

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇAY ATIĞI BİYOKÜTLESİNDEN TÜRETİLEN YÜKSEK
PERFORMANS KARBONUN TRANSİSTÖR UYGULAMALARINA
UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI**

SALİHA NUR BIÇAKÇI

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ GÖKÇEN AKGÜL
TEZ JÜRİLERİ
DOÇ. DR. ERCÜMENT YÜZÜAK
DR. ÖĞR. ÜYESİ İBRAHİM DÜZGÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RİZE-2019
Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇAY ATIĞI BİYOKÜTLESİNDEN TÜRETİLEN YÜKSEK PERFORMANS
KARBONUN TRANSİSTÖR UYGULAMALARINA UYGUNLUĞUNUN
ARAŞTIRILMASI

Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL danışmanlığında, Saliha Nur BIÇAKÇI tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 11/07/2019 tarihinde Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

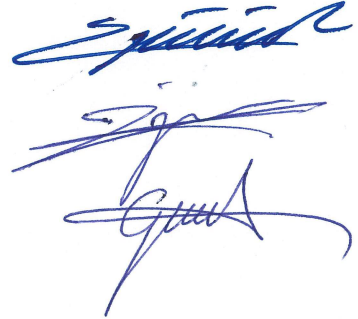
Unvanı Adı Soyadı

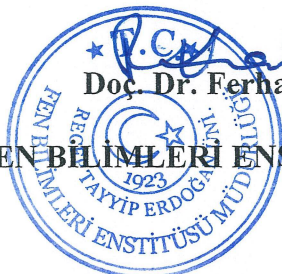
İmzası

Başkan : Doç. Dr. Ercüment YÜZÜAK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim DÜZGÜN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL




Doç. Dr. Ferhat KALAYCI
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması yenilenebilir karbon materyali olan endüstriyel çay atığından türetilen yüksek performans karbon malzemesinden grafen elde edilebileceği düşüncesiyle hazırlanmıştır. Türetilen yeni karbon malzeme alan etkili transistörde aktif iletken kanal olarak kullanılmıştır. Aygıt karbon malzemenin etkisi incelenmiştir.

Yüksek lisans çalışmalarım ve tez sürecim boyunca benden bilgi, tecrübe, önerilerini ve desteğini esirgemeyen, her konuda bana her türlü desteği sağlayan, kapısını her çaldığımda güler yüzüyle karşılayan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doç. Dr. Vagıf NEVRUZOĞLU, Doç. Dr. Eyüp Fahri KESKENLER hocalarıma, şimdiye kadar eğitim hayatımda üzerimde emeği bulunan tüm hocalarıma teşekkür ederim. Prof. Dr. Murat TOMAKİN hocama aygıt ölçümlerini almamda yardımcı olduğu bilgi ve deneyimini esirgemediği için ayrıca teşekkür etmeyi kendime borç bilirim. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı imkânlarını ardına kadar bizlere açan Öğr. Gör. Tuğba BAYAZIT'a, Öğr. Gör. Esra DEMİR'e ve Öğr. Gör. Dr. Murat ŞİRİN'e teşekkür ederim. Katkılarından dolayı RTEÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Son olarak başladığım her yolda beni destekleyen, üzerimde ödeyemeyeceğim emekleri olan, manevi ve maddi desteklerini yanımda hissettiğim eğitimim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan değerli canım annem Ayşe BIÇAKÇI'ya, babam Süleyman BIÇAKÇI ve kız kardeşlerim Zeynep'e, Selva'ya, ablam Kafiye'ye arkadaşlarım Ceren, Esra ve Nida'ya çok teşekkür ederim.

Hazırlanan bu Yüksek lisans tezi Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FLY-2018-970 nolu proje ile desteklenmiştir.

Saliha Nur BIÇAKÇI

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Çay Atığı Biyokütlesinden Türetilen Yüksek Performans Karbonun Transistör Uygulamalarına Uygunluğunun Araştırılması” başlıklı bu tezin, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 11/07/2019



Saliha Nur BİÇAKÇI

Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

ÇAY ATIĞI BİYOKÜTLESİNDEN TÜRETİLEN YÜKSEK PERFORMANS KARBONUN TRANSİSTÖR UYGULAMALARINA UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

Saliha Nur BIÇAKÇI

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL

Diyotlar, transistörler ve benzeri aygıtlar gibi ileri teknoloji elektronik alanlarında karbon malzemeler çalışılmaktadır. Gözenekli karbon materyallerin elektronik aygıtlarda kullanımı ve enerji depolama alanlarında uygulamaları da daha ekonomik yöntemler geliştirilmesi ve boyutların küçültülmesi bakımından önemlidir. Son yıllarda literatürde çok sayıda karbon kanallı transistör rapor edilmiş olsa da, gözenekli karbon olarak biyokütleden elde edilen karbonun transistör uygulamaları sınırlı sayıdadır. Karbon malzemelerin çoğu, giderek tükenmekte olan fosil kaynaklıdır. Bu sebeple yenilenebilir karbon kaynakları önem kazanmaya başlamaktadır. Biyokütle tek yenilenebilir karbon kaynağıdır. Piroliz yöntemi ile biyokömür (biochar) olarak adlandırılan karbonize materyale dönüştürülebilir. Ancak biyokömürün karbon tabanlı elektriksel aygıtlara uygulanabilmesi için yapısının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında endüstriyel çay atıklarından elde edilen biyokömür, kimyasal ve fiziksel yöntemlerle yüksek performans karbon materyale (grafen benzeri) dönüştürülmüştür. Oluşturulan bu karbon ile üst kontak/üst kapı yapıları etkili transistörler gümüş boya kullanılarak kontaktları gerçekleştirilmiş ve karakterizasyonları yapılmıştır. Yeni türetilen karbon materyal SEM, XRD, Raman Spektroskopisi, FT-IR, TGA yöntemleriyle karakterize edilmiştir. Geliştirilen alan etkili karbon transistörün akım-gerilim (I-V) karakteristikleri belirlenmiştir.

2019, 83 sayfa

Anahtar Kelimeler: Çay Atıkları, Karbon, Alan Etkili Transistör

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SUITABILITY OF HIGH PERFORMANCE CARBON DERIVED FROM TEA WASTE BIOMASS TO TRANSISTOR APPLICATIONS

Saliha Nur BIÇAKÇI

**Recep Tayyip Erdogan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Energy System Engineering
Master Thesis
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gökçen AKGÜL**

Carbon materials are studied in high-tech electronics such as diodes, transistors similar devices. The use of porous carbon materials in electronic devices and their application in energy storage areas are important in terms of developing more economical methods and reducing the dimensions. Although a large number of carbon channel transistors have been reported in the literature in recent years, transistor applications of carbon from biomass as porous carbon are limited. Most of the carbon materials are originated from fossil sources that are diminishing. So, renewable carbon resources are gaining importance. Biomass is the only renewable carbon resource. It can be converted to carbonized material called biochar by pyrolysis. However, in order to apply the biochar to carbon-based electrical devices, its structure needs to be improved. In this thesis, biochar obtained from industrial tea wastes was converted to high performance carbon material (graphene-like) by chemical and physical methods. The upper contact / upper door structured field effect transistors (FETs) were made by using these carbon materials that silver paint was used as contact point paste. The newly derived carbon materials were characterized by SEM, XRD, Raman Spectroscopy, FT-IR, TGA methods. The current-voltage (I-V) characteristics of the developed FETs were determined.

2019, 83 pages

Keywords: Tea Waste, Carbon, Field Effect Transistor

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	II
ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Transistörler	4
1.1.2. Alan Etkili Transistör (FET) Özellikleri	8
1.2. Transistörlerde Karbon	14
1.3. Grafen Üretimi.....	17
1.3.1. Mekanik Pul Pul Dökülme.....	18
1.3.2. Kimyasal Pul Pul Dökülme.....	18
1.3.3. Elektrokimyasal Pul Pul Dökülme Yöntemi.....	19
1.3.4. Epitaksiyel İnce Film Yöntemi	19
1.3.4. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi.....	20
1.4. Grafen Transistörlerin Yapısı ve Çalışma Prensibi	20
1.5. Biyokütle Kaynaklı Yüksek Performans Karbon ve Üretimi	24
1.6. Literatür Özeti.....	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	34
2.1. Karbon Malzemelerin Hazırlanması	35
2.1.1. Çay Atığı Biyokütlesinden Biyokömür Üretimi	35
2.1.2. Biyokömürden ve Grafitten İndirgenmiş Grafen Oksit Üretimi	37
2.1.3. Karbon Malzemelerin Yapısal Karakterizasyonu	39
2.2. Alan Etkili Karbon Transistör Üretimi.....	39
2.2.1. Altlık Hazırlanması	39
2.2.2. Aygıt Üretimi	41
2.2.3. Karbon Numunelerin Elektriksel Ölçümleri	49

2.2.4.	Karbon Numunelerin Optiksel Ölçümleri	45
3.	BULGULAR	50
3.1.	Karbon Malzemelerin Karakterizasyonu	50
3.1.1.	SEM Analizleri.....	50
3.1.2.	X-ışını Kırınım Difraktometri (XRD) Analizi	52
3.1.3.	Raman Spektroskopisi Analizi	56
3.1.4.	FT-IR Spektroskopisi Analizi	59
3.1.5.	TGA Analizi	60
3.1.6.	Karbon Numunelerin Optik Özellikleri.....	62
3.1.7.	Karbon Numunelerin Elektriksel İletkenlik Özellikleri	64
3.2.	Alan Etkili Karbon Transistörlerin Karakterizasyonu	65
4.	TARTIŞMA ve SONUÇLAR	68
5.	ÖNERİLER	74
	KAYNAKLAR	76
	ÖZGEÇMİŞ	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.	Elektronikte grafene dayalı ana elektronik aygıtlar	2
Şekil 2.	p-n Eklem Diyot Yapısı (a), Transistör Yapısı (b), Basit bir transistörün kutuplanması (c)	5
Şekil 3.	Transistör aygıtı çeşitleri	6
Şekil 4.	pnp tip transistör eklem yapısı (a), npn tip transistör eklem yapısı (b)	6
Şekil 5.	Transistörlerin çalışma prensibi	7
Şekil 6.	n tip MOSFET' in yandan görüntüsü	9
Şekil 7.	Alan etkili transistörde kanalın oluşması	10
Şekil 8.	Alan etkili transistörde üç farklı çalışma modu, $V_{DS}=0$ (a), $V_{DS}<V_{GS}-V_{Th}$ (b), $V_{DS}>V_{GS}-V_{Th}$ (c)	11
Şekil 9.	n kanal oluşturmali MOSFET, Transfer (giriş) Karakteristiği (a), Çıkış Karakteristiği (b)	13
Şekil 10.	p kanal oluşturmali MOSFET, Transfer (giriş) Karakteristiği (a), Çıkış Karakteristiği (b)	14
Şekil 11.	Karbon allotropları	15
Şekil 12.	Dijital elektronikte eğilimler	16
Şekil 13.	Grafen alan etkili transistörün yapısı, arka kapılı (a), üst kapılı (b), çift kapılı (c)	21
Şekil 14.	Ön besleme durumunda ambipolar transfer karakteristiği (a), Üst-Gate voltajının ($V_{GS,üst}$) farklı değerleri için n tipi geniş alan grafen kanallı bir MOSFET' in çıkış karakteristikleri (Drain akımı I_D ' ye karşılık Drain-Source Voltajı V_{DS}) (b)	23
Şekil 15.	Grafen nanoşerit ve Si-CMOS' ta Drain akımı ve Drain voltajının farklı değerleri için Drain-Source voltajına karşı ($V_{GS} = 0.175, 0.35, 0.525, 0.7$ Volt) Drain-Source akımı (a), GNR ve Si-CMOS' ta $V_{DS}= 0.7$ V için G-S voltajına karşı D-S akımı (b)	24
Şekil 16.	Biyokömürde karbon yapısı, Düzensiz rastgele yapıda aromatik karbon tabakaları (a), Türbostatik yapıda karbon tabakalarının büyümesi (b), Yüksek sıcaklıklarda grafit yapısı (c)	25
Şekil 17.	Üretilen grafen benzeri karbon yapılarda deneysel uygulama adımları, Çay atıklarından indirgenmiş grafen oksit sentezi (a), Ticari grafit tozundan indirgenmiş grafen oksit sentezi (b)	34
Şekil 18.	Piroliz reaktörü şematik çizim	35
Şekil 19.	Piroliz sisteminin programlanması	36
Şekil 20.	rGO-NMP ve BC-Fe-Y-rGO- NMP çözeltileri (a), santrifüj sonrası rGO-NMP (b)	38

Şekil 21. Üst kapı-üst kontak yapıda alan etkili karbon transistor yapısı.....	40
Şekil 22. n Si/SiO ₂ altlık optik mikroskop görüntüsü	41
Şekil 23. Alan etkili karbon transistör işlem basamakları	42
Şekil 24. Si/SiO ₂ altlıkların p katkılanmış hali (a), Gümüş kontaklı p-n-p yapı (b)	42
Şekil 25. Keithley 2410 aygıtı (a), Üretilen alan etkili karbon transistör aygıtı (b)	43
Şekil 26. p-tip alan etkili transistör, yapısı (a), elektriksel bağlantısı (b).....	43
Şekil 27. Alan etkili karbon transistörlerin elektriksel bağlantı düzeneği.....	44
Şekil 28. rGO ve BC-Fe-Y-rGO numuneleri için, cam altlık üzerine ince film kaplanması (a), cam altlık üzerinde ince filmlerin dört nokta temas bağlantıları (b),ince filmlerin Van der Pauw dört nokta öz direnç ölçüm düzeneği (c-d).....	45
Şekil 29. Van der Pauw dört nokta öz direnç ölçüm yönteminde kullanılan temas noktalarının gösterimi (a-b), Hall etkisi taşıyıcı yoğunluğu ölçüm yönteminde kullanılan temas noktalarının gösterimi (c-d)	47
Şekil 30. Ticari Grafit Tozu SEM görüntüleri.....	50
Şekil 31. GO SEM görüntüleri (1 ve 10µm)	50
Şekil 32. rGO SEM görüntüleri (1 ve 10µm)	51
Şekil 33. BC-Fe-Y SEM görüntüleri (1 ve 10µm)	51
Şekil 34. BC-Fe-Y-GO SEM görüntüleri(1 ve 10µm)	51
Şekil 35. BC-Fe-Y-rGO SEM görüntüleri (1 ve 10µm).....	52
Şekil 36. GO (a) ve rGO (b) SEM görüntüleri	52
Şekil 37. BC-Fe-Y XRD Deseni (a), Ticari Grafit Tozu XRD Deseni (b).....	53
Şekil 38. Karbon malzemelerin XRD Deseni.....	55
Şekil 39. Grafit ve GO XRD desenleri (Rao vd., 2018).....	56
Şekil 40. Kullanılan Biyokütle Kaynaklı Karbon Materyallerin Raman Spektroskopileri	57
Şekil 41. GO ve rGO' nun Raman Spektroskopisi.....	58
Şekil 42. rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin FT-IR görüntüleri.....	59
Şekil 43. Biyokömür karbon numunelerinin TGA eğrileri.....	60
Şekil 45. rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin TGA eğrileri karşılaştırması	61
Şekil 46. Elde edilen rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerin geçirgenliğinin dalga boyu ile değişimi	62
Şekil 47. rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin soğurma-dalga boyu grafiği	63
Şekil 48. rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerin $(\alpha \cdot hv)^2$ değerlerine karşılık foton enerji (hv) grafiği yasak enerji aralıklarının gösterimi.....	64

Şekil 49. Alan Etkili Karbon Transistörlerin oda sıcaklığında çıkış karakteristiklerinin karşılaştırması (V_{GS} ; 4V adımlarla -4,-20 V arasında değişmiştir.).....	66
Şekil 50. Alan Etkili Karbon Transistörlerin oda sıcaklığında giriş karakteristiği ($V_{DS}= 0.1$ V sabit)	67



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Kanal Oluşturmalı Alan Etkili Transistör Çalışma Modları.....	12
Tablo 2. BC-Fe-Y tozu ile 00-001-0640 ve 00-002-0456 kart numaralı Grafit Tozunun hkl , 2θ ve d değerleri	54
Tablo 3. rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerinin enerji bant aralıkları	64
Tablo 4. Wan der Pauw 4 Nokta direnç ve Hall ölçüm sonuçları.....	65



SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

TW	Endüstriyel Çay Atığı (Tea Waste)
Cu	Bakır
Fe	Demir
XRD	X-Işını Kırınımı (X-Ray Diffraction)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TGA	Termogravimetrik Analiz
UV	Morötesi (Ultraviole)
rpm	Dakika Devir Sayısı
E_g	Enerji Band Aralığı
E	Elektrik Alan
ρ	Özdirenç (Resistivity)
σ	Elektriksel İletkenlik
α	Soğurma Katsayısı
S	Siemens
T	Geçirgenlik (Transmittance)
g	Gram
h	Planck Sabiti ($6,62 \times 10^{-34}$ J.sn)
mg	Miligram
sn	Saniye
m	Metre
nm	Nanometre
cm	Santimetre
N	Newton
B	Bor
N	Azot
Ni	Nikel
Cu	Bakır
Ru	Rubidyum
Ir	İridyum
μ	Mikro
F	Farad

K	Kelvin
Ru	Rubidyum
Ir	İridyum
PMMA	Polimetilmetakrilat
°C	Santigrat derece
GO	Grafen Oksit
rGO	İndirgenmiş Grafen Oksit
Ar	Argon
NH ₃	Amonyak
BJT	İki Kutuplu Eklem Transistör (Bipolar Junction Transistor)
JFET	Eklem Alan Etkili Transistör (Junction Field Effect Transistor)
FET	Alan Etkili Transistör (Field Effect Transistor)
MOSFET	Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Field Effect Transistor)
HEMT	Yüksek Elektron Hareketlilik Transistörü (High Electron Mobility Transistor)
GNR	Grafen nanoşerit (Graphene Nanoribbon)
V _{GS}	Kapı-Kaynak Gerilimi (Gate-Source Voltage)
V _{DS}	Akaç-Kaynak Gerilimi (Drain-Source Voltage)
I _{DS}	Akaç-Kaynak Akımı (Drain-Source Current)
Å	Angstrom
CMOS	Silikon Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum Oksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
HfO ₂	Hafniyum Oksit
SiC	Silisyum Karbür
UV	Ultraviyole
f _t	Kesme (cut-off) Frekansı
V _{Th}	Eşik Gerilimi
eV	Elektron Volt
V	Volt
L	Kanal Uzunluğu

W	Kanal Genişliği
CVD	Kimyasal Buhar Depolama (Chemical Vapor Deposition)
HCl	Hidroklorik Asit
HF	Hidroflorik Asit
KMnO ₄	Potasyum Permanganat
C	Karbon
O	Oksijen
-COOH	Karboksil
-OH	Hidroksil
C-O-C	Epoksi
C=O	Karbonil
NMP	1-Metil-2-Pirolidon

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Teknoloji geliştikçe var olan elektronik aygıtların çok küçük boyutlu ve yüksek frekansta düşük güç tüketimiyle çalışmaları ihtiyaç haline gelmiştir. Silisyum (Si) temelli transistör teknolojisine dayalı tamamlayıcı metal oksit yarıiletken (CMOS) aygıtlar boyut, çalışma frekansı, kısa kanal etkileri, yüksek katkılama dalgalanmaları bakımından belirli sınırlarına ulaşmıştır. Bu gibi sorunların üstesinden gelmek için karbon elektroniği konusu ve mevcut Si temelli aygıtlarla uyumu son yıllarda bilim ve teknolojiye dikkat çekici bir çalışma alanı oluşturmuştur.

