedir. Kalınlık doğrultusunda yapılan ölçümlerde numune ebatları yeterli, numune yüzeyi düzgün olduğu için herhangi bir ön işlem gerekmemiştir. Ancak x ve y doğrultularındaki ölçümler için numune ebatları yetersiz gelmiştir. Bu nedenle, 4 mm kalınlığındaki numunelerden 7 tanesi çok ince bir tabaka halinde sürülmüş 404 yapıştırıcı ile yapıştırılıp, mngeneler ile sıkıştırılmış ve bir gün bekletilmiştir. Sonuç olarak, x ve y doğrultularında 28 mm kalınlığa sahip ısı iletkenlik deney numuneleri elde edilmiştir. Daha sonra bu numunelerin yüzeyleri zımparalanarak düz ve pürüzsüz bir hale getirilip, ölçümler yapılmıştır. Sensör ile numune arasındaki sıcaklık etkileşiminden yola çıkarak malzemelerin termal iletkenlik katsayıları 3 doğrultuda belirlenmiştir.

4.1.1.2 DSC-TG Analizleri ve Spesifik Isı

NETZSCH marka Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (TG-DSC/TG-DTA/TG) ile numunelerin, 24 -1100⁰ C sıcaklık aralığında atmosferik şartlarda; 5, 10, 20 ⁰C\ dak ısıtma hızlarında DSC ve TG analizleri yapılmıştır. DSC eğrileri, numune ve referans malzemesinin aynı sıcaklıkta kalması için sisteme eklenen ısının sıcaklığa karşı çizilen grafikleri ile oluşturulmaktadır. Böylece numunede olan herhangi bir hal değişimi ekzotermik veya endotermik reaksiyon olarak grafikte görülmektedir. Bu grafikte görülen pikin altında kalan alan tepkimede emilen veya açığa çıkan ısıyla, pik yükseklikleri de tepkime hızı ile doğrudan orantılıdır. Aynı cihazla yapılan TG analizinde ise sıcaklık artışı-malzeme kaybı grafiğı elde edilir. Bu analizlerin sonunda, karbon\epoksi kompozitleri için camsı geçiş sıcaklığı, bozunma sıcaklığı, sıcaklıkla birlikte numunelerde oluşan kütle değişimi ve spesifik ısıları (Cp), belirlenmiştir.

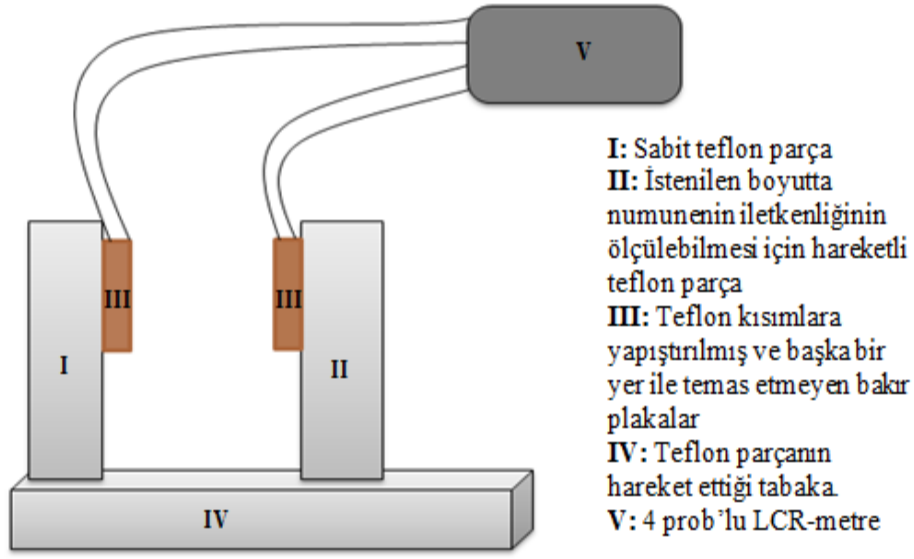
4.1.1.3 Dilatometre Analizi

Dilatometre analizi, bir malzemenin sıcaklık karşısında bünyesinde meydana gelen boyutsal değişimlerin (genleşme- büzülme) ölçümü için yapılır. Bu çalışmada CNT ilaveli ve ilavesiz T800/M21 numunelerin ısı genleşme katsayılarının belirlenebilmesi için NETZCH DIL 402 CD marka dilatometre kullanılmıştır. X ve Y doğrultularında ölçüm yapılabilmesi için kompozit malzemelerden 20-25 mm boy ve 4-5 mm kalınlıktaki ebatlarda 3'er tane numune kesilmiş ve deneyler yapılmıştır.

4.1.2 Elektriksel İletkenlik Deneyleri

SARISTU Projesinin odak noktası çeşitli uygulamalar ve bunların kombinasyonu sonucunda hava yolculuğunun maliyetini azaltmaktır. Bunun için yapılan çalışmalardan bir tanesinde amaç, karbon nanotüplerin havacılık reçinelerine dahil edilmesi ile uçağın dış kaplaması/kirişleri/ gövdesinde %3' e varan bir ağırlık tasarrufu ve gövdeye yapılan elektrik iletim ağı kurulum maliyetinde %15'lik bir azalma sağlamaktır (İnt.Kyn.12). Diğer taraftan üretilecek olan CNT katkılı reçinelerin üretim şeklinin seri üretime uygun olması da beklenen bir diğer özelliktir. Bütün bu durumlar göze alınarak spreyleme yöntemi ile üretilen CNT katkılı ve katkısız T800/M21 karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerinin elektriksel iletkenlik değerleri oda sıcaklığı ve düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa olmak üzere iki farklı şekilde ölçülmüştür.

Oda sıcaklığında elektriksel iletkenliğinin belirlenebilmesi için bir deney düzeneği hazırlanmıştır. AITM2-0065 Airbus test standartına göre hazırlanan düzende ölçme boyu ayarlanabilir olup bir tabaka üzerine montelenmiş teflon kısım ve bu kısma sabitlenmiş bakır plakalar arasına numune yerleştirilmektedir. Böylece numunelerin fiber doğrultusunda, fibere dik doğrultuda ve kalınlık doğrultusunda elektriksel iletkenlik değerleri ölçülebilmektedir. Hazırlanan deney düzeneği şematik olarak Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Elektriksel iletkenliğin ölçülmesi için hazırlanan deney düzeneği.

Numuneler bakır plakalar arasına sıkıştırılarak tam temas sağlandıktan sonra HM8118 LCR-Bridge marka LCR-metre cihazıyla oda sıcaklığında elektriksel iletkenlikler ölçülmüştür. Ölçüm, 4 prob yöntemi ile yapılarak temas direnci en aza indirilmiştir (Shena *et al.* 2007). Ayrıca numune yüzeyleri ELECOLİT 414 gümüş iletken boya ile kaplanmıştır. CNT ilaveli/ilavesiz numunelerden her bir doğrultuda üçer adet numune hazırlanmış olup her bir numuneden beş kere ölçüm alınarak ortalaması alınmıştır. Böylece homojen olmayan ve her ölçümde farklı iletkenlik sonucu veren numunelerde oluşabilecek ölçüm hataları en aza indirilmeye çalışılmıştır.

CNT ilaveli/ilavesiz numunelerin kalınlık doğrultusunda elektriksel iletkenliğinin, sıcaklık ile değişimini görmek için Novocontrol Concept 50 Dielektrik ve Empedans Spektrometresi ile 1 kHz frekansta, -100 ve +160⁰C sıcaklık aralığında elektriksel iletkenlik değerleri ölçülmüştür.

4.2 Modelleme Çalışmaları

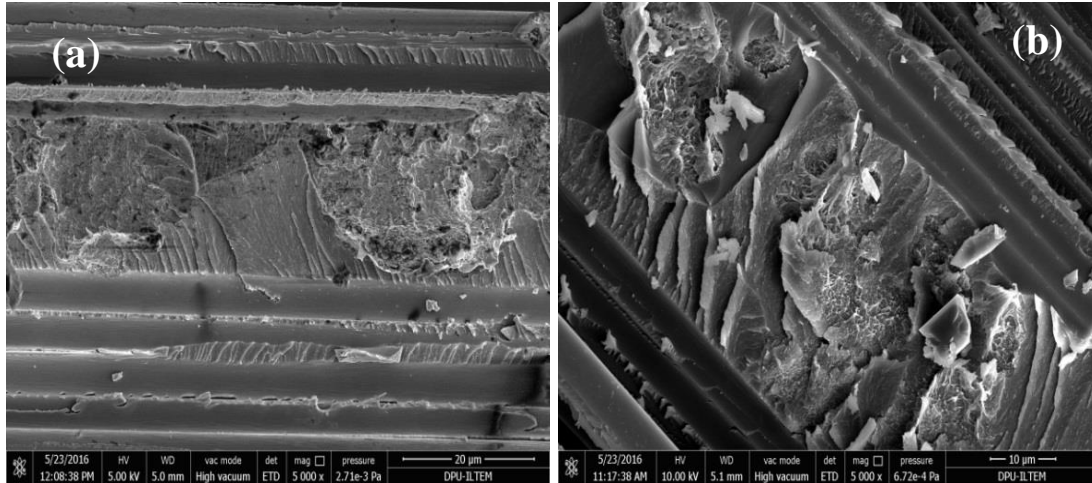
Abaqus, basit doğrusal analizlerden zorlu doğrusal olmayan simülasyonlara kadar değişen problemleri çözebilen sonlu elemanlar yöntemine dayanan bir mühendislik simülasyon programıdır. Bir çok geometrinin modellenebilmesine olanak sağlayan geniş bir öge kütüphanesi mevcuttur. Metaller, kauçuk, polimerler, kompozitler, köpükler vb. gibi en tipik mühendislik malzemelerinin davranışını taklit edebilen geniş

kapsamlı bir listesi vardır. Genel amaçlı bir simülasyon aracı olarak tasarlanan Abaqus, yalnızca yapısal (stres / yer değiştirme) problemlerinde değil ısı transferi, kütle difüzyonu, elektriksel bileşenlerin termal yönetimi, akustik, zemin mekaniği, piezoelektrik analiz, elektromanyetik analiz ve sıvı dinamiği gibi bir çok alanda analiz yapabilme kabiliyetine sahiptir.

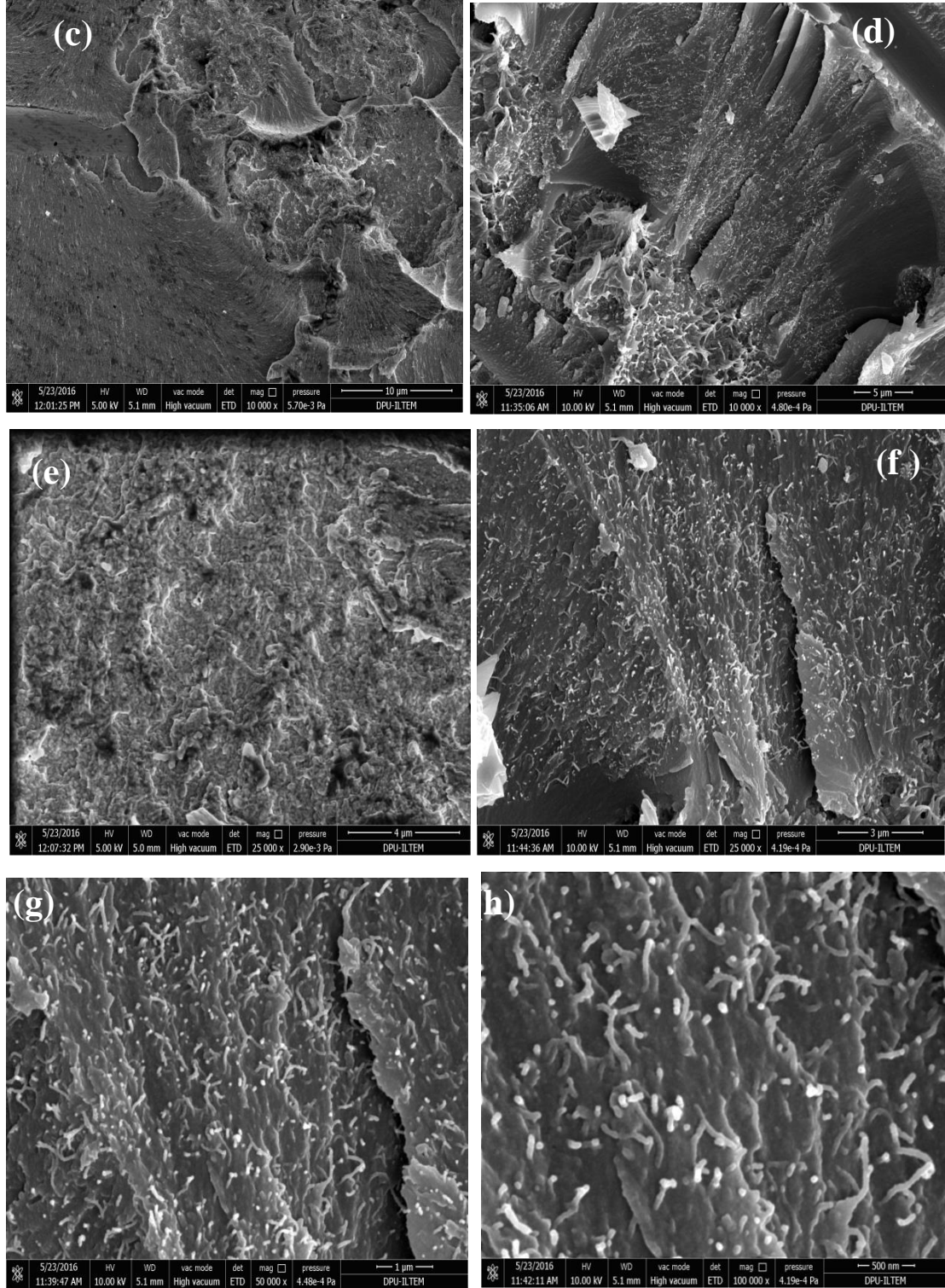
Bu çalışmada, Abaqus 6.14 sonlu elemanlar analiz programı ile, T800/M21 karbon fiber/epoksi kompozit malzemesinin elektrikselsel ve termal iletkenlikleri üzerine çalışmalar yapılarak çeşitli modeller önerilmiştir. Modelleme çalışmalarında en temel amaç her üretimde veya her ayrı numunede farklı fiziksel özelliklere sahip olan bu malzemelerin elektrikselsel ve termal iletkenliklerini kalınlık doğrultusunda en iyi şekilde yansıtabilecek modeli oluşturmak olmuştur. Bunun için yoğun olarak numunelerin mikro yapı görüntülerinden faydalanılarak bir model oluşturabilmek için çalışılmıştır.

5. BULGULAR

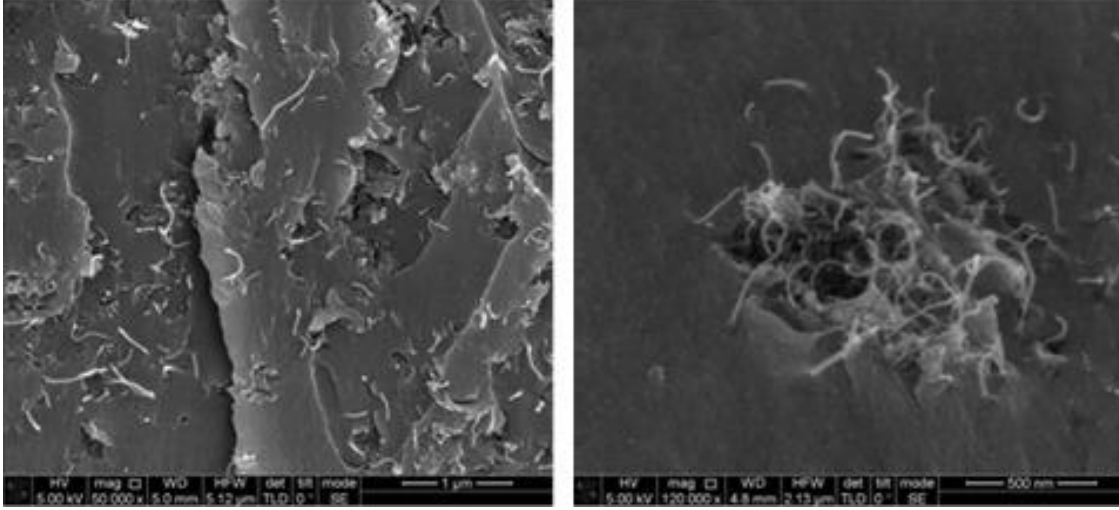
Patras Üniversitesi tarafından CNT ile takviyeli hale getirilen prepregler ile CNT takviyesiz prepregler TAI tarafından kurlenip kesildikten sonra deneylerinin yapılması için Afyon Kocatepe Üniversitesine yollanmıştır. Deneysel çalışmalar için yapılan ilk işlem CNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinin alınması olmuştur. Püskürtme tekniği ile aglomerasyonsuz numuneler elde etme iddiası amacının gerçekleşip gerçekleşmediği SEM görüntüleri alınarak araştırılmıştır. Şekil 5.1'de CNT ilaveli ve ilavesiz numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. 6 farklı numune üzerinden alınan görüntüler detaylı olarak incelendiğinde herhangi bir aglomerasyon oluşumuna rastlanmamıştır ve CNT'lerin aglomerasyonunu önlemek amacıyla uygulanan püskürtme yöntemi sonucunda reçine içinde iyi bir şekilde dağılmış CNT'ler elde edilmiştir. Romonow vd. (2015), çalışmalarında CNT aglomerasyonunun yarattığı gerilimin karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerinin özellikleri üzerine etkisini araştırmışlar ve Şekil 5.2'de verilen SEM görüntülerini elde etmişlerdir. Görüntülerde CNT aglomerasyonları açıkça belli olmaktadır. Ancak bu çalışma için üretilen CNT katkılı numunelerde böyle bir görüntüye rastlanmamıştır.



Şekil 5.1 CNT ilaveli ve ilavesiz T800\M21 epoksi kompozit malzemelerin kırık yüzeyden alınan farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri; a, c, e: T800\M21 epoksi kompozit malzeme; b, d, f, g, h: CNT takviyeli T800\M21 epoksi kompozit malzeme.



Şekil 5.2 (Devam) CNT ilaveli ve ilavesiz T800\M21 epoksi kompozit malzemelerin kırık yüzeyden alınan farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri; a, c, e: T800\M21 epoksi kompozit malzeme; b, d, f, g, h: CNT takviyeli T800\M21 epoksi kompozit malzeme.



Şekil 5.3 CNT katkılı polimer matriste aglomerasyon görüntüsü (Romanov *et al.* 2015).

5.1 Termal Deney Sonuçları

5.1.1 Termal İletkenlik Deney Sonuçları

Termal iletkenlik, yoğunluk, mukavemet özellikleri, kimyasal direnç vb. gibi malzemelerin temel özelliklerinden biridir. Katı bir malzemede, ısı iletiminin iki ana mekanizması vardır: fonon denilen elastik dalgalar yoluyla ve serbest elektronlarla. Polimer malzemeler genellikle serbestçe hareket eden elektronlara sahip değildirler. Bu nedenle, ısı transferi sadece elastik dalgalar ile yani fononlar ile gerçekleştirilir. Tek boyutlu ve doğrusal ısı akışı için, katı malzemelerdeki kararlı haldeki ısı transferi, Fourier kanunuyla tanımlanabilir (Hashim 2012):

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (5.1)$$

Burada Q ısı akışı, x malzeme kalınlığı, dT / dx birim sıcaklık aralığı için sıcaklık gradyanıdır ve orantılılık sabiti λ , termal iletkenlik katsayısı olarak bilinir.

Termal iletkenlik, genellikle λ veya k olarak yazılır ve bir malzemeden ısının taşınımını ölçmeye yardımcı olan en yaygın kullanılan özelliktir. İletim mekanizmasında fononların egemen olduğu polimer malzemelerin termal iletkenliğinin teorik olarak hesaplanması için Debye Denklemi de kullanılmaktadır (Osswald and Menges 1995, Rohsenow 1998, Sun 2008, Han and Fin 2013).

$$\lambda = \frac{1}{3} C_p v l \quad (5.2)$$

Burada C_p ; spesifik ısı, v ; ortalama molekül hızı, l ; moleküllerin ortalama serbest salınımıdır. l değeri, amorf polimerler için sayısız kusurdan biri olan fonon dağılımına bağlı olarak son derece küçük bir sabittir (bir kaç angstrom) ve polimerlerin çok düşük bir termal iletkenliğe sahip olmasına neden olur (Henry 2014).

Karbon nanotüplü\ nanotüpsüz numunelerin termal iletkenlik sonuçları Çizelge 5.1’de verilmektedir. Sonuçlar göstermektedir ki T800/M21 numunelerde fiber doğrultusunda termal iletkenlik katsayısı oldukça yüksektir. Fibere dik doğrultuda ve kalınlık doğrultusunda ise reçine zengin bölgelerden kaynaklı olarak termal iletkenlik daha düşüktür. Karbon nanotüp ilave edilmiş numunelere baktığımızda her üç doğrultuda da termal iletkenlikte azalma gözlenmiştir. Tek başlarına ısıl iletkenlikleri çok yüksek olan CNT ’ler epoksi içerisine ilave edildiğinde, kompozit malzemenin termal iletkenlik katsayısının artması beklenmiştir ancak artış değil her üç doğrultuda da küçük de olsa bir azalma görülmüştür. Son yıllarda yapılan araştırmalara göre, polimer kompozitlerde termal iletken dolgu maddeleri olarak CNT'lerin kullanımı ile ilgili iki temel kritik konu ortaya koyulmuştur (Han and Fina 2013). Bu kritik konulardan birincisine göre, CNT'ler, güçlü Van der Waals kuvvetleri nedeniyle polimerler içerisinde dağıldığında topaklanma eğilimi gösterirler. Reaksiyona girmeyen, grafit benzeri yüzeyleri, yeterli dispersiyon oluşumunu engeller. Sonuç olarak kompozitlerin termal iletkenliklerinin iyileştirilmesinde CNT'lerden tam bir verim alınabilmesi için reçine içinde iyi dağılmış CNT’ler gerekmektedir. İkinci konu ise CNT'ler ile polimer arayüzünde fonon uyuşmazlığının neden olduğu arayüzey termal direnci ile ilgilidir. Bu durum ara yüzeyde ciddi fonon saçılması ve termal taşınım özelliklerinin azalmasına yol açan yüksek bir arayüz termal direnci ile sonuçlanmaktadır. Bu çalışmanın temel amaçlarından bir tanesi, dispersiyon probleminin düzeltilmesidir. Bu amaçla püskürtme yöntemiyle üretim yapılmıştır ve SEM görüntüsü alınan numunelerde CNT’lerin reçine içerisinde iyi dağıldığı gözlemlenmiş, herhangi bir aglomerasyona rastlanmamıştır. Dolayısıyla CNT ilaveli numunelerdeki termal iletkenlik azalması ikinci sebebe bağlanabilir. Reçine içerisine karıştırılan CNT’lerin oluşturduğu extra yeni yüzeyler

termal direncin artmasına ve fonon saçılmasına neden olmuş böylelikle termal iletim düşmüştür. Ayrıca Debye Denklemi dikkate alındığında da polimer içerisindeki süreksizliklerin polimer moleküllerinin ortalama serbest salınımını azaltabileceği ve buna bağlı olarak da termal iletkenliği düşüreceği yönünde görüşler mevcuttur (Rohsenow 1998, Henry 2014).

X doğrultusundaki azalma %1 civarındadır. Karbon fiber\epoksi sisteminin termal iletkenlik katsayısının CNT\epoksi sisteminden daha fazla olduğu göz önüne alındığında, bu doğrultudaki iletimin karbon fiber\epoksi sistemi tarafından yapılması ve dolayısıyla iletkenlikte çok fazla bir farklılık olmaması olağandır. Y ve z doğrultularında ise sırasıyla yaklaşık olarak %12 ve %6 azalma meydana gelmesi bu doğrultularda reçine zengin bölgenin termal iletimi doğrudan etkilemesiyle açıklanabilir.

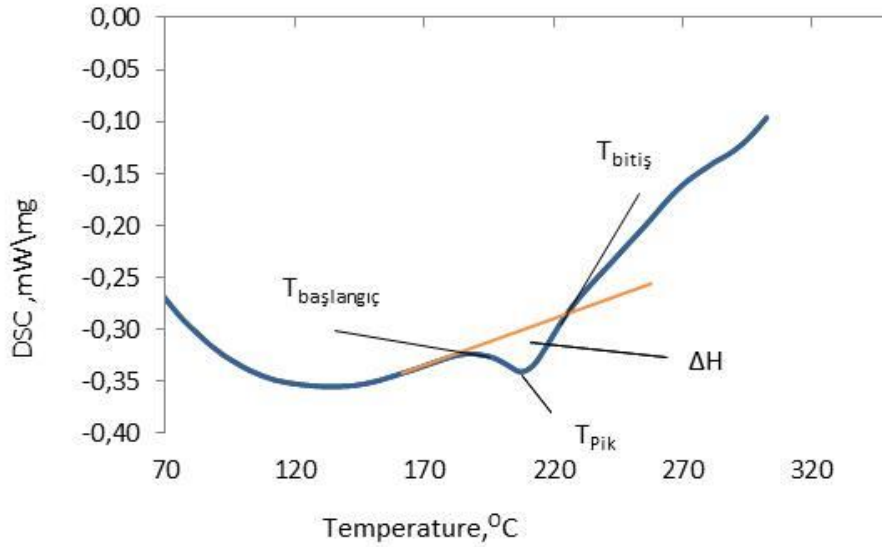
Çizelge 5.1 Termal İletkenlik Deney Sonuçları.

Fiber Doğrultusu	T800/M21 numunenin termal iletkenlik katsayısı (W/mK)	CNT katkılı T800/M21 numunenin termal iletkenlik katsayısı (W/mK)
X Doğrultusu	4.60	4.53
Y Doğrultusu	0.80	0.71
Z Doğrultusu	0.69	0.65

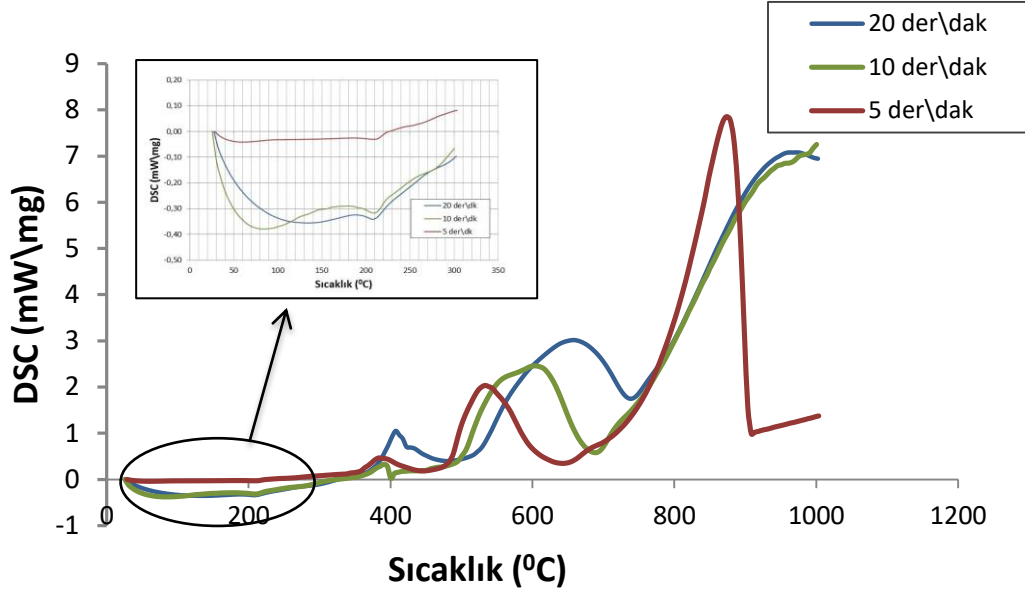
5.1.2 DSC-TG ve Spesifik Isı Analiz Sonuçları

Şekil 5.3'te bir DSC diyagramı örneği ve reaksiyon başlama sıcaklığı; $T_{başlanıç}$, reaksiyon bitiş sıcaklığı; $T_{bitiş}$ ve reaksiyon pik sıcaklığı T_{pik} ' i belirlemek için kullanılan analitik yöntem verilmiştir (Xia, Xie and Cai 2005). Bu çalışmada da DSC pikleri yorumlanırken bu analitik yöntem uygulanmıştır. Şekil 5.4'te T800/M21 numunelerinin DSC eğrilerine baktığımızda, camsı geçiş noktası tam olarak belli olmamaktadır. Grafikte 0-300⁰C arası büyütüldüğünde üç ısıtma hızında da 200⁰C civarında endotermik bir reaksiyonun gerçekleştiği pikler görülmektedir. Bu pikler

T800/M21 kompozit malzemesinin camsı geçiş sıcaklığı gösterdiği reaksiyonlardır. Sıcaklığın artması sonucunda polimer molekülündeki zincir hareketi de artmaktadır. Böylece düşük sıcaklıkta istiflenmiş olan zincirlerin titreşimleri artar ve birbirinden uzaklaşmaya başlarlar. Bu durum yapıda serbest hacimlerin oluşmasına neden olur. Sıcaklık artışı serbest hacmi de arttırır. Bu hareketlere Brownian hareketleri denir ve molekülde kalıcı bir deformasyon meydana getirmez. Ancak bu hareketlerin artması sonucunda polimerin katı halden viskoz hale geçtiği sıcaklık Camsı Geçiş Sıcaklığıdır. Polimerlerde camsı geçiş ve erime arasındaki en önemli fark; erimenin gerçek bir faz geçişi olması, camsı geçişin ise sadece bir sahte-ikinci dereceden faz geçişi olmasıdır (İnt.Kyn.9). Kullanılan M21 epoksi reçinenin camsı geçiş sıcaklığı üretilen firma tarafından 198⁰C olarak verilmektedir (İnt.Kyn.10). Ancak yapılan DSC analizleri göstermektedir ki karbon fiberlerin epoksi sistem içindeki varlığı camsı geçiş sıcaklığını 10-12⁰C kadar ötelemektedir. Camsı geçiş noktasından sonra sistem ekzotermik reaksiyonlar göstermeye başlamıştır. Şekil 4.5'te 383-402⁰C arasında ve 533-657 ⁰C arasında oluşan pikler bozunma reaksiyonlarıdır.



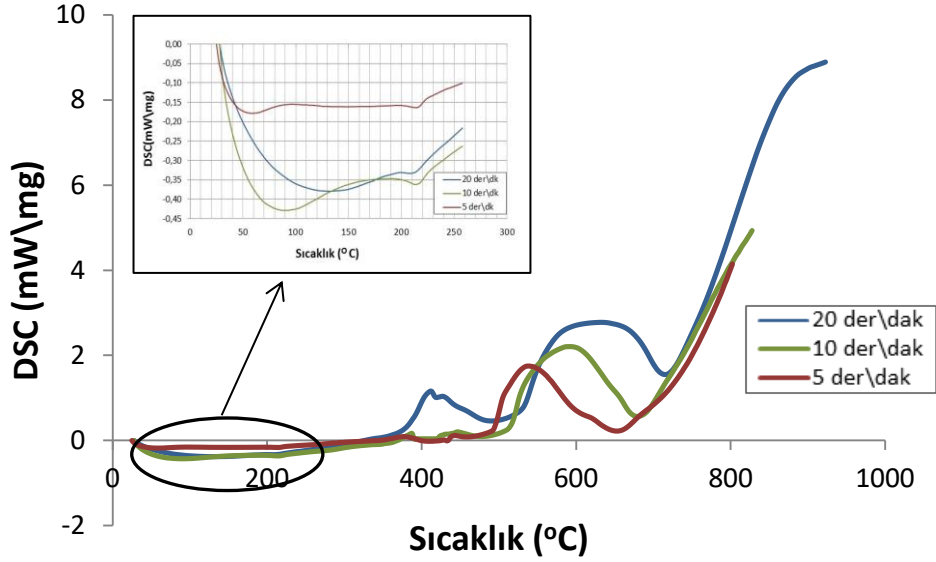
Şekil 5.4 Ekzotermik bir DSC diyagramı örneği ve $T_{başlangıç}$, $T_{bitiş}$, T_{pik} ve ΔH 'yi belirlemek için kullanılan analitik yöntem.



Şekil 5.5 T800/M21 numunelerin farklı ısıtma hızlarındaki DSC diyagramları.

CNT ilave edilmiş T800/M21 numunelerin DSC diyagramları incelendiğinde (Şekil 5.5) CNT ilavesiz numunelerde olduğu gibi 800⁰C'ye kadar üç pik oluşumu gözlenmektedir: 200⁰C civarında gerçekleşen Birinci pik polimerin camsı bölgeye geçiş reaksiyonunu ikinci pik termal olarak zayıf bağlara sahip daha düşük molekül ağırlıklı bileşenlerin bozunumunu, üçüncü pik ise kütleme sırasında oluşan yüksek molekül ağırlıklı bileşenlerin parçalanmasını belirtmektedir (İnt.Kyn.11 ,Levchik and Weil 2004, Loos *et al.* 2008, Pistor *et al.* 2012). DSC reaksiyon sıcaklıklarının detaylı olarak verildiği Çizelge 5.2' de CNT takviyesiz numunelerin yavaş ve hızlı ısıtma hızlarındaki DSC diyagramları karşılaştırıldığında, düşük ısıtma hızında (5 ⁰C/ dak) bozunma reaksiyonlarının başlangıç sıcaklığının nispeten daha yüksek olan ısıtma hızlarına göre (10 ⁰C/ dak, 20 ⁰C/ dak) daha düşük olduğu görülmüştür. Çünkü daha düşük ısıtma hızı tepkimeye giren çok sayıda kimyasal grubun reaksiyona girmesine neden olmaktadır (Varley *et al.* 2000, Costa *et al.* 2005). Ancak aynı düzen CNT katkılı numunelerde görülmemiştir. Polimerik malzemeler üzerine yapılan bazı çalışmalarda, dolgu maddelerinin ilavesinin polimer moleküllerin hareketini ve difüzyonu engellediği için camsı geçiş ve bozunma reaksiyonlarının sıcaklıklarında artışa neden olduğu belirtilmektedir (Mittal 2010, Choudhary and Gupta 2011, Tong 2011). Ancak bu çalışmada elde edilen DSC sonuçlarına göre CNT katkısının T800/M21 karbon

fiber/epoksi kompozit malzemesinin camsı geçiş ve bozunma sıcaklıklarını belirgin bir oranda düzenli bir şekilde arttırdığı veya düşürdüğünden söz edilemez (Çizelge 4.8).