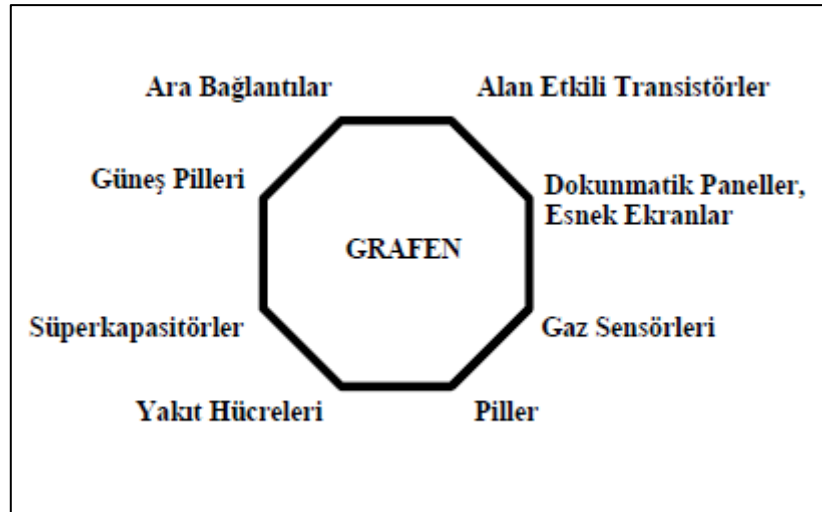
Yarıiletken teknolojilerin çoğu Si elementi ve türevleri üzerine kuruludur. Bir yarıiletken olan Si, sıcaklık ve nem gibi çevresel etkilere karşı dayanıklı ve yüksek iletiminin üstün olması gibi avantajlarıyla elektronik devre elemanlarının yapısında kullanılan en yaygın malzemedir. Fakat yüksek verime sahip Si tabanlı elektronik aygıtların üretiminde kullanılan teknolojiler çok pahalı ve küçük ölçekte uygulamalar için uygun olmamaktadır. Buna ek olarak, Si tabanlı aygıtların performansını etkileyen parametreler teorik sınırlarına ulaşmıştır. Bu sebeple Si' ye alternatif olması beklenen yarıiletken malzemelerin geliştirilmesi şarttır. 2004 yılında Manchester Üniversitesi' nde Geim ve Novoselov (Novoselov vd., 2004; Novoselov vd., 2005) tarafından grafit malzemesinden soyularak keşfedilen elektronik, mekanik, kimyasal, optik, termal, manyetik ve biyolojik özelliklere sahip *Grafen* ilgiyi üzerine çekmektedir. Karbon allotropları arasında grafit; elektronik ve biyolojik mühendislik dallarında fotovoltaik ve enerji depolama uygulama alanlarının geliştirilmesinde en iyi malzemelerdendir.

CMOS, yüksek yoğunluklu modern mikro elektronikte bütünleşik devre ve sistemlerin yüksek performansta ve düşük güçte uygulanması için gereken boyut ölçeklendirmesini sağlayan günümüz baskın teknolojisidir. Haberleşme, ulaşım, eğitim ve tıbbi bakım gibi içinde insanın olduğu süreçlerin tamamı CMOS teknolojisine dayanmaktadır. Seri üretiminin olması transistör tabanlı elektroniklerin geniş çerçevede uygulanmasını sağlamaktadır. Bu teknoloji içinde MOS transistörlerin nano ölçekte boyutlarının kaçınılmaz şekilde azaltılması nedeniyle birçok önemli zorluklarla

karşılaşılmaktadır. Yüksek güç harcanması, transistörün temel parametre sapmaları ve yüksek üretim maliyetleri gibi sorunlar, aygıt ölçeklendirmede engel olarak CMOS teknolojisinin yüksek performanslı uygulamalar için uygunluğunu gelecekteki teknolojiler için azaltacaktır.

Elektronik aygıtlarda transistörler pek çok amaç için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu aygıtların olabildiğince üretim maliyetlerinin düşük olması ve düşük enerji tüketiminde çalışması gibi yüksek kalitede çalışma performansları sergileyebilmeleri çok önemlidir.

Grafen geniş ve esnek yüzeylere uygulanabilme kolay ve hızlı üretim yöntemleri bakımından son yıllarda büyük ilgi çekmiştir. Grafen elektrokimyasal enerji depolama ve esnek elektronik gibi uygulamaları yapılan, çelikten 207 kat daha güçlü, saydam, ısı ve elektriği iyi ileten yenilikçi bir malzemedir. Şekil 1’ de görüldüğü gibi grafenin farklı uygulamaları mevcuttur. Süperkapasitörlerde, güneş pillerinde, şeffaf iletken filmlerde, ısı yayıcılarında, akustik hoparlörlerde, mekanik eyleyicilerde ve radyo frekans alan etkili transistörlerde (FET) kullanılmaktadır (Bernal, 2016).



Şekil 1. Elektronikte grafene dayalı ana elektronik aygıtlar (Bernal, 2016).

Elektronik aygıtlar genellikle yarı iletken malzemeler içeren devrelerden oluşmaktadır. Yarı iletken malzemeler; polimerler ve metal oksitler gibi organik ve inorganik temelli olabilmektedir (Ahmad, 2014; Zhang, 2010). Yüksek performans

aygıtların geliştirilmesinde materyal olarak karbon ise günümüzde önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir (Avouris ve Dimitrakopoulos, 2012; Harris, 2017; Kreupl, 2014). Elektronik aygıtlarda karbon materyaller (grafit, grafen, karbon nanotüp, karbon nanohorn, karbon nanooions, karbon nanoribbons vb.); sinyallerin doğrultulması, esneklik sağlanması, düşük güç tüketimi, yüksek anahtarlama hızı, boyutların küçültülmesi ve düşük maliyet gibi nedenlerle kullanılmaktadır (Semple vd., 2017).

Karbon materyaller, mekanik, termal ve elektronik kararlılık göstermektedirler. Özellikle grafen, transistör ve diyot gibi elektronik aygıtlarda uygulamaları çokça araştırılan materyaldir (Peng vd., 2014). Ancak grafen, gösterdiği Dirak-benzeri davranış ve band aralığının olmaması sebebi ile yarı iletken özelliği gösterememektedir. Yarı iletken özelliği kazandırmak için COOH, OH, C-O-C gibi fonksiyonel gruplar içeren ve yapısına p/n özellik katılabilecek aktif grafen oksit materyali kullanılmaktadır (Masoumi vd., 2017).

Son zamanlarda, nano-karbon veya grafen materyallerinden farklı olarak, gözenekli karbon materyaller elektronik aygıtlarda ve enerji depolama alanlarında uygulama bulmuştur. Bu materyaller daha ekonomik yöntemler geliştirilmesi bakımından önemlidir (Rahimi vd., 2016). Gözenekli karbon, biyokütlenin pirolizi ile elde edilebilir. Piroliz ile elde edilen karbon ürün biyokömür (biochar) olarak adlandırılır. Biyokütle; selüloz, hemiselüloz, lignin gibi karbon ağırlıklı organik moleküller ve sodyum, demir, potasyum ve silisyum gibi bazı temel inorganik elementlerden oluşur. İnert gaz veya sınırlı miktarda hava içeren ortamda biyokütlenin ısıtılması (pirolizi) sonucu biyokütlerdeki uçucu bileşikler uzaklaşır ve organik kısım karbonize olur. Böylece % 75-85 oranında karbon içeren yenilenebilir, sürdürülebilir ve çevreci karbonize ürün elde edilir (Lehmann ve Joseph, 2009; Li vd., 2016).

Biyokömür genellikle amorf yapıdadır (tek tip kristal yapısından ziyade sp^3 , sp^2 , sp gibi karışık hibritleşme yapıları içerir) Yüzey fonksiyonel gruplarınca (COOH, OH, C-O...) zengindir. Elektriksel iletkenliği ihmal edilecek düzeyde düşüktür (Gabhi vd., 2017). Karbonize materyalin elektrik aygıtlarında uygulanabilmesi için en azından yarı iletken özelliği göstermesi yani grafit/grafen gibi yapısındaki sp^2 bağlarınca zengin

olması gerekmektedir.

Amorf yapıdaki biyokömürün karbon yapısı grafit/grafen-oksit benzeri yapılara çeşitli termal/katalitik grafitizasyon, kimyasal aktivasyon gibi metotlarla düzenlenebilir ve elektriksel iletkenlik özelliği geliştirilebilir. Ayrıca, biyokömürün fonksiyonel gruplarca zengin olması, yarı iletkenlik özelliğine katkıda bulunur ve yapıya diğer atomların katkılanmasını da kolaylaştırır (Barbera vd., 2014; Lee vd., 2018; Maiti vd., 2008; Roy, 2017).

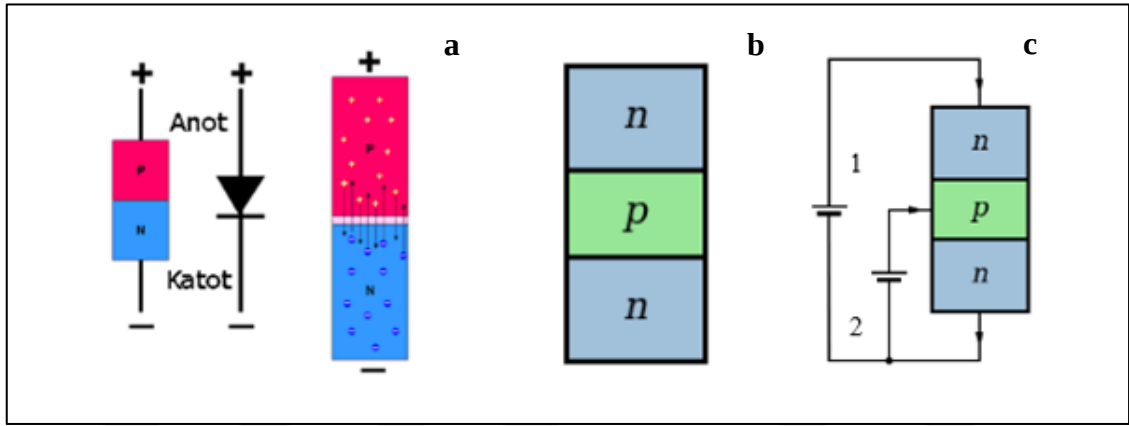
Bu çalışmada endüstriyel çay atıklarından katalitik piroliz yöntemi ile biyokömür türetilmiş, daha sonra kimyasal yöntemlerle karbonize biyokömür materyalinden yarı iletken karbon geliştirilerek transistörde kanal malzemesi olarak etkisi incelenmiştir. Çalışma, iki ana başlık altında yapılmıştır; (a) biyo-atıklardan yarı iletken malzeme geliştirilmesi, (b) bu malzemenin transistörde kullanılarak sinyal gücüne etkisinin incelenmesidir.

1.1.1. Transistörler

Transistörler bilgisayar, cep telefonları, radyo, televizyon gibi neredeyse tüm elektronik aygıtlarda bulunan yarıiletken malzemelerden oluşan, elektrik akımını kontrol eden aktif devre elemanlarıdır. Kristal Germanyum (Ge) temelli ilk transistör 1947 yılında Bell Laboratuvarları'nda John Bardeen ve Walter Brattain tarafından deneysel olarak üretilmiştir. Adını transfer ve resistör kelimelerinin birleşiminden alan transistör, taşıyıcı direnç anlamına gelir. Elektrik sinyalini değiştirme (açma-kapama) yada yükseltme (arttırma-güçlendirme) özellikleriyle bir çok elektronik aygıtın vazgeçilemeyen bileşenidir.

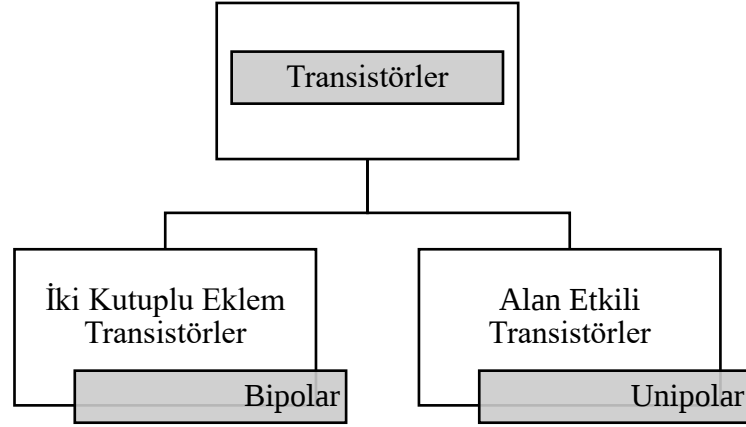
Yarıiletkenler normalde yalıtkan benzer davranış sergilemektedir. Fakat kendilerini oluşturan atomların en dış yörüngelerinde bulunan elektronlar, yeterli enerjiye sahip olduklarında serbest kalır. Böylece elektriksel iletkenlikleri metaller ile yalıtkanlar arasında değere sahip olur. Si, Ge, GaAs gibi yarıiletkenlerin aygıt uygulamalarında kullanılabilmesi için n-tipi ya da p-tipi katkılanmaları gerekmektedir. Eğer iki tür farklı katkılanmış p ve n tipi malzeme yan yana getirilirse, çoğunlukça artı

yüke sahip p tipi bölgeden çoğunlukça eksi yüke sahip n tipi bölgeye doğru bir elektrik alan ($\vec{E}$) oluşur. Oluşan bu elektrik alan negatif yüklü elektronların p tipi bölgeye, p tipi bölgesindeki pozitif yüklü deliklerin (boşlukların) ise n tipi bölgeye doğru hareket etmesini sağlar. Fakat bu durum sonsuza kadar değil, n ve p tipi bölgeler yük taşıyıcı yoğunlukları bakımından doyuma erişinceye kadar devam eder. Elektrik akımının içerisinde tek yönde akmasını sağlayan yarıiletken devre elemanı diyot, n ve p tipi katkılandırılmış yarıiletken maddelerin biraraya getirilmesiyle oluşturulur. Diyot şekil 2a’ da görüldüğü gibi iki farklı şekilde kutuplanabilir.



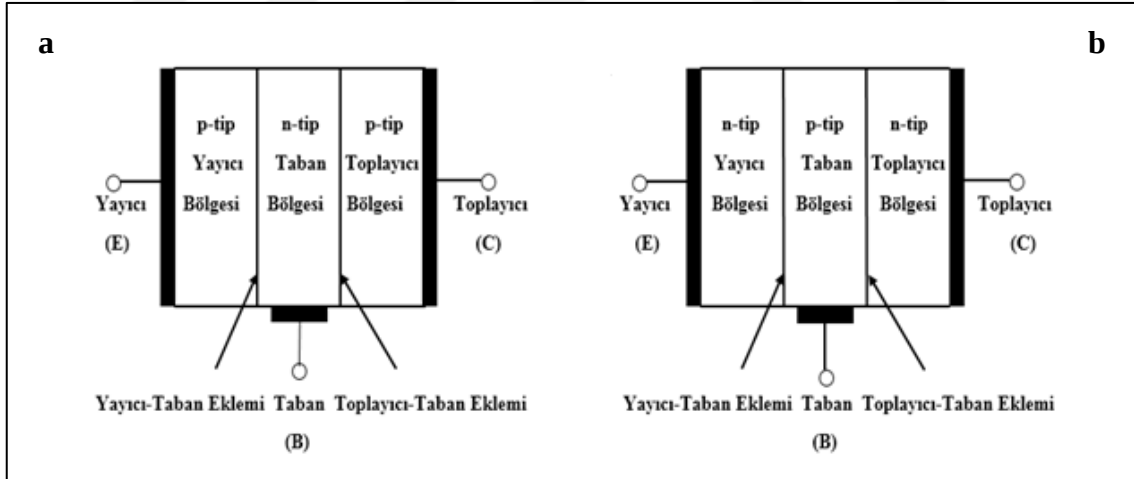
Şekil 2. p-n Eklem Diyot Yapısı (a), Transistör Yapısı (b), Basit bir transistörün kutuplanması (c) (URL-3).