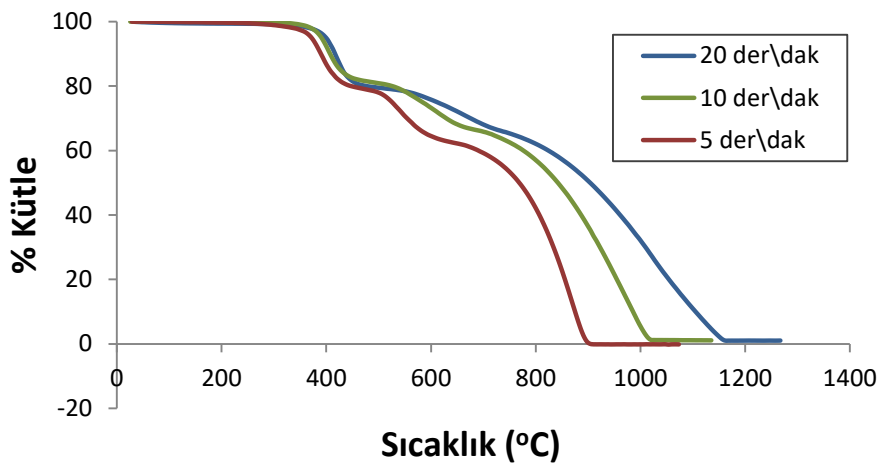
Şekil 5.6 CNT katkılı T800/M21 numunelerin farklı ısıtma hızlarındaki DSC diyagramları.

Çizelge 5.2 CNT ilavesiz/ilaveli T800/M21 Numunelerin DSC Sonuçları.

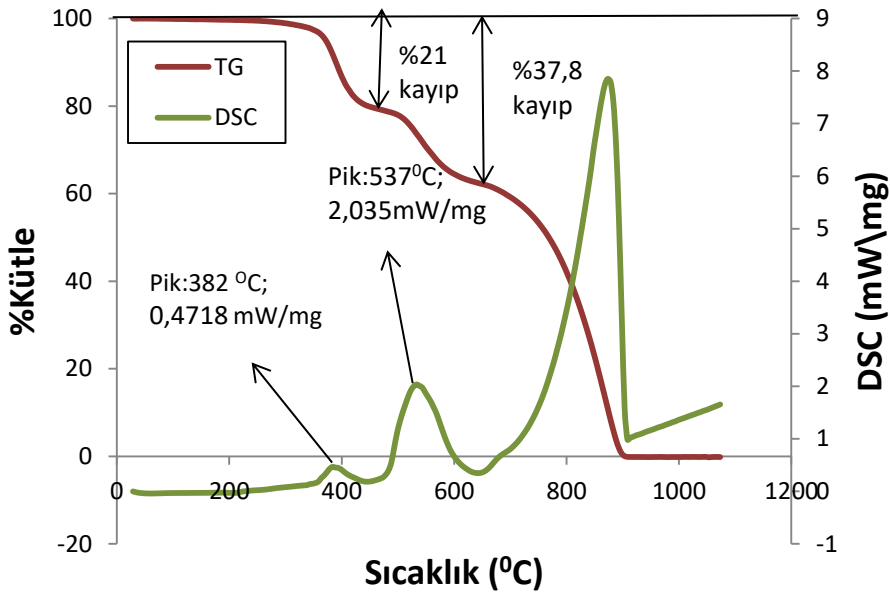
Numune	Sıcaklık Artışı (°C/dak)	1.Pik			2.Pik			3.Pik		
		T _{başlangıç} (°C)	T _p (°C)	T _{bitiş} (°C)	T _{başlangıç} (°C)	T _p (°C)	T _{bitiş} (°C)	T _{başlangıç} (°C)	T _p (°C)	T _{bitiş} (°C)
T800 / M21	5	188	208	218	348	382	413	483	537	613
	10	180	210	220	345	390	400	500	603	665
	20	192	207	218	367	407	452	527	658	732
CNT ilaveli T800/M21	5	204	214	217	354	377	394	477	534	604
	10	202	212	220	372	387	390	520	587	665
	20	197	207	222	357	412	477	537	622	692

Termogravimetrik analiz, farklı malzemelerin termal stabilitesinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesi için sıkça kullanılan tekniklerden biridir. Ayrıca çeşitli sıcaklıklardaki

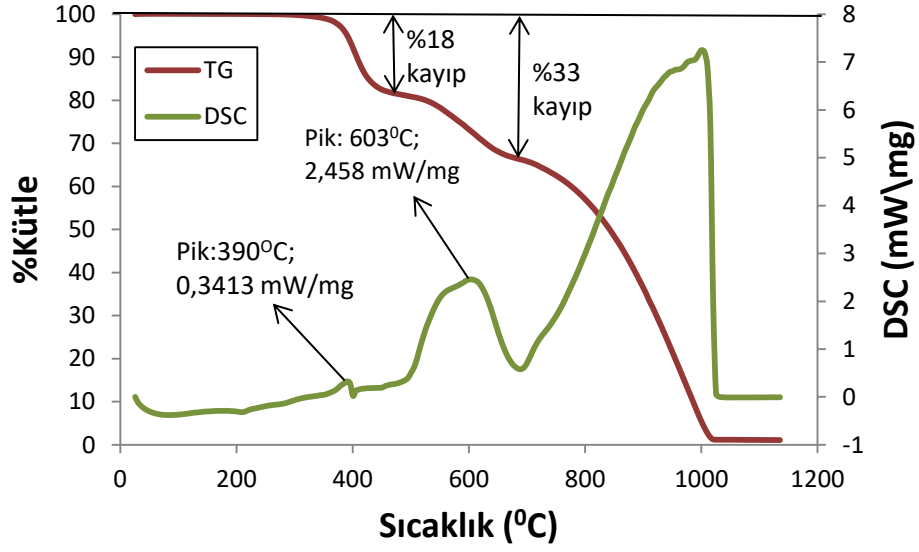
polimerlerin ayrışmasını belirlemek için kullanılır. DSC diyagramlarındaki camı geçiş sıcaklığı ve bozunma reaksiyonu olarak belirlenen pikler, TG analizleriyle de doğrulanmıştır. Şekil 5.6'da üç farklı ısıtma hızında T800/M21 numunelerinin TG diyagramları görülmektedir. Diyagramlara göre ilk belirgin kütle kaybı 350-400°C civarında görülmektedir ve bu sıcaklık aralığında DSC diyagramlarında ilk bozunma pikleri görülmüştür. Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da sırasıyla 5 °C/ dak, 10 °C/ dak ve 20 °C/ dak ısıtma hızı ile ısıtılmış T800/M21 numunelerinin birleştirilmiş DSC ve TG diyagramları bulunmaktadır.



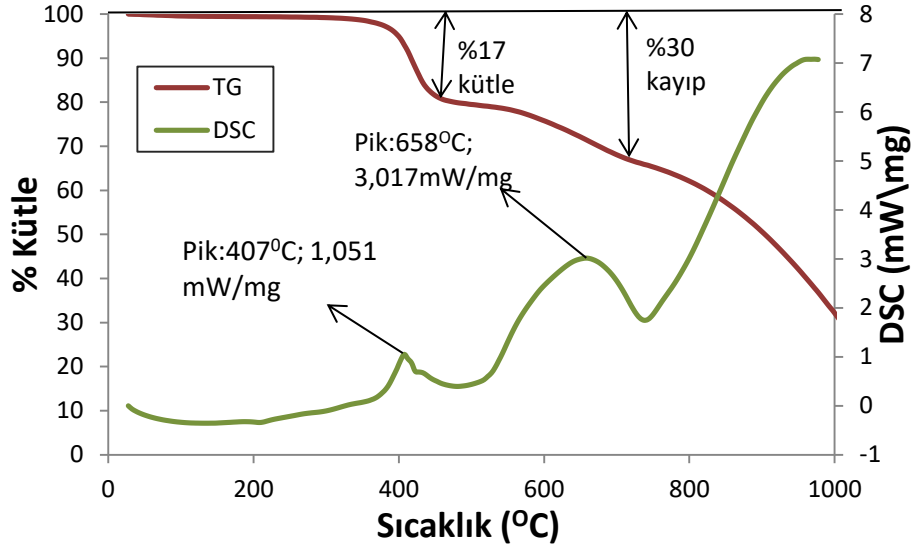
Şekil 5.7 T800/M21 numunelerin farklı ısıtma hızlarında TG diyagramları.



Şekil 5.8 T800/M21 numunelerin 5 °C/dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları.

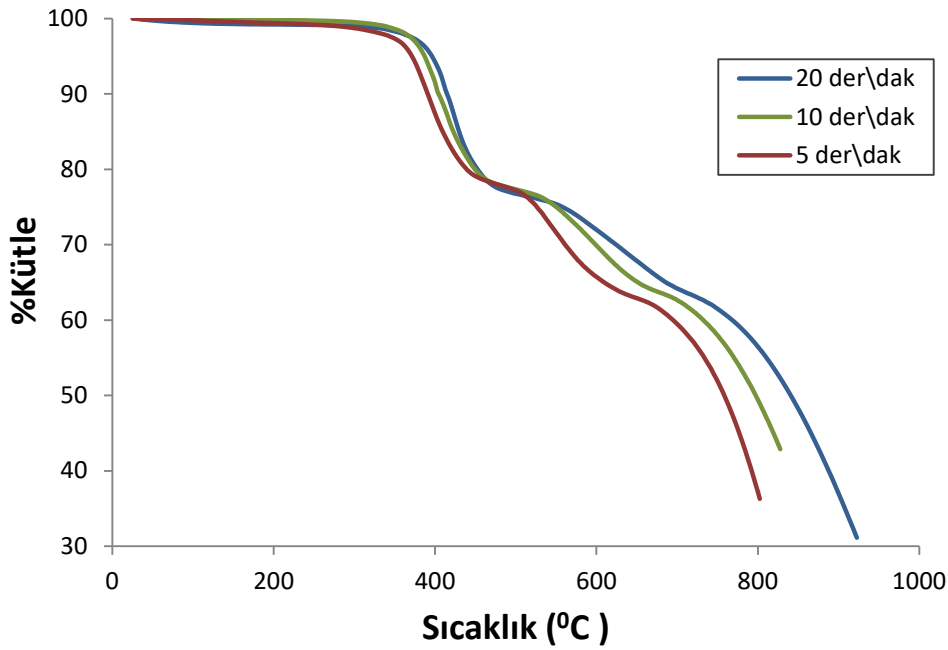


Şekil 5.9 T800/M21 numunelerin 10 °C/ dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları.



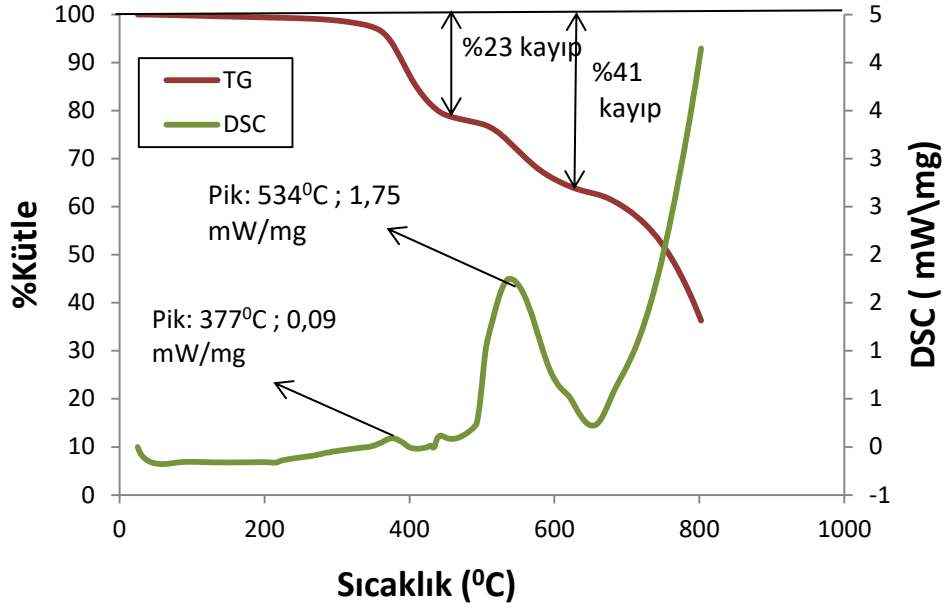
Şekil 5.10 T800/M21 numunelerin 20 °C/ dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları.

CNT katkısız kompozit numunelerin detaylı DSC-TG diyagramları incelendiğinde ilk bozunma reaksiyonundan sonraki kütle kaybı miktarlarının ısıtma hızı arttıkça düştüğü görülmektedir. 20 °C/ dak ısıtma hızında ilk bozunma reaksiyonundan sonra %17 olan kütle kaybı, 5 °C/ dak ısıtma hızında %21'dir. DSC diyagramında da reaksiyon başlama sıcaklıklarının düşmesi ile görülen bu durum düşük ısıtma hızının çok sayıda kimyasal grubun tepkimeye girmesine neden olduğu sonucunu doğrulamıştır.

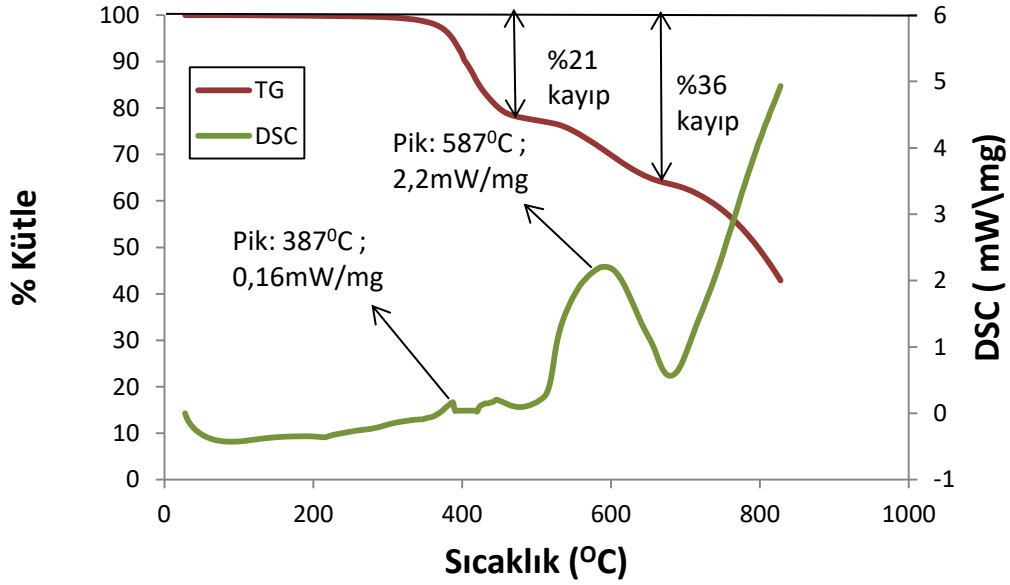


Şekil 5.11 CNT katkılı T800/M21 numunelerin farklı ısıtma hızlarında TG diyagramları.

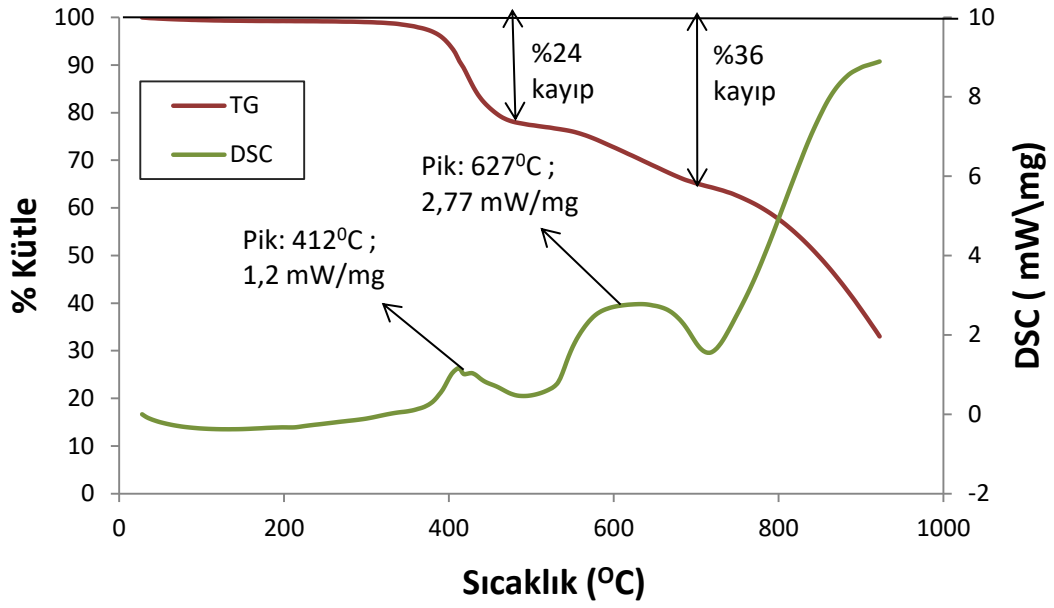
Şekil 5.10’da CNT ilaveli T800/M21 numunelerin TG diyagramları verilmektedir. İlk kütle kaybının camısı geçiş reaksiyonundan sonra 350-400⁰C aralığında başlamıştır. Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 incelendiğinde CNT takviyesiz numunelerde düzenlibir şekilde yaşanan düşük ısıtma hızında daha fazla kütle kaybı durumunun CNT takviyeli numunelerde tam olarak gerçekleşmediğini görüyoruz. Ancak CNT’lü numunelerde birinci ve ikinci bozunma reaksiyonlarından sonra gerçekleşen kütle kayıplarının CNT katkısız numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeni, CNT’lerin atmosferik koşullarda 600⁰C’de yanarak sistemden uzaklaşmasıdır (Chang, *et al.* 2008), (Yu, *et al.* 2005).



Şekil 5.12 CNT katkıli T800/M21 numunelerin 5 °C/dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları.

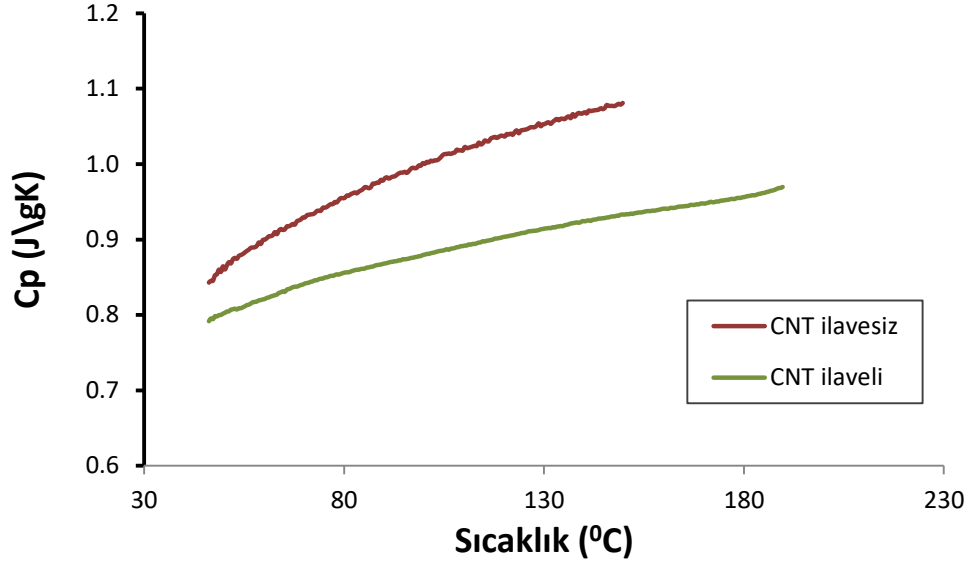


Şekil 5.13 CNT katkıli T800/M21 numunelerin 10 °C/dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları.



Şekil 5.14 CNT katkılı T800/M21 numunelerin 20 °C/dak ısıtma hızında TG-DSC diyagramları.

Isı kapasitesi, bir maddenin sıcaklığını 1°C değiştirmek için verilmesi gereken ısı miktarı olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle malzemenin dışarıdan ısı absorblayarak sıcaklığını yükseltebilme kapasitesini gösteren bir özelliktir. CNT ilaveli/ilavesiz numunelerin ısı kapasitesi değerleri karşılaştırıldığında, dakikada 20°C ısıtılan sistemlerde, 50°C'de CNT'süz numunenin ısı kapasitesi değeri 0,86 (J/(gK)) iken, CNT'lü numunede bu değer 0,80 (J/(gK)) olarak belirlenmiştir . Bu çalışmada da kullanılan çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ün ısı kapasitesi literatürde oda sıcaklığında 0,75 (J/(gK)) olarak belirlenmiştir (Pradhan, *et al.* 2009). Karbon fiberlerin de ısı kapasitesi üretici firma tarafından 0,75 (J/(gK)) olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla bu düşüşü CNT'lerin ısı kapasitesine bağlamak mümkün değildir. Ancak formül (5.2)'deki Debye denklemine göre termal iletkenlik ile ısı kapasitesi doğru orantılıdır. Fonon saçılması sonucu termal iletkenlikleri düşük çıkan CNT ilaveli numunelerde ısı kapasitesinin de düşük çıkması formülü doğrulamaktadır.



Şekil 5.15 CNT ilaveli/ilavesiz T800/M55 numunelerin spesifik ısı sonuçları.

5.1.3 Dilatometre Analiz Sonuçları

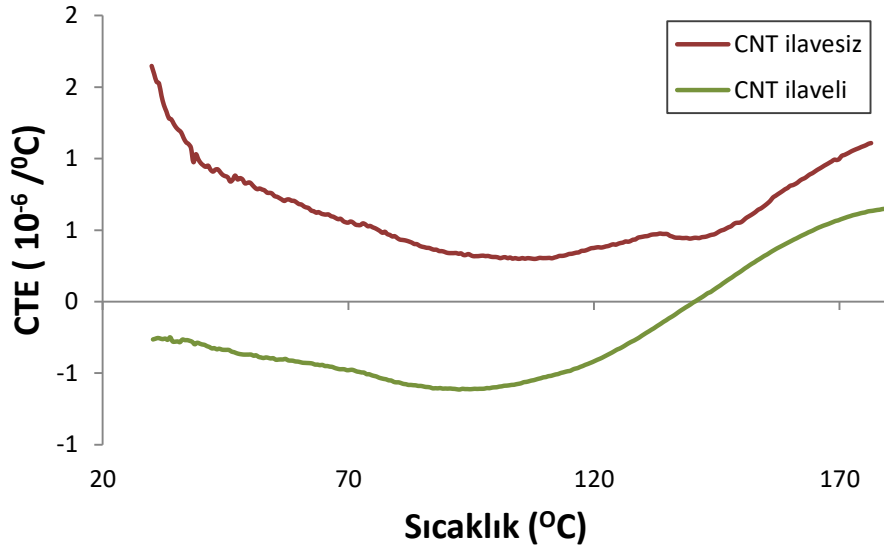
Termal genleşme katsayısı mühendislik uygulamalarında kullanılan polimerler için önemli bir özelliktir. İyi bir boyutsal kararlılığın elde edilebilmesi için düşük termal genleşme katsayısı istenmektedir. Kompozit malzemelerin termal genleşme katsayısı iki yaklaşımla elde edilebilir. Eğer malzeme bileşenleri yaklaşık olarak aynı elastik özelliklere sahipse ve termal gerilim meydana gelmemişse aşağıdaki karışım kuralı eşitliği kullanılabilir:

$$\alpha_C = \alpha_f V_f + \alpha_m (1 - V_f) \quad (5.3)$$

Burada α_C ; kompozit malzemenin termal genleşme katsayısı, α_f ; fiberin termal genleşme katsayısı, α_m ; ise matrisin termal genleşme katsayısıdır. Ancak bileşenler çok farklı elastik özelliklere sahipse eşitlik, bileşenlerin elastik modülleri hesaba katılarak bu duruma uyarlanabilir (Gonnet 2004):

$$\alpha_C = \alpha_f V_f E_f + \alpha_m (1 - V_f) E_f / (V_f E_f + (1 - V_f) E_m) \quad (5.4)$$

Bu eşitlikte ise E_f ; fiberin elastisite modülü, E_m ; matrisin elastisite modülüdür. Karbon fiberler, bazı zamanlarda, fiber doğrultusunda negatif termal genleşme göstermekte, yani ısındıkça büzölmektedirler (Gonnet 2004). Havacılık sektörü negatif termal genleşme katsayısına sahip malzemelerle pozitif termal genleşme katsayısına sahip malzemelerin kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin kullanımında öncü durumdadır. Böylece kompozit malzemede geniş bir sıcaklık aralığında meydana gelen şekil değişimi oldukça küçük mitalara çekmek amaçlanmaktadır.

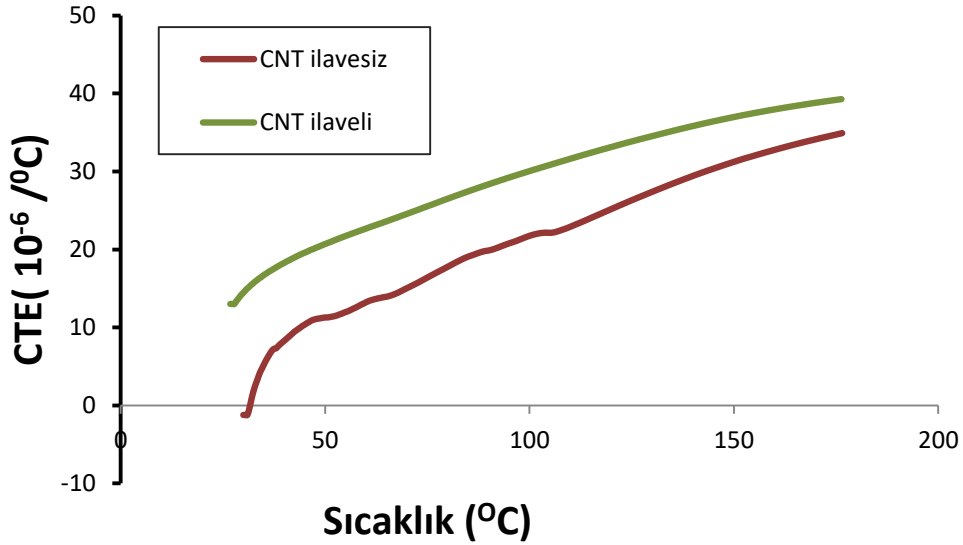


Şekil 5.16 CNT ilavesiz/ilaveli T800/M21 numunelerin X doğrultusunda termal genleşme katsayıları.

Çalışmada kullanılan epoksinin termal genleşme katsayısı $55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, fiberin termal genleşme katsayısı ise $-0.56 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ dir (İnt.Kyn.8, İnt.Kyn.10). (5.4) numaralı denkleme göre T800/M21 kompozit malzemesinin termal genleşme katsayısı hesaplandığında sonuç oldukça küçük , $-0,07 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ bulunmaktadır. Ancak numuneler anizotropik olduğu için bu değeri direk olarak dikkate almak çok da doğru sayılmayacaktır. Deneysel sonuçlara bakıldığında T800/M21 kompozit malzemesinin x yönünde ısıl genleşme katsayısının pozitif yönde ve oldukça düşük değerlerde olduğu Şekil 5.15’de görölmektedir. Karbon nanotüp ilave edilmiş numunelere baktığımızda ise termal genleşme katsayısının 140°C ’ ye kadar negatif değerlerde olduğunu görmekteyiz. Karbon fiberler gibi karbon nanotüplerin de negatif termal genleşme katsayısına sahip olmaları sonucu (Gonnet 2004), CNT katkılı bu numunelerde düşük

sıcaklıklarda epoksi matrisin genleşme davranışı baskılanmıştır. Ancak 140°C'nin üzerinde x doğrultusunda CNT katkılı numunelerin termal genleşme miktarı pozitif değerlere çıksa da yine de ilavesiz numunelere göre daha stabillerdir.

Şekil 5.16'da Y doğrultusundaki termal genleşme katsayısına bakıldığında CNT'süz ve CNT'lü numunelerin hepsinde x doğrultusuna kıyasla çok daha fazla bir genleşmenin olduğunu görebiliriz . Bu doğrultuda CNT' süz numunelerde epoksi zengin bölgeler olduğu için genleşmenin daha fazla olması beklenen bir sonuçtur. Y doğrultusunda x doğrultusunun aksine CNT'lü numuneler CNT'süz numunelerden daha fazla genleşmeye uğramışlardır. Literatürde, CNT'nin polimer matrise takviyesinin, kompozit malzemenin boyutsal stabilitesinde artışa neden olduğunu gösteren bazı çalışmalar mevcuttur (Rios *et al.* 2013, Sathyanarayana and Hübner 2013). Ancak bu çalışmada x doğrultusu için bu sonuca ulaşılsa da y doğrultusu için böyle bir sonuç elde edilmemiştir. Fiber doğrultusunda zaten iyi bir stabilite sağlayan fiberlerle birlikte CNT'ler stabilite artışına neden olmuş olabilirler.



Şekil 5.17 CNT ilavesiz/ilaveli T800/M21 numunelerinY doğrultusunda termal genleşme katsayıları.

5.2 Elektriksel İletkenlik Deney Sonuçları

Elektriksel direnç, bir iletkenin uzunluğu (l) ile doğru, kesit alanı (A) ile ters orantılıdır. Aşağıda verilen bağıntılarda ise ρ ; öz direnci temsil etmektedir ve iletkenliğin tersidir.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5.5)$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (5.6)$$

Deney düzeneğinde LCR metreden alınan direnç değerleri aşağıdaki formülde yerine koyularak kompozit numunelerin x, y ve z doğrultularında elektriksel iletkenliği elde edilmiştir:

$$\sigma_{kompozit} = \frac{l}{R \times A} \quad (5.7)$$

Burada l ; numunenin iletkenliğinin ölçüldüğü doğrultudaki boyu, R ; direnci, A ise probun temas ettiği yüzeyin alanıdır.

CNT ilaveli ve ilavesiz tüm numunelerin x, y ve z doğrultusunda oda sıcaklığında elde edilen direnç ve formül (5.7)' ye göre hesaplanan elektriksel iletkenlik sonuçları her doğrultuda üç numune ve her numune için beş ölçüm olacak şekilde Çizelge 5.3, Çizelge 5.4, Çizelge 5.5, Çizelge 5.6, Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8' de verilmiştir.

Çizelge 5.3 CNT ilavesiz numunelerin oda sıcaklığında X (Fiber) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.

Numune	l (mm)	w (mm)	t (mm)	Deney No	Direnç (ohm)	İletkenlik (S/m)
X1	50,32	25,36	4,28	1	0,0286	16209,95
	50,32	25,36	4,28	2	0,0318	14578,76
	50,32	25,36	4,28	3	0,0296	15662,31
	50,32	25,36	4,28	4	0,0313	14811,64
	50,32	25,36	4,28	5	0,0304	15250,15
Ort.					0,030	15302,56
X2	50,31	24,95	4,21	1	0,0287	16688,59
	50,31	24,95	4,21	2	0,0283	16924,48
	50,31	24,95	4,21	3	0,0271	17673,90
	50,31	24,95	4,21	4	0,0299	16018,82
	50,31	24,95	4,21	5	0,0278	17228,87
Ort.					0,028	16906,93
X3	50,8	25,36	4,28	1	0,0292	16028,31
	50,8	25,36	4,28	2	0,0283	16538,05
	50,8	25,36	4,28	3	0,0321	14580,27
	50,8	25,36	4,28	4	0,0384	12188,20
	50,8	25,36	4,28	5	0,0359	13036,96
Ort.					0,032	14474,36
Genel Ortalama					0,030	15561,28

Çizelge 5.4 CNT ilavesiz numunelerin oda sıcaklığında Y (Fibere dik) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.

Numune	l (mm)	w (mm)	t (mm)	Deney No	Direnç (ohm)	İletkenlik (S/m)
Y1	50,1	24,5	4,20	1	5,8	20,07
	50,1	24,5	4,20	2	5,76	20,21
	50,1	24,5	4,20	3	5,94	19,60
	50,1	24,5	4,20	4	5,78	20,14
	50,1	24,5	4,20	5	5,73	20,32
Ort.					5,80	20,07
Y2	50,23	24,68	4,20	1	6,49	18,03
	50,23	24,68	4,20	2	6,42	18,22
	50,23	24,68	4,20	3	6,56	17,83
	50,23	24,68	4,20	4	6,77	17,28
	50,23	24,68	4,20	5	6,65	17,59
Ort.					6,57	17,79
Y3	50,19	24,81	4,20	1	6,36	18,51
	50,19	24,81	4,20	2	6,24	18,86
	50,19	24,81	4,20	3	6,12	19,23
	50,19	24,81	4,20	4	6,23	18,89
	50,19	24,81	4,20	5	6,37	18,48
Ort.					6,264	18,79
Genel Ortalama					6,21	18,88

Çizelge 5.5 CNT ilavesiz numunelerin oda sıcaklığında Z (kalınlık) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.

Numune	l (mm)	w (mm)	t (mm)	Deney No	Direnç (ohm)	İletkenlik (S/m)
Z1	50,20	25,12	4,23	1	3,27	1,03
	50,20	25,12	4,23	2	3,35	1,00
	50,20	25,12	4,23	3	2,89	1,16
	50,20	25,12	4,23	4	2,91	1,15
	50,20	25,12	4,23	5	3,01	1,11
Ort.					3,086	1,09
Z2	50,20	25,27	4,3	1	3,03	1,12
	50,20	25,27	4,3	2	2,89	1,17
	50,20	25,27	4,3	3	3,14	1,08
	50,20	25,27	4,3	4	2,93	1,16
	50,20	25,27	4,3	5	3,13	1,08
Ort.					3,024	1,12
Z3	49,20	25,18	4,2	1	2,92	1,16
	49,20	25,18	4,2	2	2,62	1,29
	49,20	25,18	4,2	3	2,73	1,24
	49,20	25,18	4,2	4	2,87	1,18
	49,20	25,18	4,2	5	2,61	1,30
Ort.					2,75	1,24
Genel Ortalama					2,95	1,15

Çizelge 5.6 CNT ilaveli numunelerin oda sıcaklığında X (Fiber) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.