Şekil 2a’ da görülen diyotun eğer n kısmına negatif, p kısmına ise pozitif gerilim uygulanırsa diyot ileri yönde kutuplanır. Tam tersi n kısmına pozitif p kısmına ise negatif gerilim uygulanması durumunda diyot ters yönde kutuplanır. Bir diyot aygıtı ileri yönde kutuplanma durumunda akım geçirebilir. Ters kutuplanma durumunda ise diyot akım geçiremez. Üç farklı yarıiletken bölgenin yani iki diyotun anot bölgesinden birleştirilmesiyle oluşan yapı transistör aygıtını meydana getirir (Şekil 2b). Oluşan yeni yapının iki ucuna Şekil 2c’ de görüldüğü gibi 1 numaralı güç kaynağı ile gerilim uygulanırsa p-n birleşimlerinden bir tanesi ters yönde kutuplanır. Eğer ikinci bir 2 numaralı güç kaynağı aygıtı bağlanır ise orta ve alt kısımda kalan p-n yapı ileri yönde kutuplanır. Bu durumda 2 numaralı güç kaynağı sayesinde transistör aygıtı ileri yönde kutuplanarak akım geçişi sağlanır.



Şekil 3. Transistör aygıtı çeşitleri.

Transistörler iki kutuplu eklem transistörler (bipolar junction transistor, BJT) ve alan etkili transistörler (field effect transistor, FET) olarak genel anlamda iki gruba ayrılmaktadır (Şekil 3). Şekil 4’ de görüldüğü gibi üç yarıiletken malzemenin npn veya pnp şeklinde bir araya getirilmesiyle oluşturulan, iki kutuplu eklem transistör (BJT) elektron (e) ve deliklerin (h) hareketiyle oluşturduğu akım ile kontrol edilen transistörlerdir.



Şekil 4. pnp tip transistör eklem yapısı (a), npn tip transistör eklem yapısı (b) (URL-1).

İki yada çift kutuplu eklem transistörler Emitör (E), Base (B) ve Kollektör (C) olarak isimlendirilen üç bacaklı aygıtlardır. Taban (Base) bölgesi genellikle üretimde yoğunluğu az ve çok ince tabaka olarak tasarlanır. Fakat Yayıcı (Emitör) ve Toplayıcı (Kollektör) bölgeleri ise yeterince kalındır ve yoğunluğu yüksektir. B terminaline sinyal uygulandığında C ve E arasındaki direnç azalarak, aygıt üzerinden akım geçebilir. Yani C-E arasından geçecek akım B terminaline uygulanan akıma bağlı olarak değişir.



Şekil 5. Transistörlerin çalışma prensibi (URL-2; URL-3).

Transistörler elektrik direncinin değişmesine bağlı olarak çalışır. Çalışma prensibi bir musluktan akan suya benzetilir. Şekil 5’ de görülen musluk örneğinde, musluğu açıp kapamaya yarayan tutacak B (BJT’ lerde) yada G (FET’ lerde) terminaline benzetilir. Musluğun tutacağına uygulanan kuvvet ile suyun akıp akmayacağı akım olarak, yada suyun ne hızla akacağı ise akım şiddeti olarak düşünülür. Eğer tutacağa herhangi bir kuvvet uygulanmaz ise, bu da direnç olarak düşünülebilir. Suyun musluğa gireceği kısım C (yada FET’ lerde S), suyun musluktan çıktığı kısım ise E (yada D) terminali olarak düşünülebilir. Bir transistör, girişine uygulanan küçük değerlerde bir akımla büyük değere sahip elektrik üretir (anahtarlama davranışı) veya zayıf bir sinyali güçlendirebilir (yükseltme davranışı). Yani küçük bir elektrik sinyaliyle (BJT’ lerde akım, FET’ lerde gerilim) güçlü bir elektrik sinyali elde edilmesini sağlar.

İki kutuplu eklem transistörlerde p-n eklem diyotlardaki gibi uygulanan potansiyel ile akım değiştirilirken, alan etkili transistörlerde yarıiletken tabakadan yalıtılan bir başka elektrota uygulanan potansiyel sonucu oluşan kapasitif etki yarıiletken tabakada iletken bir kanal bölgesi oluşturur. Alan etkili transistörler BJT’ lere göre, anahtarlama davranışında sapmanın olmaması, düşük gürültüde çalışmaları, giriş empedanslarının yüksek olması, boyutlarının küçük olması, düşük ve yüksek frekanslarda kullanılmaları nedeniyle yüksek işlemcilerde sahip entegre devrelerde kullanılma avantajlarına sahiptir (Tozlu, 2010).

Diğer transistör tipi alan etkili transistör ise 1930 yılında Lilienfeld tarafından keşfedilmiştir. 1960 yılında ise Kahng ve Atala tarafından ilk silikon tabanlı metal oksit yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET) oluşturulmuştur.

Alan etkili transistörler; eklem alan etkili transistör (JFET- Junction Field Effect Transistor) ve metal oksit alan etkili transistör (MOSFET, Metal Oxide Field Effect Transistor) olmak üzere iki grupta incelenir. Tüm alan etkili transistörlerde olduğu gibi n kanal JFET' te n tipi bir malzeme içerisine iki p tipi bölgenin yerleştirilmesiyle, aynı şekilde p kanal JFET ise bir p tipi malzeme içerisine iki n tipi bölgenin yerleştirilmesiyle oluşturulur.

Son dönem elektronik aygıtlarda çoğunlukla alan etkili transistörler mevcuttur. Karbon elektroniği konusu da alan etkili transistörler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu sebeple, tez çalışmasında alan etkili transistörler üzerine çalışmalar yapılmıştır.

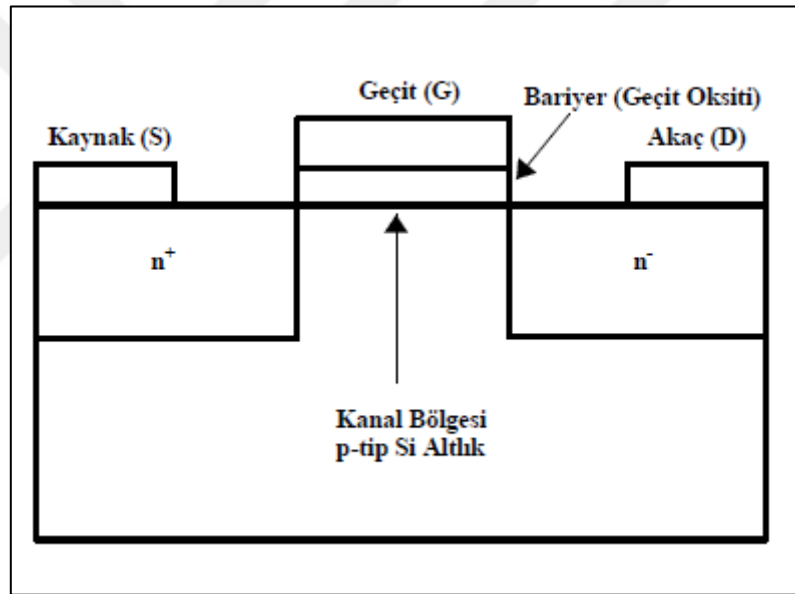
1.1.2. Alan Etkili Transistör (FET) Özellikleri

Alan etkili transistörler (FET) günümüzde bilgisayarlarda, cep telefonlarında ve birçok elektronik aygıtta karşılaştığımız temel ve en önemli elektronik elemanlardan biridir. Alan etkili transistör Kaynak (Source: S) ve Akıç (Drain: D) adı verilen iki omik kontak arasındaki akımın aktığı yol olan iletken kanallı bir levha şeklinde tanımlanan kapasitördür. İletken kanal içerisindeki yük taşıyıcılarının yoğunluğu, Geçit (Gate: G) adı verilen ikinci kapasitör levhaya voltaj uygulanmasıyla ayarlanır. Yani elektrik alan etkisi ile iletkenliği değişen kanaldaki akımın kontrol edilmesi ile çalışır. Başka bir tanımla, FET G, S ve D elektrotlarını bir kanal bölgesinde birleştiren ve kanal bölgesini G elektrodundan bir bariyer ile ayıran aygıttır. Kanal iletkenliği geçit elektroduna uygulanan gerilim tarafından kontrol edilerek, D akımının artması ya da azalması sağlanır. D ve S arasında iletken kanalın oluşması için (yük yoğunluğunun yeterli seviyeye ulaşması için) geçit (G-S arasına uygulanan potansiyel V_{GS} ile) elektroduna uygulanan en küçük gerilime eşik voltajı (V_{Th}) denir. V_{GS} , eşik voltajını aştığında kanal oluşarak I_D akımı akar (Amiri ve Ghadiry, 2018).

Modern dijital mantık, silikon tamamlayıcı metal oksit yarı iletken (CMOS, complementary metal oxide semiconductor) teknolojisine dayanır. CMOS mantık kapıları akımın elektron hareketi ile ya da delik hareketi ile sağlandığı yani hem n hem de p kanallı MOSFET' lerden oluşur. Yani akımın iletilmesinde tek tip yük

taşıyıcılarının görev almasından oluşan yük polarlanma tiplerine göre N kanallı MOS transistörlere NMOS, p kanallı MOS transistörlere ise PMOS adı verilir. N kanallı transistörlerde akım taşıyıcılar elektronlar oldukları için bu transistörler daha hızlı çalışır. Ek olarak, MOSFET' ler kaynak ve akaç arasında kanalın olmadığı *kanal oluşturmali (enhancement)* ve geçite uygulanan gerilimle kanalın kontrol edildiği *kanal ayarlamalı (depletion)* olarak 2 ayrı çeşide sahiptir.

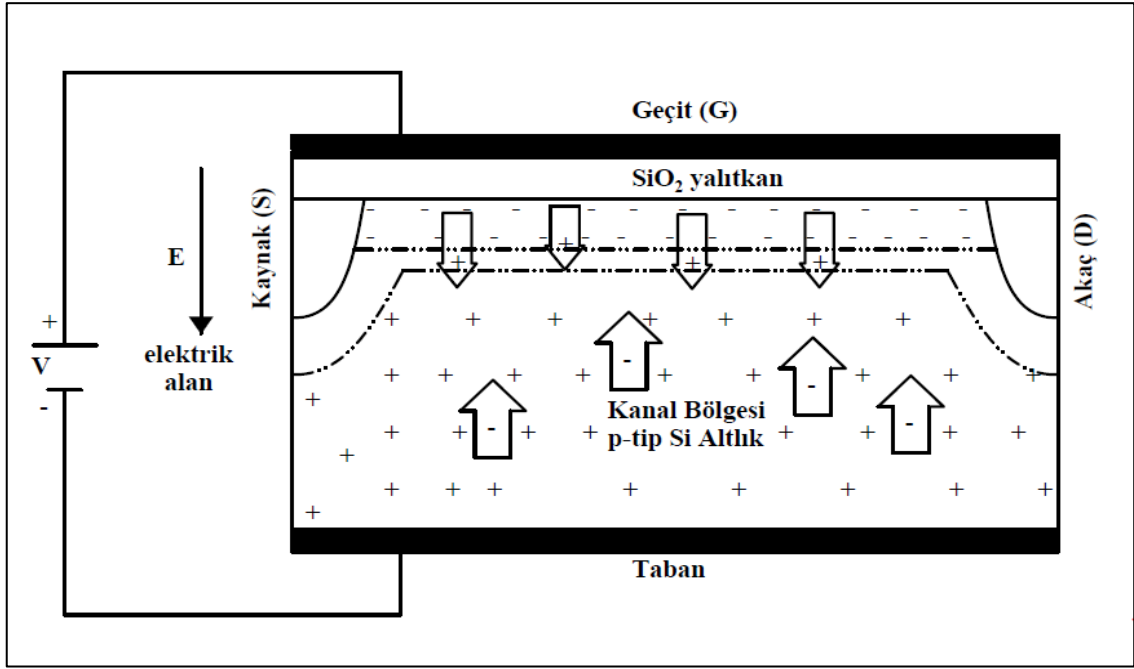
FET' ler n veya p tipi yarıiletkenlerden yapılmış bir taban (substrat, altlık, wafer) üzerinde inşa edilir. Şekil 6' da p tipi yarıiletken taban kullanılan n-tipi alan etkili transistör (NMOS) yapısı görülmektedir. Kaynak ve akaç bağlantıları çok katkılı n^+ bölgeler oluşturularak elde edilir.



Şekil 6. n tip MOSFET' in yandan görüntüsü (Amiri ve Ghadiry, 2018; Schwierz,2010).

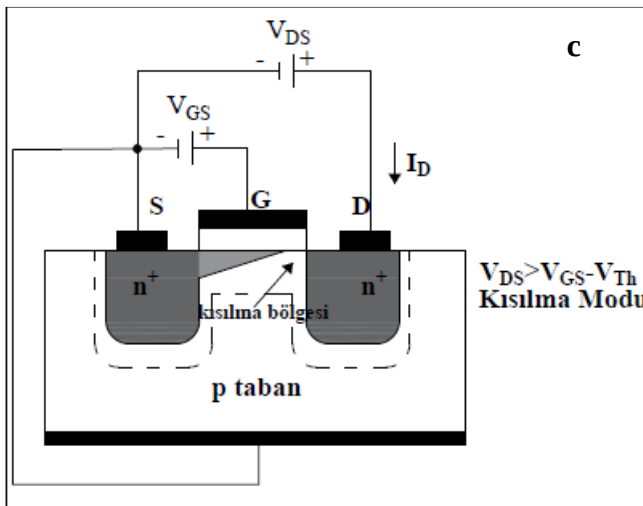
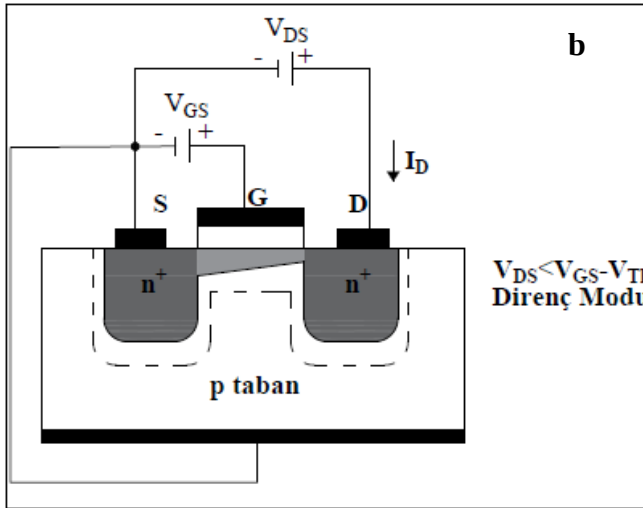
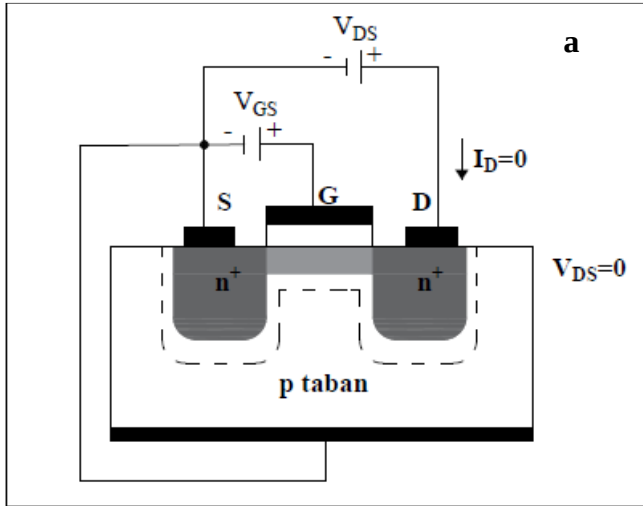
Normal şartlarda alan etkili transistörler kanal oluşturma prensibine göre çalışmaktadır. Eğer geçit elektrotuna gerilim uygulanmamış ise kanal yoktur, dolayısıyla D ile S arasında akım akışı gerçekleşmez. Şekil 7' de p tipi altlık üzerinde inşa edilen alan etkili transistör yapısında G' ye pozitif gerilim uygulandığında geçit elektrodunun alt bölgesinde bulunan pozitif yükler (delikler) elektrik alan etkisi ile bu bölgeden uzaklaşır. Kanal bölgesinde tükenme (depletion, fakirleşmiş) bölgesi oluşur. V_{DS} arttırılırsa tükenme bölgesi genişler. Eğer pozitif kapı (geçit) gerilimi biraz arttırılırsa p tipi tabanda az miktardaki negatif yükler (elektronlar) geçidin alt

kısımındaki kanal bölgesinde toplanır ve bu bölge n-tipi özelliğe sahip yarıiletken dönüşür. Böylece oluşan kanal ile S ve D elektriksel olarak birbirine bağlanmış olur. Bu iki uç arasına gerilim uygulandığında (V_{DS}) akım akar. Eğer kanal bölgesine biriken negatif yük yoğunluğu taban bölgesinde bulunan delik yoğunluğuna eşit olursa bu andaki geçit gerilimi eşik gerilimidir (V_{Th}).