Numune	l (mm)	w (mm)	t (mm)	Deney No	Direnç (ohm)	İletkenlik (S/m)
X1	50,3	25,2	4,36	1	0,01817	25195,68
	50,3	25,2	4,36	2	0,0162	28259,60
	50,3	25,2	4,36	3	0,0174	26310,66
	50,3	25,2	4,36	4	0,0209	21904,57
	50,3	25,2	4,36	5	0,0186	24613,20
Ort.					0,018	25256,74
X2	49,9	24,4	4,4	1	0,0172	27022,75
	49,9	24,4	4,4	2	0,0123	37787,92
	49,9	24,4	4,4	3	0,0229	20296,57
	49,9	24,4	4,4	4	0,0156	29794,32
	49,9	24,4	4,4	5	0,0226	20565,99
Ort.					0,018	27093,51
X3	50,1	24,8	4,4	1	0,01907	24075,91
	50,1	24,8	4,4	2	0,0162	28341,21
	50,1	24,8	4,4	3	0,0187	24552,28
	50,1	24,8	4,4	4	0,0171	26849,57
	50,1	24,8	4,4	5	0,0195	23545,00
Ort.					0,018	25472,79
Genel Ortalama					0,018	25941,01

Çizelge 5.7 CNT ilaveli numunelerin oda sıcaklığında Y (Fibere dik) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.

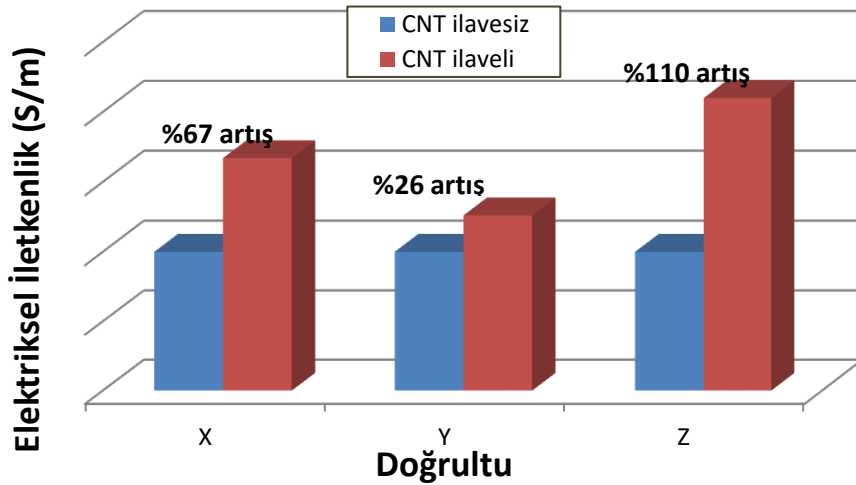
Numune	l (mm)	w (mm)	t (mm)	Deney No	Direnç (ohm)	İletkenlik (S/m)
Y1	50,1	25,53	4,20	1	4,8	25,28
	50,1	25,53	4,20	2	4,7	25,81
	50,1	25,53	4,20	3	5	24,27
	50,1	25,53	4,20	4	4,78	25,38
	50,1	25,53	4,20	5	4,95	24,51
Ort.					4,84	25,05
Y2	50,1	25,64	4,38	1	5,2	22,47
	50,1	25,64	4,38	2	5,2	22,47
	50,1	25,64	4,38	3	5,13	22,78
	50,1	25,64	4,38	4	4,97	23,51
	50,1	25,64	4,38	5	5,04	23,18
Ort.					5,10	22,88
Y3	50,1	25,5	4,35	1	4,91	23,83
	50,1	25,5	4,35	2	5,21	22,46
	50,1	25,5	4,35	3	4,83	24,23
	50,1	25,5	4,35	4	4,97	23,54
	50,1	25,5	4,35	5	4,82	24,28
Ort.					4,94	23,67
Genel Ortalama					4,96	23,87

Çizelge 5.8 CNT ilaveli numunelerin oda sıcaklığında Z (kalınlık) doğrultusunda elektriksel iletkenlik ölçümleri.

Numune	l (mm)	w (mm)	t (mm)	Deney No	Direnç (ohm)	İletkenlik (S/m)
Z1	50,20	25,1	4,4	1	1,5	2,33
	50,20	25,1	4,4	2	1,47	2,38
	50,20	25,1	4,4	3	1,48	2,36
	50,20	25,1	4,4	4	1,54	2,27
	50,20	25,1	4,4	5	1,53	2,28
Ort.					1,50	2,32
Z2	50,20	24,5	4,4	1	1,51	2,37
	50,20	24,5	4,4	2	1,512	2,37
	50,20	24,5	4,4	3	1,509	2,37
	50,20	24,5	4,4	4	1,513	2,36
	50,20	24,5	4,4	5	1,5	2,39
Ort.					1,50	2,37
Z3	50,10	24,2	4,4	1	1,45	2,50
	50,10	24,2	4,4	2	1,38	2,63
	50,10	24,2	4,4	3	1,33	2,73
	50,10	24,2	4,4	4	1,47	2,47
	50,10	24,2	4,4	5	1,48	2,45
Ort.					1,42	2,56
Genel						
Ortalama					1,47	2,42

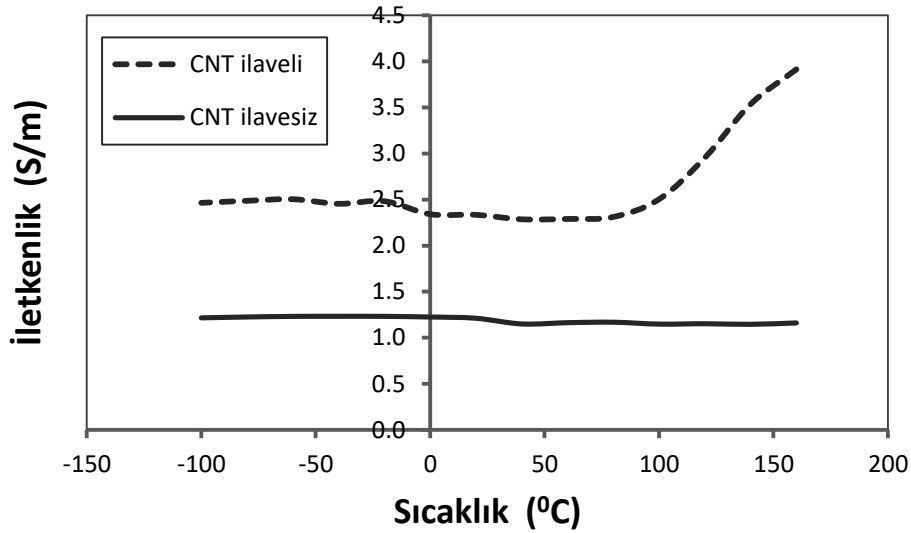
Sonuçlar incelendiğinde CNT ilavesiz T800/M21 numunelerin x doğrultusunda elektriksel iletkenliği ortalama olarak 15561 S/m, y doğrultusunda 18,88 S/m ve z doğrultusunda ise 1,15 S/m'dir. CNT ilave edilen numunelere bakıldığında ise elektriksel iletkenliğin x doğrultusunda 25942 S/m, y doğrultusunda 23,87 S/m, ve z doğrultusunda ise 2,42 S/m olduğu görülmektedir. Görüldüğü gibi CNT ilavesi elektriksel iletkenlik üzerinde özellikle kalınlık doğrultusunda oldukça iyi bir artış

sağlamıştır. Şekil 5.17’de üç doğrultuda da iletkenlik artışının gösterildiği grafik verilmiştir. En iyi artış %110 ile kalınlık doğrultusunda olmuştur. Yıldırım çarpması sonucu yaklaşık olarak 200000 amperlik akım oluşmaktadır. Bu akımın iletilmesini sağlayan kaplamaların iletkenlik değeri çok yüksek olmalıdır. Alcore firması tarafından ASTM B373 standartına göre üretilen iletken alüminyum folyo yıldırım çarpması sonucu oluşan akımın iletilmesini sağlayabilecek iletkenlikte bir kaplamadır ve maximum direnç değeri 0,15 ohm’dur. T800/M21 kompozit malzemesi fiber doğrultusunda bu iletkenliği sağlamaktadır ancak y ve z doğrultularında yeterli iletkenliğe sahip değildir. CNT katkısı sonucunda kalınlık doğrultusunda gerçekleşen %110’luk artış bile yeterli gelmemektedir. Ancak uçaklarda yıldırım çarpmasıyla oluşan akımın iletilmesi için uygulanan yollarda değil de elektronik devrelerden veya sürtünmeden kaynaklanan statik elektriği topraklayarak etkisiz hale getirecek, iletkenliği nispeten daha düşük olan anti-statik kaplamalar da kullanılmaktadır. PRC-Desoto tarafından üretilen ve anti statik kaplamalara örnek gösterilebilen bu malzeme uçakta yük taşımayacak ikincil yapılarda kullanılmaktadır. Kaplamada izin verilen maksimum direnç $10^{-1} - 10^5$ ohm olmak üzere oldukça geniş bir aralıkta değişmektedir. Elde edilen iletkenlik sonuçlarına göre CNT katkısız T800/M21 kompozit numunelerin direnç değerleri bu direnç aralığını sağlamaktadır ancak CNT ilavesi ile ve anti statik kaplamalara daha çok yerde alternatif olabilecek malzemeler üretmek mümkündür.



Şekil 5.18 CNT ilavesinin farklı doğrultularda elektriksel iletkenlik üzerine yaptığı etki.

CNT ilaveli/ilavesiz numunelerin kalınlık doğrultusunda elektriksel iletkenliğinin, sıcaklık ile değişimini görmek için Novocontrol Concept 50 Dielektrik ve Empedans Spektrometresi ile 1 kHz frekansta, -100 ve +160⁰C sıcaklık aralığında elektriksel iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Şekil 5.18'e göre CNT katkısız kompozit malzemenin elektriksel iletkenliği sıcaklıkla herhangi bir değişim göstermemektedir. CNT katkılı numunelerde ise 80⁰ C'ye neredeyse sabit bir iletkenlik görülürken burdan sonra iletkenlik değerinde artış görülmektedir.160⁰C'de kompozit malzemenin kalınlık doğrultusundaki iletkenlik değeri neredeyse bir buçuk katına çıkmıştır. Sürtünme etkisiyle veya elektronik cihazların sebep olduğu statik elektrik sonucunda sıcaklık da artacağı için iletkenliğin sıcaklıkla artması istenilecek bir sonuçtur.



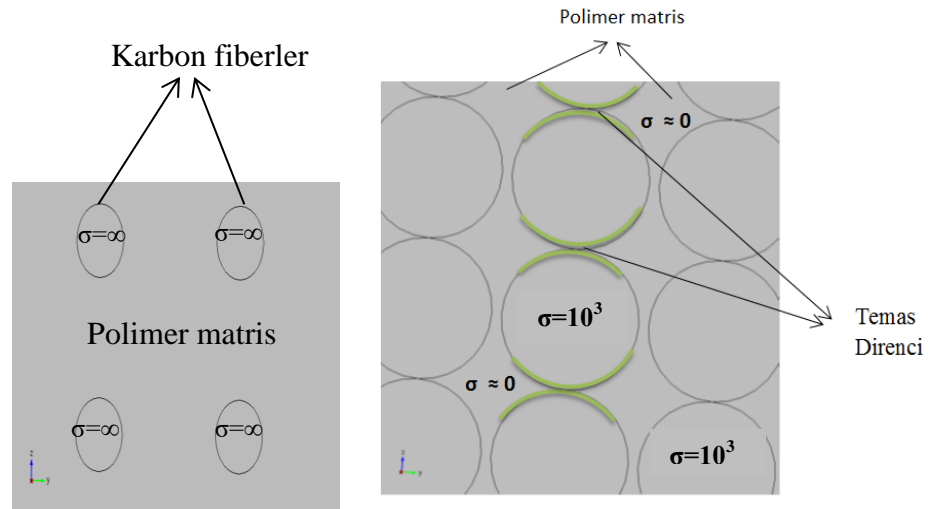
Şekil 5.19 -100 +160⁰C aralığında CNT ilaveli ve ilavesiz numunelerin elektriksel iletkenlik ölçümleri.

5.3 Modelleme Sonuçları

5.3.1 Elektriksel İletkenlik Modelleme Çalışmaları ve Sonuçları

Tez çalışmasının modelleme aşamasında Abaqus 6.14 sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak tek doğrultulu T800/M21 kompozit malzemelerinin kalınlık doğrultusunda elektriksel iletkenliği üzerine çalışılmıştır. Karbon fiberler elektriksel iletkenliği yüksek olan malzemelerdir. Deney numunelerinde kullanılan T800 karbon fiberin elektriksel iletkenliği üretici firma tarafından 71400 S/m olarak belirlenmiştir. Epoksiler ise

(Hussan 2012) 10^{-12} S/m civarında oldukça düşük bir iletkenliğe sahiptirler. Modelleme çalışmasında epoksinin elektriksel iletkenliği 10^{-12} S/m verildiğinde fiberler ile matris arasındaki iletkenlik farkı çok yüksek bir değere ulaştığı için program hata vermekte ve çözüm yapamamaktadır. Schmidt ve arkadaşları (Schmidt and Banerjee 2013) COMSOL programı ile yaptıkları modelleme çalışmasında iki durumu göz önüne almışlardır. Şekil 5.19'da verilen modellemelerde birinci durum karbon fiberlerin birbirine temas etmediği yani perkolasyon görülmeyen durumdur. Burada hem karbon fiberler, hem de polimer matris iletimi sağlamaktadır ancak karbon fiberler çok küçük dolayısıyla ihmal edilebilir bir direnç göstermektedirler. Bu yüzden iletkenliğini sonsuz olarak kabul etmişlerdir. İkinci durumda ise fiberlerin birbirine temas ettiği perkolasyon durumu göz önüne alınmıştır. Böyle bir durumda fiberlerin iletkenliği çok yüksek polimer matrisin ise çok düşük olduğu için karbon fiberi sistemdeki tek iletken, polimeri ise iletme pek bir katkısı olmadığı için neredeyse yalıtkan olarak kabul etmiş ve iletkenliğini sıfıra yakın verdiklerini belirtmişlerdir.



Şekil 5.20 Schmidt ve arkadaşları tarafından önerilen modeller: a)perkolasyon görülmeyen durum; b)perkolasyon durumu (Schmidt and Banerjee 2013).

Schmidt ve arkadaşının çalışması da göz önünde bulundurularak önerilen çeşitli modeller için malzeme özellikleri şu şekilde verilmiştir: Karbon fiberin elektriksel iletkenliği, σ_{fiber} , 71400 S/m, epoksi matrisin elektriksel iletkenliği, σ_{matris} , 5×10^{-7} S/m, yüzeylere kaplanan gümüş boyanın elektriksel iletkenliği, $\sigma_{\text{gümüş}}$, 63000 S/m ' dir. Epoksi matris için önerilen iletkenlik değeri, fiberin iletkenliğini 71400 S/m verdiğimizde Abaqus

programının hata vermeden kabul ettiği en küçük değerdir. Programda Coupled thermal –electric analizi steady-state olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm modellerde gümüş kaplama üzerine tek noktadan 1×10^{-6} A yoğunlaştırılmış akım verilmiş, karşı yüzeydeki gümüş yüzeyde elektrik potansiyeli sıfır verilerek modelde sınır şartı oluşturulmuştur. Element type, S4R, Thermal Electric seçilmiştir. Aşağıda önerilen modeller sırasıyla anlatılmaktadır:

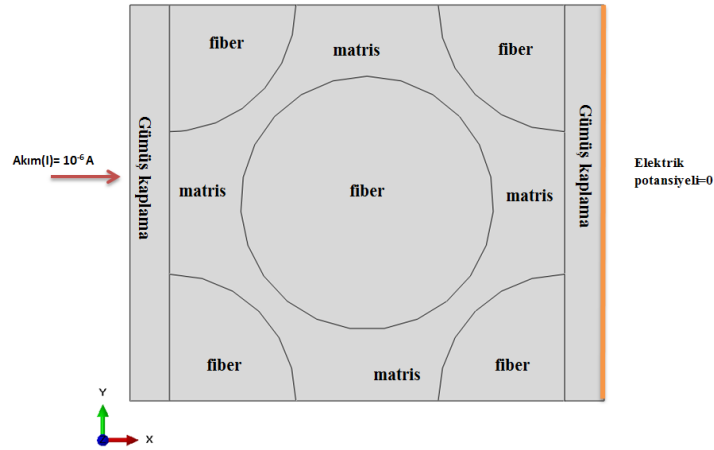
5.3.1.1 Hexagonal Model

Hexagonal modelleme çalışması için öncelikle kalınlık doğrultusunda İki boyutlu ve üç boyutlu modeller oluşturulmuştur. Burada amaç iki boyutlu ve üç boyutlu modelleme sırasında sonuçlarda herhangi bir farklılık olup olmadığını görmek ve modelleme çalışmalarına nasıl devam edileceği hususunda bir karar vermektir.

Şekil 5.20’de görülen iki boyutlu olarak tasarlanan modelde en ve boy $0,1 \times 0,1$ mm olarak belirlenmiştir. Gümüş kaplamanın kalınlığı, $t_{\text{gümüş}}$, 0,01 mm’dir. Fiberlerin yarıçapı, d_{fiber} , 0,029 mm ve fiber hacim oranı, V_f , deney numuneleri ile uyumlu olarak 0,57’dir. Modeller yaklaşık olarak 15000-25000 arasında eş parçaya bölünmüştür. Analiz sonucunda parçanın potansiyel farkı, v , elde edilerek aşağıdaki formüllerde yerine koyulmuş ve kompozit malzemenin elektriksel iletkenliğine ulaşılmıştır.

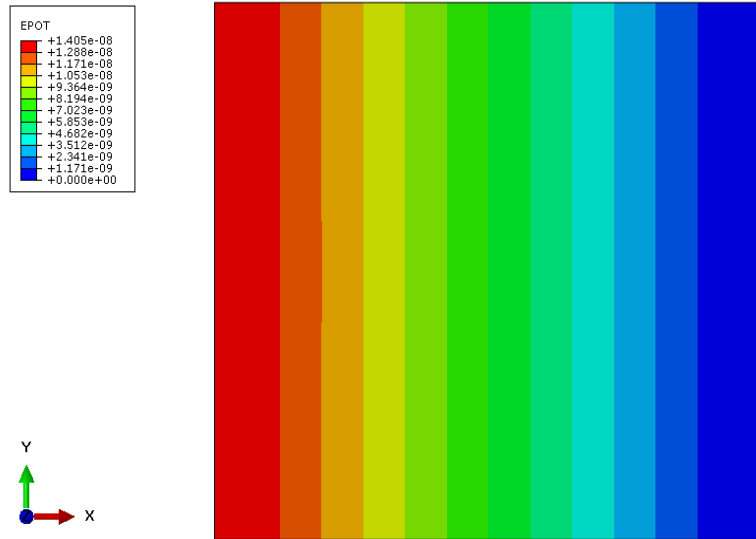
$$v = I \times R \quad (5.8)$$

$$\sigma_{\text{kompozit}} = \frac{l}{R \times A} \quad (5.7)$$



Şekil 5.21 Elektriksel iletkenlik için oluşturulan iki boyutlu hexagonal model, uygulanan yük ve sınır şartı.

Hesaplama yapılırken modelimiz iki boyutlu olduğu için olmayan kalınlık boyutu 1 mm olarak alınmıştır. Bu kalınlığı 1 mm olarak belirleyebilmek için ise programda bazı denemeler yapılmıştır. En ve boyu $0,1 \times 0,1 \text{ mm}$, iletkenliği 71400 S/m olarak modellenen kare homojen bir malzemenin, 10^{-6} A akım altında potansiyel farkı (v), $1,405 \times 10^{-8}$ elde edilerek (Şekil 5.21) aşağıdaki formüllerde yerine koyulmuştur:



Şekil 5.22 Modellenen kare homojen malzemenin analiz sonucunda elde edilen potansiyel farkı.

$$v = I \times R$$

$$1,4 \times 10^{-8} = 10^{-6} \times R$$

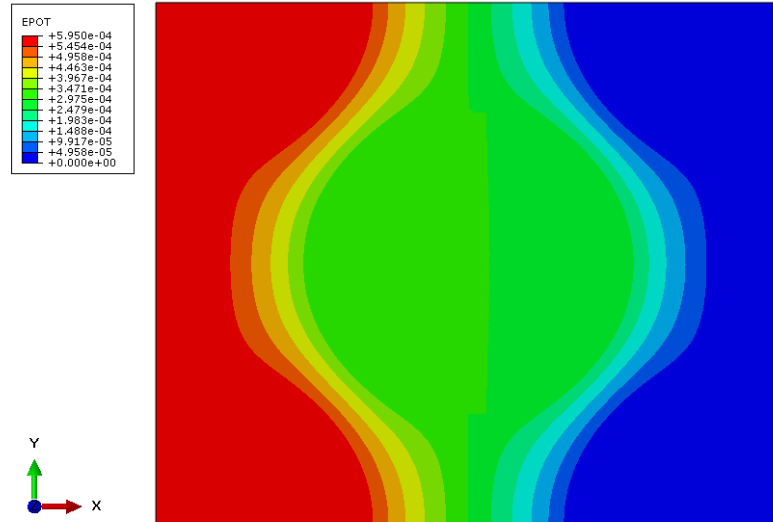
$$R=1,4 \times 10^{-2} \text{ ohm}$$

$$\sigma_{kompozit} = \frac{l}{R \times A}$$

$$\sigma_{kompozit} = \frac{0,1}{1,4 \times 10^{-2} \times (0,1 \times t)}$$

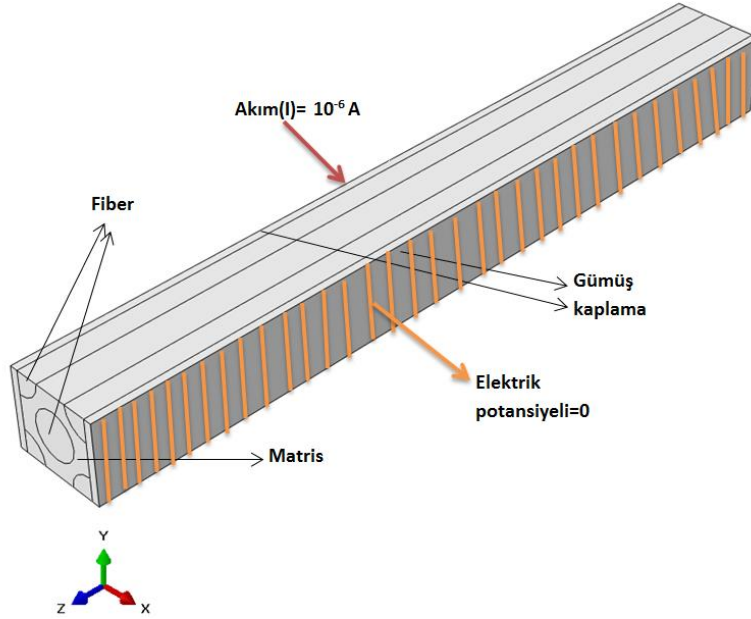
$$\sigma_{kompozit} = \frac{71,42}{t} \text{ S/mm}$$

Analiz sonucunda parçanın potansiyel farktan giderek elde edilen elektriksel iletkenliği ile başta özellik olarak verilen iletkenliğin eşit olması gerektiği için t , kalınlığının 1 mm olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu deneme çalışması farklı ebatlarda, farklı özelliklerde ve farklı birimlerde malzemeler için denenmiş ve her seferinde iki boyutlu modellemelerde formüldeki kalınlık değerinin, modele verilen ölçülerinin birimleri ile tutarlı olarak 1 alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bunun üzerine hexagonal modelleme çalışmalarına kalınlık, hesaplamalar sırasında 1 mm alınarak devam edilmiştir. Şekil 5.22’de ise , fiberler ve matristen oluşan hexagonal modelin elektriksel iletkenlik analizi sonucunda elde edilen potansiyel farkı verilmektedir. $5,95 \times 10^{-4}$ V potansiyel farktan direnç elde edilerek iletkenlik formülünde yerine koyulursa 2D hexagonal kompozit malzemenin kalınlık doğrultusunda iletkenliği, $\sigma_{kompozit}$, 1,68 S/m olarak elde edilmiş olur.

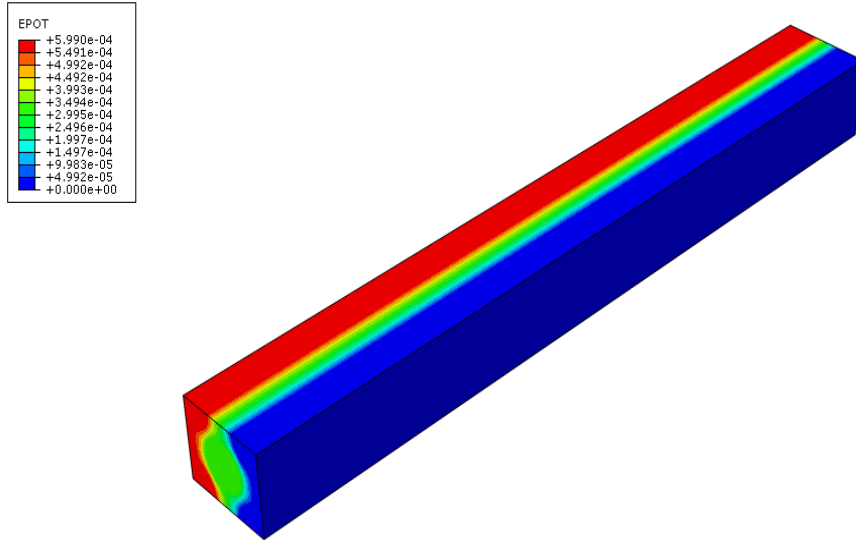


Şekil 5.22 2D Hexagonal modelin analiz sonucu.

Daha sonra hexagonal model, boyutları $0,1 \times 0,1 \times 1$ mm olarak üç boyutlu şekilde modellenmiştir. Oluşturulan model Şekil 5.23’de verilmektedir. Diğer bütün özelliklerin aynı olarak verildiği ve 43186 parçaya bölünerek yapılan analiz sonucunda potansiyel fark Şekil 5.24’te verildiği gibi $5,95 \times 10^{-4}$ V olarak elde edilmiştir. Üç boyutlu olarak modellenmiş kompozit malzemenin kalınlık doğrultusunda iletkenliği, $\sigma_{kompozit}$, ise 1,68 S/m olarak elde edilmiştir.



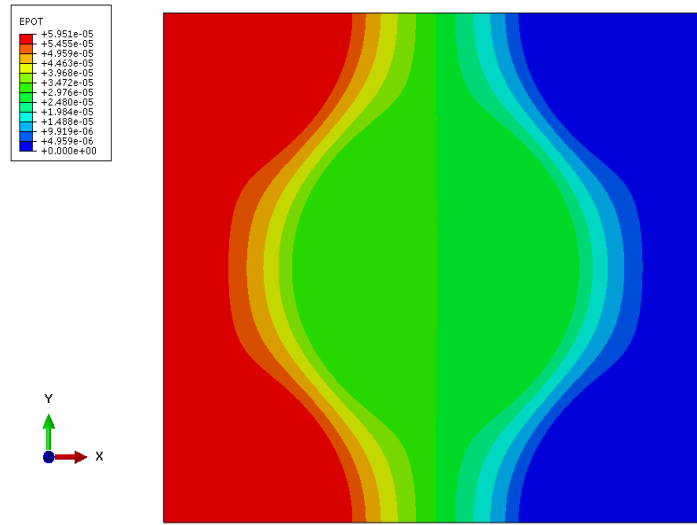
Şekil 5.23 3D Hexagonal model.



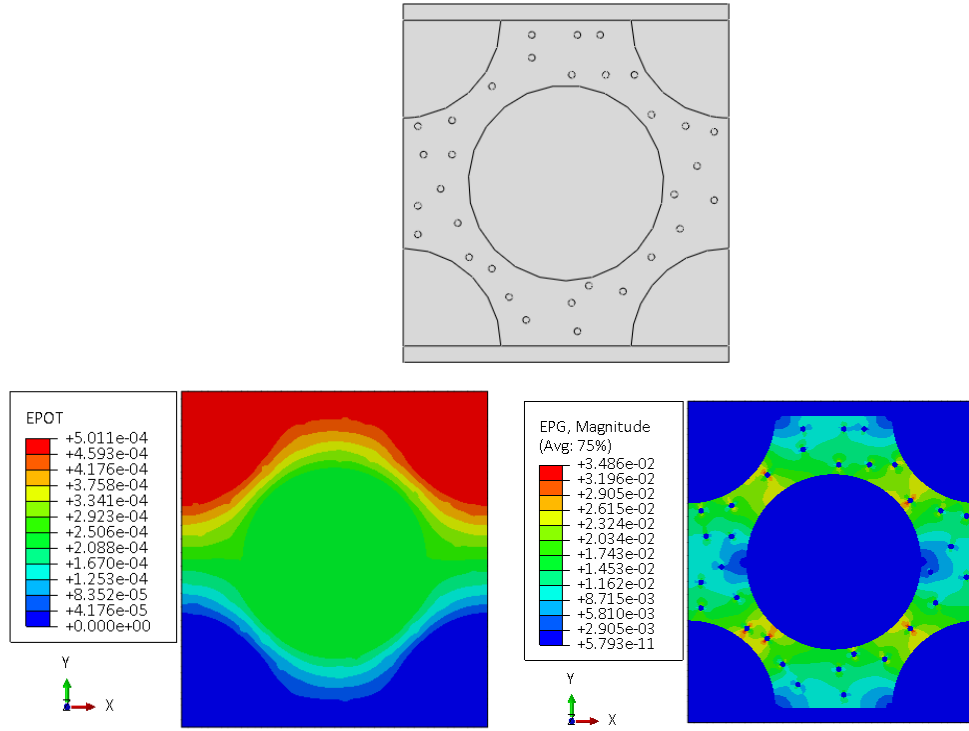
Şekil 5.24 3D Hexagonal modelin analiz sonucu.

Analizler sonucunda iki boyutlu ve üç boyutlu modellerin elektriksel iletkenlik sonuçlarının aynı çıkması üzerine modelleme çalışmalarına iki boyutlu olarak devam edilmiştir. Çünkü daha karmaşık olan modellerde üç boyutlu modellemeler analiz süresini oldukça uzatmakta ve hatta analizin hatalar nedeniyle durmasına neden olmaktadır.

Hexagonal modellemede CNT ilaveli T800/M21 kompozit malzeme için denendiğinde CNT ilavesinin modellemeye nasıl yansıtılacağı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bunun için ilk önce CNT'lerin tüm reçinede homojen olarak dağıldığı varsayılarak tüm reçinenin iletkenliği eşit ve 10^{-3} S/mm alınmıştır. Elde edilen analiz sonucu Şekil 5.25'te verilmiştir ve elektriksel iletkenliği 16,8 S/m olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç deneysel sonuçla karşılaştırıldığında oldukça büyüktür. Ayrıca CNT'ler reçinenin iletkenliğini bu kadar homojen bir şekilde arttıramayacağı için çok da gerçekçi bir model olmadığı sonucuna varılmıştır.

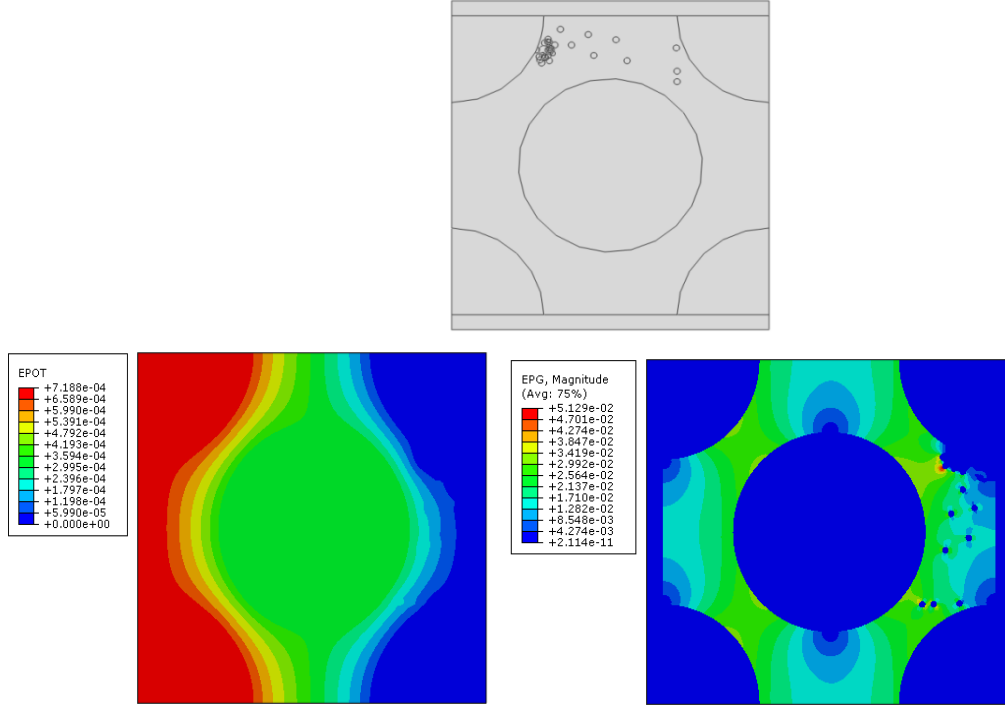


Şekil 5.25 Homojen CNT ilavesi ile yapılan modelin analiz sonucu.



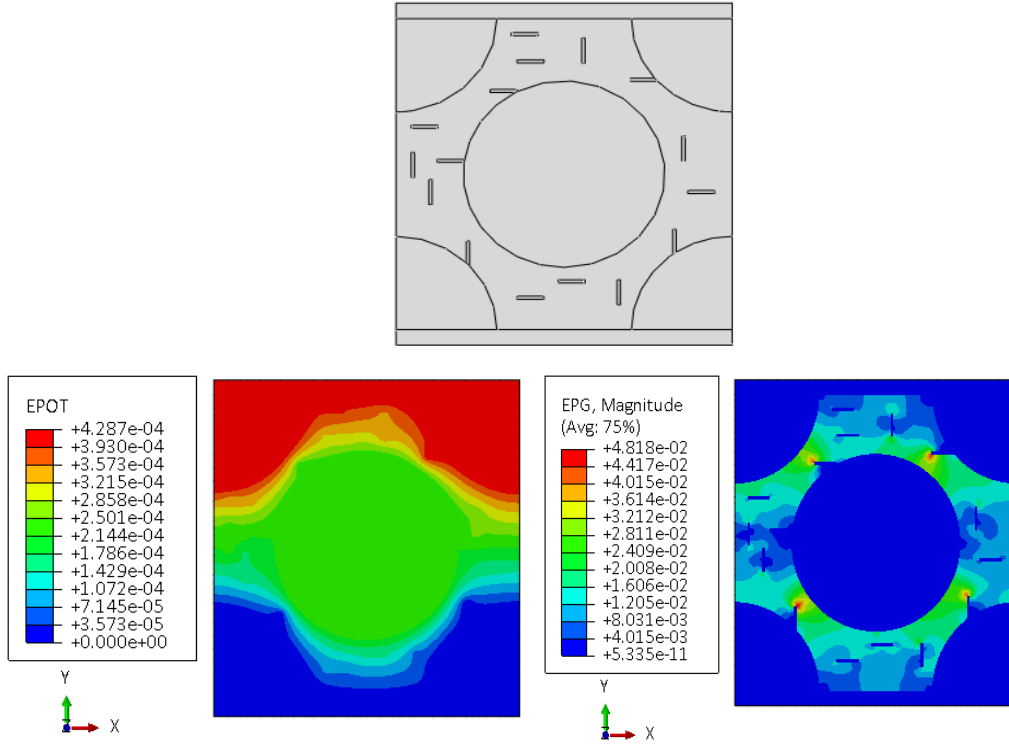
Şekil 5.26 Partikül şeklinde CNT takviyesi yapılmış farklı modellerin analiz sonuçları.