Şekil 7. Alan etkili transistörde kanalın oluşması (Morgül, 2016).

Alan etkili transistörler üç farklı çalışma durumuna sahiptir. $V_{GS} < V_{Th}$ (eşik altı bölge) durumunda iletken kanal oluşmaz dolayısıyla akım akmaz. Eşik altı bölgede karakteristik eğrinin eğimi ne kadar yüksek olursa transistörün anahtarlama (switch-on) davranışı o kadar iyi derecededir. Bu bölge *kesim bölgesi* olarak adlandırılır. Alan etkili transistörlerde kanal akımı V_{GS} (kapı-kaynak gerilimi) ve V_{DS} (akaç-kaynak gerilimi)'nin bir arada uygulanmasıyla oluşur. $V_{DS}=0$ iken geçitle taban bölgesi arasında gerilim her noktada aynı olduğundan, $V_{GS} > V_{th}$ olduğunda kanal oluşur. Fakat $V_{DS}=0$ olduğundan I_D (Akaç akımı)=0' dır (Şekil 8). Tablo 1' de n ve p kanallı MOSFET'lerin çalışma modları özetlenmiştir.



Şekil 8. Alan etkili transistörde üç farklı çalışma modu, $V_{DS}=0$ (a), $V_{DS}<V_{GS}-V_{Th}$ (b), $V_{DS}>V_{GS}-V_{Th}$ (c) (Morgül, 2016).

Tablo 1. Kanal oluşturmali alan etkili transistör çalışma modları.

MOSFET Tipi	Kesim Bölgesi	Direnç Bölgesi	Doyum Bölgesi
NMOS	$V_{GS} < V_{Th}$	$V_{GS} > V_{Th}$ ve $V_{DS} < V_P$	$V_{GS} > V_{Th}$ ve $V_{DS} > V_P$
PMOS	$V_{GS} > -V_{Th}$	$V_{GS} < -V_{Th}$ ve $V_{DS} > -V_P$	$V_{GS} < -V_{Th}$ ve $V_{DS} < -V_P$

n kanal oluşturmali alan etkili transistörde D elektrotuna pozitif bir gerilim uygulandığında kanalın S ucundaki gerilim V_{GS} ’ ye eşit iken, D ucundaki gerilim $V_{GS}-V_{DS}$ kadardır. Eğer bu gerilim V_{Th} ’ den büyük ise kanal ve akım oluşur. Fakat oluşan kanal düzgün olmayıp S tarafında daha geniş D tarafında ise daha dardır (Şekil 8 (b)). Bu çalışma moduna *direnç bölgesi* (omik, doğrusal bölge) adı verilir.

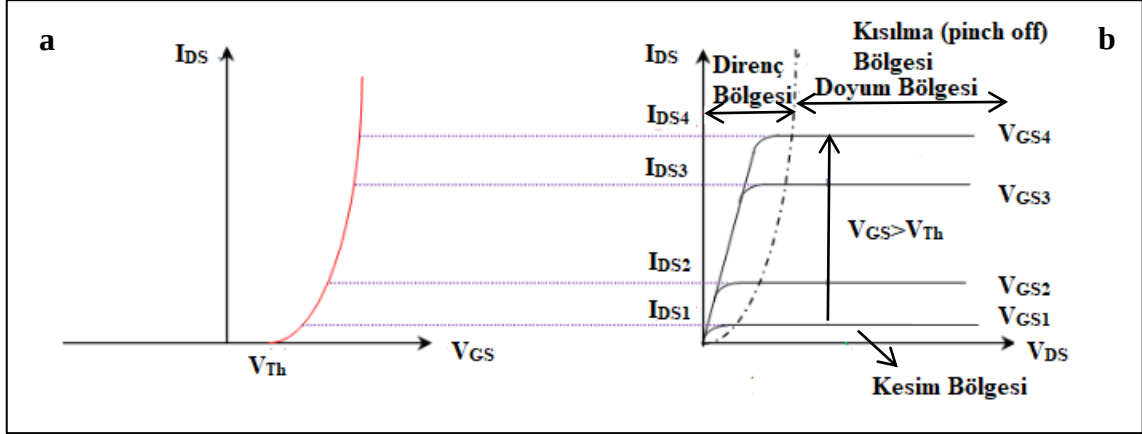
$$I_D = K [(V_{GS} - V_{Th})V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2] \quad (V_{DS} < V_{GS} - V_{Th}) \quad (1)$$

Direnç bölgesinde V_{DS} ’ nin küçük değerleri için denklem (1)’ de ifadesi verilen drain akımı (I_D) bağıntısında V_{DS} ’ nin küçük değerleri için V_{DS}^2 terimi ihmal edilirse, lineere yakın bir bağıntıya dönüşür ve transistör direnç gibi davranır. Oluşan direnç değeri V_{GS} ile ters orantılı olur dolayısıyla kontrollü direnç elde edilir. Bu denklemde K alan etkili transistör yapısına ait bir parametredir (Morgül, 2016).

$V_{GS} > V_{Th}$ ve $V_{DS} > V_{GS} - V_{Th}$ olduğunda geçit ile kanal bölgesi derinliği sıfıra düşer dolayısıyla geçit kanal bölgesi gerilimi sıfır olur. Bu durumda akaç akımı sadece bu kısılan ara yüzeyden akar. Bu ara yüzeyde akabilecek akım sınırlıdır. V_{DS} arttırılsa bile akım artmaz. Kanalın kapanıp akım akmasına izin vermediği bölgeye kısılma gerilimi (V_P) adı verilir. V_{DS} değeri büyüyünce kısılmış bölge (pinch-off region) daha uzar, direnci artar, gerilim arttığı için akım sabit kalır. Doyum bölgesinde V_{Th} ’ den sonra belirli V_{DS} ’ den sonra akım doygunluk noktasına ulaşır. Artık V_{DS} arttıkça akım biraz artar ve sonra sabitlenir. Bu bölgede yük taşıyıcılarının hızı kanal bölgesindeki çarpışmalar ve kanal bölgesinde yanal bölgeden ayrılan yükler nedeniyle azalır.

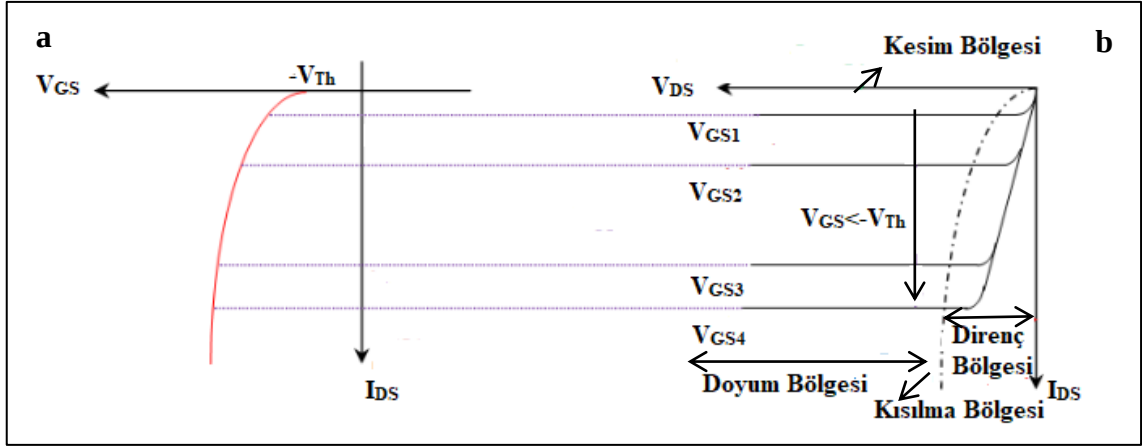
Her FET karakteristiğinde kesim (cut-off), omik (doğrusal, lineer) ve doyma (saturasyon) bölgesi bulunmaktadır. Bir FET’ in performansı transfer ve çıkış karakteristikleri ile belirlenir. Sabit bir V_{GS} gerilimine karşı I_{DS} akımının değişimi *çıkış karakteristiği*, sabit bir V_{DS} gerilimi altında I_{DS} akımının V_{GS} gerilimine göre değişimi

ise *transfer (giriş) karakteristiği* olarak adlandırılır. Şekil 9’ da n kanal FET’ e ait çıkış karakteristiği verilmiştir. V_{GS} eşik gerilimini aşıncaya kadar aygıtta akım akmadığı görülmektedir. Daha sonra V_{DS} geriliminin küçük değerlerinde I_{DS} akımı V_{DS} gerilimi ile doğrusal artarken, artan V_{DS} gerilimi ile I_{DS} akımının artışı yavaşlamakta ve V_{DS} geriliminden bağımsız hale gelmektedir.



Şekil 9. n kanal oluşturmali MOSFET, Transfer (giriş) Karakteristiği (a), Çıkış Karakteristiği (b) (URL-4).

Şekil 10’ da ise p kanal alan etkili transistörün performans özellikleri (giriş ve çıkış özeğrileri) görülmektedir. Bir p kanal oluşturmali alan etkili transistörde G terminaline negatif gerilim uygulanarak n altlık üzerinde elektriksel alanın yönü oksit alanına doğru olduğu için n kısımdaki çoğunlukça fazla olan elektronlar bu bölgeye taşınır. Negatif G gerilimi boşlukları n altlık tarafında iter. Böylece kanal bölgesinde D ve S terminalleri arasında boşluk (negatif) yük taşıyıcıları bu elektronlar üzerinden p kanal oluşturmuş olur.



Şekil 10. p kanal oluşturmali MOSFET, Transfer (giriş) Karakteristiği (a), Çıkış Karakteristiği (b) (URL-4).

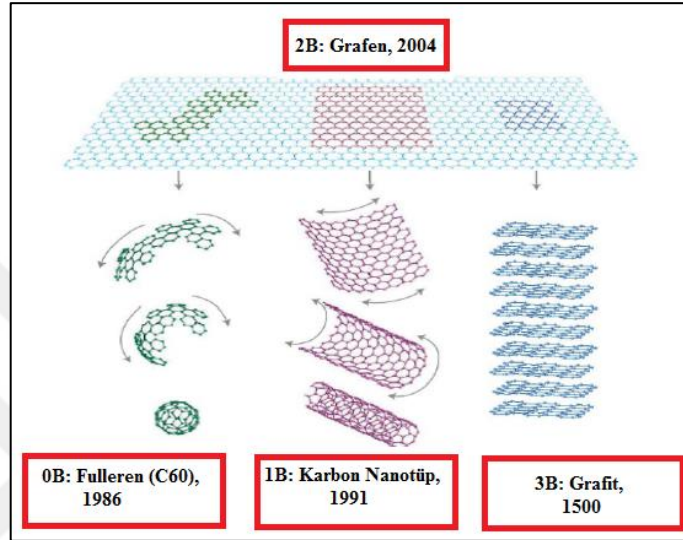
1.2. Transistörlerde Karbon

Tüm alan etkili transistörlerde inorganik Si, Ge gibi periyodik tablonun III ve V numaralı yarıiletken elementleri yada bunların alaşımları (GaAs gibi) kullanılır. Karbon, dış enerji seviyesinde 4 elektronu bulunan Si ve Ge gibi yarıiletkenlerle periyodik tabloda aynı grupta bulunur ve elmas, grafit, fulleren gibi farklı allotroplara sahiptir. 2004 yılında Manchester Üniversitesi'nde yoğun madde fiziği çalışanları Andre Geim ve Konstantin Novoselov'un grafende alan etkisini bulmalarıyla ilk karbon tabanlı grafen alan etkili transistör tanıtılmıştır.

2020'li yıllarda yarı iletken endüstrisi en yeni "Yarı İletken Uluslararası Teknoloji Yol Haritası (ITRS)'nda, ölçeklendirilmiş CMOS teknolojisinin ömrünün sonuna geldiğini bildirmektedir (Ahopelto vd., 2019; Jiang vd., 2019). Moore kanunu ve yarı iletken endüstrisinin gelişimi ile birlikte, farklı malzemelere dayalı özgün tasarıma sahip yeni aygıtlar gelecekte teknolojiyi derinden etkileyebilir. Bu önemli gelişmelerden sonra karbon allotrop yapılar (karbon nanotüp (CNT), grafen, grafen nanoşeritler (GNR) gibi) geliştirilmiştir (Zhijie vd., 2019).

Şekil 11' de karbon yapılar görülmektedir. Görüldüğü gibi bütün grafenik karbon malzemelerin temel yapı taşı, sp^2 dizilimindeki karbon atomlarının oluşturduğu altıgen bal peteği örgü yapısına sahip 3 boyutlu (3B) grafitin tek katmanıdır. Bu tabakalar zayıf Van der Waals bağlarıyla sıkıca birbirlerine bağlıdır. Grafitin tek tabakası; küre

oluşturduğunda sıfır boyutlu fulleren (C_{60}), eksenine göre yuvarlandığında bir boyutlu karbon nanotüp (CNT) ve düzlemsel olarak 2 boyutta tabakalandığında ise grafen meydana gelir. Tek katmanlı grafitik karbon tek duvarlı grafen (single wall graphene, SWG), iki veya daha fazla katmanlı grafitik karbon çok duvarlı grafen (multi wall graphene, MWG) olarak isimlendirilir.

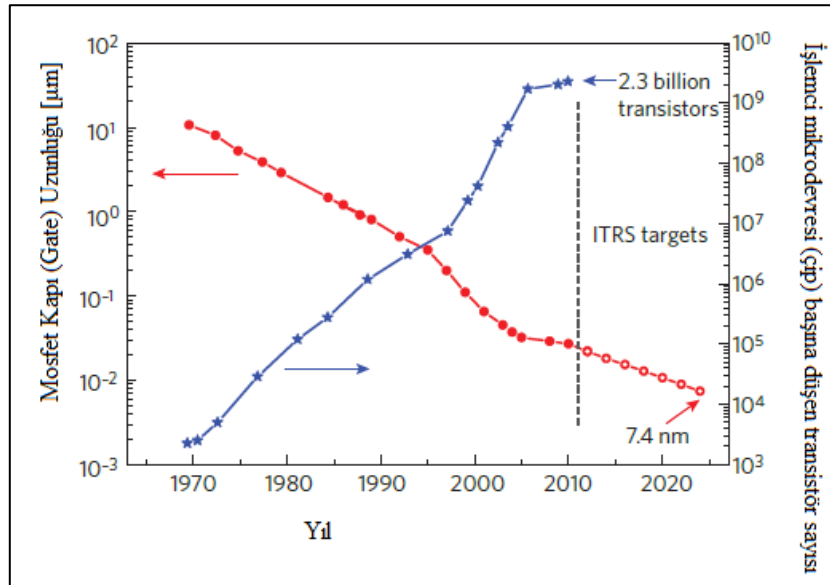


Şekil 11. Karbon allotropları (Bhuyan vd., 2016).

Farklı karbon malzemeler arasında güçlü karbon nanoyapısına sahip tek katmanlı iki boyutlu (2B) atomik yapıda, kafes yapısında her köşesinde karbon atomu bulunan düzgün altıgen yapılardan oluşan grafen; elektriksel, optik, manyetik, yüksek elektron hareketliliği ($25 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{sn}^{-1}$), elektriksel iletkenlik (6500 Sm^{-1}) gibi özellikleriyle ilgiyi üzerine çekmiştir (Smith vd., 2019). Silikon elektroniğine alternatif malzeme olarak görülmektedir. Tek atom kalınlığında karbon tabakası iki boyutlu grafen, elektronlar ve delikler (boşluklar) için yüksek hareket yeteneğine sahip olmasıyla yüksek doyma hızıyla elektronik aygıt transistörlerin potansiyel kullanımına uygundur. Grafen alan etkili transistörler, kayan kapı flash bellek (FGT), dirençli rastgele erişim belleği gibi katı-hal elektronik aygıtlarda kullanılır (Yeh vd., 2019; Zhijie vd., 2019). Si ile grafenin işleme teknolojileri benzer iken CNT' de durum farklıdır. CNT' nin yük taşıma mobilitesi $100.000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ iken, grafende ise bu değer $200.000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ dir. Teorik olarak grafen nanoyapı, $\sim 2630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ değeriyle CNT' den daha büyük yüzey alanına sahiptir. $\sim 0.335 \text{ nm}$ ve tabakalar arası zayıf Van der Waals bağlarıyla grafen levhaların üretiminde zorluklara neden olur. Ancak geniş alanlarda kullanım için uygun

maliyetlerde grafeni sentezlemek gerekir (Bhuyan vd., 2016; Novoselov vd., 2004; Disa vd., 2015).

30 nm kapı uzunluğuna sahip MOSFET içeren işlemciler Şekil 12’ deki gibi seri üretimdedir. Şekilde 30 nm Gate uzunluğuna sahip MOSFET içeren işlemcilerin geçit (Gate) uzunluğunun üretim aşamasındaki tümleşik devrelerde (dolu kırmızı daireler) ve ITRS hedeflerinin (açık kırmızı daireler) gelişimi ve kapı uzunlukları azaldıkça, işlemci çip başına transistör sayısının arttığı (mavi yıldızlar) sunulmaktadır. Bu şekilde aygıtları ölçekleme yarı iletken endüstrisi için önemli bir zorluk olduğundan grafen gibi yeni malzemeler araştırılmaktadır. Yarıiletken elektronikleri başlıca dijital mantık ve radyofrekans aygıtları oluşturmaktadır. Yeni materyallerle aygıt kavramları radyofrekans uygulamaları için dijital mantık uygulamalarına kıyasla (çoğunu silikon oluşturduğundan) daha uygundur. Çünkü dijital mantık devreleri radyofrekans devrelerine göre daha karmaşıktır. Bunun göstergesi radyo frekans elektroniğinde GaAs, InP, periyodik tablodaki III-V yarıiletkenlerine dayalı yüksek elektronlu mobil transistörler (high electron mobile transistor, HEMT), silikon n-kanal MOSFET’ leri ve farklı bipolar tip transistörler olmuştur. Bu özellikler radyo frekans elektroniğinde, grafeni 2 boyutlu (2B) yapısı ve taşıyıcı özellikleri gereği ilgi çekici kılmaktadır (Schwierz, 2010).



Şekil 12. Dijital elektroniğe eğilimler (Schwierz, 2010).

Geniş alan Grafenin değerlik ve iletim bantları arasında küçük birleşme söz konusudur. Bu sebeple grafen sıfır bant aralıklı bir yarımetaldir. Grafenin bant aralığı sıfır olduğundan, grafenden yapılmış kanallara sahip aygıtlar mantık uygulamaları gibi birçok elektronik uygulama için uygun değildir. Bu sebeple, belirli uygulamalarda grafen yapısındaki bant boşluğunun açılması ve/veya uyarlanması grafen için en önemli araştırma konuları içinde yer almaktadır. Grafenin bant yapısı; grafen nanoşeritler (GNR) oluşturarak (geniş alan grafeni bir boyutta sınırlandırarak), iki tabakalı grafeni bastırarak ve grafene baskı uygulayarak üç yolla açılarak değiştirilebilir (Chen vd., 2015).

Grafenin en iyi avantajlarından biri oda sıcaklığındaki yüksek taşıyıcı hareketliliğidir. Grafenin yük taşıyıcı mobilitesi $10.000-15.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{sn}^{-1}$ değerinde SiO_2 kaplı Si substratlarda pul pul dökülmüş grafen için ölçülmüştür. Ve bazı çalışmalarda 40.000 ile $70.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{sn}^{-1}$ arasında üst sınırlar bildirilmiştir. FET' lerin birkaç mikrometre uzunluğundaki kapıları olduğunda, hareketlilik taşıyıcı iletim hızının uygun bir ölçütüdür. Yani, hareketlilik, düşük elektrik alanlarda taşıyıcı iletimini sağlar. Modern FET' lerde kısa kapı uzunlukları, kanalın oldukça büyük bir bölümünde yüksek alanlara neden olur ve bu durum mobilitenin aygıt performansı ile olan ilişkisini azaltır. Bu şekilde yüksek alanlarda, sabit durumdaki taşıyıcı hızı doygunluğa ulaşır ve bu doygunluk hızı bir diğer önemli taşıyıcı iletim ölçüsü olur (Schwierz, 2010).

1.3. Grafen Üretimi

Günümüzde Grafen sentezinde en bilinen yöntemler aşağıdaki gibidir.

- Yukarıdan Aşağı Yöntemler:
 - Mekanik Pul Pul Dökülme (Mechanical Exfoliation)
 - Kimyasal Yöntem (Modifiye Hummers Yöntemi)
 - Elektrokimyasal Pul Pul Dökülme (Electrochemical Exfoliation)
- Aşağıdan Yukarıya Yöntemler:
 - Epitaksiyel İnce Film Yöntemi
 - Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

1.3.1. Mekanik Pul Pul Dökülme

Grafit tek atom boyutundaki grafen katmanlarının zayıf Van der Waals bağları ile istiflenmesinden oluşur. Katmanlar arası mesafe $3.34 \text{ \AA}$, katmanlar arası bağ enerjisi ise 2 eV/nm^2 dir. Mekanik olarak grafit tabakadan grafeni soymak için $\sim 300 \text{ nN/}\mu\text{m}^2$ lik bir kuvvete ihtiyaç vardır (Bhuyan vd., 2016).

Yüksek düzenli pirolitik grafitin (HOPG, highyl oriented pyrolytic graphite) mekanik olarak pul pul dökülmesi veya “scotch tape” yöntemi olarak bilinen bu yöntem Geim ve Novoselov tarafından yapılan ilk grafen sentez yöntemidir. Bu yöntem, selo bant (scotch tape) kullanarak bant üzerinde soluk grafit tabakaları bırakana kadar işlemin tekrarına dayanır. Bant yüzeyinde kalan tek veya az katmanlı grafen SiO_2/Si gibi bir altlık (substrat) üzerine aktarılır. Bir miktar temizlemeden sonra, optik bir mikroskopta veya raman spektroskopisi içindeki kontrast farkı kullanılarak grafen tanımlanabilir. Bu yöntem ile tek ya da çok katmanlı kaliteli grafen ucuz maliyetle sentezlenir (Kathalingam vd., 2014; Bartolomeo, 2015).

1.3.2. Kimyasal Pul Pul Dökülme

Kimyasal yöntem grafen sentezinde en uygun yöntemlerden biri olarak sayılabilir. Grafen kimyasal indirgeme yöntemiyle ucuz ve basit bir şekilde kolaylıkla sentezlenemebilmektedir. Kimyasal pul pul dökülme yöntemi iki aşamadan oluşur. Birinci aşamada grafen katmanları arasındaki boşluğu arttırmak için Van der Waals bağları güçsüz hale getirilir. Böylece açılan bölgelerde grafen birleştirme bileşikleri oluşur. Daha sonra hızlı ısıtma ya da sonikasyonla grafen pul pul dökülür.

Grafen oksit sentezi Brodie, Hummers, Offeman ve Staudenmaier tarafından farklı şekillerde tanıtılan yaygın olarak potasyum permanganat (KMnO_4), sülfirik asit (H_2SO_4) veya sodyum nitrat (NaNO_3) kullanılarak grafitin oksitlendirilmesine Hummers Yöntemi denir. Hummers yönteminde kimyasal oksidasyon işleminden sonra epoksi (C-O-C), hidroksil (-OH), karboksil (-COOH) ve karbonil (C=O) gibi fonksiyonel grupları içeren hidrofilik yapıya grafen oksit (GO) denir. Fonksiyonel grupların varlığı GO’ nun elektriksel iletkenliğini düşürür. Yapıdaki fonksiyonel gruplar GO’ nun indirgenmesi ile

uzaklaştırılarak/azaltılarak elektriksel iletkenliği geri kazanılır. Her indirgeme prosedürünün bant aralığı, elektriksel iletkenlik ve GO' nun optik özellikleri üzerindeki etkisi vardır. Sodyum hidroksit, Potasyum hidroksit, alkoller ve metaller, fenil hidrazin, hidroksilamin, glikoz, askorbik asit, alkalın çözeltileri, üre, bal ve amonyak gibi indirgeyiciler kullanılarak GO' nun indirgenmiş hali indirgenmiş grafen oksit (rGO) olarak isimlendirilir. rGO üretiminde indirgeyici ajan kullanıldığında, GO düzleminde bulunan epoksi ve hidroksil gibi fonksiyonel gruplar indirgenir. Genellikle grafen oksitin N-metil-2-pirolidon, tetrahidrofuran ve etilen glikol gibi organik çözücülerde basit sonikasyon işlemiyle çözünmesiyle grafen üretilir. Bu yöntemde genel olarak çift ve çok tabakalı grafen elde edilir (Marcano vd., 2010; Bhuyan vd., 2016; Yoo ve Park, 2019; Disa vd., 2015; Reddy vd., 2018; Bartolomeo, 2015; Gebreegziabher vd., 2019).

1.3.3. Elektrokimyasal Pul Pul Dökülme Yöntemi

Elektrokimyasal soyulma (exfoliation) yöntemi grafenin alkali iyonlar içeren çözeltide dökülmesine dayanan yüzey aktif madde (surfaktant) içeren GO veya grafen levha üreten bir yöntemdir. Bu yöntemde az sayıda kimyasal kullanılır ve elektrot potansiyeli harici bir güç kaynağından kontrol edilerek, grafen tabaka kalınlığı kontrol edilebilir. Grafenin su tabanlı sistemde uyumu için organik çözücüler yerine farklı yüzey aktif maddeleri kullanılır. Yüzey aktif maddelerin polar hidrofilik yapısı suyun içerisine çekilirken, hidrofobik yapı grafenin suyun üst yüzeyinde durmasını sağlar. Yani yüzey aktif madde bu yöntemde grafenin su yüzeyinde homojen şekilde dağılması avantajına sahiptir. Kullanılan ticari yüzey aktif maddeler genellikle sodyum dodesil sülfat (SDS), poli (sodyum 4- stirensülfonat) (PSS) ve sodyum dodesilbenzen sülfonat (SDBS)' tır. Bu yöntemde üretilen sıvı formda grafen farklı malzemeler ve polimerler ile uyum gösterir (Disa vd., 2015).

1.3.4. Epitaksiyel İnce Film Yöntemi

Grafen tabakaları, ultra yüksek vakumda silisyum karbürün (SiC) 1000 °C ile 1500 °C sıcaklığa ısıtılmasıyla epitaksiyel olarak oluşturulabilir. Bu yöntemde, 4H-SiC ($E_g=3,26$ eV) ve 6H-SiC ($E_g=3,03$ eV) yaygın olarak kullanılır. Isıtma sonucu Si süblimleşir (desorpsiyona uğrar), geriye kalan karbonlar epitaksiyel olarak biraraya

gelerek grafen tabakayı oluşturur. SiC yarıyalıtkandır, böylece aygıtlar SiC üzerinde grafen formunda desenlenerek kalıplanabilir ve substrat içinden akan elektrik akımı ile ilgilenmeden oluşturulabilir. Bu yöntemde dezavantaj, ilk grafen katmanları oluştuktan sonra Si' un tabakadan uzaklaşamayabilmesidir. Bu durum da grafen büyümesinin sonlandırabilir (Bedeloğlu ve Taş, 2016).

1.3.4. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi

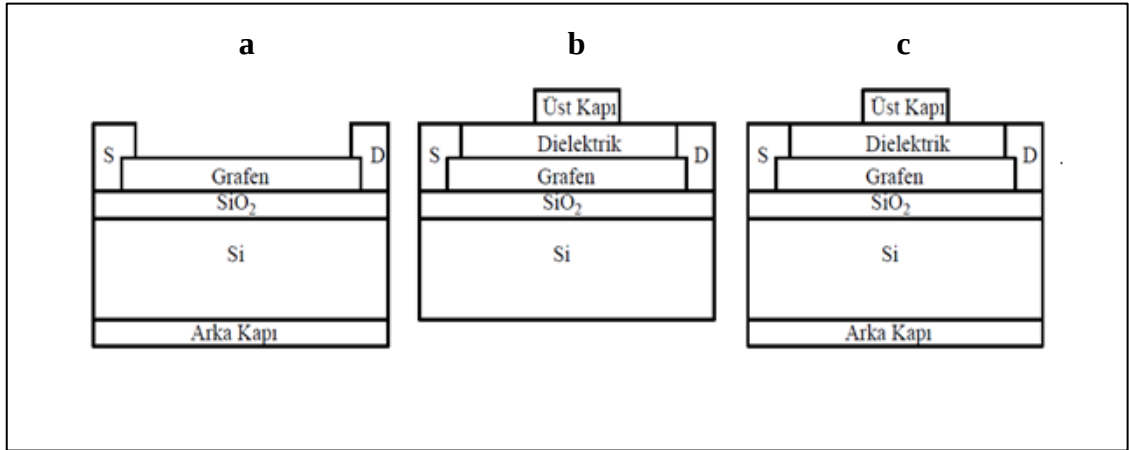
Kimyasal buhar biriktirme (CVD) yönteminde karbon gaz hali ile sağlanır ve grafen sentezi için katalizör ve substrat olarak metal (Ni, Cu, Ru ve Ir en sık kullanılan substratlardır) kullanılır. Metan (CH₄) veya asetilen (C₂H₂) gibi karbon içeren gaz argon (Ar) gibi bir inert gaz taşıyıcısı kullanılarak bir kuvars boru haznesinde taşınır (diğer bazı gazlar örnek olarak hidrojen (H₂) özel amaçlar için ilave edilir). Grafenin büyümesi bu yöntemde ~1000 °C sıcaklıkta gerçekleşir. Metal yüzey üzerinde karbon içeren gazın ayrışması yüzey ile kütle arasında konsantrasyon gradyanı oluşturarak karbon atomlarının metale dağılmasını ve katı bir çözelti oluşturmasını sağlar. Sistem soğutulduktan sonra, metalde yüksek sıcaklıkta çözünen karbon atomları çökerek metal yüzeyde ayrışır, bir veya daha fazla grafen tabakası meydana gelir. Yöntemde en son destekleyici tabaka PMMA aseton ile çözülür. Bu yöntem ile grafen sentezinde altlıklar üzerinde büyütülen grafen bir başka altlığa transfer edilirken kirlilikler yada kusurlar meydana gelebilir (Ravichandran, 2016; Dathbun vd., 2019).

1.4. Grafen Transistörlerin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Grafen sentezinden sonra yarıiletken işleme teknikleriyle (litografi, metalizasyon ve etching-asit ile aşındırma) grafen transistörler üretilebilir. 2004 yılında Manchester grubu (Novoselov vd., 2004) tarafından bildirilen Grafen transistör aygıtı Grafen' in altında 300 nm kalınlıkta SiO₂ tabakası (arka kapı dielektrik maddesi) ve arka kapı görevi gören katkılı silikon substrattan oluşur. Bu tür aygıtlar parazitik kapasitanslarla karşı karşıya kaldığı için diğer bileşenler ile entegre edilemezler. Bu nedenle grafen transistörlerin bir üst kapıya (top-gate) ihtiyacı olur. Üst kapılı ilk grafen MOSFET 2007 yılında bildirilmiştir. Bu üst kapılı MOSFET çalışmalarının birkaçında pul pul dökülmüş grafen, metallerde büyüyen grafen ve epitaksiyel grafen kullanılmış ve SiO₂,

Al_2O_3 , HfO_2 gibi yalıtkanlar üst kapı dielektriği görevini üstlenmiştir. Bu üst kapılı grafen transistörlerin kanalları, bir bant aralığına sahip olmayan geniş alan grafen kullanılarak yapılmıştır, bu yüzden anahtarlama davranışlarında kapatılamamıştır.

Grafen alan etkili transistör üç yada dört terminale sahip bir aygıttır. Aygıt Şekil 13’ de görüldüğü gibi arka kapı (back gate), üst kapı (top gate) ve çift kapı ile kontrol edilebilecek şekilde geometriye sahiptir.



Şekil 13. Grafen alan etkili transistörün yapısı, arka kapılı (a), üst kapılı (b), çift kapılı (c) (Ravichandran, 2016).

Grafen transistörler, aygıtın kapısına uygulanan eksi değerli bir elektrik sinyaliyle grafen kanal bölgesinde boşluk taşıyıcı yük iletimi veya artı değerli bir beslemeyle elektron iletimiyle sonuçlanan ambipolar davranışa sahiptir. Radyo frekans karıştırıcılarında, faz dedektörlerinde, dijital modülatörlerde ve yüksek performanslı frekans katlayıcılarında grafenin ambipolar davranışı avantaj sağlar. Ambipolar davranışa sahip grafen FET geçit voltajını (V_G) negatiften pozitif doğru değiştirirken minimum bir iletkenlik gösterir. Bu minimum iletkenlik noktasına nötr noktası veya dirac noktası adı verilir. Ve bu sıfır geçit voltajında grafen serbest yük taşıyıcılarına sahip değildir. Yük nötr noktası grafendeki negatif ve pozitif yük taşıyıcılarının (elektronlar ve delikler) nötrlüğünü temsil eder, yani bu noktada taşıyıcı yükler işaret değiştirir. Nötr noktasının pozitif tarafa kayması delik ağırlıklı iletimi ifade eder. Nötr noktasının pozitif voltaj tarafına kayması grafenin işlenmesi sırasında H_2O gibi adsorbandların kimyasal katkılanmasına bağlı olabilir. Adsorbe olan atomlar grafenin fermi seviyesini değiştirerek nötr noktasının pozitif besleme kısmına kaymasını sağlar

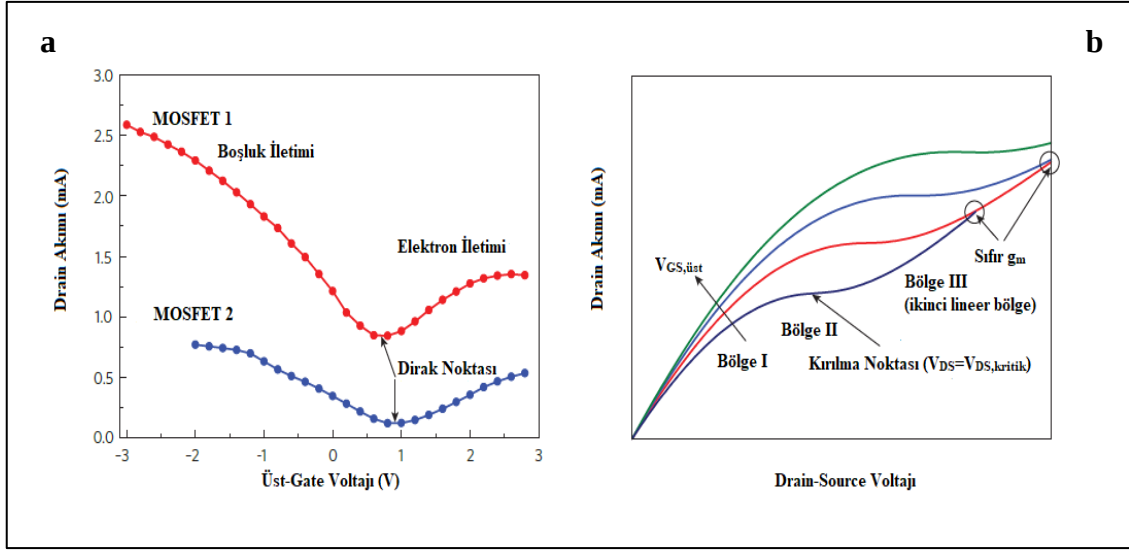
(Kathalingam vd, 2014; Ravichandran, 2016).