Bir sonraki analiz çalışmasında Şekil 5.26' da verildiği gibi CNT'ler reçine içerisine dairesel partikül olarak iyi bir dağılım gösterecek şekilde dağıtılarak modellenmiştir. 0,1 x 0,1 mm epoksi alan içerisine 0,029 mm yarı çapında karbon fiberler ve 0,001 mm yarı çapında 32 tane CNT eklenmiştir. CNT'lerin elektriksel iletkenliği 10^6 S/m olarak alınmıştır. Bu model ile elde edilen kompozit malzemenin elektriksel iletkenlik sonucu ise 1,99 S/m dir. Daha sonra CNT aglomerasyonunun elektriksel iletkenliğe etkisinin araştırılması için dairesel partiküllerle aglomerasyon modeli oluşturularak elektriksel iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Tüm modellemeler deney numunelerine uygun olarak fiber hacim oranı %56, CNT hacim oranı %1 olacak şekilde oluşturulmuştur. Aynı fiber ve CNT hacim oranına sahip ancak CNT'lerin aglomerasyon gösterdiği Şekil 5.27'deki modelde iletkenlik yaklaşık olarak %43 düşerek 1,39 S/m olarak elde edilmiştir. Tüm modellerde CNT'lerin karbon fiberlere yakın olduğu bölgelerde elektrik potansiyel gradyanında artış olduğu görülmektedir. Gradyanın en büyük olduğu kısımlar potansiyel farkın dolayısıyla da direncin en yüksek olduğu noktaları göstermektedir. Değer olarak da en yüksek elektrik potansiyeli gradyanının aglomere olmuş CNT'lerde görülmesi iletkenliğin düşmesini açıklamaktadır.

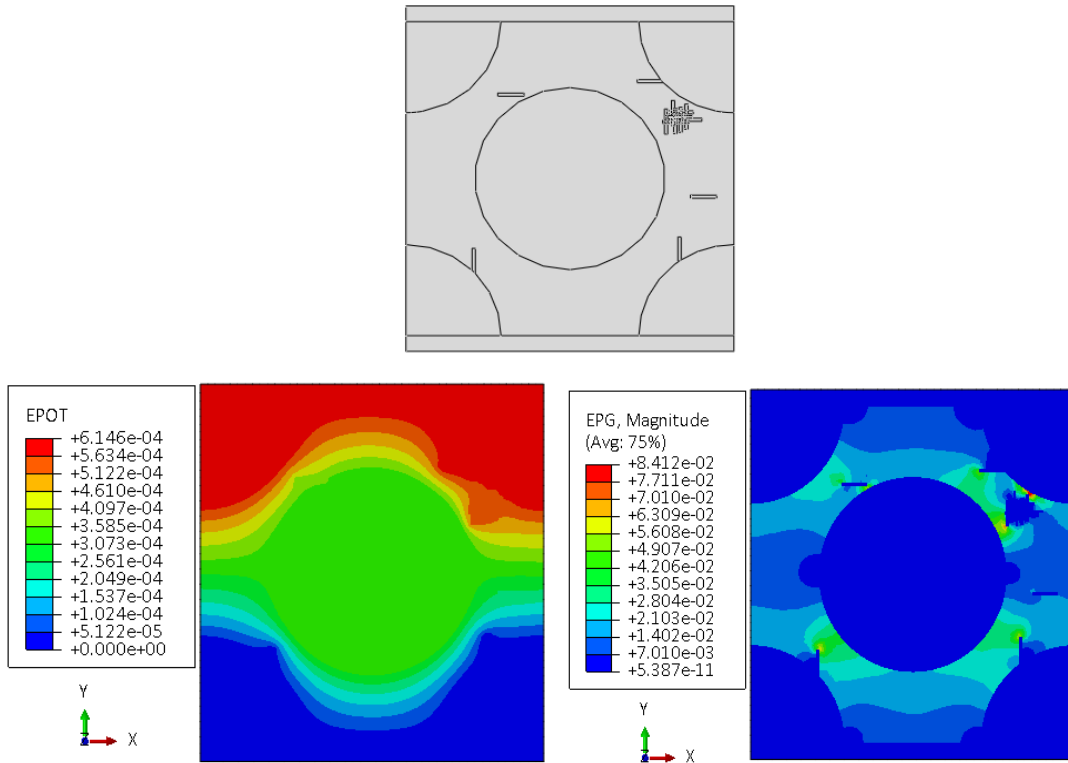


Şekil 5.27 Partikül şeklinde CNT takviyesi yapılmış ve aglomerasyon oluşmuş modelin analiz sonucu.

Diğer bir modelleme çalışmasında çubuk şeklinde CNT'ler modellenmiş ve elektriksel iletkenlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Hexagonal modelde matris içerisine rastgele dağılmış 0,001 x 0,008 mm ebatlara sahip CNT'ler eklenmiştir. İki farklı dağılım ve bir tane aglomerasyon modellenmesi üzerine çalışılmıştır. Çubuk şeklindeki CNT'lerin aglomerasyonunu modellemek için CNT'lerin mevcut yüzey alanı değiştirilmeden 0,01 mm yarı çapında bir daire ve onun etrafına çubuk şeklinde CNT'ler modellenmiştir. Burada amaç çubuk şeklindeki CNT'lerin oluşturabileceği düğümü modelleyebilmektir. Tüm modellerde fiber hacim oranı % 56'da ve CNT hacim oranı %1 'de sabit tutulmuştur. Sonuçlara göre elektriksel iletkenlik değeri Şekil 5.28'de 2,33 S/m olarak verilmiştir. Şekil 5.29'da ise aglomere olmuş çubuk şeklindeki CNT'lerin elektriksel iletkenliğe etkisi %43'lük bir düşüş şeklinde olmuştur ve iletkenlik sonucu 1,62 S/m olarak elde edilmiştir.



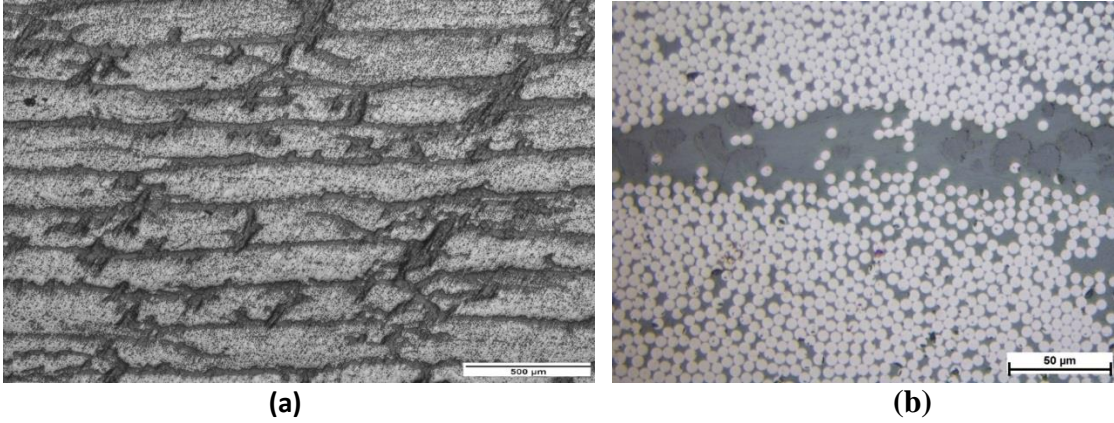
Şekil 5.28 Çubuk şeklinde CNT'lerin homojen dağılıma sahip olduğu analiz sonuçları.



Şekil 5.29 Çubuk şeklinde CNT takviyesi yapılmış ve aglomerasyon oluşmuş modelin analiz sonucu.

5.3.1.2 Düzenli Fiber Modeli

Kalınlık doğrultusunda görüntülenen mikro yapı resimlerine bakıldığında bazı kısımlarda bozukluklar olsa da genel olarak fiber-matris-fiber şeklinde bir tabaka yapısı olduğu görülmektedir (Şekil 5.30 a). Akım birbirine temas eden fiberleri takip ederek en kısa yoldan ilerlemektedir. Dolayısıyla iletkenliği sağlayan elektronların fiberlerin düzeninin bozulduğu yerleri değil, Şekil 5.30 b'deki gibi fiberlerin düzgün, direncin daha düşük olduğu kısa yolu tercih edeceği düşünülerek düzenli fiber yapısına sahip bir model oluşturulmuştur. 0,1 x 0,1 mm boyutlarındaki modelde fiber yarı çapı 0,005 mm, reçine zengin bölge ise 0,02 mm olarak alınmıştır. Gümüş kaplamanın kalınlığı, $t_{\text{gümüş}}$, 0,01 mm'dir.

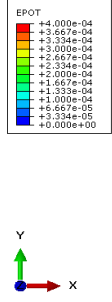
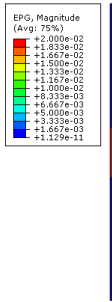
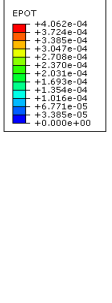
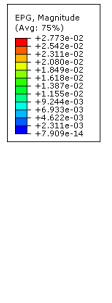
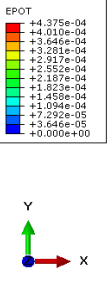
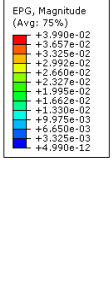
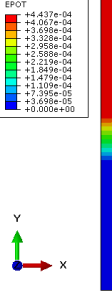
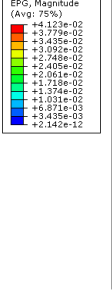


Şekil 5.30 T800/M21 Karbon fiber epoksi kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü a; 100X, b)500X.

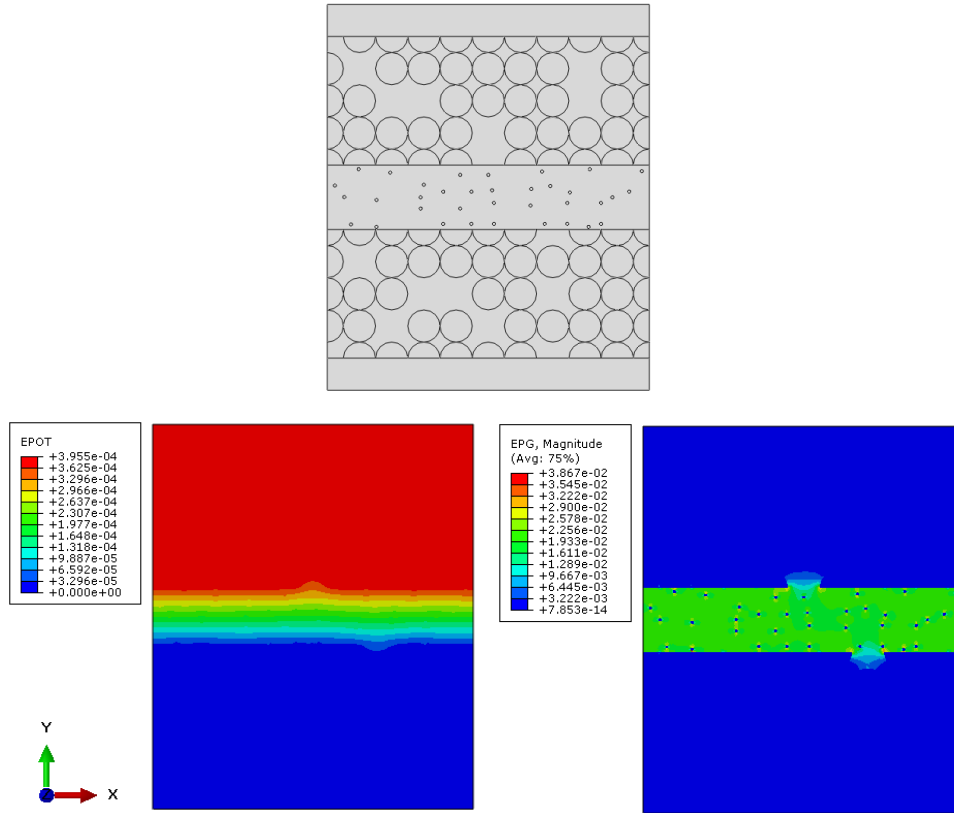
Tüm fiberlerin birbiri ile temas halinde olduğu modelde fiber hacim oranı yaklaşık olarak 0,62'dir. Analiz sonucunda parçanın potansiyel farkı, v , elde edilerek elektriksel iletkenliğe ulaşılmıştır. Sonuç olarak modelin elektriksel iletkenliği 2,5 S/m elde edilmiştir. Elektrik potansiyel gradyanı da beklenildiği gibi direncin en yüksek olduğu matris zengin bölgede en üst değere ulaşmıştır. Ancak düzenli fiber modelinde tüm fiberler birbiri ile temas ettirilmiş ve fiber bölgesi tam dolu şekilde modelleme yapıldığında fiber hacim oranı deneysel çalışmalardaki numunelerden fazla olmaktadır. Fiber hacim oranının deneysel çalışma ile uyumlu olması için 0,57'ye düşürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle rastgele fiberler silinerek fiber hacim oranı 0,57'ye düşürülmüştür. Rastgele silme olayının iletkenliğe etkisini belirleyebilmek için de üç

farklı rastgele silme işlemi ile model oluşturulmuştur. Çizelge 5.9’da tam dolu fiber modeli ve rastgele silme işlemi ile fiber hacim oranı 0,57’ya düşürülmüş üç farklı model görülmektedir.

Çizelge 5.9 Düzenli fiber modellemesi için oluşturulan modeller ve analiz sonuçları.

Oluşturulan Model	Elektrik Potansiyeli	Elektrik Potansiyel Gradyanı	İletkenlik, σ
1			2,5
2			2,46
3			2,28
4			2,25

Sonuçların hepsi deneysel olarak elde edilen iletkenlik sonucundan yüksek çıkmıştır. Ancak beklenildiği gibi fiber hacim oranı düşürülmüş modellerde sonuçlar deneysel sonuca daha yakındır. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise rastgele silme işleminin yani fiberlerin yerinin iletkenlik sonucunu nasıl değiştirdiğidir. Bunun için rastgele fiber silerek elde edilen üç modelin iletkenlik sonuçlarının standart sapmaları hesaplanmış ve 0,11 elde edilmiştir. Bu sonuç göstermektedir ki rastgele silinerek oluşturulan modeller farklı iletkenlik değerleri verse de sonuçlar bir birinden çok büyük farklılıklar göstermemektedir. Çizelge 5.9'a göre elektrik potansiyel gradyanları incelendiğinde, modeli oluştururken varsaydığımız akımın ilerlemek için fiberlerin birbirine temas ettiği noktaları seçtiğini görmekteyiz. Akım ilerleyebileceği bir yol bulduğunda gradyan mavi olarak görülmektedir. Mavi kısımlarda fiber boşlukları dahi olsa akımın boşluk olan yolu değil temas halindeki yolu tercih ettiği dolayısıyla iletkenlikte en önemli etkiye reçine zengin bölgenin sahip olduğu bir kere daha görülmüştür.

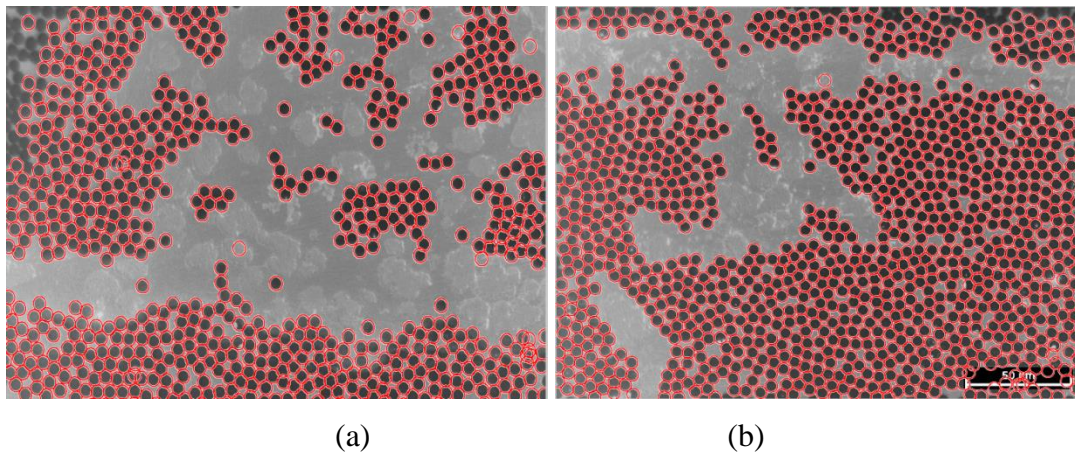


Şekil 5.31 CNT takviyesi yapılmış düzenli fiber modeli ve analiz sonucu.

Rastgel fiber silinerek oluşturulmuş ve iletkenlik sonucu 2,46 S/m olan modele dairesel partiküller şeklinde %1 CNT takviyesi yapıldığında (Şekil 5.31) iletkenliğin 2,53 S/m olduğunu görüyoruz. Bu sonuç deneysel sonuca yakın olmakla birlikte, CNT katkısız numunenin iletkenliği deneysel sonuçtan daha yüksek çıktığı için sağlıklı bir sonuç olduğunu söyleyemeyiz.

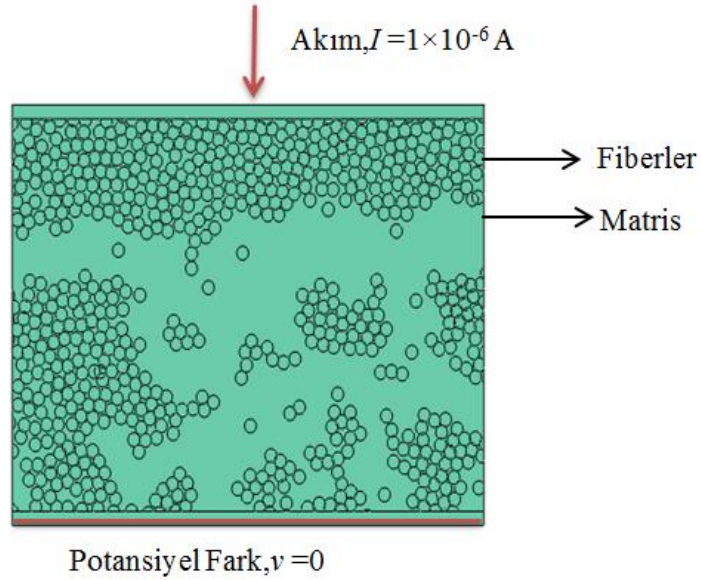
5.3.1.3 Mikroyapı Görüntüsü Modelleme

Yapılan hexagonal ve düzenli fiber modelleme çalışmaları basit ve uygulanabilirlik açısından tercih edilebilecek yöntemler olsa da, kompozit malzemelerin homojen olmayan yapıları nedeniyle bütün tek doğrultulu CFRP kompozit malzemeleri temsil ettikleri söylenemez. Bu duruma çözüm olarak numunelerin mikro yapı görüntülerinden model oluşturma şeklinde bir yaklaşıma gidilmiştir. Bunun için farklı 6 numuneden farklı büyütme ölçeklerinde mikro yapı görüntüleri alınmış ve bu görüntüler MATLAB’da görüntü işleme özelliği kullanılarak “dxf” uzantılı AutoCAD çizimlerine dönüştürülmüştür. Matlab’da mikroyapı görüntüsü üzerinde elde edilen çizimler Şekil 5.32 a ve b’de verilmiştir. Mikro yapı resminin X eksenine göre simetriği olarak elde edilen autocad çizimleri burada “scale” komutu kullanılarak orijinal boyutlarına getirilmiştir. Bu işlem yapıldıktan sonra her bir fiberin yarı çapı 5 µm olarak belirlenmiştir.

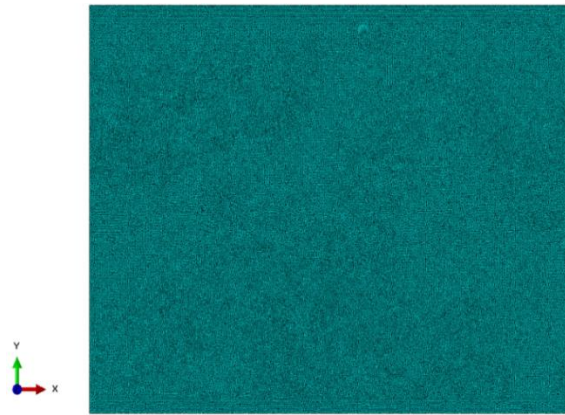


Şekil 5.32 MATLAB’den alınan mikro yapı görüntüleri.

Daha sonra ABAQUS 6.14 sonlu elemanlar programına “import” komutu ile alınan orijinal boyutundaki autocad çizimlerinden model oluşturularak Coupled thermal – electric analizi steady-state olarak gerçekleştirilmiştir. Bu modellere de deneysel methoda uygun olarak gümüş kaplama yapılmıştır. Karbon fiberin elektriksel iletkenliği, σ_{fiber} , 71400S/m, epoksi matrisin elektriksel iletkenliği, σ_{matris} , 5×10^{-7} S/m, yüzeylere kaplanan gümüş boyanın elektriksel iletkenliği, $\sigma_{\text{gümüş}}$, 63000 S/m’ dir. Diğer modellerle aynı şekilde gümüş kaplama üzerinde tek noktadan 1×10^{-6} A yoğunlaştırılmış akım verilmiş, karşı yüzeydeki gümüş yüzeyde elektrik potansiyeli sıfır verilerek modelde sınır şartı oluşturulmuştur. Modeller fiber yoğunluğuna göre 35000-60000 aralığında üçgen eş parçalara bölünmüşlerdir.

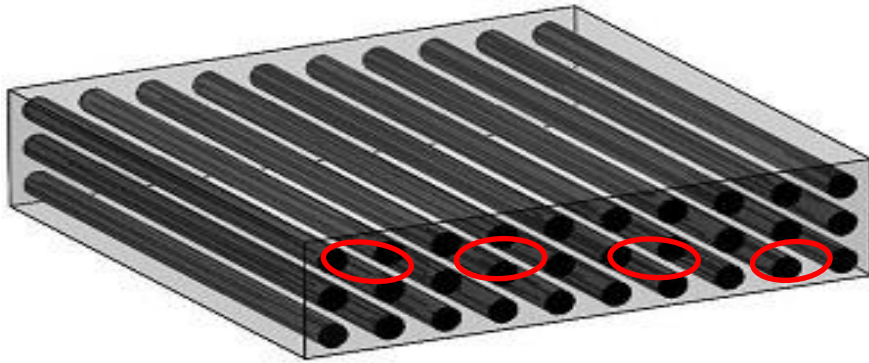


Şekil 5.33 500 büyümeye sahip mikro yapı görüntüsünden elde edilen model.



Şekil 5.34 62245 eş üçgen parçaya bölünmüş 500 büyümeye sahip mikroyapı görüntüsü modeli.

Öncelikle 6 farklı numuneden Şekil 5.35'deki gibi mikro yapı görüntüleri kalınlık doğrultusunda üst köşeden alt çapraz köşeye rastgele olarak alınmıştır. Bütün numunelerimizin kalınlığı yaklaşık olarak 4 mm'dir. Alınan resimler Matlab ve Autocad adımlarından sonra Abaqus 6.14 sonlu elemanlar yazılımına aktarılarak 0,1 x 0,1mm ebatlarında modellere dönüştürülmüşlerdir. Modele uygulanan gümüş kaplamanın kalınlığı 0,0005 mm dir.



Şekil 5.35 500 büyütmeye sahip mikro yapı resimlerinin temsili alınış şekli.

Bu modelleme çalışmasında her bir numuneden alınan mikro yapı resimleri birer direnç olarak düşünülmüş ve bu dirençlerin birbirine Şekil 5.36'daki gibi seri olarak bağlandığı varsayılmıştır. Böylece herbir mikro yapı resmi farklı bir direnç olarak düşünülmüş ve üzerinden geçen yük eşit olarak verilmiştir. Seri bağlı devrelerde üretcin negatif kutbundan çıkan yük dirençlerden geçer ve üretcin pozitif kutbuna ulaşarak devreyi tamamlar. Böylece tüm dirençlerden geçen yük miktarı ya da akım şiddeti aynı olur.

$$I = I_1 = I_2 = I_3 \quad (5.9)$$

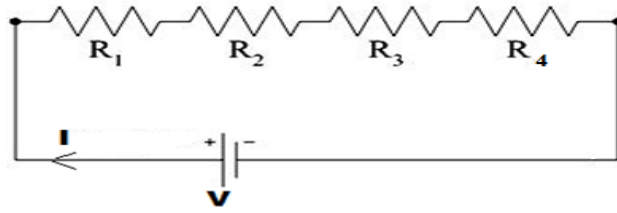
Üretcin uçları arasındaki potansiyel farkı (v) ise dirençlerin uçları arasındaki potansiyel farkların toplamına eşittir.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (5.10)$$

Bir devrede birden fazla direncin yaptığı işi tek başına yapabilen dirence eş değer direnç denir ve $R_{eş}$ olarak gösterilir. Seri bağlı dirençlerin eş değer direnci,

$$R_{eş} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (5.11)$$

şeklindedir. Seri bağlı devrelerde eş değer direnç, seri bağlı dirençlerin en büyüğünden daha büyüktür. Yani dirençler seri bağlandığında devrenin direnci artar, devreden geçen akım şiddeti azalır. Seri bağlı dirençlerin her birinin uçları arasındaki potansiyel farkı ise direncin büyüklüğü ile doğru orantılıdır.



Şekil 5.36 Seri bağlı devre.

Çizelge 5.10'da her bir numuneden elde edilen görüntüler ve bunların analiz sonucunda hesaplanan direnç değerleri verilmiştir. Parçanın iletkenlik değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$R_{eş} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$l_{top} = l_{1.numune} + l_{2.numune} + l_{3.numune} + l_{4.numune}$$

$$\sigma_{top} = \frac{l_{top}}{R_{eş} \times A}$$

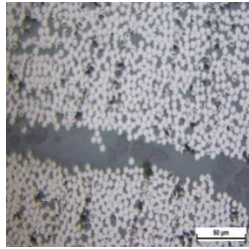
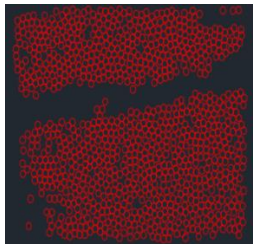
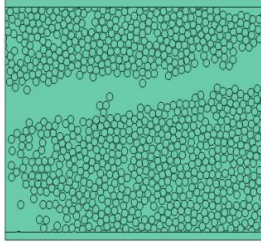
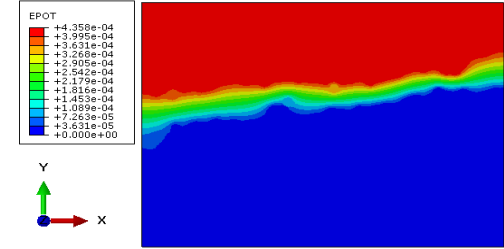
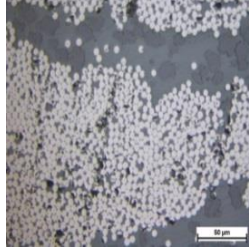
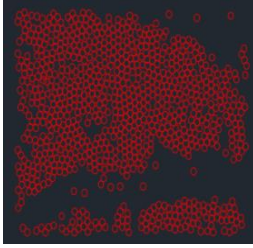
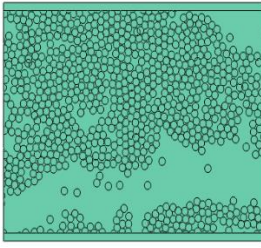
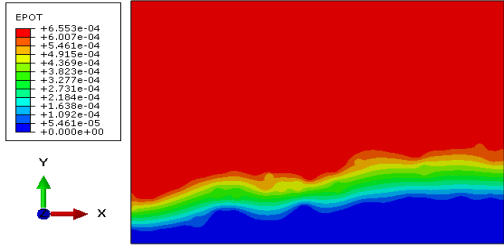
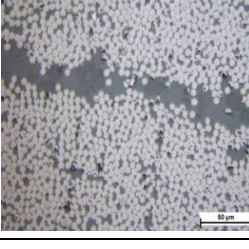
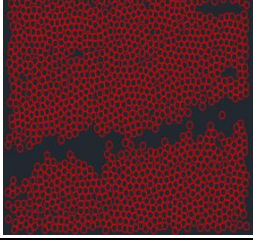
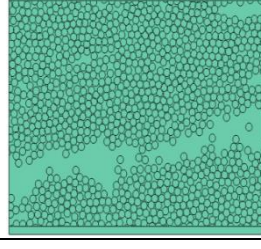
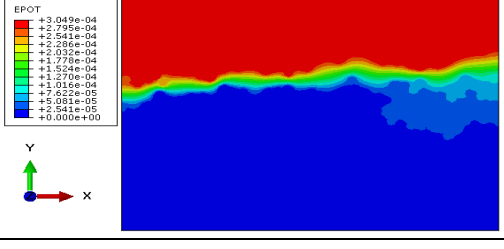
Bir örnek üzerinden açıklamak gerekirse, 1. Numuneden alınan dört farklı mikro yapı resimleri için:

$$R_{eş} = 435 + 655 + 304 + 664 = 2058 \, \Omega$$

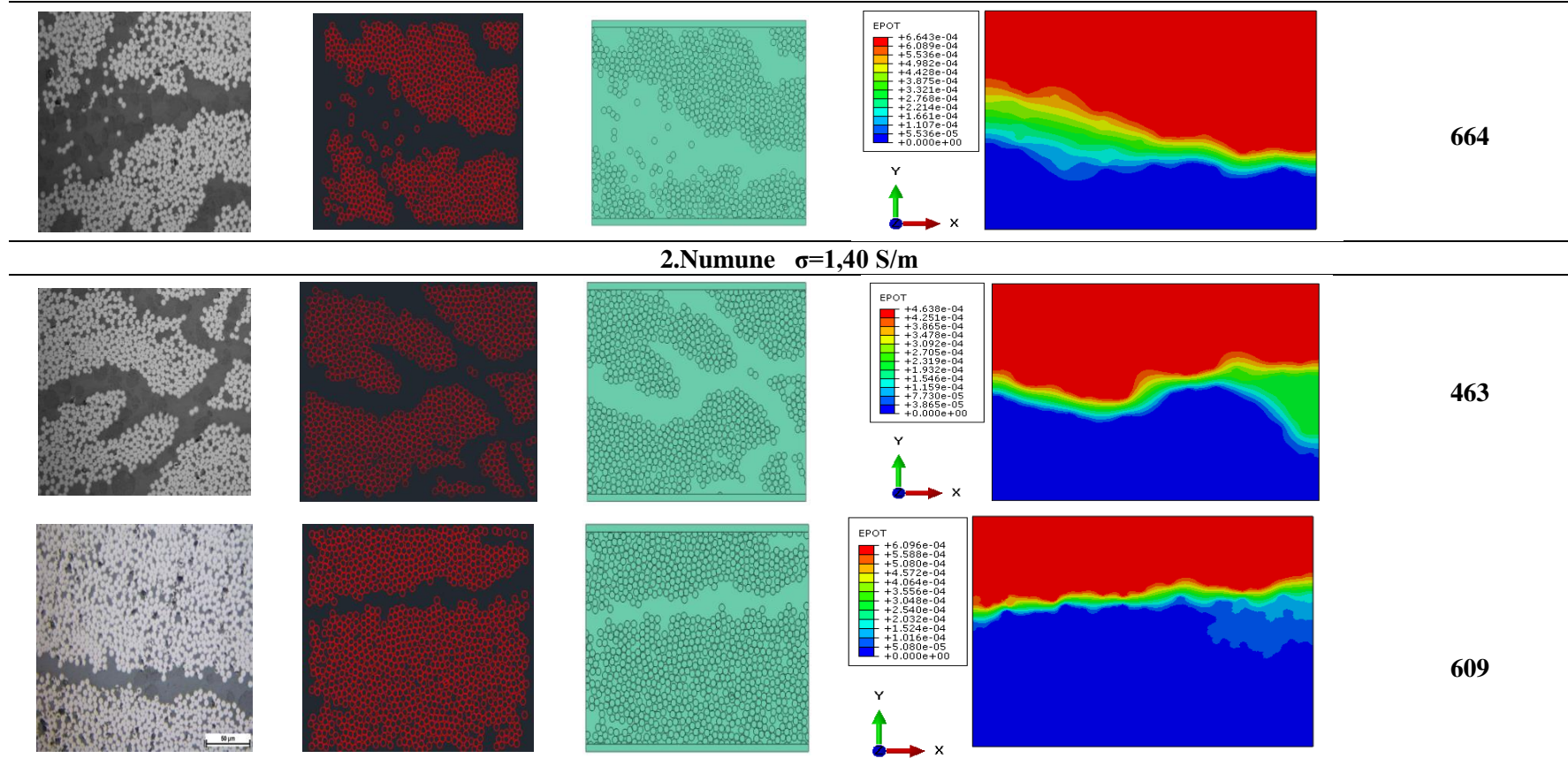
$$l_{top} = 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,1 = 0,4 \, \text{mm}$$

$$\sigma_{top} = \frac{0,4}{2058 \times (1 \times 0,1)} = 1,19 \times 10^{-3} \frac{S}{mm} = 1,19 \, S/m$$

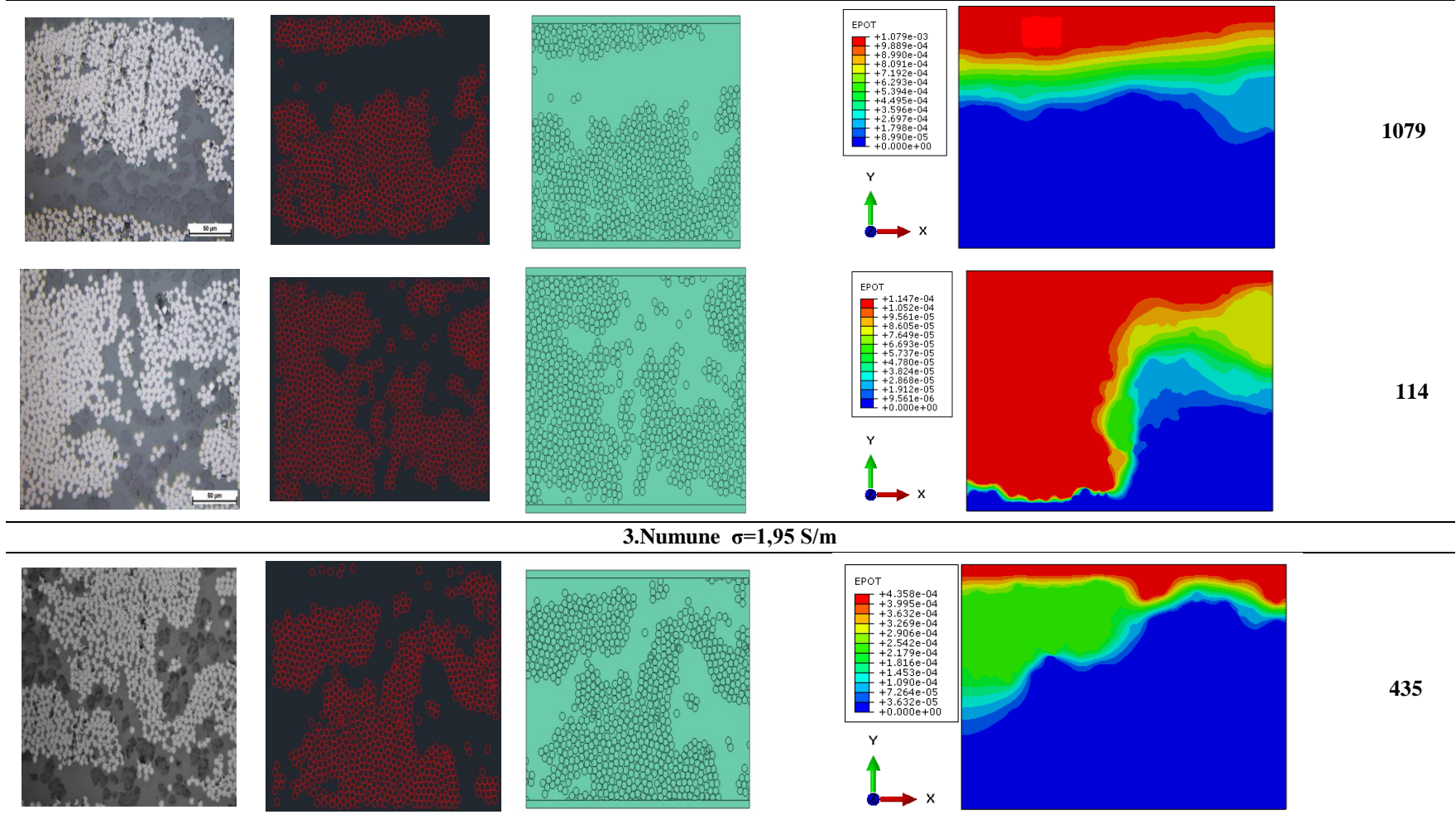
Çizelge 5.10 500 büyütme ile alınan mikro yapı görüntüleri.