Grafen transistörler, mükemmel bir akım-gerilim transfer karakteristiği gösterir. Kanaldaki taşıyıcı yoğunluğu ve taşıyıcı tipi (elektronlar veya delikler), kanal ve kapılar (üst kapı yada arka kapı) arasındaki potansiyel farklılıklar tarafından yönetilmektedir. Büyük artı değerli G voltajı, kanalda elektron birikimi sağlar (n-tipi kanal) ve büyük eksi değerli G voltajı ise p tipi bir kanal oluşturur. Bu davranış, Dirak noktası ya da şarj nötrlüğü denilen noktayla ayrılan transfer özelliklerinin iki kolunu oluşturur (Şekil 14a).

Dirak noktasının konumu birkaç faktöre bağlıdır:

- G' nin iş fonksiyonları ve grafen arasındaki fark,
- Kanalin üst ve alt arayüzlerindeki yüklerin tipi ve yoğunluğu,
- Grafenin katkılanması

Şekil 14' de grafen kanala sahip üst kapı geometrisine sahip alan etkili transistörün doğru akımda akım-gerilim davranışları görülmektedir. Grafen FET' lerde geleneksel Si MOSFET' lerin aksine akım hem artı değerli hem de eksi değerli G gerilimleri için akar. Şekil 14(a)' da farklı (MOSFET 1, MOSFET 2) transistörlerin ambipolar transfer karakteristiği görülmektedir. Birçok grafen MOSFET' in çıkış karakteristiği, herhangi bir doygunluk olmadan doğrusal bir şekil gösterir veya her biri aygıt hızına göre bir dezavantaj olan, sadece zayıf doygunluk gösterir. Bununla birlikte, bazı grafen MOSFET' ler, ikinci bir doğrusal bölge içeren alışılmadık bir doyma benzeri davranış biçimine sahiptir (Şekil 14b). Bu grafiklere göre, küçük V_{DS} değerleri için transistör doğrusal bölgede çalışır ve tüm kanal n tipidir (Bölge I). V_{DS} değeri arttıkça D akımı, $V_{DS}=V_{DS,Kritik}$ değerindeki kırılma noktasına kadar doymaya başlar ve kritik noktaya ulaşır (Bölge II). Burada, kanalın D ucundaki potansiyel koşullar Dirac noktasına karşılık gelir. V_{DS} , $V_{DS,Kritik}$ ' i aştığı zaman kanalın D ucundaki iletim tipi n- tipinden p- tipine geçer ve transistör ikinci bir doğrusal bölgeye ulaşır (Bölge III). Büyük V_{DS} değerlerinde farklı Gate voltajlarında çıkış karakteristikleri sıfır veya negatif iletkenliğe sebep olabilir. Bu istenmeyen bir durumdur. Bu aygıtlardaki bu farklı davranış boşluksuz kanallara sahip olmalarının bir sonucudur ve yarı iletken kanallara sahip FET' lerde görülmez.

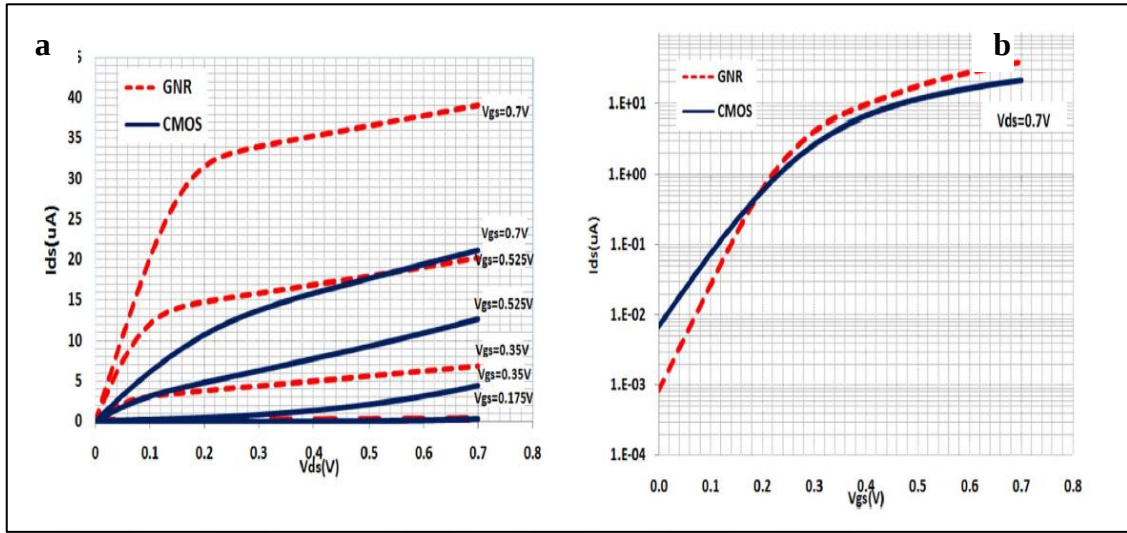


Şekil 14. Ön besleme durumunda ambipolar transfer karakteristiği (a), Üst-Gate voltajının ($V_{GS,üst}$) farklı değerleri için n tipi geniş alan grafen kanallı bir MOSFET' in çıkış karakteristikleri (Drain akımı I_D ' ye karşılık Drain-Source Voltajı V_{DS}) (b) (Schiewerz, 2010).

Grafenin elektriksel özelliklerinin modifikasyonunda en etkili yollardan biri, yapısındaki sp^2 bağlı karbon atomlarının (katkılama, yer değiştirici olarak nitelendirilebilen doping olayı) bor veya azot gibi heteroeatomlarla kimyasal olarak yer değiştirmesidir. Grafenin elektronik özelliklerini kontrol etmenin en etkili yollarından biri, kimyasal yer değiştirmeyle iki boyutlu (2D) grafen düzlemine heteroeatomların yerleştirilmesidir. Hetero atomlarla grafenin katkılanması indirgenmiş grafen oksit (rGO) / grafen oksit (GO)' in kimyasal tedavisi tarafından veya heteroeatomlarla katkılanmış şablonlar olarak kimyasal buhar biriktirme, ark deşarj, metal organik yapılar (MOF) / kovalent organik yapılar (COF) ile yapılır. Bor, kükürt ve florin gibi yabancı elementlerle modifikasyonla, benzersiz elektronik ve spin yapıları ayarlanarak grafit yapılar, elektriksel, optik ve katalitik alanlarda kullanılır.

Grafen, geniş yüzey alanı, yüksek kimyasal stabilitesi, mekanik ve elektriksel sağlamlığı nedeniyle şeffaf iletken elektrotlar, elektrokatalizörler, alan etkili transistörler, kimyasal / biyolojik algılama sensörleri ve enerji aygıtları gibi nanoelektronik uygulamalarda kullanılan umut vaad eden materyallerden biridir. Grafen materyalinin çekici kılan bir diğer özelliği ise eş zamanlı şekilde yarı iletken ve yarı metalik özellikleri sağlayan sıfır bant enerji boşluğuna sahip benzersiz elektronik yapısıdır. Grafene dayanan nanoelektriksel aygıtların gerçekleştirilmesinde grafenin

elektriksel özelliklerinin istenen uygulamaya göre ayarlanması önemlidir.



Şekil 15. Grafen nanoşerit ve Si-CMOS’ ta Drain akımı ve Drain voltajının farklı değerleri için Drain-Source voltajına karşı ($V_{GS} = 0.175, 0.35, 0.525, 0.7$ Volt) Drain-Source akımı (a), GNR ve Si-CMOS’ ta $V_{DS} = 0.7$ V için G-S voltajına karşı D-S akımı (b) (Rabieefar ve Dideban, 2019).

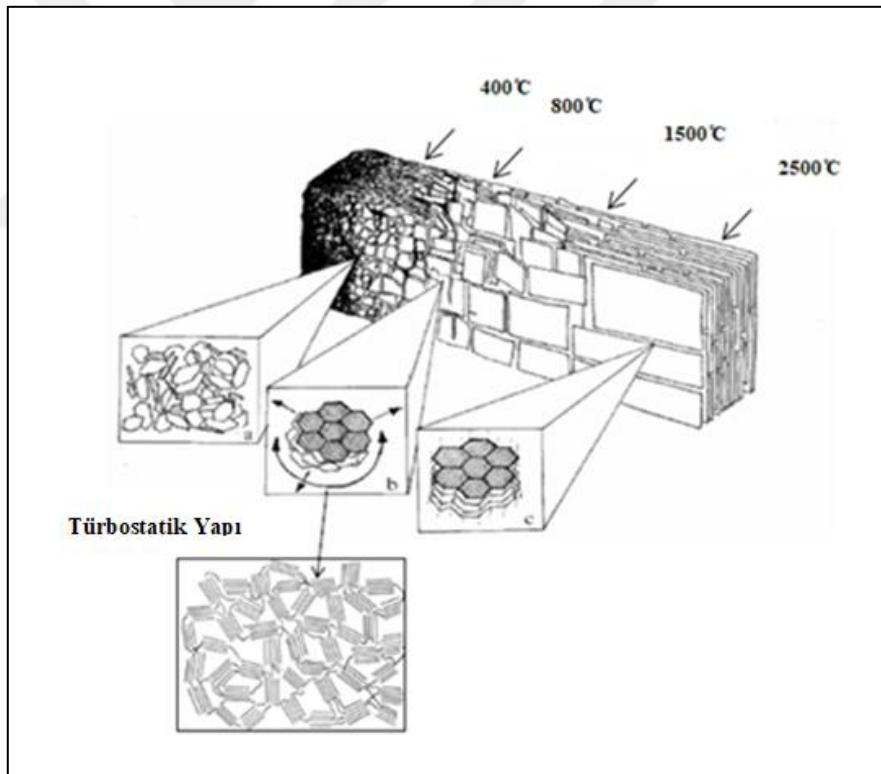
Şekil 15a, 16 nm teknolojisinde n tipi Grafen nanoşerit (GNR) ve geleneksel Si-MOSFET’ in çıkış karakteristikleri açısından kıyaslamasını göstermektedir. Aygıtlara uygulanan en yüksek gerilim 0.7 V besleme gerilimidir. Görüldüğü gibi GNR-FET Si-CMOS’ a göre daha yüksek akıma sahiptir (I_{on}). Şekil 15b, $V_{DS} = 0.7$ V’ ta n tipi GNR-FET ve Si-MOSFET için $0 < V_{GS} < 0.7$ V gerilimine karşı Drain-Kaynak akımını göstermektedir. Şekil GNR transistörün Si-MOSFET’ e göre daha yüksek açma (I_{on}), kapama (I_{off} -kaçak akım) oranına sahip olduğunu ifade eder.

1.5. Biyokütle Kaynaklı Yüksek Performans Karbon ve Üretimi

Biyokömür sınırlı miktardaki oksijen varlığında ve nispeten düşük sıcaklıklarda (< 700 °C) organik temelli malzemenin termal olarak parçalanmasıyla üretilen ve karbon bakımından zengin katı bir maddedir. Bu termal ayrışma sürecine *piroliz* adı verilir. Biyokütle pirolizinden üç farklı ürün elde edilebilir; biyoyağ, yanıcı gazlar ve biyokömür. İlk iki ürün enerji üretmekte kullanılırken (güç, ısı üretimi ve iletim yakıtı), üçüncü ürün biyokömür ise kimyasal bir hammaddedir. Pirolizin ürün birleşimi sadece ilk biyokütle kaynağına bağlı değil aynı zamanda ısıtma hızı, süresi ve maksimum ısı

işlem sıcaklığı gibi reaksiyon parametrelerine de bağlıdır.

Biyokömür genel olarak amorf karbon tabakalarından oluşur, grafit gibi düzgün bir yapıya sahip değildir. Yapısında yüksek karmaşıklıkta aromatik bileşikler (kaynaşmış C kristalleri-monosiklik karbon halkaları) içermektedir. Bu kristaller zayıf Van der Waals bağları ile küçük grafen tabakasına benzer çapraz bağlı yassı aromatik karbon tabakalarıdır. Piroliz sıcaklığına bağlı olarak yapısındaki kaynaşmış aromatik yapılar büyük ölçüde amorf yapıya ve yüksek sıcaklıklarda ise türbostatik yapıya dönüşebilir. Şekil 15’ de görüldüğü gibi, karbonlaştırma sıcaklığı arttıkça, mikro kristaller (grafit benzeri) büyüyerek tabakalar arası daha düzenli bir hal alır. Ayrıca sıcaklık arttırıldıkça biyokömür yapısındaki uçucu bileşikler ayrılır, böylece biyokömürün yüzey alanı genişler ($\sim 500 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) (Dehkhoda, 2016) .



Şekil 16. Biyokömürde karbon yapısı, Düzensiz rastgele yapıda aromatik karbon tabakaları (a), Türbostatik yapıda karbon tabakalarının büyümesi (b), Yüksek sıcaklıklarda grafit yapısı (c) (Dehkhoda, 2016).

1.6. Literatür Özeti

Grafen mükemmel elektriksel ve mekanik özellikleri sayesinde aygıt uygulamalarında eğilim gösterilen bir materyaldir. Geleneksel alan etkili transistör teknolojisinin yerine, grafen alan etkili transistörler üretim yöntemlerine bağlı iyi performansa sahiptir. Karbon materyalin transistör veya elektriksel aygıtlarda uygulanması ile ilgili bazı güncel literatür çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Manukyan (2009), tez çalışmasında alan etkili grafen transistörün Drain ve Source kontaklarında gümüş boya kullanmışlardır. Tek ve çok katmanlı grafen tabakaların üretim yöntemlerini, karakterizasyonlarını ve transistörün elektriksel karakteristiklerini araştırmıştır. Grafen esaslı, alan etkili transistör üretimi, grafenin Si/SiO₂' ye aktarılmasıyla başlamıştır. Grafenin dielektrik yüzey üzerindeki karakterizasyonundan sonra, cihaz şablonu (Si/SiO₂+grafen) geleneksel fotolitografi teknikleri ile şekillendirilmiştir. Bu işlem, şablon yüzeyinde fotoresist malzemenin kaplanması ile başlamıştır. Sonuç olarak, yüksek elektron mobilitesi ile grafenin alan etkili transistörde umut vadeden bir materyal olduğunu göstermiştir.

Pince ve Kocabas (2010), grafeni alan etkili transistörlerde uygulamış ve yüksek frekans performansı ile çıkış ve transfer karakteristiklerini belirlemişlerdir. Grafen transistörün radyo frekans bandında güç kazanımı sağladığını görmüşlerdir. Yüksek frekans uygulamaları günümüzde akıllı telefonların etkili çalışmasında önemlidir.

Schwierz (2010), elektronik aygıtlar için grafenin özelliklerine ilaveten mantık ve radyofrekans uygulamalarında grafen transistörlerin performans etkilerini incelemiştir. Grafen alan etkili transistörlerde mevcut aygıtların performansını kısıtlayan kısa kanal etkileriyle karşılaşmadan daha kısa kanal uzunluklarına ve daha yüksek hız için ölçek bakımından küçültülerek çok ince kanallı aygıtlar yapma olasılığının olacağı sonucuna varmıştır. Grafen transistörlerin göze çarpan zorlukları arasında grafenin geniş bir enerji bant aralığına sahip olmaması yüzünden grafen nanoşerit (nanoribbon)' e sahip transistörlerin üretilmesi gerektiğini bildirmiştir.

Zheng vd. (2010), amorf karbonu metal katalizör eşliğinde grafene dönüştürmüşlerdir. Metal tabakalar arasında termal tavlanan amorf karbonun yapısı sp^2 yapısına kristalize edilmiştir. Metal film üzerinde oluşturulan grafen katmanı, pratik uygulamalar için önemli bir faktör olan diğer substratlara kolaylıkla aktarılabilir. Grafenin metal substratlardan izolatörlere aktarılması, elektronik uygulamaları gerçekleştirmek için kritik bir adımdır. Bu da, aygıt işleme için imalat karmaşıklığını daha da kolaylaştıracaktır.

Trung vd. (2013), indirgenmiş grafen oksit temelli alan etkili transistörle ultra hassas baskı algılayıcı (sensör) geliştirmiştir. rGO FET' leri esnek ve saydam polietersülfan (PES) altlık kullanarak üretmişlerdir. G elektrotu e-ışın buharlaştırma yöntemiyle biriktirilmiş, kapı dielektriği olarak ise Al_2O_3 (Alüminyum Oksit) kullanılmıştır. Bildirilen rGO-FET düşük gerilme (strain) modlarında bile ultra hassasiyet göstermişlerdir. Aygıtın $I_{DS}-V_G$ karakteristiği ambipolar özellik göstermiştir. Yani hem delik hem boşluk akımları V_G tarafından indüklenir. Kişisel sağlığın sensörler tarafından incelenmesi, sensör robotlar, elektronik deriler ve farklı insan arayüz ekipmanları için esnek basınç, zorlanma, ısı ve optik sensörler konusunu nanotel, karbon nanotüp, grafen açısından incelenmiştir. Gerilimi algılayan malzeme olarak grafenden faydalanmışlardır.

Bark vd. (2013), mikroişitici olarak adlandırıp geliştirdikleri alan etkili transistörde termal indirgenmiş grafen oksitin (TrGO- termal reduced graphene oxide) enerji seviyesine bağlı Seebeck katsayılarını karşılaştırmışlardır. Seebeck etkisi termoelektrik etki olarak da bilinir. İki farklı yarıiletken arasında sıcaklık farklı oluşturulduğunda oluşan gerilim olarak bilinir. Çalışmada, P-katkılı TrGO ve N-katkılı TrGO' yu borik asit ve ürenin GO çözeltilerine muamelesiyle hazırlamışlardır. Bunun için farklı katkılama oranları kullanmışlardır. Yoğun N-katkılı TrGO' yu ise Ar ve NH_3 atmosferi altında GO' nun tavlama ile hazırlamışlardır. Termal tavlama sırasında borik asit B atomlarına, üre ise N atomlarına ayrışarak TrGO üzerine katılanmıştır. TrGO' nun G' ye bağlı Seebeck katsayısı yük taşıyıcılarının durumuna göre ambipolar davranış (hem elektron hem delik iletimi) göstermiştir. Çalışmada numunelerin iletkenliği katkılama etkisiyle bant aralığı (E_g =bant aralığı enerjisi) açıklığının değerlendirilmesi olarak ortam sıcaklığının değişimiyle yapılmıştır. Yani kapı (G) ön

beslemesine bağılı seebeck katsayısı ve katkılama yoğunluğuna göre *fermi enerji seviyesi* değişmiştir. Buradan TrGO, B-TrGO ve N-TrGO' nun metalik iletkenlik gösterdiklerini bulmuşlar, bu sonucu Seebeck katsayısının değerlerinin denklemi ile desteklemişlerdir. Kapı beslemesi negatif ile pozitif değerler arasında değiştirildiğinde TrGO' nun Seebeck katsayısı pozitif ile negatif değerde ($\mu\text{V/K}$) değişmiştir. Bu durum beslemenin enerji durumuna göre yük taşıyıcılarının delikten elektrona değiştiği anlamına gelmektedir. Burdan yola çıkarak B veya N katkılı TrGO ve yoğun N katkılı TrGO farklı davranışlar sergilediği gerekli transfer eğrileri ile ifade edilmiştir. Transfer eğrileri TrGO ve B-TrGO' daki delik iletiminin elektron iletiminden daha yoğun olduğunu, elektron iletiminin ise N-TrGO' da arttığını göstermiştir. B-TrGO ve N-TrGO' nun Seebeck katsayılarının sayısal değerleri hem transfer eğrilerinden hem de teorik olarak sunulmuştur. Ayrıca çalışmada TrGO, B-TrGO ve N-TrGO' nun göreceli bant aralıkları ve Seebeck katsayılarına göre TrGO' nun göreceli elektronik yapısı (fermi enerji seviyeleri) gösterilmiştir.

Kathalingam vd. (2014), mekanik pul pul dökülme yöntemiyle çift katmanlı üretilen grafen pullarını kullanarak arka kapılı (back-gate) grafen alan etkili transistör üretmişlerdir. Alan etkili transistör histeresiz etkisi ve elektriksel özellikleri açısından incelenmiştir. Üretilen grafen FET, p tipi katkılama ile histeresiz özellik göstermiştir. Çalışmada gözlemlenen histeresiz ve p katkılamanın muhtemel sebebi açıklanmıştır. Grafit “scotch tape” yöntemiyle mekanik olarak, 300 nm SiO_2 tabakalı p tipi Si altlık üzerine dökülmüştür. Oluşan farklı kalınlıklardaki grafen tabaka optik mikroskop, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve Raman Spektroskopisi kullanılarak incelenmiştir. D ve S kontakları arası mesafe (L, kanal uzunluğu) 5 μm ve kanal genişliği (W) 10 μm olan aygıtta metal kontaklar (Ti-Au / 10-200 nm) termal buharlaştırmayla sağlanmıştır. Grafen altlık üzerine 450 °C' de tavlanmıştır. Arka kapılı grafen FET, bir Keithley 4200 yarı iletken parametre analiz aygıtıyla oda sıcaklığında karakterize edilmiştir. Farklı V_{DS} ' lerde V_{GS} ' nin hem ileri hem de geri taraması için I_{D} değişikliği değerlendirildiğinde histeresiz döngünün V_{DS} ile arttığı tespit edilmiştir. Üretilen grafen FET, 1.150 $\text{cm}^2 / \text{V.s}$ delik, 980 $\text{cm}^2 / \text{V.s}$ elektron alan hareketliliği değerindedir. Histeresiz özellik grafen / oksit arayüzündeki şarj tutma yada tutmama özelliğinden kaynaklanır. Çift katmanlı grafen, iki katman arasında potansiyel fark uygulanarak ayarlanabilir enerji bant boşluğu açma özelliğine sahiptir. Arka kısmında Si altlık

kullanılarak üretilen (arka-kapılı) aygıt mimarisi, üst kapılı (top-gate) aygıtın işlenmesi sırasındaki zorluklardan dolayı avantajlıdır. Mekanik olarak pul pul dökülen grafen, transistör ve entegre devrelerin üretimine uygundur.

Kreupl (2014), çalışmasında CMOS için grafen ve karbon nanotüp özelliklerinin transistör üzerine etkisini incelemiştir. Karşılaştırmalı transfer eğrilerinde karbon nanotüplerin daha uygun olacağını belirtmiştir. Karbon nanotüp FET' lerde tümünden kapı (gate) uygulamasını, transistörün kanal bölgesindeki temas direncinin etkisini, karbon nanotüp alan etkili transistörlerde (CNTFET) boş alan olmadığını, yüksek kalitede materyallerle bu aygıtların uyumunu ve bu açılardan performans karşılaştırmasını işaret ettiği çeşitli çalışmalarla ele almıştır. Harici erişim direncinin kanal direncine oranı aygıt boyutları küçüldükçe önemli ölçüde artar. Yapılabilecek aygıttaki S-D alanlarının yüksek kapasitans ve G bölgesinde büyük saçak kapasitansları oluşur. Oluşabilecek kapasitans etkisi aygıtta hız ve enerji tüketimi gibi özellikleri etkiler. En uygun durumda kanal teması metal ile gerçekleştirilir ve kanalda düşük değerde Schottky kontak oluşur. Si FET' lerde görülen seri dirence göre tek bir CNT ile oluşturulan FET aygıtında genel seri direnç 11 k Ω olduğu belirtilmiştir. Düşük gerilimlerde CNTFET yüksek temas direnci kötü sonuçlar gösterdiği, temas direnci ihmal edildiğinde I-V karakteristiğinde doyum performansının iyi olduğu yine bu çalışmada gösterilmiştir. Yüksek mobilitelere sahip materyallerin aksine CNT aygıtta tek bir atomik tabakada iletkenlik sağlar ve bu özellik düşük eşik altı doygunluk (SS) ve D' den kaynaklanan bariyerin düşük olmasıyla sonuçlanır. CNTFET' ler yüksek-k dielektriğine sahip Al, Ti, Ta, Hf, Zr ve La elementlerinin oksitleriyle uyumludur. Farklı kanal materyalleri yüksek mobiliteler açısından kıyaslama gerçekleştirildiğinde düşük gerilimlerde aygıtın akım karakteristiği belirleyici etkindir.

Hyun vd. (2015), kimyasal işlem görmemiş (yüzey işlemi görmemiş) cam kağıt altlıklarda birkaç baskı tekniği kullanarak basılmış, yan-kapı geometrisine sahip katlanabilir, düşük voltajda çalışabilen yüksek verimli organik ince film transistörler (TFT) göstermiştir. Yüksek yoğunluk sağlamak için etil selüloz polimeriyle yüksek mekanik özelliklere sahip grafen mürekkep hazırlanmıştır. Saf grafen mürekkebi ekran baskı (screen printing) tekniği ile iletken olarak S, D ve G elektrotlarının oluşturulması için silikon şablon kullanılarak, fotonik tavlama yöntemiyle biriktirilmiştir. S ve D

elektrotları arasına yarıiletken kanal olarak, poli (3-heksiltiyofen) (P3HT) aerosol baskı tekniğiyle ve geçit dielektriği olarak iyi bükülebilir özelliğe sahip iyon-jel mürekkep püskürtmeli baskı (ink-jet printing) tekniği ile katmanlar oluşturulmuştur. Katlanabilir elektronik aygıtlar taşınabilme avantajına sahiptir. Çalışmada aygıtlar plastik altlıklarda benzer tekniklerle üretilen aygıtların performansları ile karşılaştırıldığında belirgin değişikliklerin olduğu belirtilmiştir.

Bayaya (2016), tez çalışmasında karbon temelli materyaller ile alan etkili transistör yapımı ve elektriksel karakterizasyonlarını sunmuştur. Karbon temelli nano malzemelerin alan etkili transistörlerde iletkenliği artırdığını göstermiştir.

Dissanayake ve Eisaman (2016), herhangi bir dış kimyasal olmadan çok katmanlı grafen kullanarak, n tipi ve p tipi tamamlayıcı üst-kapı alan etkili transistör çiftini mikron uzunluğa sahip kanallarda üretmişlerdir. Tekniklerinde CMOS ile uyumlu grafen transistörleri (% 15 Na₂O) sodalı kireç cam substrat üzerine hidrojen silseskudiyoksan (HSQ) döndürerek kaplama (spin-coating) ile kaplayarak üretmişlerdir. Bunun üzerine 5 katmanlı CVD grafen (Multilayer graphene) standart ıslak transfer yöntemiyle HSQ ile desenlenmiş sodalı kireç cam (SLG) üzerine aktarılmıştır. Çok katmanlı grafen, elektron ışın litografisiyle desenlenerek, kısmen HSQ bariyeri üzerinde 1 µm genişliği ve 5 µm uzunluğunda grafen kanalları elde etmek için oksijen plazması kullanılarak oyulmuştur (etching). Çok katmanlı grafen ve substrat arasına yerleştirdikleri HSQ, n katkılamaı bloke ederek, çok katmanlı grafen HSQ ile desenli bölgeler üzerinde p katkılama ile sonuçlanır. S ve D elektrot bölgeleri iki ayrı grafen kanal bölgesi üzerine desenlenmiştir. 20 nm' lik Al₂O₃ atomik tabaka biriktirme yöntemiyle üst geçit oksidi olarak tüm kanal üzerine biriktirilmiştir. İki ayrı G elektrotları ise kapı oksidi üzerinde termal olarak buharlaştırılmıştır. Grafen kullanılarak hem analog hem de dijital devrelerde altlık ölçekli tamamlayıcı CMOS uyumlu transistörlerin geliştirilebileceği bu çalışmada gösterilmiştir. Dış katkılamaı kimyasalların genelde aygıtı üst taraftan katkılандığı GFET' lerden farklı olarak, bu alt tabaka katkılı GFET' ler kanala daha güçlü elektrostatik bağlanma sağlayan üst kapıya izin verir ve çalışma kapı beslemesini (gate-bias) azaltır.

Generalov vd. (2017), 400 GHz çalışma frekansında grafen alan etkili transistör (GFET) dedektörü bildirmişlerdir. Yüksek dirençli 300 nm SiO₂ tabakalı Si substrat üzerine tek katmanlı CVD kuru transfer ile kaplanmıştır. Grafen katmanı üzerine ince bir Al kaplanarak doğal oksidasyon (160 °C’ de) gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde üretilen FET, kanaldaki sıvıların grafen katmanı ile temas etmesini önleyerek, daha temiz kapı dielektriği/grafen arayüzü sağlar. FET’ in S ve D kontakları Ti (4 nm), Pd (10 nm) ve Au (290 nm) buharlaştırılarak, G elektrotu ise Ti (10 nm) ve Au (300 nm) buharlaştırılarak, desenlenir. Çalışmada transistörün grafen kanalında oluşan grafen artık yük taşıyıcı yoğunlukları (n_0) ve kirliliklerin, dedektörün üretiminde ve performansı üzerinde önemli bir parametre olduğu incelenir. Grafen kanalının sıvı işlemlere maruz kalması en aza indirgenerek, düşük artık madde çözünürlüğü sağlanır. Dedektörün hassasiyeti, grafen/arayüz kalitesinden etkilenir ve grafen katmanındaki kalıntı taşıyıcı konsantrasyonunun artmasıyla azalır.

Masoumi vd. (2017), desenlenmiş indirgenmiş grafen oksit tabanlı Si/SiO₂ substrat üzerinde arka kapılı alan etkili transistörü düşük maliyetli bir üretimle çözeltiye dayalı yöntem ile sunmuşlardır. İletken kanal indirgenmiş grafen oksit elde etmek için hidrazin kullanılmıştır. D ve S kontakları Au ve Cr kullanılarak fotolitografi yöntemiyle biriktirilmiştir. Aygıtlarının transfer karakteristikleri ambipolar davranış sergilemiştir.

Yeh vd. (2019), transfersiz büyütülen grafeni metal olmayan alt tabakada sunar. Çalışmada CMOS ile uyumlu safir altaşıta yetiştirilen grafen CVD yöntemiyle üretilmiş ve GHz çalışmasında alan etkili transistörde kanal materyali olarak kullanılmıştır. GHz çalışma koşulunda GFET’ lerin grafen-altlık arayüz temizliğinin transistör performansını etkilediği ayrıntılı karakterizasyonlar (X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi, Raman Spektroskopisi, Geçirimli Elektron Mikroskobu) ile gösterilir. Safir altlık üzerine büyütülen transfersiz CVD grafen standart e-ışın litografi yöntemiyle Drain ve Source elektrotları (Cr ve Au) termal buharlaştırmayla biriktirilerek üst kapı (top-gate) şeklinde transistör üretimi gerçekleştirilmiştir. Mantar şeklinde yüksek kalitede düşük kaçak akım ve yüksek kapı kapasitansı gibi avantajları olan AlO_x üst kapı kullanılmıştır. Grafenin kendine özgü yüksek hareketlilik özelliğinden faydalanan GFET’ lerin GHz çalışma performansları, aynı kanal uzunluğuna sahip Si altlıklarda transferli CVD ile büyütülen grafen ile karşılaştırılmıştır. Bu şekilde grafen alan etkili

transistörün yüksek hızlı kablosuz iletişimde önemli paya sahip olacağı yüksek frekanslı transistörlerin ana performans ölçütleri olan kesme frekansı (f_T) ve maksimum salınım frekansı (f_{mak}) değerlendirilerek gösterilmiştir. Metal olmayan altlıkta büyütülen grafen performans açısından yüksek kalitededir ve atomik açıdan temizdir. Bu nedenle CMOS ile uyumludur. Yüksek hızlı kablosuz iletişimde transfersiz grafen alan etkili transistör yapısı avantajlıdır. Bu şekilde üretilen transfersiz grafenli transistörler mikrodalga entegre devreleri, düşük gürültülü amplifikatörler, güç amplifikatörleri, frekans çarpanları, frekans karıştırıcıları, frekans osilatörleri gibi RF devrelerin kullanımını içeren uygulamalarda kullanılır.

Dathbun vd. (2019), güncel çalışmalarında mevcut grafen transistörlerin ambipolar yük taşıyıcı özelliklerinin tamamlayıcı mantık kapılarındaki sınırlılığını ortadan kaldırmak için, grafende yük taşıyıcılarının katkılanmasıyla elektriksel özelliklerini değiştirmişlerdir. Grafen filmler, karbon kaynağı olarak metan kullanılarak CVD ile Cu katalizörü eşliğinde termal olarak sentezlenmiştir. Aygıt üzerinde kanal ve elektrot alanı oluşturmak için fotolitografi tekniğiyle reaktif iyon aşındırma yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada; sentezlenen CVD grafene, bis (triflorometan sülfonil) amin (TFSA) molekülüyle p-tipi katkılama, poli (etilenimin) (PEI) molekülüyle n-tipi katkılama yapılır. Kimyasal olarak katkılanan grafen kanalın genişliği 1000 μm ve uzunluğu ise 100 μm ' dir. Grafen transistörün gate terminaline sinyalin kararlı uygulanması için genellikle Al_2O_3 , ZrO_2 ve HfO_2 gibi yüksek-k metal oksitler kullanılırken, burada aygıtın düşük voltajlarda çalışmasını sağlamak için geçit dielektriği olarak, iyon jeli kullanılmıştır. İyon jel esnek kapı (gate) dielektriği için 1 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, den büyük yüksek kapasitansı ile 2 V' un altındaki değerlerde grafen transistörü çalıştırır. İyon jel dielektriği kullanılarak esnek ve saydam monolitik p-tipi ve n-tipi grafen kanallı transistörler birleştirilerek, tamamlayıcı mantık kapıları (NOT, NAND ve NOR gibi) üretilmiştir.