Mikro Yapı Resmi (500X)	Görüntü işleme ile Auto-Cad'e aktarılmış mikroyapı resmi	Auto-Cad'den Abaqus'e aktarılan mikroyapı modeli	Abaqus analizi sonucu	R (ohm)
1.Numune $\sigma=1,19$ S/m				
				435
				655
				304

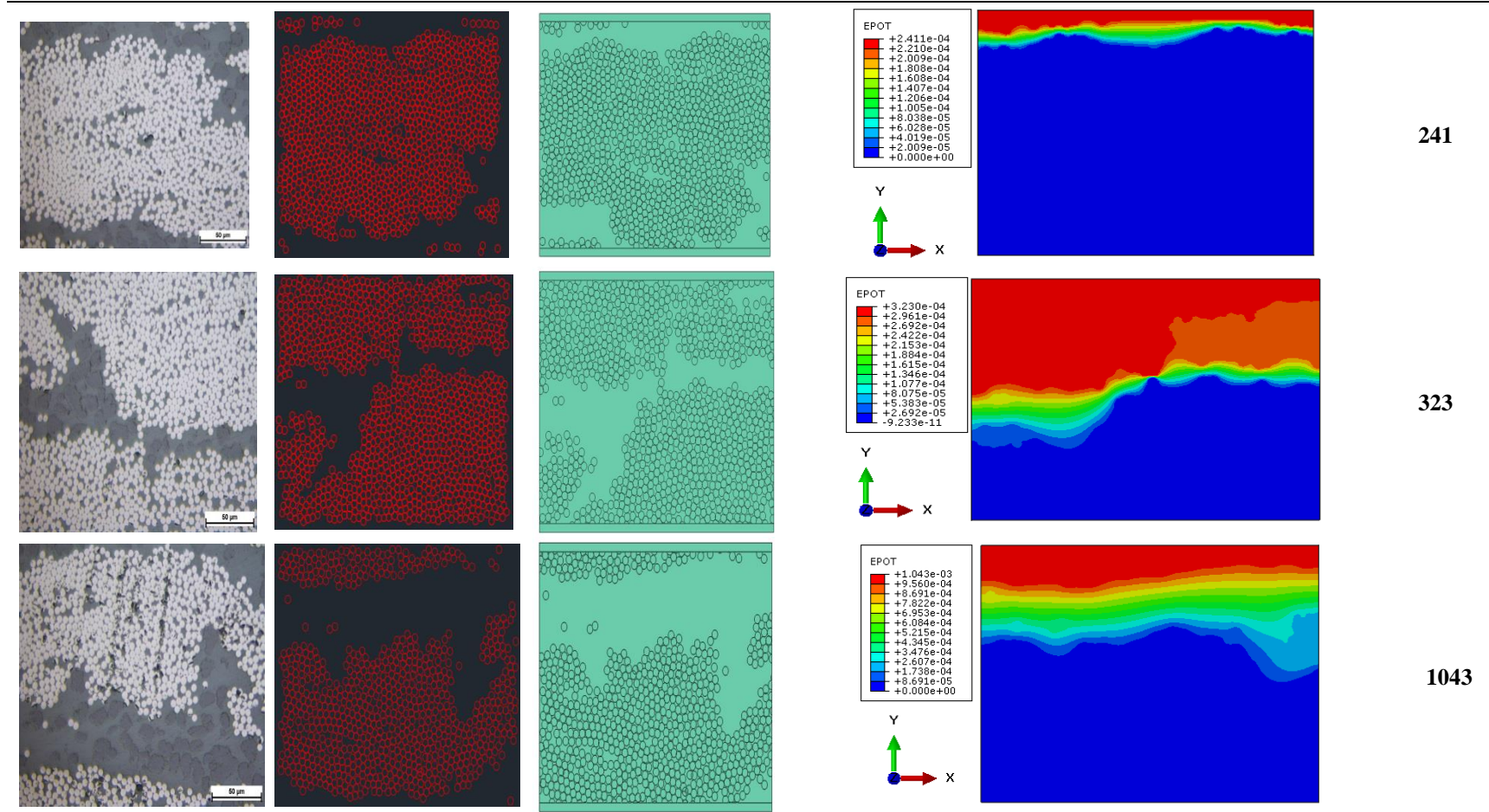
Cizelge 5.10 (Devam) 500 büyütme ile alınan mikro yapı görüntüleri.



Çizelge 5.10 (Devam) 500 büyütme ile alınan mikro yapı görüntüleri.

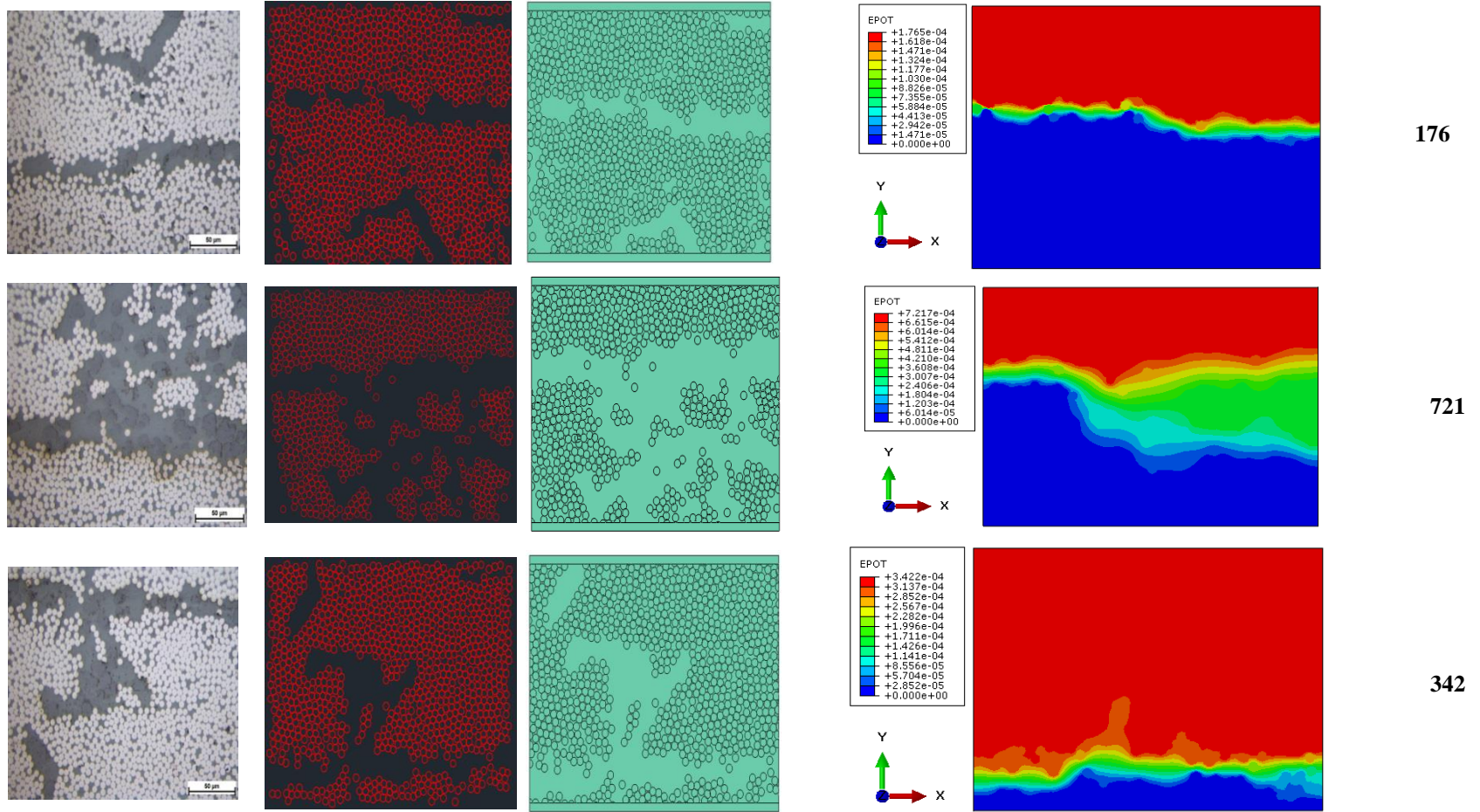


Çizelge 5.10 (Devam) 500 büyütme ile alınan mikro yapı görüntüleri.

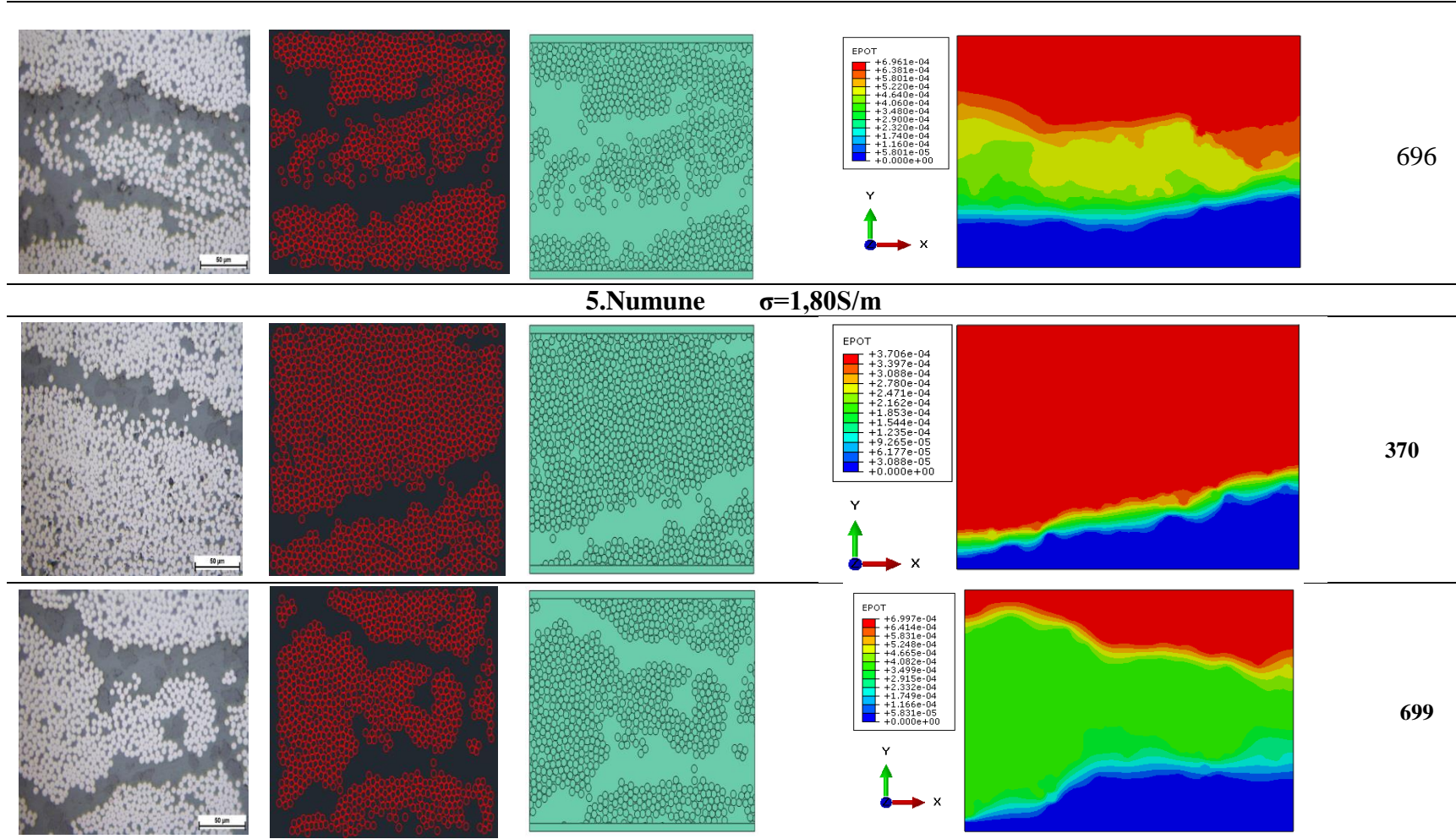


Çizelge 5.10 (Devam) 500 büyütme ile alınan mikro yapı görüntüleri.

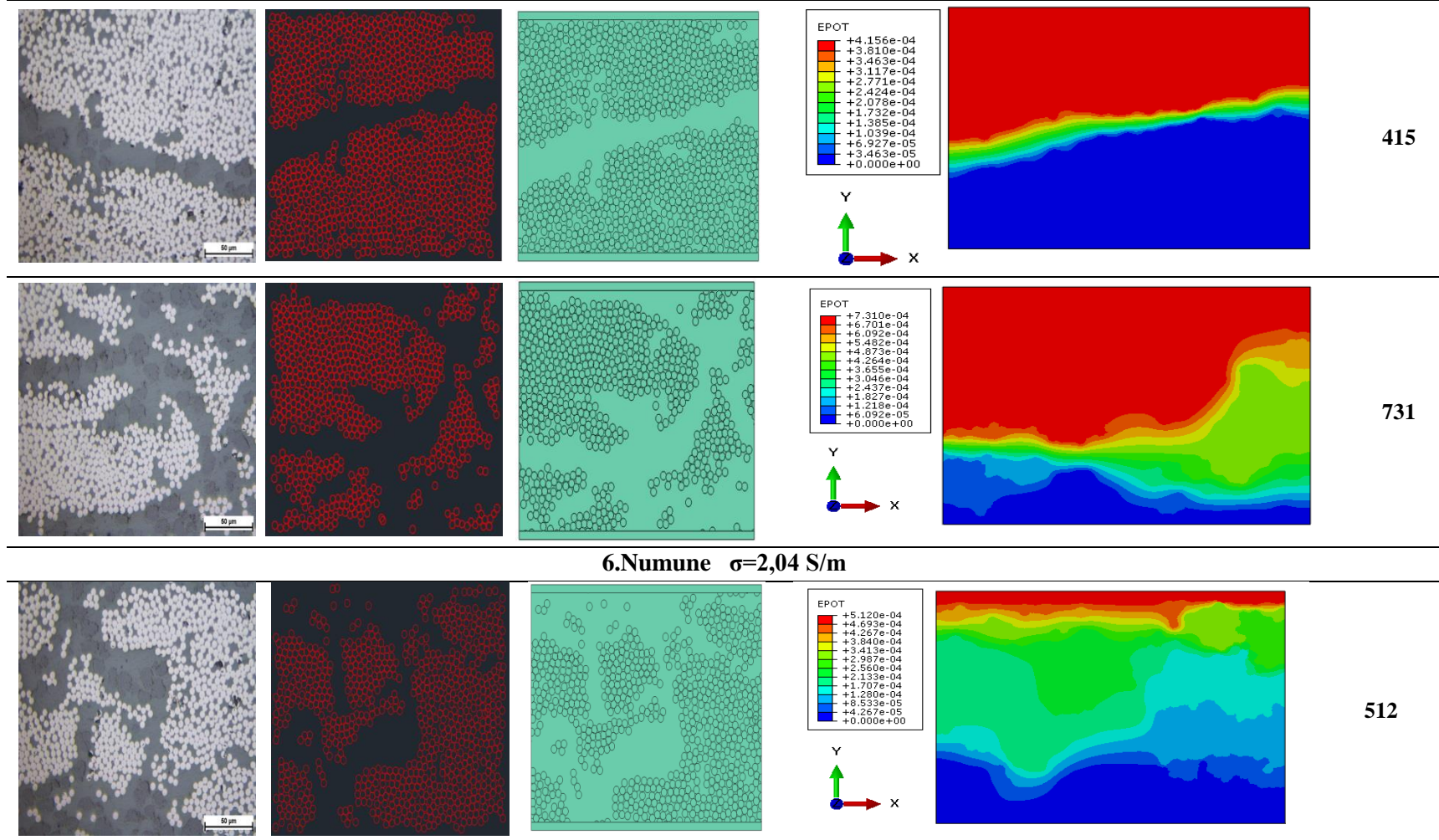
4.Numune $\sigma=2,06$ S/m



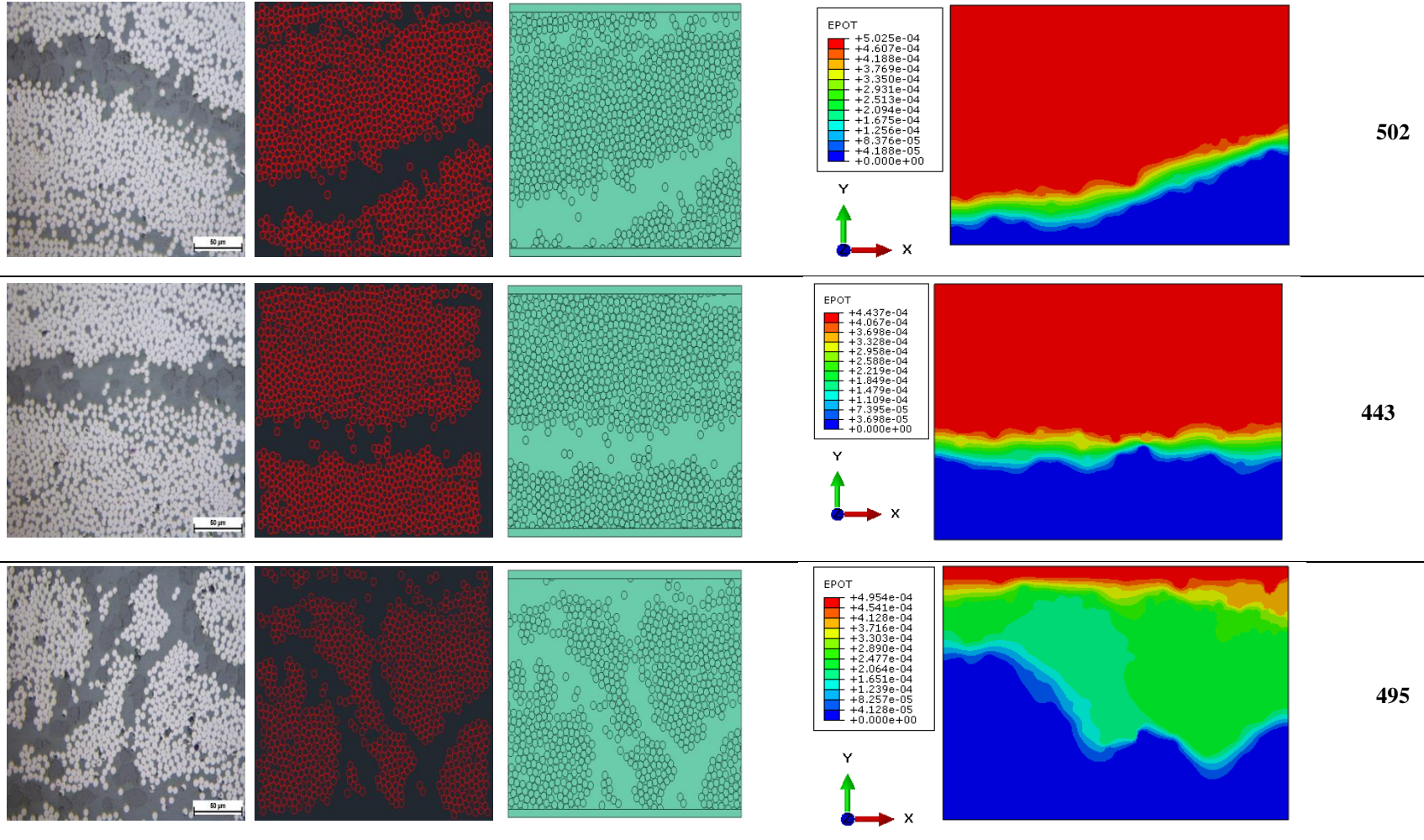
Çizelge 5.10 (Devam) 500 büyütme ile alınan mikro yapı görüntüleri



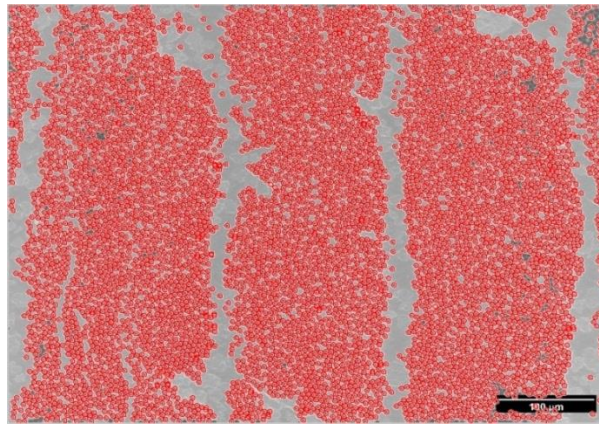
Çizelge 5.10 (Devam) 500 büyütme ile alınan mikro yapı görüntüleri



Çizelge 5.10 (Devam) 500 büyütme ile alınan mikro yapı görüntüleri

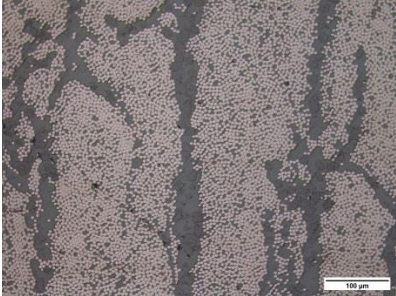
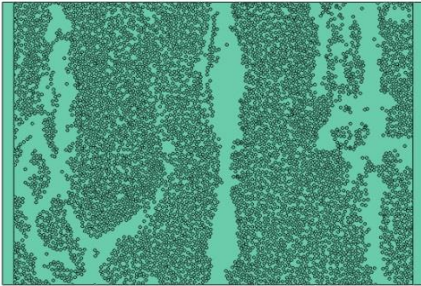
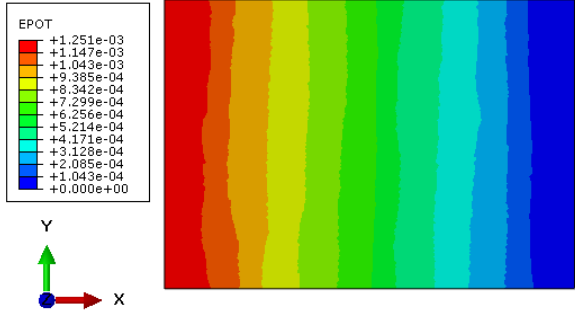
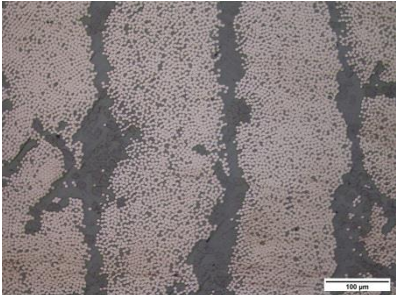
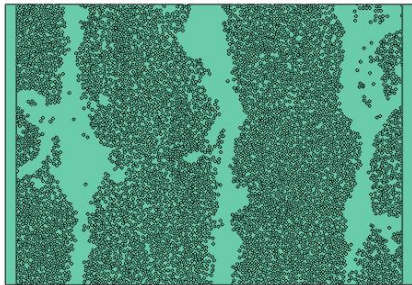
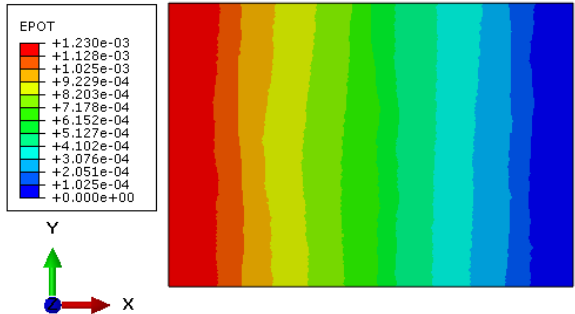


Çizelge 5.10’da verilen 500 büyütmeye sahip mikroyapı resimleri ile yapılan Abaqus analizleri sonuçlarında her bir numune için elde edilen iletkenlik değerleri 1,19 S/m ile 2,06 S/m arasında değişmektedir. Deney numunelerinde yapıldığı gibi tüm sonuçların ortalaması alındığında ise iletkenlik değeri 1,74 S/m olarak hesaplanmaktadır. İletkenlik sonuçlarının standart sapma değeri ise 0,3 olarak hesaplanmıştır. Mikro yapı resimleri ile analiz yapılmasının amacı kompozit malzemelerin yapısında bulunan farklılıkları modellemeye en iyi şekilde yansıtmaktadır. 6 numune üzerinden elde edilen sonuçlar ise bize bu yöntemin iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Kalınlık boyunca 500 büyütme ile alınmış bir mikroyapı resmi yaklaşık olarak 250 µm lik bir uzunluğu yansıtmaktadır. Her numuneden 4 mikroyapı resmi alındığı için kalınlığı 4mm olan numunenin 1 mm uzunluğundan geçen akım dikkate alınmış olmaktadır. Daha fazla mikro yapı resmi analizi ile deneysel sonuca daha fazla yaklaşılabılır ancak bu da daha fazla zaman harcanması gereken bir yöntem olacaktır. Bu durumda daha düşük büyütmedeki mikro yapı resimleri ile çalışıldığında daha fazla bir yüzey dikkate alınmış olacağı için sonuçların deneysel sonuçlara daha yakın olacağı tartışmasızdır. Bu nedenle bir sonraki çalışmada 200 büyütmeye sahip mikro yapı görüntüleri ile analiz yapılmıştır. Matlab’den 0,95 hassasiyetle alınan çizim Şekil 5.37’de verilmiştir. 6 numune üzerinde çalışılmış ve her birinden rastgele 3 mikro yapı görüntüsü alınmıştır. 500 büyütme ile alınmış görüntüler gibi bu görüntülerin de her biri birer direnç olarak düşünülmüş ve birbirine seri bağlı olduğu varsayılmıştır. Abaqus’te oluşturulan 0,72 x 0,52 mm boyutundaki modeller 200000-250000 arasında eş parçaya bölünmüş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 5.11’de verilmiştir.

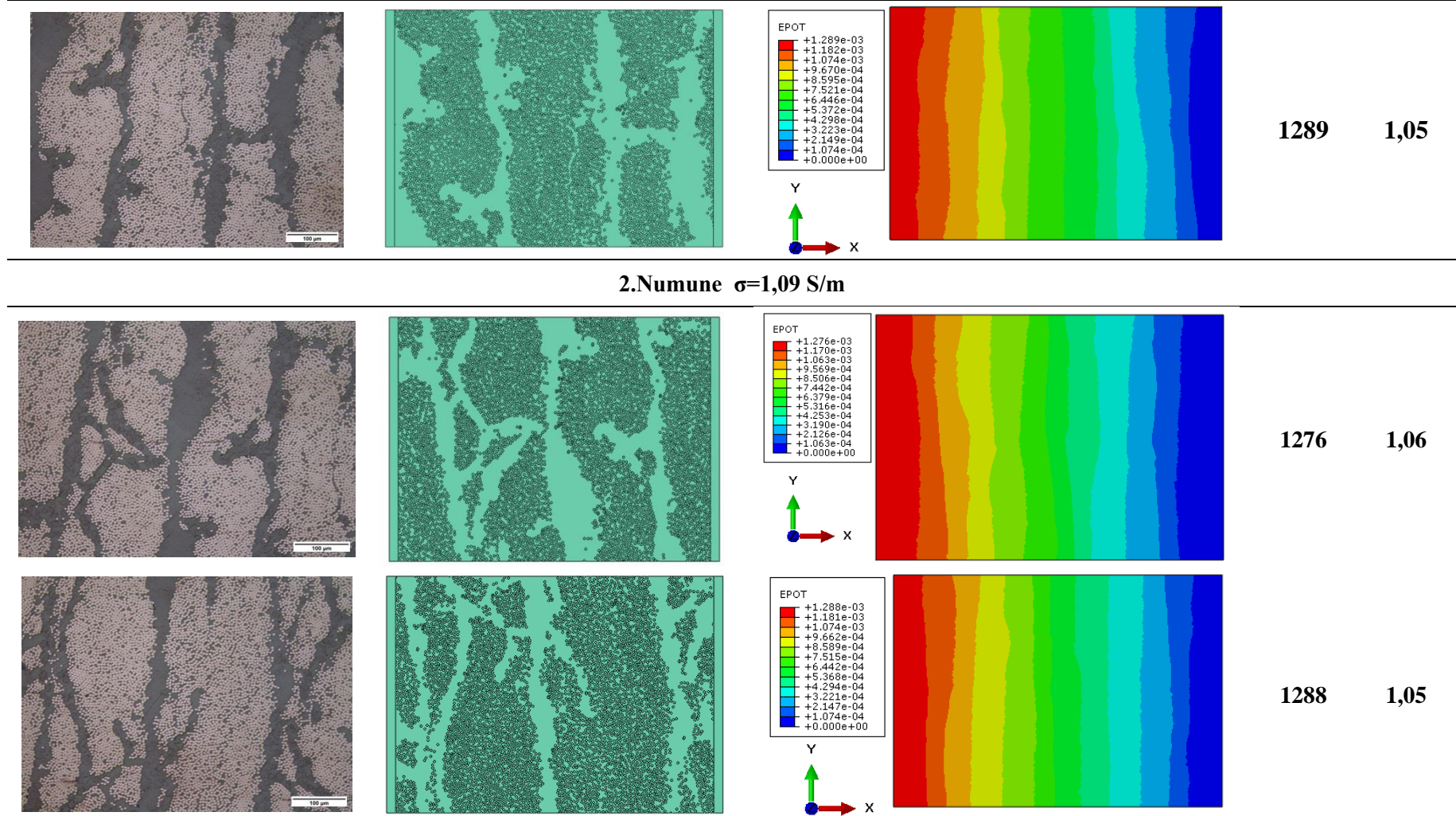


Şekil 5.37 MATLAB’den alınan 200X mikroyapı görüntüsü.

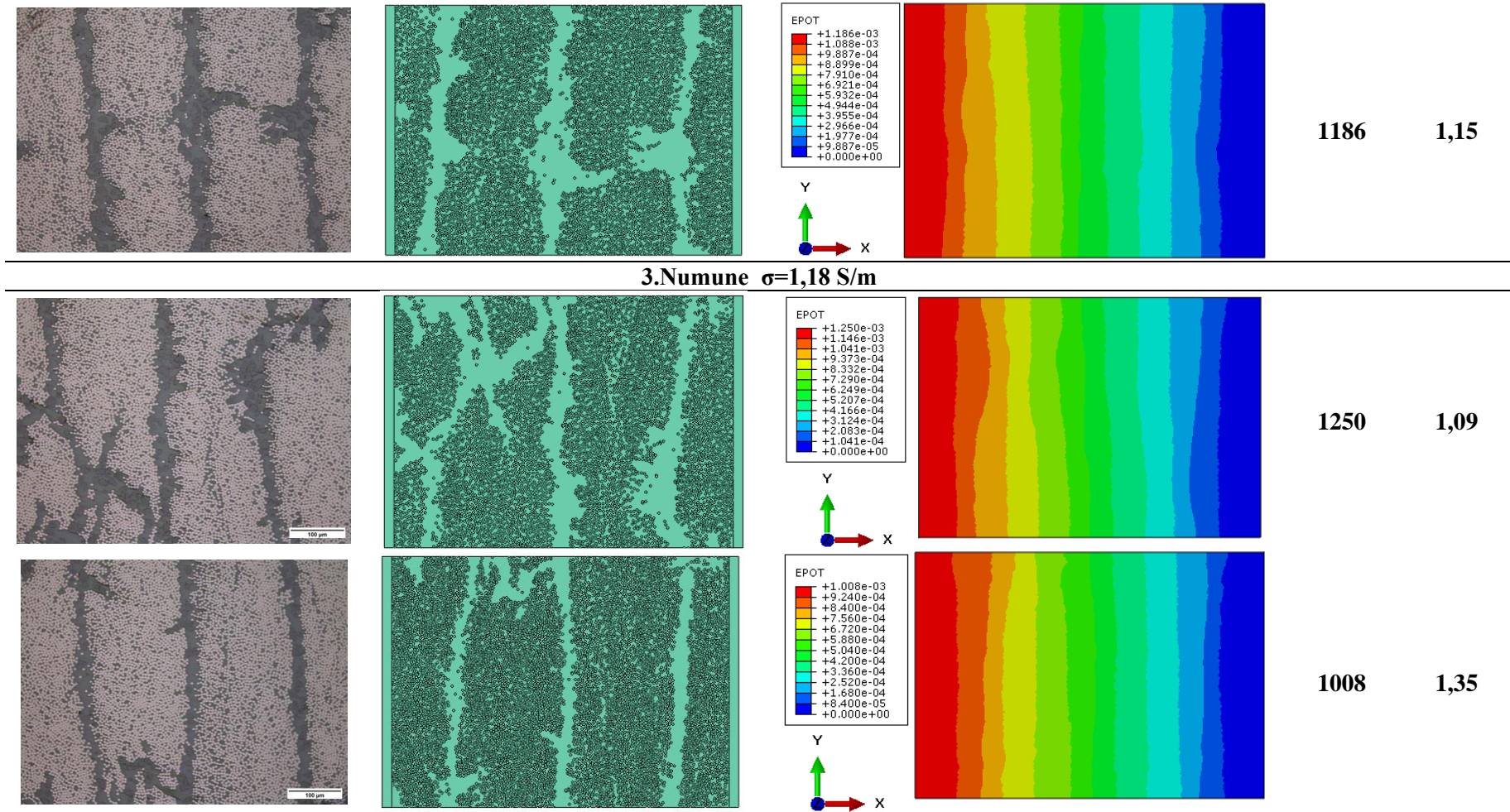
Çizelge 5.11 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.

Mikro Yapı Resmi (200X)	Auto-Cad'den Abaqus'e aktarılan mikroyapı modeli	Abaqus analizi sonucu	R (ohm)	σ (S/m)
1.Numune $\sigma=1,08$ S/m				
		 <p>EPOT</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.251e-03 +1.147e-03 +1.043e-03 +9.385e-04 +8.342e-04 +7.299e-04 +6.256e-04 +5.214e-04 +4.171e-04 +3.128e-04 +2.085e-04 +1.043e-04 +0.000e+00 <p>Y ↑ X →</p>	1251	1,09
		 <p>EPOT</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.230e-03 +1.128e-03 +1.025e-03 +9.229e-04 +8.203e-04 +7.178e-04 +6.152e-04 +5.127e-04 +4.102e-04 +3.076e-04 +2.051e-04 +1.025e-04 +0.000e+00 <p>Y ↑ X →</p>	1230	1,1

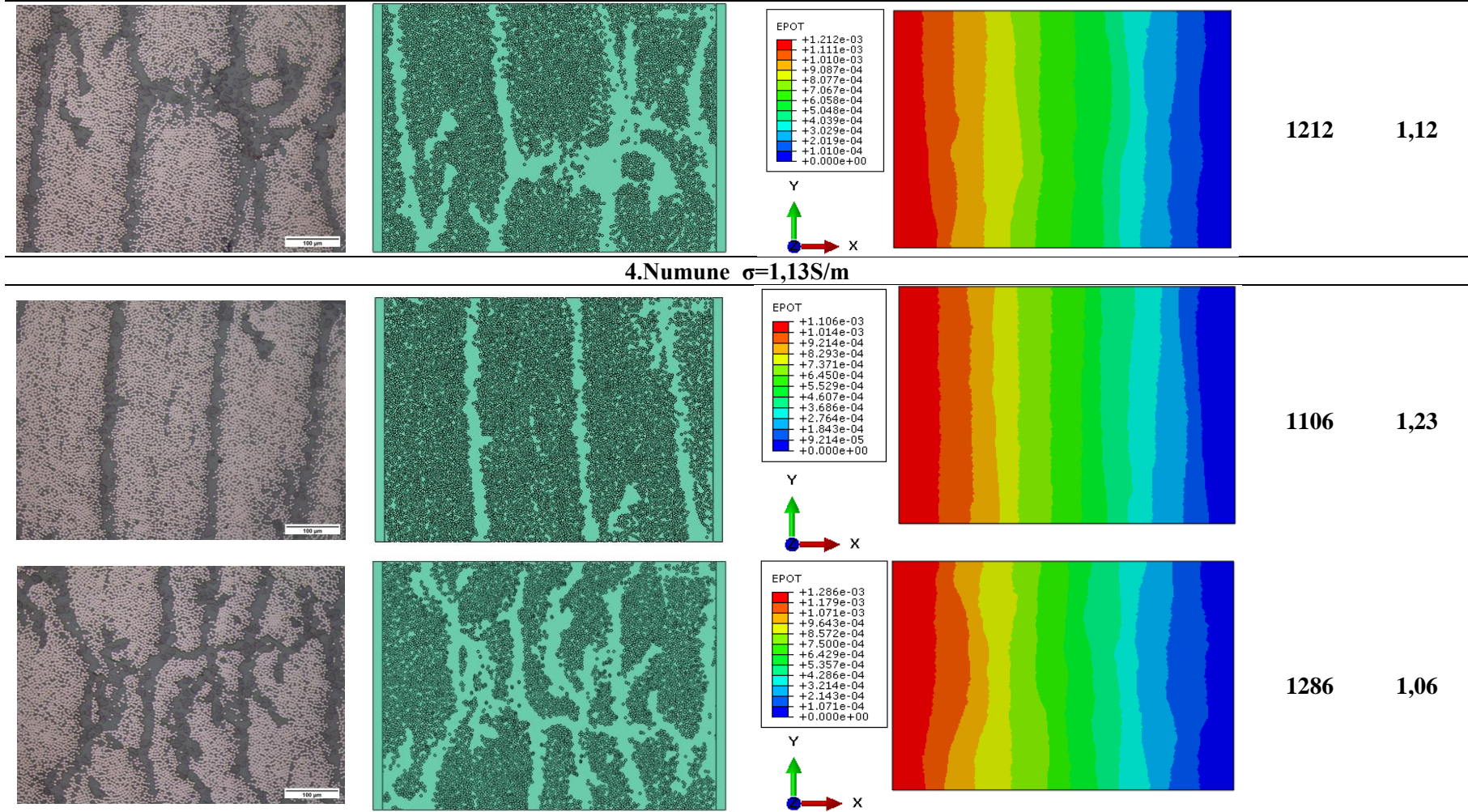
Çizelge 5.11 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



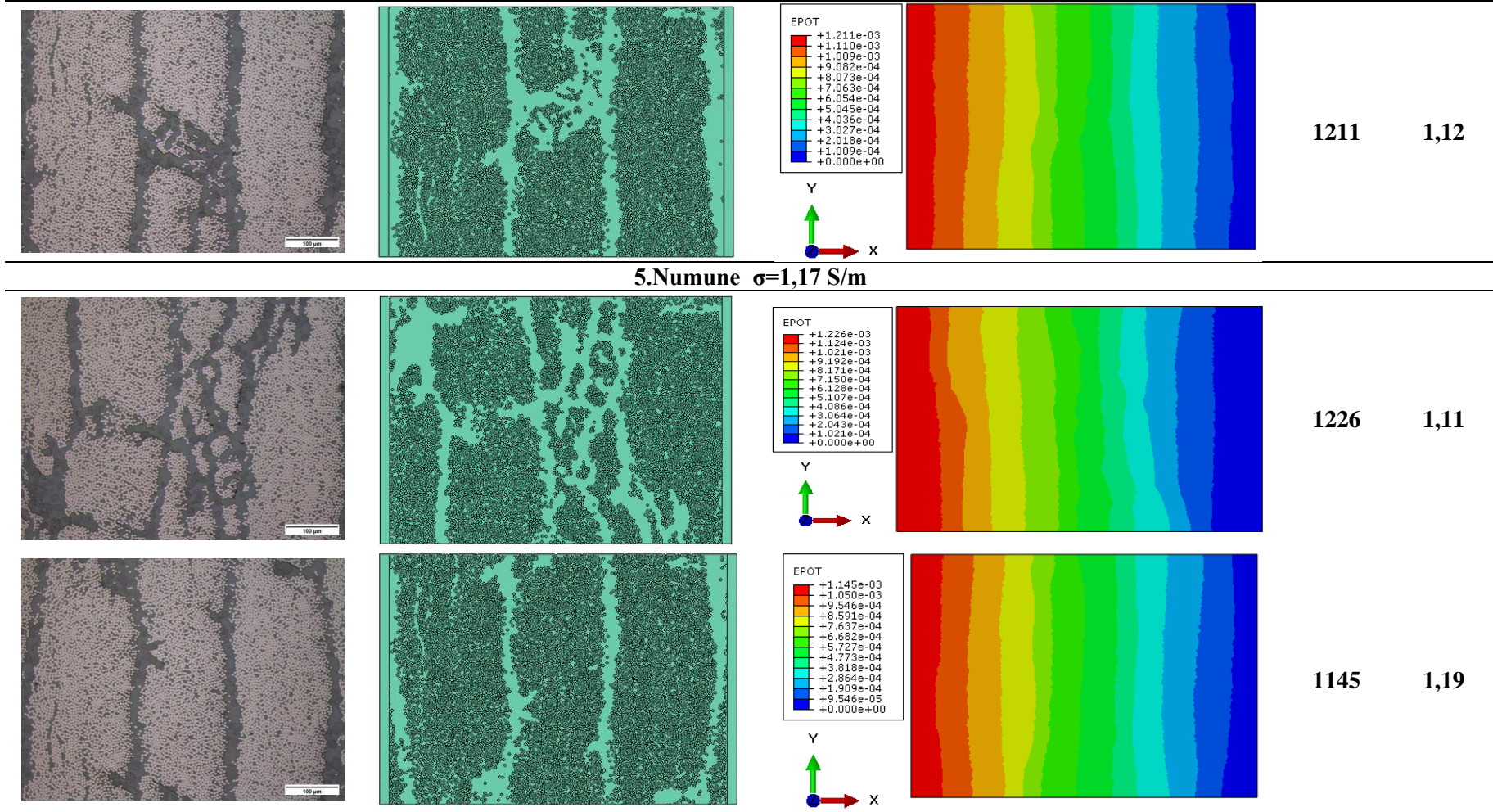
Çizelge 5.11 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



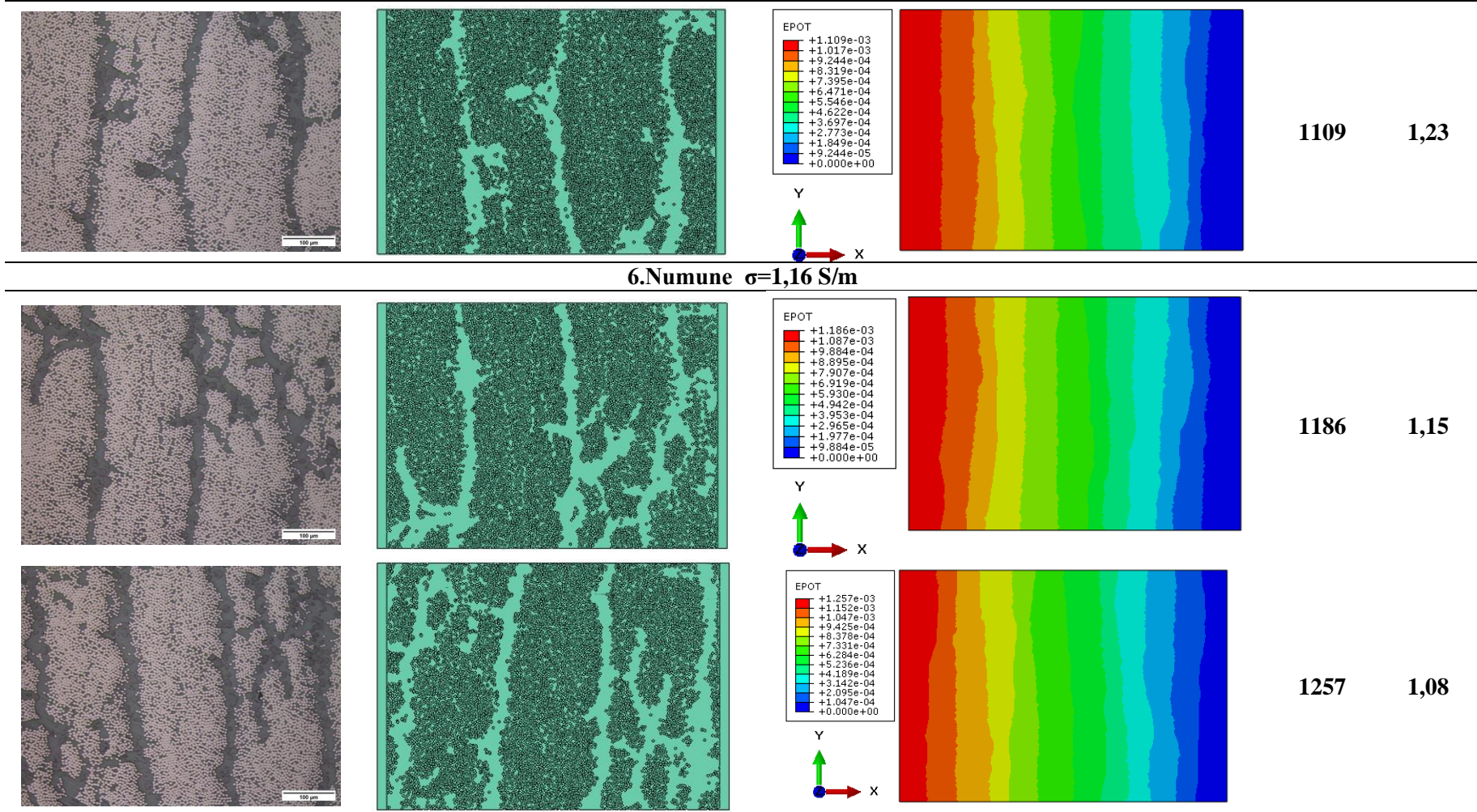
Çizelge 5.11 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



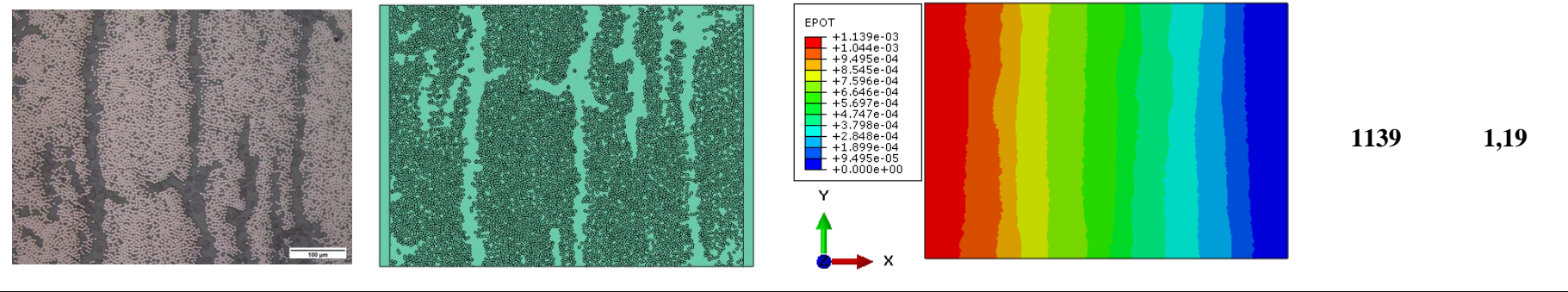
Çizelge 5.11 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



Çizelge 5.11 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



Çizelge 5.11 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



Çizelge 5.11’de verilen 200 büyütmeye sahip mikroyapı resimleri ile yapılan Abaqus analizleri sonuçlarında her bir numune için elde edilen iletkenlik değerleri 1,08 S/m ile 1,18 S/m arasında değişmektedir. Sonuçların standart sapma değeri 0,04 olup 500 büyütme ile elde edilen sonuçlara göre oldukça fazla tutarlılık göstermektedir. Deney numunelerinde yapıldığı gibi tüm sonuçların ortalaması alındığında ise iletkenlik değeri 1,13 S/m olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç deney sonucunda elde edilen 1,15 S/m değerine çok yakındır. 200 büyütmedeki mikro yapı resimleri yaklaşık olarak 630 µm lik bir uzunluğu yansıtmaktadır. Her numuneden 3 mikroyapı resmi alındığı için yine yaklaşık olarak 1,9 mm uzunluğundan geçen akım dikkate alınmış olmaktadır. Böylece daha az görüntü ile daha fazla kalınlık elde edilmiş ve görüntülerin numuneyi yansıtma miktarı artmıştır. Ayrıca Çizelge 5.11’e göre, mikro yapı resimlerinin her birisi tek başına düşünüldüğünde dahi elektiriksel iletkenlik değerleri mantıklı sonuçlar vermektedir ve standart sapmaları 0,07’dir. Sonuçlar deneysel sonuç ile karşılaştırıldığında oldukça yakın oldukları görülmektedir.

5.3.2 Termal İletkenlik Modelleme Çalışmaları ve Sonuçları

Katı bir maddenin komşu bölgelerinde oluşan sıcaklık farklılıkları, ısı transferinin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu akışın nedeni atomsal titreşimler (fononlar) ve serbest elektronların enerjiyi sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru taşınmasıdır. Bu tür ısı akışına kondüksiyonla ısı transferi veya sadece iletim denir.

Kondüksiyonla ısı akışının temel denklemi, izotermal bir yüzeyden geçen ısı akış hızı ve yüzeydeki sıcaklık dalgalanmaları arasındaki orantı ile verilir ve buna Fourier Kanunu denilmektedir:

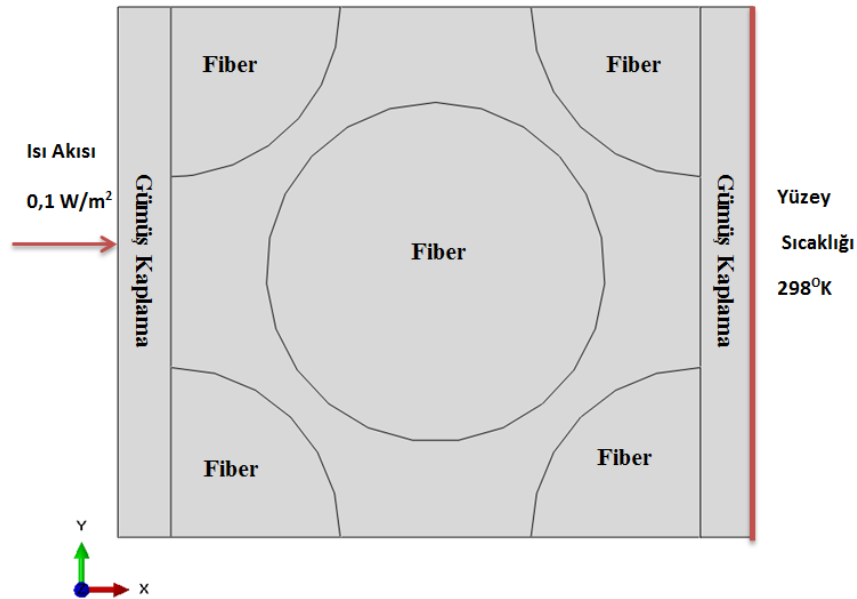
$$\frac{q}{A} = - \lambda \frac{\Delta T}{X} \quad (5.9)$$

Burada A; izotermal yüzeyin alanını (m²), q; birim zamanda yüzeye normal yönden geçen ısı transfer oranını (W), ΔT; iki yüzey arasındaki sıcaklık farkını (K), X; yüzeye dik doğrultuda ölçülen mesafeyi (m), λ ise termal iletkenlik katsayısını vermektedir, birimi Watt/m² dir. Negatif işaret, ısı akışının sıcaktan soğuk tarafa doğru olduğunu gösterir. A alanı ısı akışına dik bir yüzeydir;

Tez çalışmasının termal iletkenlik modelleme aşamasında Abaqus 6.14 sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak tek doğrultulu T800/M21 kompozit malzemelerinin kalınlık doğrultusunda termal iletkenliği üzerine çalışmalar yapılmıştır. Önerilen tüm modeller için malzeme özellikleri şu şekilde verilmiştir: Karbon fiberin termal iletkenlik katsayısı, λ_{fiber} ; 35,1 W/mK (İnt.Kyn.8). Epoksi matrisin termal iletkenlik katsayısı, λ_{matris} ; 0,2 W/mK (Hussan 2012, Kostagiannakopoulou *et al.* 2016), yüzeylere kaplanan gümüş boyanın termal iletkenlik katsayısı, $\lambda_{\text{gümüş}}$, 400 W/mK dir. Programda Heat-transfer analizi steady-state olarak gerçekleştirilmiştir. Gümüş kaplama üzerinde tek noktadan 0,1 W/m² ısı akısı uygulanmış, karşı taraftaki gümüş yüzeyin sıcaklığı 298 K verilerek modelde sınır şartı oluşturulmuştur (Şekil 5.38). Element type, S4R, Thermal Electric seçilmiştir. Aşağıda önerilen modeller sırasıyla anlatılmaktadır:

5.3.2.1 Hexagonal Model

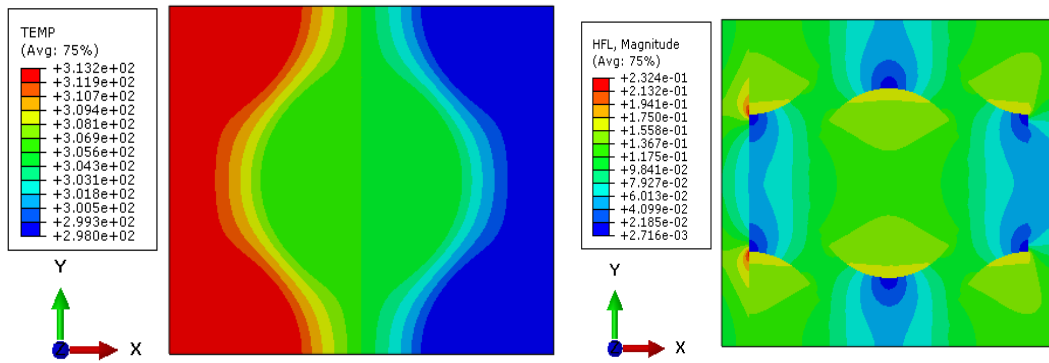
Termal iletkenlik için hexagonal modelleme çalışmasında Şekil 5.37’de verilen model üzerinden çalışılmıştır. Şekilde yükleme koşulları görülen modelin fiber hacim oranı, V_f , 0,57’dir. Model 14000 eş parçaya bölünmüştür. Analiz sonucunda parçanın iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı, ΔT , elde edilerek formülde yerine koyulmuş ve kompozit malzemenin termal iletkenlik katsayısına ulaşılmıştır.



Şekil 5.38 Hexagonal model, uygulanan yük ve sınır şartı.

q/A ; birim zamanda birim alandaki ısı geçişi miktarıdır ve ısı akısı olarak tanımlanmaktadır. Birimi watt/m^2 dir.Abaqus sonlu elemanlar programında step aşamasında heat-transfer analizi uygulandıktan sonra verilen yük, ısı olarak değil ısı akısı olarak verilmektedir. Modellememiz iki boyutlu olduğu ve diğer ölçüler mm olarak verildiği için program modelin derinliğini 1 mm olarak almaktadır.

Şekil 5.39’da 0,57 fiber hacim oranına sahip hexagonal modelin termal iletkenlik analiz sonucu verilmektedir. Sonuca göre $\Delta T = 15 \text{ K}$ ’dir. Buna göre ;



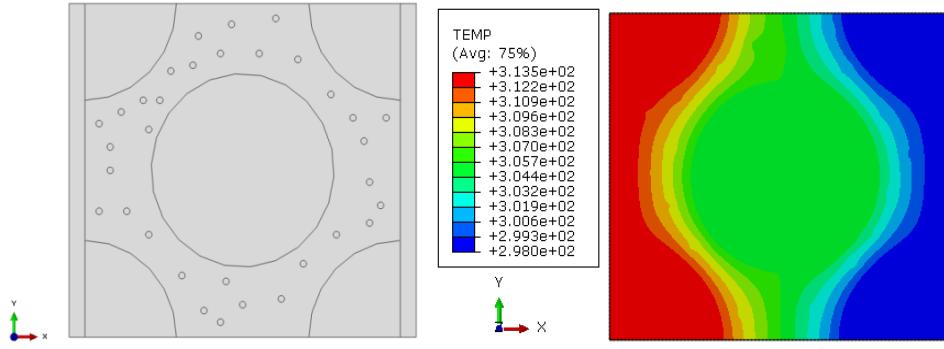
Şekil 5.39 Hexagonal model analiz sonucu.

$$\frac{q}{A} = -\lambda \times \frac{\Delta T}{X}$$

$$0,1 = -\lambda \times \frac{15}{0,1} \text{ ise } \lambda = 6,6 \times 10^{-4} \text{ W/mmK}$$

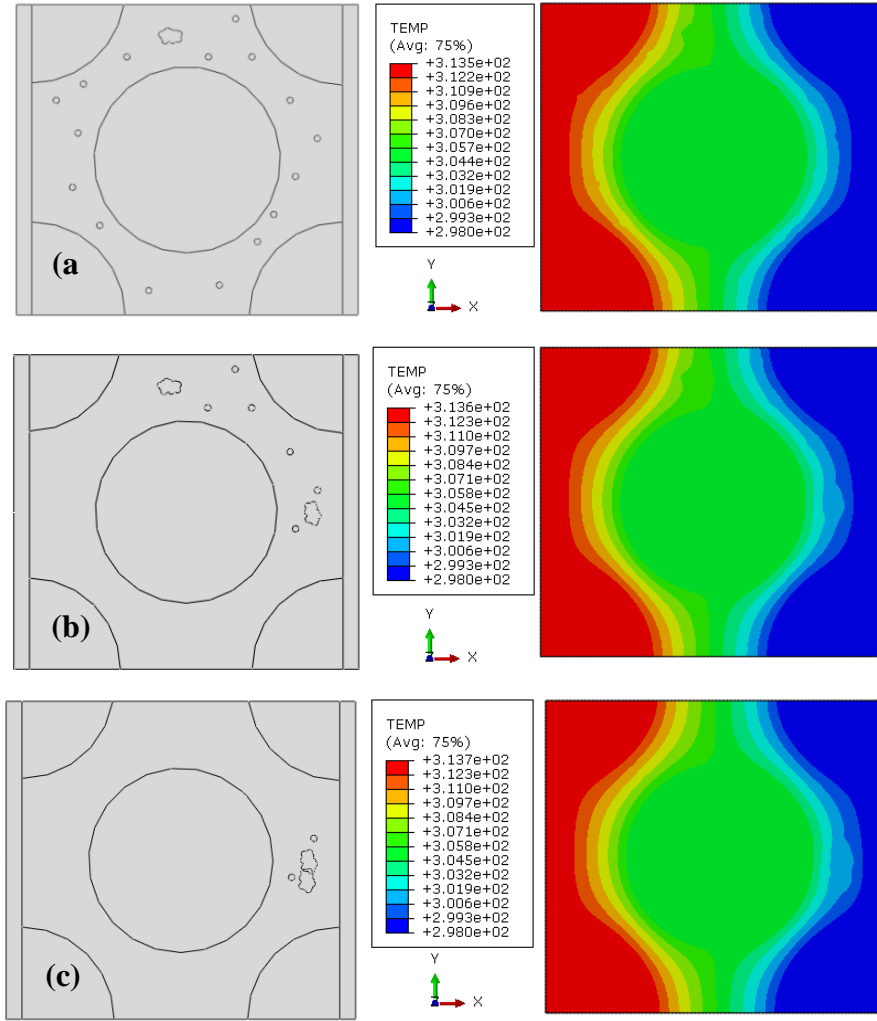
$$\lambda = 0,66 \text{ W/mK dir.}$$

Elde edilen bu sonuç, deneysel olarak elde edilen ve kalınlık doğrultusunda termal iletkenlik katsayısı 0,69 W/mK olan T800/M21 kompozit malzemesinin sonucuna oldukça yakındır. Daha sonra hexagonal modellerde CNT takviyesinin termal iletkenlik üzerine etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Şekil 5.40’daki gibi dairesel partiküller şeklinde dağıldığı model ve %1 CNT takviyesi yapılmış modelin yüzey sıcaklığı sonucu verilmektedir.CNT’lerin termal iletkenliği 3000 W/mK (İnt.Kyn.13) olarak alınmıştır.



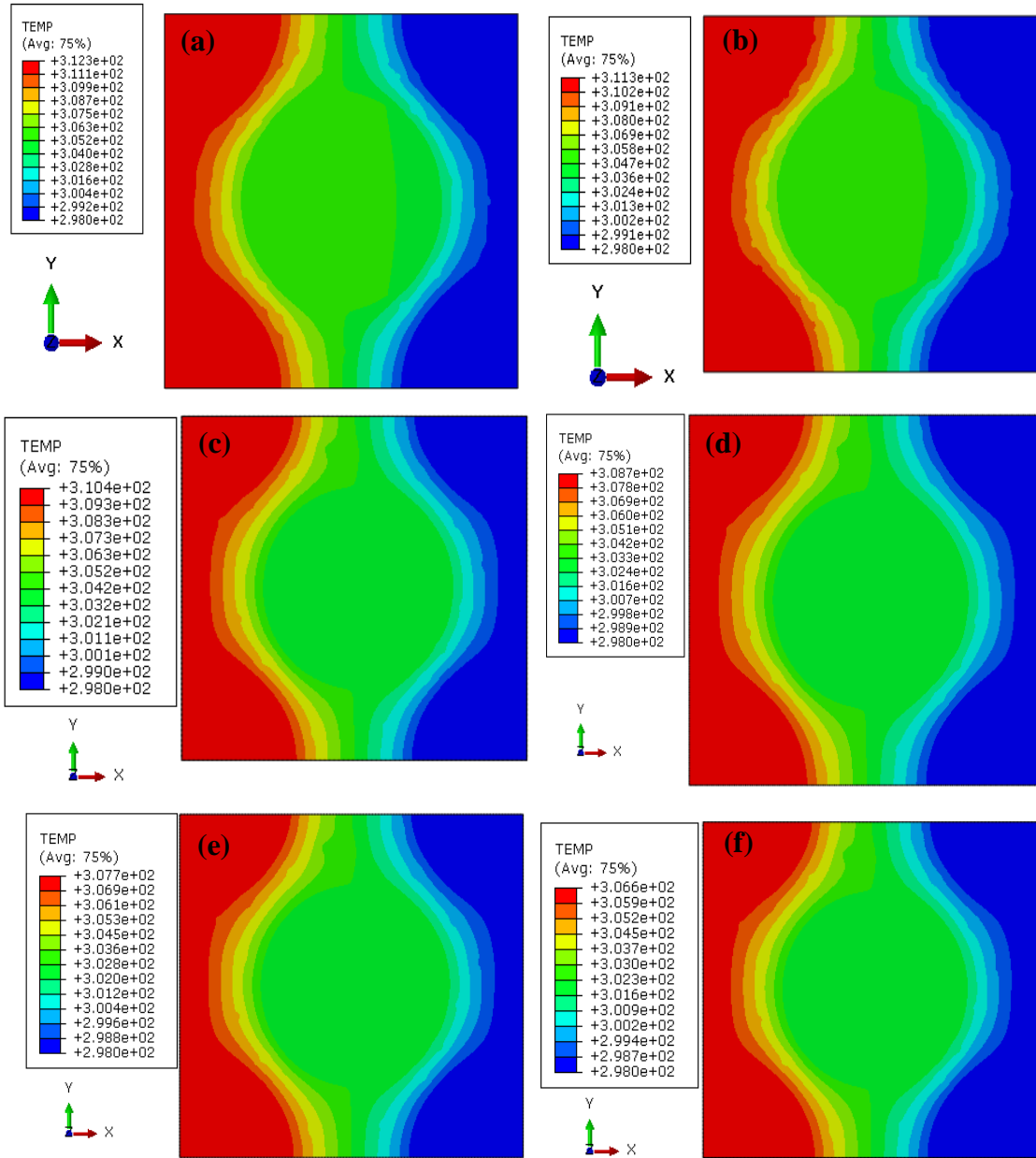
Şekil 5.40 Dairesel partiküller şeklinde % 1 CNT ilavesi yapılmış modellerin analiz sonuçları.

Analize dairesel CNT'lerin olduğu modelden elde edilen termal iletkenlik kat sayısı 0.68 W/mK'dir. CNT takviyesiz numunelerle karşılaştırdığımızda dairesel CNT'lerin termal iletkenliği %3 arttırdığı görülmektedir. Deney sonuçlarında ise CNT katkılı numunelerde kalınlık boyunca termal iletkenlik %5 azalmıştır. %1 CNT katkısının termal iletkenlik üzerinde çok büyük bir değişime neden olmadığı deney sonuçlarında da modelleme sonuçlarında da görülmektedir. Ancak deney sonuçlarında termal iletkenlik katsayısında azalma görülürken modelleme sonuçlarında küçük de olsa artış görülmesinin nedeninin deney numunelerinde var olan aglomerasyonların olabileceği ihtimali üzerine Şekil 5.41'de verilen üç farklı aglomerasyon modellemesi çalışılmıştır. %1 CNT katkı miktarı değişmeyecek şekilde yapılan modellemelere göre Şekil 5.41-a'da yaklaşık olarak % 50 aglomerasyon; b'de %82 aglomerasyon; ve c'de ise %95 aglomerasyon görülmektedir. Termal iletkenlik katsayıları ise sırasıyla 0,645; 0,641 ve 0,636 W/mK'dir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi aglomerasyon miktarındaki değişiklikler termal iletkenlik katsayısı üzerinde çok büyük etkilere yol açmasa da en düşük aglomerasyonda bile katsayıda yaklaşık olarak %2,2 miktarında bir azalma görülmüştür. Bu sonuç deneysel sonuçlardaki azalmanın da bir açıklaması olarak kabul edilebilir.



Şekil 5.41 Farklı miktarlarda aglomerasyon içeren modellerin analiz sonucu: a) %50 aglomerasyon, b) %82 aglomerasyon, c) %95 aglomerasyon.

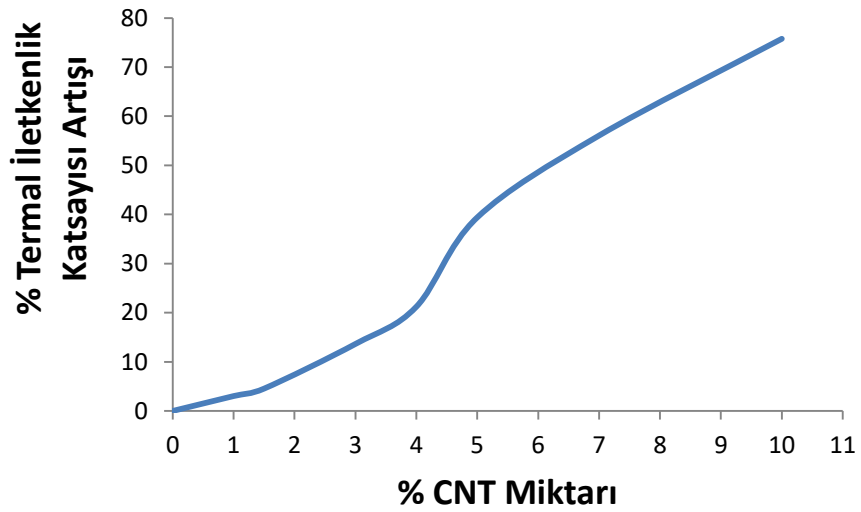
İyi dağılması sağlanmış %1'lik bir CNT katkısının kompozit malzemenin kalınlık doğrultusundaki iletkenliğini sadece %3 oranında arttırdığı sonucuna ulaşıldıktan sonra ne kadarlık bir katkının termal iletkenliğe kayda değer bir artış göstereceğini belirleyebilmek için Şekil 5.42'de, %1,5, %3, %4, %5, %7 ve %10 CNT ilavesi yapılan numunelerin modelleri ve analiz sonuçları verilmiştir.



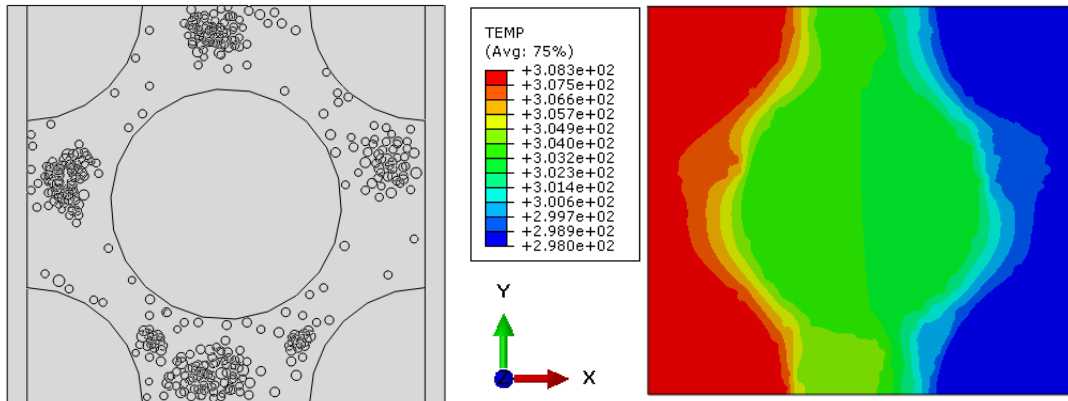
Şekil 5.42 Farklı miktarlarda CNT ilavesi yapılmış modellerin analiz sonuçları: a) %1,5 miktarında; b)%3 miktarında, c)%4 miktarında, d)%5 miktarında,e)%7 miktarında, f) %10 miktarında.

Analiz sonuçlarına göre elde edilen Şekil 5.43'deki grafik göstermektedir ki tek doğrultulu karbon fiber/epoksi kompozit malzemenin kalınlık doğrultusunda termal iletkenliğini %20 ve üzerinde arttırmak istiyorsak en az % 4 CNT takviyesi yapılması ve bu CNT'lerin iyi dağıtılması gerekmektedir. Tez çalışmasının literatür kısmında da belirtildiği CNT'ler direk reçineye karıştırılarak bir üretim yapılırsa artan CNT miktarı reçinenin vizkozitesini arttırarak üretimin zorlaşmasına ve dahası van der waals

etkisindeki CNT'lerin aglomere olarak iyileştirmesini beklediğimiz özellikleri daha da düşürmesine neden olabilir.Şekil 5.44'te %10 CNT katkısı yapılmış ve aglomerasyon görülmüş model ve analiz sonucu görülmektedir. İyi dağılım olmuş modellerle termal iletkenlik katsayıları karşılaştırıldığında yaklaşık %17'lik bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu sonuç da göstermektedir ki CNT miktarı arttıkça aglomerasyon etkisi de artmaktadır.

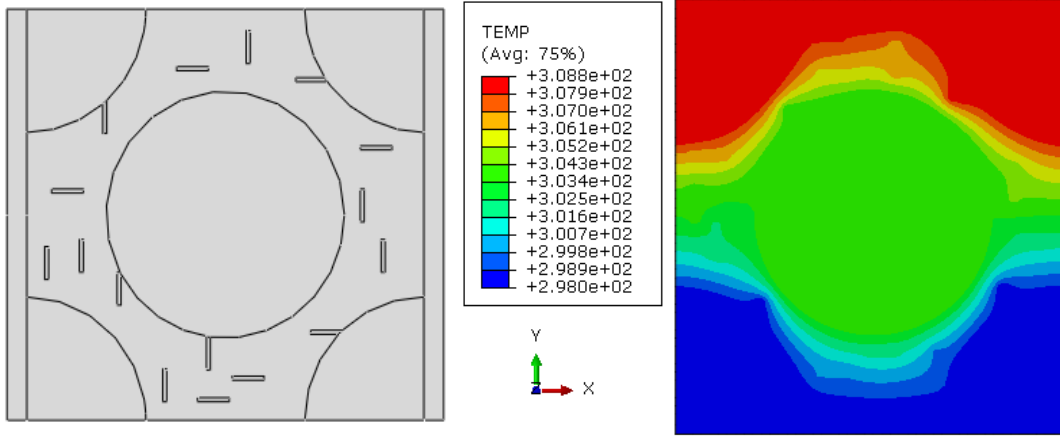


Şekil 5.43 Farklı miktarlarda CNT ilavesi yapılmış modellerin analiz sonuçlarının değerlendirilmesi



Şekil 5.44 %10 CNT ilavesi yapılmış ve aglomerasyon oluşmuş modelin analiz sonucu.

Şekil 5.45'teki gibi çubuk şeklinde CNT'ler modellenip ısı transferi analizi yapıldığında ise elde edilen sonuç 0,92 W/MK olup deneysel sonuca göre oldukça fazladır. Bu nedenle çubuk şeklindeki CNT modellemesi ile daha fazla çalışma yapılmamıştır.

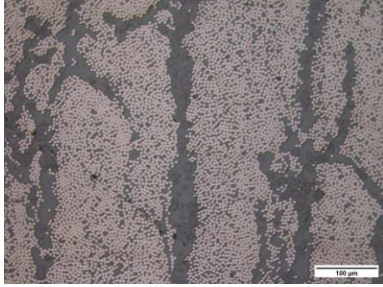
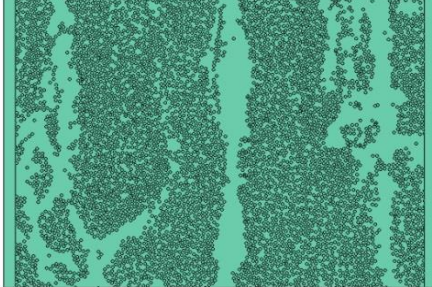
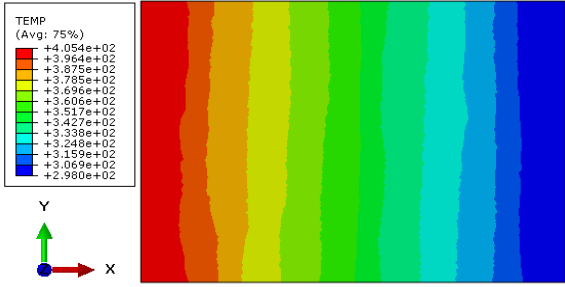

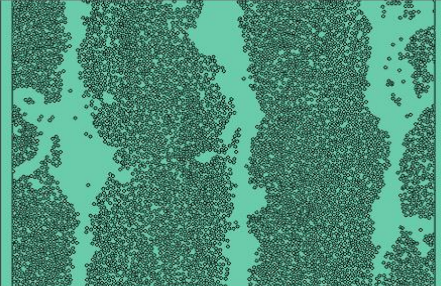
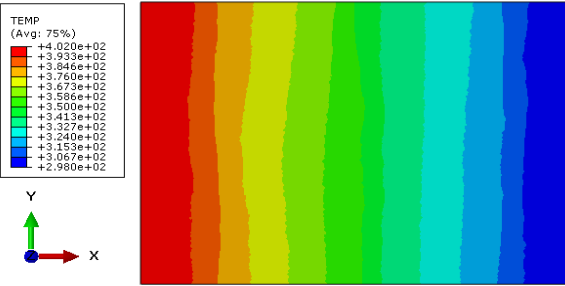


Şekil 5.45 Çubuk şeklinde %1 CNT ilavesi yapılmış modelin analiz sonucu.

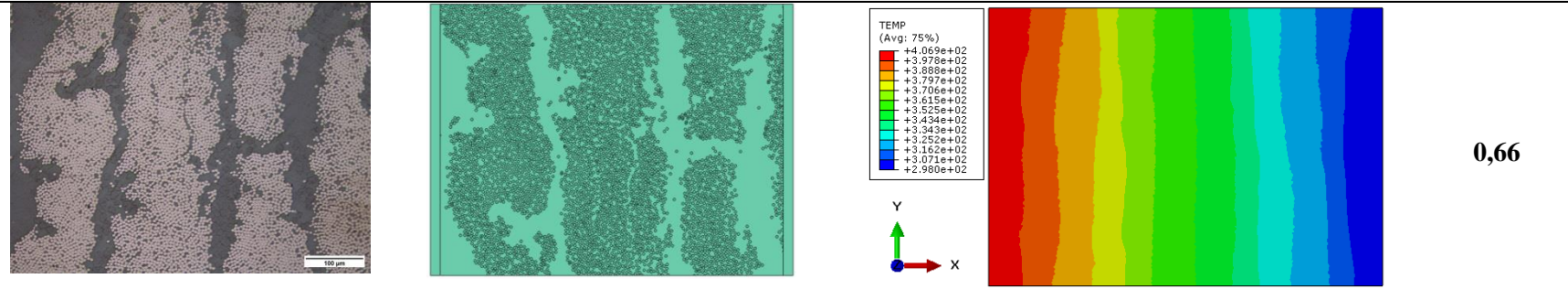
5.3.2.2 Mikroyapı Modelleme

Hexagonal modelleme çalışması CNT katkılı ve katkısız kompozit malzemelerin termal iletkenlik katsayılarının hesaplanmasında oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Ancak elektriksel iletkenlik modellemelerinde de bahsedildiği gibi tek doğrultulu karbon fiber/epoksi kompozit malzemeleri doğaları gereği homojen değildir ve üretim şartlarına göre çok farklı özellikler gösterebilmektedirler. Bu nedenle mikroyapı modellemesi ile bu farklılıkların modellere yansıtılabileceği düşünülerek ısı transferi analizleri için de mikroyapı resimlerinden faydalanılmıştır. Bunun için elektriksel iletkenlik analizleri için 6 farklı numuneden alınan ve MATLAB'dan AutoCAD'e oradan da ABAQUS 6.14 sonlu elemanlar programına aktarılan 200 büyütmede mikro yapı görüntülerine "Heat Transfer" analizi steady state olarak yapılmıştır. Bu modellere de deneysel metoda uygun olarak gümüş kaplama yapılmıştır. Bütün malzeme özellikleri hexagonal modelde kullanılan özellikler ile aynıdır. 6 numune üzerinden rastgele alınmış 3 mikro yapı görüntüsü Abaqus'te 0,72 x 0,52 mm boyutundaki modellere dönüştürülmüş ve fiber yoğunluğuna göre 200000-250000 arasında eş parçaya bölünmüştür. Burada da elektriksel iletkenlik modellemesinde olduğu gibi her bir mikro yapı resmi bir direnç olarak düşünülmüştür ve bu dirençlerin ortalaması alınarak termal iletkenlik katsayısı hesaplanmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 5.12'de verilmektedir.

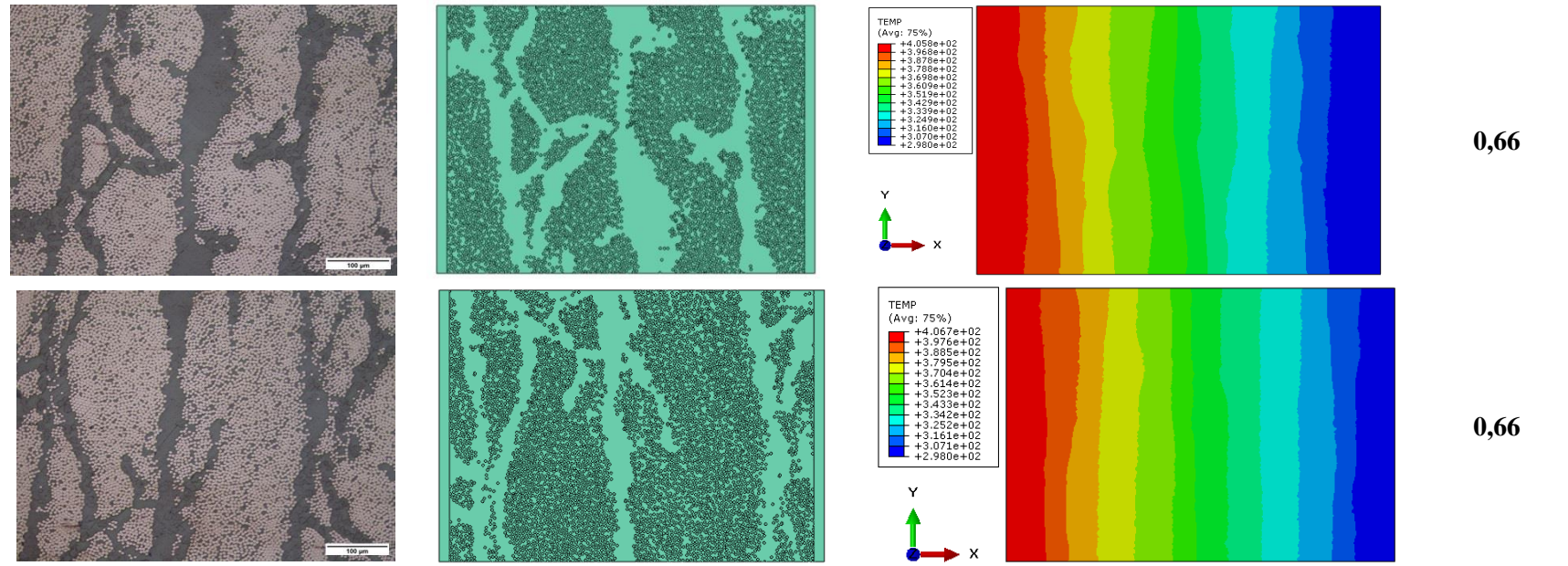
Çizelge 5.12 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin termal iletkenlik analiz sonuçları.

Mikro Yapı Resmi (200X)	Auto-Cad'den Abaqus'e aktarılan mikroyapı modeli	Abaqus analizi sonucu	Termal İletkenlik
1.Numune $\lambda_{ort} = 0,67 \text{ W/mK}$			
			0,67
			0,69

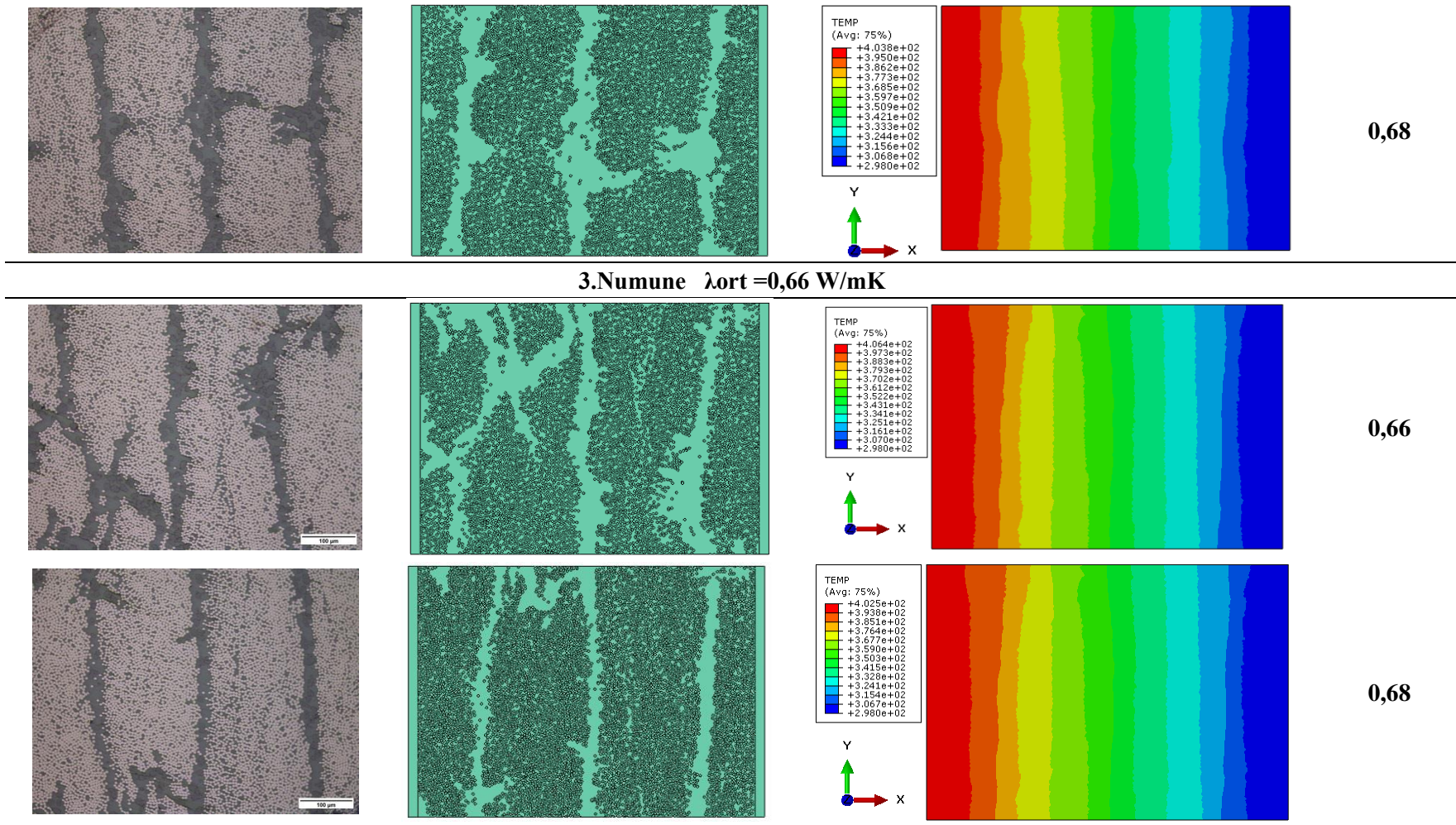
Çizelge 5.12 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



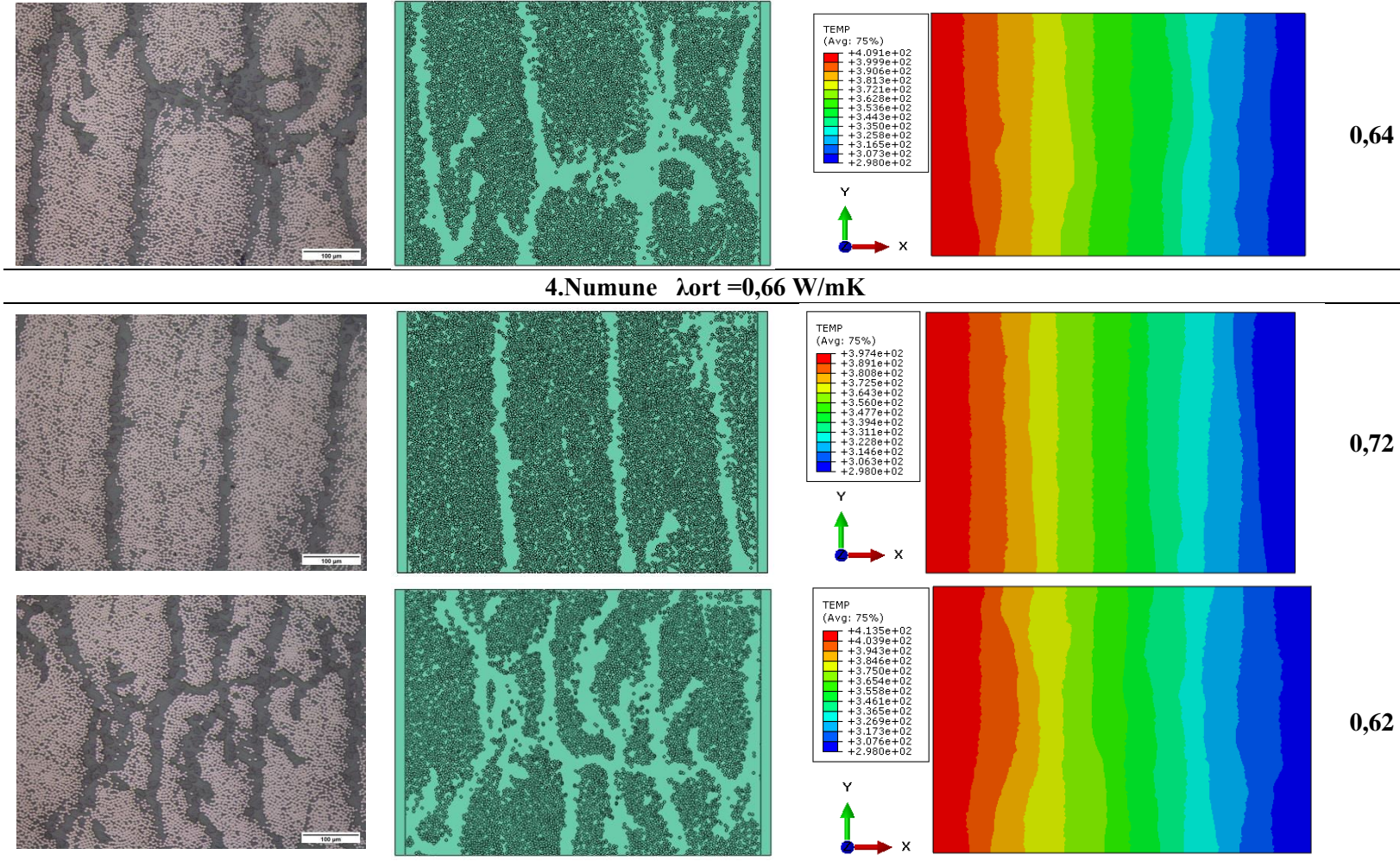
2.Numune $\lambda_{ort} = 0,66$ W/mK



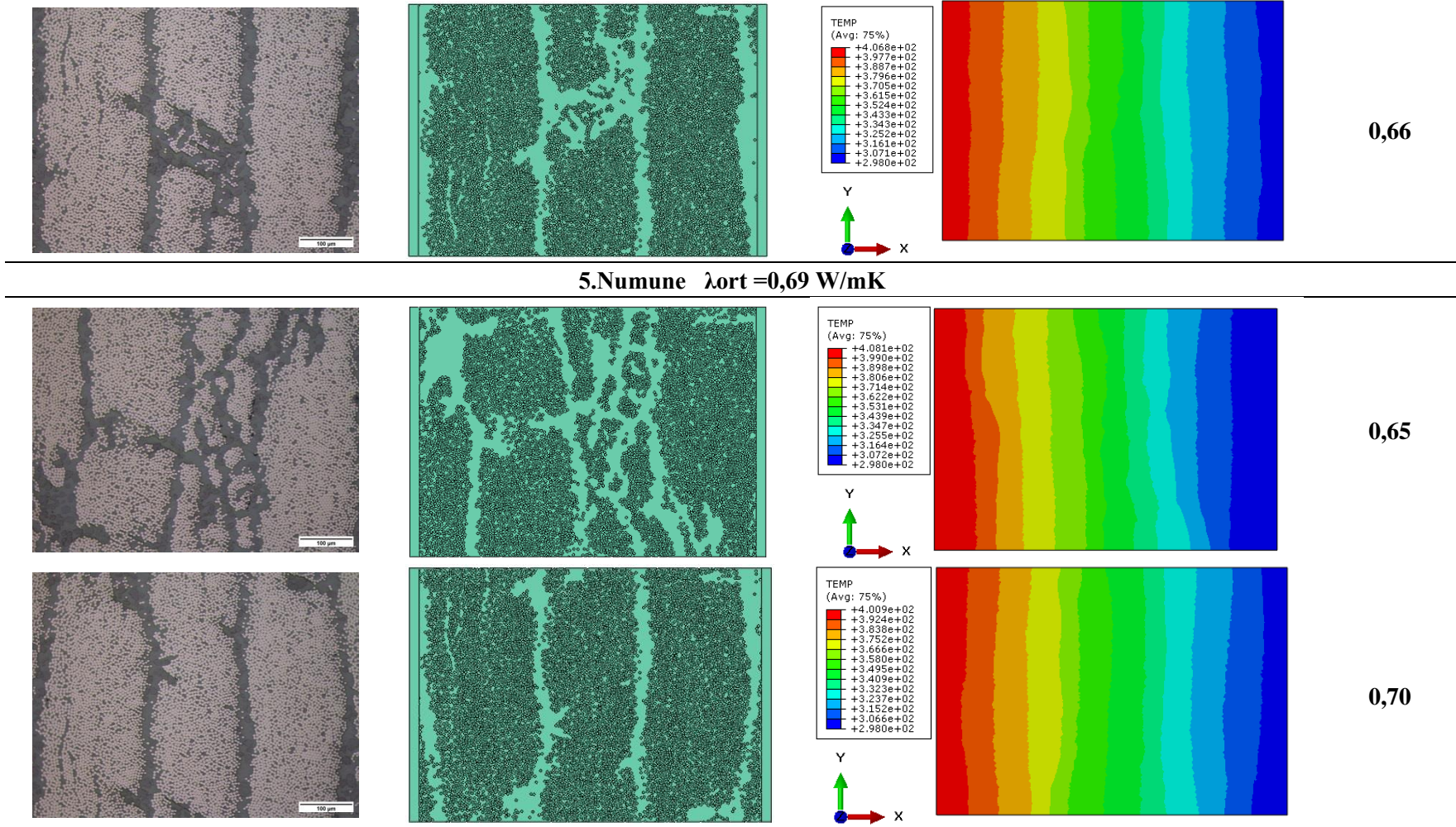
Cizelge 5.12 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



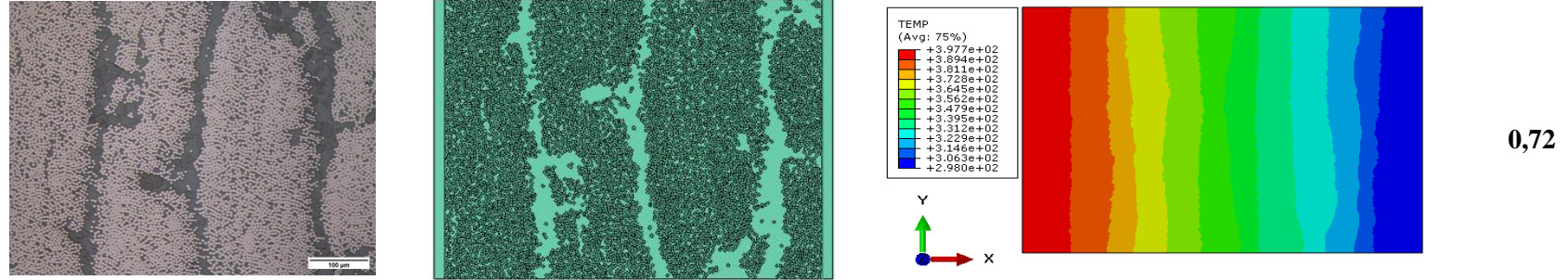
Çizelge 5.12 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



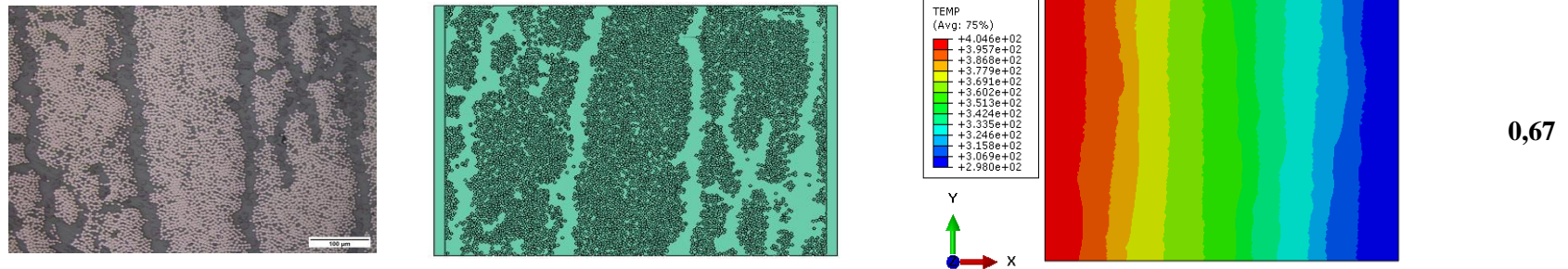
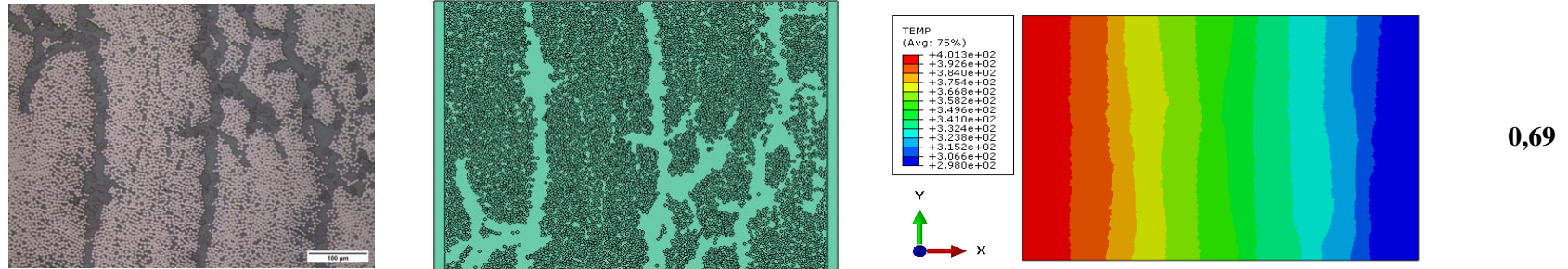
Çizelge 5.12 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



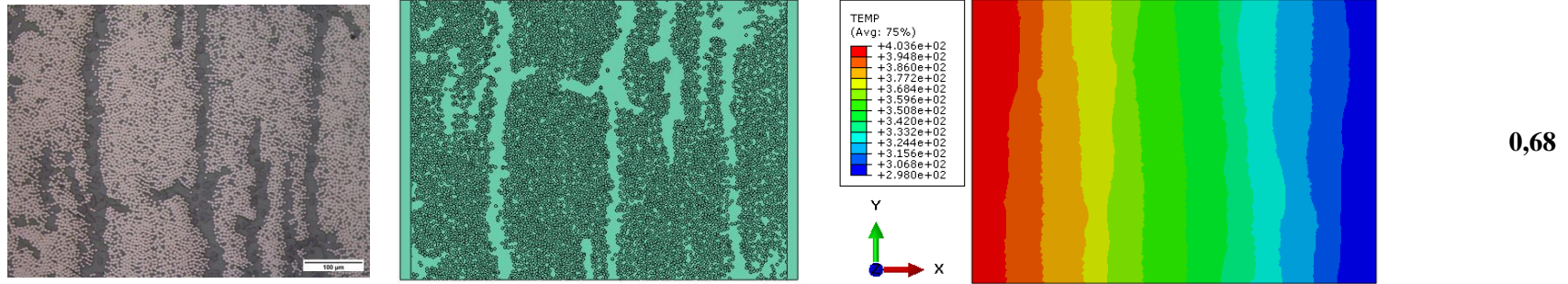
Çizelge 5.12 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



6.Numune $\lambda_{ort} = 0,68 \text{ W/mK}$



Çizelge 5.12 (Devam) 200 büyütme ile alınan mikro yapı görüntülerinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları.



Çizelge 5.12’de verilen 200 büyütmeye sahip mikroyapı resimleri ile yapılan Abaqus analizleri sonuçlarında her bir numune için elde edilen iletkenlik değerleri 0,69 W/mK ile 0,66 W/mK arasında değişmektedir. Sonuçların standart sapma değeri 0,01 olup kendi aralarında oldukça tutarlılık göstermektedirler. Deney numunelerinde yapıldığı gibi tüm sonuçların ortalaması alındığında ise termal iletkenlik değeri 0,67 W/mK olarak bulunmaktadır. Bu sonuç deney sonucunda elde edilen 0,69 W/mK değeri ile %2 ‘lik bir fark göstermektedir ki modellemelerde yapılan “mesh” işlemi veya çözüm aralığının değiştirilmesi bile bu kadar bir farka neden olabilmektedir. Elektriksel iletkenlik analizi sonuçlarında olduğu gibi termal iletkenlik analiz sonuçlarında da her bir mikro yapı resminin termal iletkenliği tek başına bile deneysel sonuçla yakındır.

Mikro yapı modellemesi ve analiz çalışmaları CNT ilavesiz karbon fiber/epoksi kompozit malzemeleri için hem termal hem de elektriksel iletkenlik için deney sonuçlarına çok yakın sonuçlar vermiştir. Ancak mikro yapı modellemesi CNT katkılı numuneler için uygulanamamıştır. Fiberler ile CNT’lerin gerçek boyutları arasındaki fark mikro yapı resimlerinde ikisinin birden görünmesini imkansız kılmaktadır. Hexagonal modellemede olduğu gibi daha büyük partiküller halinde olan bir modelleme ise zaten karmaşık olan modeli daha karmaşık bir hale getirerek çözüm esnasında hatalar oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle CNT katkılı numuneler için mikroyapı modellemeleri gerçekleştirilememiştir.

6. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, endüstriyel ölçekte üretime olanak sağlayan ve geleneksel sıvı enjeksiyon proseslerinde meydana gelen sorunları gidermeye yarayacak olan püskürtme yöntemi ile üretilmiş CNT takviyeli tek yönlü karbon fiber / epoksi prepreg kompozit malzemenin elektriksel ve termal özellikleri deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Tek doğrultulu kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliğini oda sıcaklığında, fiber doğrultusu (x), fibere dik doğrultu (y) ve kalınlık doğrultusu (z) olmak üzere üç doğrultuda da doğru bir şekilde belirleyebilmek için bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Ayrıca CNT'li ve CNT'siz numunelerin kalınlık doğrultusunda -100 °C ve +160°C sıcaklık aralığında elektriksel iletkenlikleri araştırılmıştır. Termal davranışlar için DSC, TG analizleri yapılmış, ısı kapasiteleri, termal iletkenlik katsayıları ve termal genleşme katsayıları belirlenmiştir. Ayrıca tez çalışması kapsamında ABAQUS 6.14 sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak CFRP kompozit malzemelerin elektriksel ve termal iletkenliği modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ve modelleme sonuçları şeklinde aşağıda verilmiştir:

Deneysel Sonuçlar;

- Fiber doğrultusu (X doğrultusu), fibere dik doğrultu (Y doğrultusu) ve kalınlık doğrultusunca (Z doğrultusu) ölçülen termal iletkenlik katsayısı sonuçlarına göre, T800/M21 numunelerde fiber doğrultusunda termal iletkenlik katsayısı oldukça yüksektir, çünkü bu doğrultuda iletim fiberler tarafından sağlanmaktadır. Fibere dik doğrultuda ve kalınlık doğrultusunda ise reçine zengin bölgelerden kaynaklı olarak termal iletkenlik düşüktür. Karbon nanotüp ilave edilmiş numunelere baktığımızda her üç doğrultuda da termal iletkenlikte azalma gözlenmiştir.
- T800/M21 ve CNT katkılı T800/M21 kompozit malzemelerinin DSC diyagramları incelendiğinde 5⁰C/dak, 10⁰C/dak ve 20⁰C/dak şeklinde olan üç ısıtma hızında da 200⁰C, 300⁰C ve 500⁰C civarında oluşan pikler görülmüştür. Birinci pik polimerin camsı bölgeye geçiş sıcaklığını, ikinci pik termal olarak zayıf bağlara sahip daha düşük molekül ağırlıklı bileşenlerin bozunumunu,

üçüncü pik ise kütleme sırasında oluşan yüksek molekül ağırlıklı bileşenlerin parçalanmasını belirtmektedir.

- CNT takviyesiz numunelerin düşük ısıtma hızında ($5^{\circ}\text{C}/\text{dak}$) bozunma reaksiyonlarının başlangıç sıcaklığı yüksek ısıtma hızlarına göre ($10^{\circ}\text{C}/\text{dak}$, $20^{\circ}\text{C}/\text{dak}$) daha düşüktür. Ancak aynı düzen CNT katkılı numunelerde görülmemiştir.
- Literatürde dolgu maddelerinin takviyesinin camsı geçiş ve bozunma reaksiyonlarının sıcaklıklarında artışa neden olduğu belirtilmektedir. Ancak bu çalışmada elde edilen DSC sonuçlarına göre CNT katkısının T800/M21 karbon fiber/epoksi kompozit malzemesinin camsı geçiş ve bozunma sıcaklıklarını belirgin bir oranda ve düzenli bir şekilde arttırdığı veya düşürdüğünden söz edilemez .
- CNT katkısız TG diyagramlarına göre kütle kayıp miktarı ısıtma hızı arttıkça düşmektedir. $20^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızında ilk bozunma reaksiyonundan sonra %17 olan kütle kaybı, $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızında %21'dir.
- CNT'lü numunelerde birinci ve ikinci bozunma reaksiyonlarından sonra gerçekleşen kütle kayıpları CNT katkısız numunelere göre daha fazladır. Bu durumun nedeni, CNT'lerin atmosferik koşullarda 600°C 'de yanarak sistemden uzaklaşmasıdır.
- 50°C 'de CNT'süz numunenin ısı kapasitesi değeri $0,86 \text{ (J/(gK))}$ iken, CNT'lü numunede bu değer $0,80 \text{ (J/(gK))}$ 'dir. CNT ilaveli numunelerde ısı kapasitesinin biraz daha düşük çıkması, CNT'lerin ısı kapasitesinin düşük olmasına bağlanmıştır. Ayrıca polimerlerin termal iletkenliğinin hesaplandığı formül (4.2)' ye göre ısı kapasitesi ile termal iletkenlik doğru orantılıdır. Dolayısıyla CNT taviyeli numunelerin hem ısı kapasitelerinin hem de termal iletkenliklerinin düşük çıkması birbirini doğrulayan bir sonuçtur.
- CNT katkısı fiber doğrultusunda termal genişleme katsayısının düşmesine, fibere dik doğrultuda ise artmasına neden olmuştur.
- Oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik sonuçlarına göre; CNT ilavesiz T800/M21 numunelerin x doğrultusunda elektriksel iletkenliği ortalama olarak 15561 S/m , y doğrultusunda $18,88 \text{ S/m}$ ve z doğrultusunda ise $1,15 \text{ S/m}$ 'dir. En iyi artış %110 ile kalınlık doğrultusunda olmuştur.

- Uçaklarda anti-statik kaplamalarda izin verilen maksimum direnç $10^{-1} - 10^5$ ohm arasında değişmektedir. CNT katkılı T800/M21 kompozit malzemesi bu direnç aralığını üç doğrultuda da fazlasıyla sağlamaktadır ve anti statik kaplamalara alternatif olarak değerlendirilebilir.
- $-100 + 160^0$ C aralığında kalınlık doğrultusunda iletkenliğe baktığımızda, CNT katkısız numunelerin iletkenliğinde herhangi bir değişiklik görülmezken, CNT katkılı numunelerde 80^0 C'den sonra iletkenlik değerinde artış görülmektedir. 160^0 C'de kompozit malzemenin kalınlık doğrultusundaki iletkenlik değeri neredeyse bir buçuk katına çıkmıştır. Sürtünme etkisiyle veya elektronik cihazların sebep olduğu statik elektrik sonucunda sıcaklık da artacağı için iletkenliğin sıcaklıkla artması istenilecek bir sonuçtur.

Modelleme sonuçları;

- T800/M21 karbon fiber/epoksi numunelerinin elektriksel iletkenlik modellemeleri için hexagonal model, düzenli fiber modeli ve mikroyapı modeli olmak üzere üç farklı model denenmiştir.
- Düzenli fiber modelinde deneysel numunelerinin hacim oranına ulaşmak için üç farklı şekilde rastgele fiber silinmiştir. Rastgele fiber silinerek oluşturulan modeller için elektriksel iletkenlik sonuçları 2,46 S/m; 2,28 S/m; 2,25 S/m'dir. Burada amaç fiber hacim oranı sabit tutulduğunda, fiberlerin konumlarının iletkenliği ne kadar etkilediğini belirlemektir. Elde edilen iletkenlik sonuçlarının standart sapması 0,11'dir ve sonuçlarda çok fazla bir değişiklik olmamaktadır.
- CNT katkısız numunelerin mikroyapı modellemeleri altı numuneden üçer tane rastgele olarak alınan 500 büyütme ve 200 büyütmedeki mikro yapı resimleri kullanılarak yapılmıştır. 500 büyütmeli resimler ile yapılan analiz sonuçlarına göre iletkenlik 1,74 S/m olarak hesaplanırken 200 büyütmeli resimlerle yapılan analiz sonuçları 1,15 S/m olan deneysel sonuca çok yakın olup 1,13 S/m olarak hesaplanmıştır.
- CNT takviyeli numunelerin elektriksel iletkenlik analizleri için, hexagonal model üzerine dairesel ve çubuk partiküller olmak üzere iki farklı CNT takviyesi modeli denenmiştir.

- Dairesel CNT takviyesi hexagonal modelde düzenli dağılmış ve aglomerasyona uğramış olarak modellenmiştir. Sonuçta düzenli dağılımda elektriksel iletkenlik 1,99 S/m iken aglomerasyon durumunda 1,39 S/m olarak elde edilmiştir. Çubuk şeklindeki CNT'lerde ise düzenli dağılımda 2,33 S/m, aglomerasyonda ise 1,62 S/m elektriksel iletkenlik elde edilmiştir. Dairesel CNT'lerin analiz sonuçları deneysel sonuca daha yakındır.
- CNT takviyesiz numunelerde termal iletkenlik analizi için hexagonal model kullanılmıştır. Elde edilen termal iletkenlik katsayısı 0,66 W/mK'dir. 0,69 W/mK olan deney sonucu ile %4'lük bir fark vardır. Bu model kolay ve uygulanabilir, elde edilen sonuç da deneysel sonuca yakın olduğu için CNT takviyesi sadece hexagonal model üzerinden çalışılmıştır.
- İyi dağılmış dairesel partiküller şeklinde CNT takviyeli hexagonal model kompozit malzemenin termal iletkenliği 0,68 W/mK'dir. Deneylerde CNT takviyesinin kalınlık doğrultusunda termal iletkenliği %5 düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Hexagonal modellemede ise CNT katkısı termal iletkenliği %3 arttırmıştır. Sonuçlar tam olarak uyuşmasa da %1'lik bir CNT katkısının termal iletkenlikte aşırı bir değişime neden olmadığı görülmüştür.
- CNT aglomerasyonunun termal iletkenlik üzerine etkisini araştırmak için %50 aglomerasyon, %82 aglomerasyon ve %95 aglomerasyon görülen modeller oluşturulmuştur. Bu modellerin termal iletkenlik katsayıları ise sırasıyla 0,645; 0,641 ve 0,636 W/mK'dir. Sonuçlar göstermektedir ki aglomerasyonların termal iletkenlik üzerinde, elektriksel iletkenlik kadar bir etkisi bulunmamaktadır.
- İyi dağılması sağlanmış %1'lik bir CNT katkısının kompozit malzemenin kalınlık doğrultusundaki iletkenliğini sadece %3 oranında arttırdığı sonucuna ulaşıldıktan sonra ne kadarlık bir katkının termal iletkenliğe kayda değer bir artış göstereceğini belirleyebilmek için %1,5, %3, %4, %5, %7 ve %10 CNT ilavesi yapılan numunelerin modelleri oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre elde edilen veriler göstermektedir ki tek doğrultulu karbon fiber/epoksi kompozit malzemenin kalınlık doğrultusunda termal iletkenliğini %50 ve üzerinde arttırmak istiyorsak en az %7 CNT takviyesi yapılması ve bu CNT'lerin iyi dağıtılması gerekmektedir.

- Çubuk şeklinde CNT'ler modellenip ısı transferi analizi yapıldığında elde edilen sonuç 0,92 W/MK olup deneysel sonuca göre oldukça fazladır. Bu nedenle çubuk şeklindeki CNT modellemesi ile daha fazla çalışma yapılmamıştır.
- 200 büyütmeye sahip mikroyapı resimleri ile yapılan Abaqus analizleri sonuçlarında termal iletkenlik değerleri ortalaması 0,67 W/mK olarak bulunmaktadır. Bu sonuç deney sonucunda elde edilen 0,69 W/mK değeri ile %2 'lik bir fark göstermektedir ki modellemelerde yapılan "mesh" işlemi veya çözüm aralığının değiştirilmesi bile bu kadar bir farka neden olabilmektedir. Elektriksel iletkenlik analizi sonuçlarında olduğu gibi termal iletkenlik analiz sonuçlarında da her bir mikro yapı resminin termal iletkenliği tek başına bile deneysel sonuçla yakındır.
- Hem termal hem de elektriksel iletkenlik için deney sonuçları ile çok yakın sonuçlar veren mikro yapı modellemesi CNT katkılı numuneler için uygulanamamıştır. Çünkü fiberler ile CNT'lerin gerçek boyutları arasındaki fark mikro yapı resimlerinde ikisinin birden görünmesini imkansız kılmaktadır. Hexagonal modellemede olduğu gibi daha büyük partiküller halinde olan bir modelleme ise zaten karmaşık olan modeli daha karmaşık bir hale getirerek çözüm esnasında hatalar oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle CNT katkılı numuneler için mikroyapı modellemeleri gerçekleştirilememiştir. Gelecek modelleme çalışmalarında bu durumun üzerine gidilecektir.

Bu tez çalışmasının amacı doğrultusunda;

- Özellikle uçak gövdesinde kullanılan T800 karbon fiber takviyeli M21 epoksi polimer malzemenin termal özellikleri ve elektriksel iletkenliği detaylı olarak araştırılmış, elde edilen bulgular yorumlanarak literatüre sunulmuştur. Bu çalışmanın, ülkemizde kısa vadede üretilmesi planlanan yerli ve milli uçak ve helikopter çalışmalarına da kaynak olabileceği düşünülmektedir.
- Son yıllarda polimer kompozit malzemelerin mekaniksel, elektriksel ve termal özelliklerini aynı anda düzeltebileceği düşünülen karbon nanotüplerin, T800/M21 karbon fiber/epoksi kompozit malzemesinin elektriksel iletkenlik ve termal davranışları üzerine etkisi araştırılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan CNT takviyeli T800/M21 karbon fiber/epoksi kompozit malzemeleri endüstriyel

ve seri üretime uygun bir şekilde püskürtme yöntemi ile üretilmiştir. Böylelikle CNT 'lerin reçine içerisine karıştırılması ile yapılan üretimlerde meydana gelen viskozite ve aglomerasyon sorununun da önüne geçilmeye çalışılmıştır.

- SARISTU projesi kapsamında, püskürtme yöntemi ile CNT takviye edilmiş prepreg malzeme laboratuvar ölçeğinden uygulama aşamasına ve dolayısıyla endüstriyel ölçekte üretimini incelemek üzere seçilmiştir.
- SARISTU Projesinin amaçlarından bir tanesi, karbon nanotüplerin havacılık reçinelerine dahil edilmesi ile uçağın dış kaplaması/kirişleri/ gövdesinde %3' e varan bir ağırlık tasarrufu ve gövdeye yapılan elektrik iletim ağı kurulum maliyetinde %15'lik bir azalma sağlamaktır. Bu çalışmaya kapsamında üç doğrultuda elde edilen elektriksel iletkenlik değerlerine göre, CNT takviyesi ile T800/M21 kompozit malzemesinin ikincil yapılarda anti-statik kaplamalara daha geniş bir alanda alternatif olarak kullanılabilceği görülmüştür.
- Yapılan FEM çalışmaları ile tek doğrultulu karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerinin kalınlık boyunca elektriksel ve termal iletkenlikleri nümerik olarak hesaplanmıştır. Özellikle mikro yapı görüntülerinden, MATLAB'ın görüntü işleme yöntemi kullanılarak Abaqus 6.14 sonlu elemanlar programına aktarılan ve bu şekilde oluşturulan modeller sonucunda elektriksel ve termal iletkenlik deneysel sonuçlarına çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Böylece tek doğrultulu karbon fiber/epoksi kompozitlerin her üretimde farklı olabilen kendine özgü yapılarının doğru bir şekilde, genelleme yapmaya gerek duymaksızın modellenebileceği görülmüştür. Sonuç olarak elektriksel ve termal iletkenlik dahil olmak üzere bu malzemelerin diğer bir çok özelliğinin FEM ile analiz edilebileceği düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Allaouia, A., Bai, S., Cheng, H.M., and Bai, J.B. (2002). Mechanical and electrical properties of a mwnt/epoxy composite. *Composites Science and Technology*, **62**:1993–1998.
- Allen, D.H., Jones, R.H., and Boyd, J.G. (1994). Micromechanical analysis of a continuous fiber metal matrix composite including the effects of matrix viscoplasticity and evolving damage. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **42**: 505-529.
- Ayatollahi, M.R., Shadlou, S., Shokrieh, M., and Chitsazzadeh, M. (2011). Mechanical and electrical properties of epoxy/multi-walled carbon nanotube/nanoclay nanocomposite. *Iranian Polymer Journal*, **19**: 835-843.
- Baker, A.A. (2004). *Composite materials for aircraft structures*: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Bal, S. (2010). Experimental study of mechanical and electrical properties of carbon nanofiber/epoxy composites. *Materials and Design*, **31**: 2406–2413.
- Bekyarova, E., Thostenson, E., Yu, A., and Haddon, t.R.C. (2007). Multiscale carbon nanotube/carbon fiber reinforcement for advanced epoxy composites. *Langmuir* **23**: 3970-3974
- Chang, C.-W., Tseng, J.-M., Horng, J.-J., and Shu, C.-M. (2008). Thermal decomposition of carbon nanotube/al₂o₃ powders by dsc testing. *Composites Science and Technology*, **68**: 2954–2959.
- Choudhary, V., and Gupta, A. (2011). Preparation and characterization of polymer composites with cnts. in *Carbon nanotubes– polymer nanocomposites* Rijeka: InTech, 65-91.
- Costa, M.L., Botelho, E.C., Paiva, J.M.F.d., and Rezende, M.C. (2005). Characterization of cure of carbon/epoxy prepreg used in aerospace field. *Materials Research*, **8**.

- Díez-Pascual, A.M., Ashrafi, B., Naffakh, M., González-Domínguez, J.M., Johnston, A., Simard, B., Gómez-Fatou, M.A. (2011). Influence of carbon nanotubes on the thermal, electrical and mechanical properties of poly(ether ether ketone)/glass fiber laminates. *Carbon*, **49**: 2817–2833.
- Dong, K., Liu, K., Zhang Q., Gu, B., Sun, B. (2016). Experimental and numerical analyses on the thermal conductive behaviors of carbon fiber/epoxy plain woven composites. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **102** : 501–517
- Feller, J.F., Linossier, I., and Grohens, Y. (2002). Conductive polymer composites: Comparative study of poly(ester)-short carbon fibres and poly(epoxy)-short carbon fibres mechanical and electrical properties. *Materials Letters*, **57**: 64-71.
- Florez, S., Gaztelumendi, I., and Gayosa, J. (2016). Improvement of the electrical isotropy of composite structures-overview Wölcken, P., Christof, P., (Eds.), MichaelSmart intelligent aircraft structures (saristu), Springer, London, 805-814.
- Garcia, E.J., Wardle, B.L., and Hart, A.J. (2008). Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **39**: 1065–1070.
- Gardea, F., and Lagoudas, D.C. (2014). Characterization of electrical and thermal properties of carbon nanotube/epoxy composites. *Composites: Part B* **56**: 611–620.
- Gojny, F.H., Wichmann, M.H.G., Fiedler, B., Kinloch, I.A., Bauhofer, W., Windle, A.H., and Schulte, K. (2006). Evaluation and identification of electrical and thermal conduction mechanisms in carbon nanotube/epoxy composites *Polymer*, **47**: 2036–2045.
- Gonnet, P. (2004). Thermal conductivity and coefficients of thermal expansion of swnts/epoxy nanocomposites. Doktora Tezi, The Florida State University College Of Engineering, Florida.

- Gutowski, T.G., and Dillon, G. (1992). The elastic deformation of lubricated carbon fiber bundles: Comparison of theory and experiments. *Journal of Composite Materials*, **26**: 2330-2347.
- Güler, K.A. (2003). Uçak yapımında kullanılan malzemeler ve özelliklerinin İncelenmesi. Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Han, Z., and Fina, A. (2013). Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review. *Progress in Polymer Science*, **36**: 914–944.
- Harris, C.E. (2011). Opportunities for next generation aircraft enabled by revolutionary materials. AIAA SDM Conference, Denver, 4-7 Nisan.
- Hashim, A. (2012). Smart nanoparticles technology. Intechopen, Rijeka, Hırvatistan.
- Henry, A. (2014). Thermal transport in polymers. Begell House. Danbury, Amerika Birleşik Devletleri.
- Huang, H., Yang, C., and Wu, Z. (2012). Electrical sensing properties of carbon fiber reinforced plastic strips for detecting low-level strains. *Smart Materials and Structures*, **21**.
- Hussan, S.I. (2012). Thermal conductivity and electrical conductivity of epoxycomposites filled with carbon nanotube and chopped carbon fibers. *Al-Mustansiriya J. Sci*, **23**: 131-140.
- İnce, S. (2003). Yıldırımın uçaklara etkileri ve korunma yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- İnkaya, S. (2015). Dünyada ve türkiye'de kompozit sektörü. *Mühendis ve Makina*, **52**: 30-34.
- Kalanchiam, M., and Chinnsamy, M. (2012). Advantages of composite materials in aircraft structures *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, **6**: 2428-2432.

- Karcı, A. (2009). Uçak yapısal parçalarında kullanılan karbon/epoksi kompozit malzemelerin yorulma davranışı. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Kelly, A., and Zweben, C. (2000). Comprehensive composite materials. Elsevier, Amsterdam, Hollanda.
- Kim, S.-K., Kim, J.T., Kim, H.-C., and Kathi, J. (2012). Thermal and mechanical properties of epoxy/carbon fiber composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Macromolecular Science Part B* **51**: 358-367.
- Kim, Y.A., Kamio, S., Tajiri, T., Hayashi, T., Song, S.M., and Endo, M. (2007). Enhanced thermal conductivity of carbon fiber/phenolic resin composites by the introduction of carbon nanotubes. *Applied Physics Letters* **90**: 814 – 820.
- Kostagiannakopoulou, C., Fiamegkou, E., Sotiriadis, G., and Kostopoulos, V. (2016). Thermal conductivity of carbon nanoreinforced epoxy composites. *Journal of Nanomaterials*, **1**: 1-12.
- Leonardo, L., Rosario, P., and Ernesto, M. (2011). Saristu-smart intelligent aircraft structures. Elsevier, Amsterdam, Hollanda.
- Levchik, S.V., and Weil, E.D. (2004). Thermal decomposition, combustion and flame-retardancy of epoxy resins—a review of the recent literature. *Polymer International* **53**: 1901-1929.
- Lin, Y., Gigliotti, M., Lafarie-Frenot, M.C., and Bai, J. (2014). Effect of carbon nanotubes on the thermoelectric properties of CFRP laminate for aircraft applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **34**: 173-184
- Lonjon, A., Demont, P., Dantras, E., and Lacabanne, C. (2012). Electrical conductivity improvement of aeronautical carbon fiber reinforced polyepoxy composites by insertion of carbon nanotubes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **15**: 1859-1862.

- Loos, M.R., Coelho, L.A.F., PezzinI, S.H., and Amico, S.C. (2008). The effect of acetone addition on the properties of epoxy. *Polímeros*, **18**.
- Marcos-Gómez, D., Ching-Lloyd, J., Elizalde, M.R., Clegg, W.J., and Molina-Aldareguia, J.M. (2010). Predicting the thermal conductivity of composite materials with imperfect interfaces. *Composites Science and Technology*, **70**: 2276–2283.
- Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering*: CRC Press
- Mittal, V. (2010). *Polymer nanotube nanocomposites: Synthesis, properties and applications*. Wiley-Scrivener, New Jersey, Amerika Birleşik Devletleri.
- Moisala, A., Li, Q., Kinloch, I.A., and Windle, A.H. (2006). Thermal and electrical conductivity of single- and multi-walled carbon nanotube-epoxy composites. *Composites Science and Technology*, **66**: 1285–1288.
- Nayak, N.V. (2014). Composite materials in aerospace applications. *International Journal of Scientific and Research Publications*, **4**: 1-10.
- Ogasawara, T., Hirano, Y., and Yoshimura, A. (2010). Coupled thermal–electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **41**: 973–981.
- Osswald, T.A., and Menges, G. (1995). Hanser, *Material science of polymers for engineers*. Münih, Almanya.
- Park, J.G., Cheng, Q., Lu, J., Bao, J., Li, S., Tian, Y., B.W. (2012). Thermal conductivity of mwcnt/epoxy composites: The effects of length, alignment and functionalization. *Carbon*, **50**: 2083–2090.
- Park, S.-J., and Heo, G.-Y. (2014). Precursors and manufacturing of carbon fibers Carbon fibers. Springer, Berlin, Almanya.

- Pistor, V., Ornaghi, F.G., Jr., H.L.O., and Zattera, A.J. (2012). Degradation kinetic of epoxy nanocomposites containing different percentage of epoxycyclohexyl—poss. *Polymer Composites*, **13**: 7-18.
- Pradhan, N.R., Duan, H., Liang, J., and Iannacchione, d.G.S. (2009). The specific heat and effective thermal conductivity of composites containing single-wall and multi-wall carbon nanotubes. *Nanotechnology*, *20*, 705-711.
- Raghavan, P., Moorthy, S., Ghosh, S., and Pagano, N.J. (2001). Revisiting the composite laminate problem with an adaptive multi-level computational model. *Composites Science and Technology*, *61*(8), 1017–1040.
- Rana, S., Alagirusamy, R., and Joshi, M. (2011). Development of carbon nanofibre incorporated carbon/epoxy composites with enhanced mechanical, electrical and thermal properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **42**: 439–445.
- Rana, S., Alagirusamy, R., and Joshi, M. (2011). Single-walled carbon nanotube incorporated novel three phase carbon/epoxy composite with enhanced properties. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **11**: 7033-7036.
- Rios, P.F., Kenig, S., Cohen, R., and Shechter, A. (2013). The effect of carbon nanotubes on the thermal expansion isotropy of injection molded carbon fiber reinforced thermoplastics. *Polymer Composites*, **34**: 1367–1374.
- Rohsenow ,W.M.R. (1998). Handbook of heat transfer. Mcgraw-Hill, Newyork,Amerika Birleşik Devletleri.
- Romanov, V.S., Lomov, S.V., Verpoest, I., and Gorbatikh, L. (2015). Stress magnification due to carbon nanotube agglomeration in composites. *Composite Structures*, **133**: 246–256.
- Rustan, P.L. (1983). Lightning qualification test techniques for aerospace vehicles and hardware, mil-std-1757a. Amerika Birleşik Devletleri: Department of Defence.

- Sathyanarayana, S., and Hübner, C. (2013). Thermoplastic nanocomposites with carbon nanotubes Structural nanocomposites Springer ,Berlin ,Almanya.
- Schmidt, J.L., and Banerjee, D.P. (2013).Electrical Conductivity Modeling and Validation in Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites, Comsol conference, Boston,Amerika Birleşik Devletleri.
- Shen, Z., Bateman, S., Wu, D.Y., McMahon, P., Dell'Olio, M., and Gotama, J. (2009). The effects of of carbon nanotubes on mechanical and thermal properties of woven glass fibre reinforced polyamide-6 nanocomposites. *Composites Science and Technology*, **69**: 239–244.
- Shena, L., Li, J., Liaw, B.M., Delale, F., and Chung, J.H. (2007). Modeling and analysis of the electrical resistance measurement of carbon fiber polymer–matrix composites. *Composites Science and Technology*, **67**: 2513–2520.
- Sun, L. (2008). Phonon transport in confined structures and at interfaces. Doktora Tezi Purdue Üniversitesi, West Lafayette.
- Todoroki, A., Samejima, Y., Hirano, Y., Matsuzaki, R., and Mizutani, Y. (2010). Electrical resistance change of thick cfrp laminate for self-sensing. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 4(6), 658-668.
- Todoroki, A., Tanaka, M., and Shimamura, Y. (2002). Measurement of orthotropic electric conductance of cfrp laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method. *Composites Science and Technology*, 62(5), 619–628.
- Tong, X.C. (2011). Advanced materials for thermal management of electronic packaging. Springer Series in Advanced Microelectronics 30, Schaumburg,Almanya.
- Tunakova, V., and Gregr, J. (2010). Electrical conductivity measurement of fibers and yarns. 7 International Conference - TEXSCI 2010 Liberec, Çek Cumhuriyeti.

- Varley, R.J., Hodgkin, J.H., Hawthorne, D.G., Simon, G.P., and McCulloch, D. (2000). Toughening of a trifunctional epoxy system part iii. Kinetic and morphological study of the thermoplastic modified cure process. *Polymer* **41**: 3425–3436.
- Wen, J., Xia, Z., and Choy, F. (2011). Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement. *Composites Part B: Engineering*, **42**: 77–86.
- Wölcken, P.C., and Papadopoulos, M. (2015). *Smart intelligent aircraft structures (saristu)*. Springer, Bremen,Almanya.
- Xia, X., Xie, C., and Cai, S. (2005). Non-isothermal crystallization behavior of low-density polyethylene/copper nanocomposites. *Thermochimica Acta* , **427**:129-135.
- Yu, H., Lu, C., Xi, T., Luo, L., Ning, J., and Xiang, C. (2005). Thermal decomposition of the carbon nanotube/sio₂precursor powders. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **82**: 97-101.
- Zhang, X., Fujiwara, S., and Fujii, M. (2000). Measurements of thermal conductivity and electrical conductivity of a single carbon fiber. *International Journal of Thermophysics*, **21**: 965–980.

İnternet Kaynakları

- 1) Baker, A., Dutton, S., and Kelly, D. (2009). Composite materials for aircraft structures. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, <http://www.montana.edu/dcairns/documents/composites/MSUComposites2009.pdf>, 13.04.2017
- 2) Materials for Aircraft Structures-Future Program .» 1987. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880004773.pdf> , 1.11. 2016
- 3) Alcore. (2017). Alcore key product lines. http://www.thegillcorp.com/alcore/Alcore_Brochure.pdf, 1.04. 2016
- 4) PPG, A. (2009). Commercial and general aviation coatings guide. http://www.ppgaerospace.com/getmedia/cd254e05-ae7e-4e45-a9b6e19ef6762d56/PPG_AS_GA_Coatings_10-2009.pdf, 12.01. 2017
- 5) Association, F.M. Manufacturing process of carbon fiber. <http://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/manufacture.html#>, 18.05.2016
- 6) MIT, M.I.o.T. (2004). Materials chemistry. http://web.mit.edu/3.082/www/team2_f01/chemistry.html, 18.05.2017
- 7) Hexcel. (2017). Hextow as4 carbon fiber product data sheet. <http://www.hexcel.com/resources/datasheets/carbon-fiber-data-sheets/as4.pdf>, 18.05.2017
- 8) T800h data sheet.) Erişim Tarihi, from <http://www.toraycfa.com/pdfs/T800HDataSheet>, 18.05.2017
- 9) Database, P.P. (2015). Glass transition temperature. <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/GlassTransition.html>, 18.05.2017
- 10) Hexcel. (2015). Hexply® m18/1 180°c curing epoxy matrix. http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/M18_1_eu.pdf, 18.05.2017
- 11) Pistor, V., Soares, B.G., and Mauler, R.S. (2012). Kinetic degradation of hybrid polymer nanocomposites. <http://www.4spepro.org/pdf/004453/004453.pdf>, 18.05.2017
- 12) SARISTU (2011). Smart İntelligent Aircraft Structures. <http://www.saristu.eu/project/objectives/> ,18.05.2017

- 13) Jia, C., and Yong, Z. (Producer). (2017). Single, double, multiwall carbon nanotube properties and applications. Retrieved from <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/single-double-multi-walled-carbon-nanotubes.html>, 18.05.2017

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yelda AKÇİN ERGÜN
Doğum Yeri ve Tarihi : Uşak, 07.02.1986
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 505 457 0609 / yeldaakcin@aku.edu.tr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Uşak Orhan Deniz Anadolu Lisesi (1997-2004)
Lisans : Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, (2004-2008)
Yüksek Lisans : Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2008-2011)
Doktora : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2012-2017)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Afyon Kocatepe Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü : 2010-

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

Kayalı Y., Akçin Y., Mertgenç E., Gökçe B., (2017). Investigation of kinetics of borided ductile and lamellar graphite cast iron. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 53(1), 127-132., Doi: 10.1134/S2070205117010105 (Yayın No: 3464363)

Akçin Y., Karakaya Ş., Soykasap Ö., (2016). Electrical Thermal and Mechanical Properties of CNT Treated Prepreg CFRP Composites. Materials Sciences and Applications, 7(09), 465-483., Doi: 10.4236/msa.2016.79041 (Yayın No: 3042791)

Aytekin H., Akçin Y., (2013). Characterization of borided Incoloy 825 alloy. *Materials & Design*, 50, 515-521., Doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.015 (Yayın No: 2326540)

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

Soykasap O., Karakaya S., Gayretli A., Akçin Y., (2015). Preliminary Design of Deployable Flexible Shell Reflector of an X band Satellite Payload. 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, Doi: 10.2514/6.2015-0945 (Tam Metin Bildiri/) (Yayın No:2150248)

Soykasap O., Karakaya Ş., Gayretli A., Akçin Y., (2016). Structural Dynamic Response of Deployable Thin Shell Reflector in Folded Configuration. 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, Doi: 10.2514/6.2016-2169 (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:3043163)

Özçatal M., Akçin Y., Kara R., Çolak F., Başpınar M. S., (2015). High Temperature Insulation Via Highly Porous Expanded Silica Gel And Diatomite. International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition, PPM (Tam Metin Bildiri/) (Yayın No:2155405)

Karakaya Ş., Akçin Y., (2015). Investigation of Electrical Conductivity of Few Laminated Composite Materials. International Congress on Natural and Engineering Sciences (Yayın No:2153687)

Soykasap Ö., Karakaya Ş., Akçin Y., Çolakoğlu M., (2015). Finite Element Modeling of CNT Doped CFRP Plates for Lightning Strike Damage. Proceedings of SARISTU Final Conference, Doi: 10.1007/978-3-319-22413-8 (Tam Metin Bildiri/) (Yayın No:2152616)

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

Akçin Y., Asi O., Yeşil Ö., (2013). Kompozit Malzemelerin Kaplanabilirliğinin İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(7), Doi: 10.5505/pajes.2013.52724

Projelerde Yaptığı Görevler:

Az tabakalı karbon epoksi malzemelerde elektrik iletkenliğinin incelenmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, , 26/07/2013 - 28/04/2015 (ULUSAL)

Uydu Platformu İçin Açılabilir Katlanabilir Kompozit Reflektör Konsept Analizi Programı, Diğer kamu kuruluşları (Yükseköğretim Kurumları hariç), Araştırmacı, , 21/11/2013 - 26/09/2016 (ULUSAL)

Smart Intelligent Aircraft Structures, Avrupa Birliği, Araştırmacı, , 01/09/2011 - 01/09/2015 (ULUSLARARASI)

Tasarım:

Ku-band için tasarlanmış açılıp katlanabilir kompozit reflektör anten, Ömer Soykasap, Şükrü Karakaya, Ahmet Gayretli, Yelda Akçin, Bilimsel Tasarım, Savunma Bakanlığı (SSM) Projesi kapsamında konsept tasarım gerçekleştirilmiş ve ön analiz çalışmaları yapılmıştır., Savunma Bakanlığı (SSM) Projesi kapsamında konsept tasarım gerçekleştirilmiş ve ön analiz çalışmaları yapılmıştır., 12.11.2013 -11.01.2015