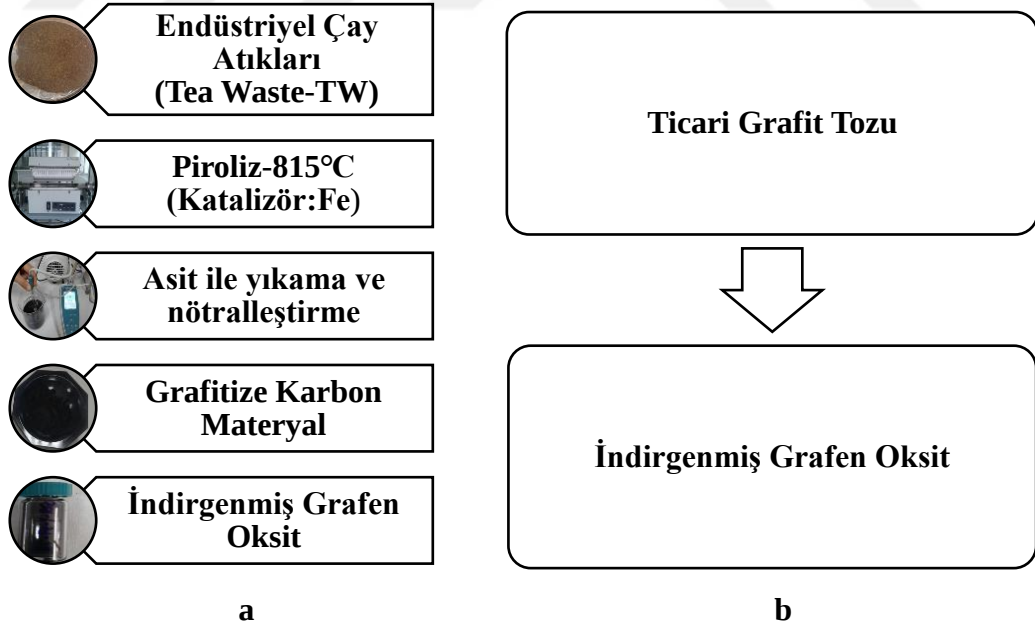
Rabieefar ve Dideban (2019), güncel çalışmalarında analog sinyallerden dijital sinyallere veri dönüştürücülerde sıradan Si aygıtlara kıyasla, grafen nanoşeritlerin (nanoribbons) etkisini yüksek hız ve düşük güç tüketimi açısından incelemişlerdir. Dijital analog ve analog dijital dönüştürücüler elektronikte çok önemli paya sahiptir.

Karbon elektroniğindeki literatür transistör çalışmaları göstermektedir ki; grafen, transistör aygıtlarının üretiminde uygun olarak uygulanmaktadır ve aygıt üzerine etki parametreleri araştırılmaya devam edilmektedir. Bu tezde biyokütle karbonunun grafen benzeri karbona dönüştürülmesi ve transistörde kullanımı amaçlanmaktadır. Bununla ilgili literatür çalışmaları sınırlıdır.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu yüksek lisans tez çalışması yeni ve yenilenebilir karbon kaynağı olan çay atığından türetilen yüksek performans karbon malzemesinden grafenik karbon üretimi ve bunun transistör uygulama araştırmasını amaçlamaktadır. Çoğunlukla karbon transistör uygulamalarında Si altlıklar kullanıldığı için, çalışmada n tipi (100) yönelimli Si/SiO₂ altlık üzerine alan etkili transistör inşa edilmiştir. Alan etkili karbon transistör yapısında aktif iletken tabaka olarak kullanılan, çay atığı biyokütlesinden türetilen karbon materyalinin transistör performansına etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla karbon malzemeler sentezlenmiştir. Sentezlenen karbon malzemeler transistör üzerinde aktif kanal oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Aygıtlar üretilerek, karakterizasyonları yapılmıştır. Gerek indirgenmiş grafen oksit kullanılarak hazırlanan, gerekse biyokütleden hazırlanan indirgenmiş grafen oksit ile hazırlanan alan etkili karbon transistörlerin hazırlanmasında kullanılan deneysel yöntemler ve bunların fiziksel, kimyasal ve elektriksel karakterizasyonları bu bölümde sunulmaktadır. Şekil 17, materyal geliştirilmesini özetlemektedir.

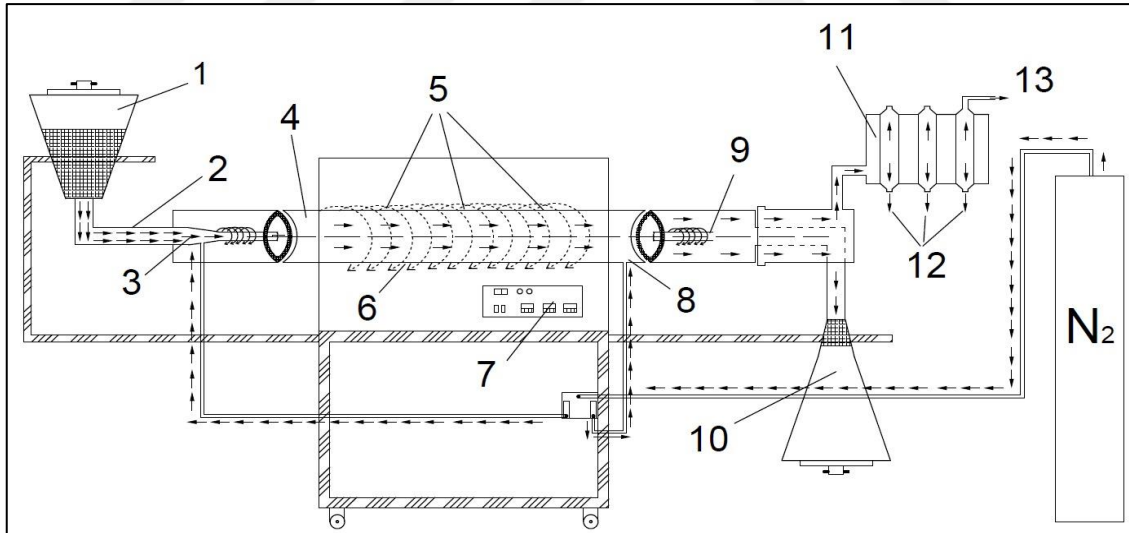


Şekil 17. Üretilen grafen benzeri karbon yapılar için deneysel uygulama adımları, Çay atıklarından indirgenmiş grafen oksit sentezi (a), Ticari grafit tozundan indirgenmiş grafen oksit sentezi (b).

2.1. Karbon Malzemelerin Hazırlanması

2.1.1. Çay Atığı Biyokütlesinden Biyokömür Üretimi

Karbon malzeme üretiminin ilk aşamasında, yerel bir fabrikadan alınan çay fabrikası atıkları piroliz yöntemi ile karbonize ürün olan biyokömüre dönüştürülmüştür. Çay atıkları öğütücüden (Spice & Herb Grinder IC-04A) ve kahve değirmeninden geçirilmiştir. Ve 500 mm' lik metal elek ile elde elenmiştir. Öğütülmüş çay atıkları 80 °C' de üç gün süreyle etüvde kurutulmuştur. İyi bilinen grafitizasyon katalizörü demir, bu çalışmada çay atıklarını grafitte dönüştürmede kullanılmıştır (Liu vd., 2017; Rufford vd., 2010). Bu sebeple, etüvde kurutulmuş çay atıkları biyokütlesine 1:3 oranında $FeCl_3$ (Tekkim) impregne edilmiştir. 3 oranında çay atığı biyokütlesine 1 oranında $FeCl_3$ sulu çözeltisi hazırlanıp çay atıkları ile karıştırılarak oda sıcaklığında, orbital karıştırıcıda (Heidolp Unimax 1010 Schekers) 1 gün karışmaya bırakılmıştır. Fe impregne edilen çay atıkları biyokütlesi etüvde 2-3 gün kurutulmuştur. Bu numune TW-Fe olarak adlandırılmıştır.

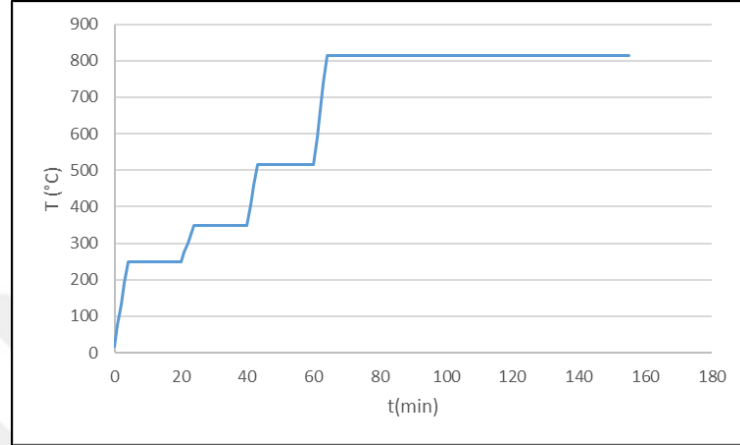


(1) Numune beslemesi, (2) numune ilerlemesini sağlayan titreşimli mekanizma, (3) helezon giriş konveyörü, (4) giriş azot beslemesi, (5) üç ayrı yerden sıcaklık ölçümü alan termokupl sıcaklık sensörü, (6) kuvars malzemeden üretilmiş piroliz reaktörü, (7) kontrol konsolu, (8) reaktör çıkışı azot gazı beslemesi, (9) helezon çıkış konveyörü, (10) katı ürün haznesi, (11) gaz ürün yoğunlaştırma ünitesi, (12) sıvı ürün (tar/piroliz yağı) haznesi ve (13) gaz çıkışı

Şekil 18. Piroliz reaktörü şematik çizim.

Şekil 18' de döner yataklı ve laboratuvar ölçekli piroliz reaktörünün şematik görünümü verilmektedir.

Piroliz reaktöründe üretim için, piroliz sisteminde azot atmosferinde (1L/dk), 27,2 g TW-Fe Şekil 19' da görüldüğü üzere 250 °C / 15 dk, 350 °C / 15 dk, 515 °C / 15 dk ve 815 °C / 90 dk olarak programlanarak piroliz edilmiştir. Bu aşamada, ~ % 25 verimle BC-Fe (Biyokömür-Demirli) elde edilmiştir.



Şekil 19. Piroliz sisteminin programlanması (Proterm -Ordell UDL 100).

Piroliz işlemi sonucu elde edilen biyokömür numuneleri öğütücüde (Fritsch - Pulverisette 9) 850 rpm' de BC-Fe (10 dk) ve ticari grafit tozu (10 dk) kontrollü şekilde öğütülmüştür. Biyokömür numuneleri öğütüldükten sonra elenmiştir. Eleme işlemi, Restch AS 200 analitik sarsmalı elek sisteminde gerçekleştirilmiştir. Öğütülmüş BC-Fe numunesi ve ticari grafit tozu 25 µm' lik metal elekte elenmiştir.

Fe, tuz ve çeşitli mineraller içeren BC-Fe (<25 µm) numunesi, bu yapılardan arındırılmak için konsantre HCl (Tekkim) (1:1 w/w su: asit) ve konsantre HF (1:1 w/w asit:su) çözeltileri ile ikişer kez yıkanmıştır. Asit ile yıkanan katı nötralleşinceye kadar saf su ile yıkanmış ve 80 °C' de etüvde kurumaya bırakılmıştır. Elde edilen bu numune BC-Fe-Y olarak adlandırılmıştır.

2.1.2. Biyokömürden ve Grafitten İndirgenmiş Grafen Oksit Üretimi

Biyokömür üretiminden sonra grafen yapısına ulaşmak için karbon malzemelerine Modifiye Hummers kimyasal yöntemi uygulanmıştır (Alma vd., 2017; Bedeloğlu ve Taş, 2016; Pei ve Cheng, 2012; Tiyeek vd., 2016; Zhou vd., 2009; Jahan vd., 2010; Smith vd., 2019).

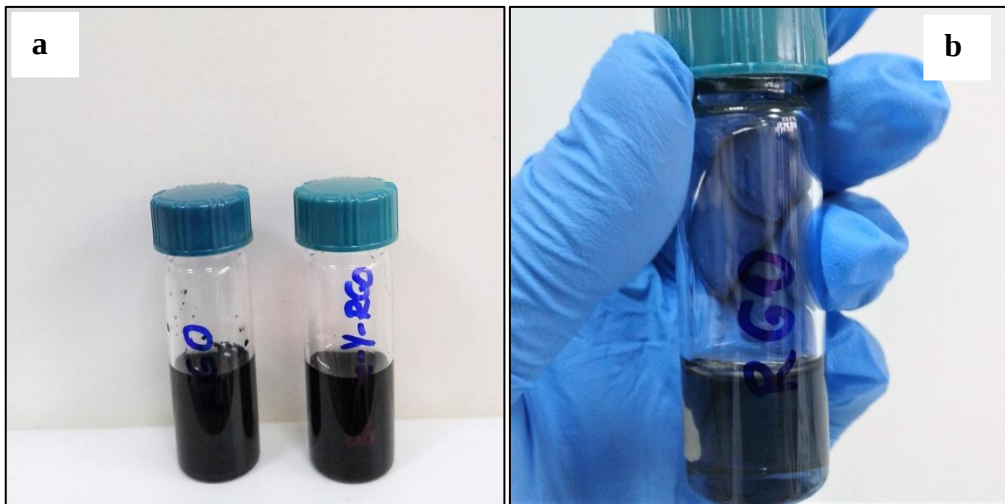
Başlangıçta kontrol grubu olarak, grafen oksit sentezinde ticari grafit tozu ($>25 \mu\text{m}$) (SBM teknik, amorf) kullanılmıştır. Literatürde verilen Modifiye Hummers yöntemine göre, 5 g Grafit tozu, 2,5 g NaNO_3 ve 115 mL H_2SO_4 behere alınarak buz banyosunda 2 saat $\sim 5^\circ\text{C}$ de manyetik karıştırıcıda (SCIOLOGEX MS7-H550-Pro) karıştırılmıştır. Çözeltiye 15 g KMnO_4 eklenerek, çözelti manyetik karıştırıcıda 500 rpm' de 35°C de karıştırılmaya devam etmiştir. Çözelti koyu kahverengi çamur kıvamına dönmüştür. Bu aşamada, karışıma 500 mL saf su eklenmiş ve 24 saat karıştırılmıştır. 24 saat sonunda karışıma 10 mL H_2O_2 (%30 luk Merck) eklenerek 1 saat daha karıştırıcı üzerinde karışması sağlanmıştır. Çözelti rengi koyu kahverenginden soluk sarımsı kahverengiye dönmüştür. Çözelti falkon tüplere eşit olarak dağıtılarak 30 dk, 5000 rpm' de santrifüjlenmiştir (Universal 320R, Hettich Zentrifugen). Katı kısım 1:1 HCl:Saf su asit çözeltisiyle yıkanarak tekrar, santrifüjlenmiştir (Asit ile yıkama ve santrifüj 2 kere gerçekleştirilmiştir). Santrifüj sonrası kalan katı pH derecesi nötr oluncaya dek saf su ile yıkanmıştır. Nuce düzeneğinden filtre kağıdı ($45 \mu\text{m}$, Millipore) ile süzülen katı kurumaya bırakılmıştır. Elde edilen ürün grafen oksittir (GO). Aynı işlemler BC-Fe-Y numunesine de uygulanarak BC-Fe-Y-GO karbon malzemesi elde edilmiştir (Roy, 2017; Roy vd., 2018). Çözeltide renk değişimi olmamıştır.

Grafen oksit üretiminde oksidasyon işlemi sırasında grafitin sp^2 kristal yapısı bozulur, yapıya hidroksil, epoksi grupları, karboksilik asit ve keton grupları gibi çok çeşitli oksijen fonksiyonel grupları eklenir. Elde edilen grafen oksit hidrofilik yapıya sahip olmuştur. İndirgenmiş grafen oksit (rGO) literatüre göre hazırlanmıştır (Alma vd., 2017; Eigler vd., 2013; Arco vd., 2009; Hummers ve Offeman, 1958; Jahan vd., 2010; Temel vd., 2017; Poniatowska vd., 2019; Reddy vd., 2018; Tiyeek vd., 2016; Yoo ve Park, 2019). Bunun için, 1,5030 g GO düz tabanlı balon joje içerisine alınmıştır. Üzerine 300 mL saf su eklenerek, 38°C de 400 rpm' de ~ 24 saat manyetik ısıtıcılı

karıştırıcıda karışmaya bırakılmıştır. Karışıma 40 mL hidrazin hidrat (Merck) eklenip, geri soğutmalı düzenek altında 24 saat 90 °C’ de manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır.

24 saat sonunda 10 mL hidrazin hidrat çözeltiye eklenerek, geri soğutmalı düzende ~95 °C’ de 24 saat manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. İşlem sonucunda balondaki katı ürün saf su ile 2 kez yıkanarak süzgeç kağıdından süzölmüş ve 50 °C’ de kurumaya bırakılmıştır. Aynı işlemler BC-Fe-Y-GO numunesine de uygulanarak indirgenmiş grafen oksit (rGO) ve indirgenmiş biyokömür grafen oksit (BC-Fe-Y-rGO) karbon numuneleri elde edilmiştir.

Sentezlenen karbon malzemelerinin (rGO ve BC-Fe-Y-rGO) alan etkili karbon transistörde aktif kanal olarak ince film halinde kullanılması için mürekkep haline getirilmesi gerekmektedir. Dimetilformamid (DMF), N-metil-2-pirolidon (NMP), tetrahidrofuran (THF) ve saf su gibi çözücüler içerisinde indirgenmiş grafen oksit dağılır (Alma vd., 2017; Park ve Ruoff, 2009). Bu çalışmada NMP çözgeni kullanılmıştır. Bunun için 26 mg rGO üzerine 5 mL NMP çözgeni (Carlo Erba) ve 26 mg BC-Fe-Y-rGO üzerine 5 mL NMP eklenerek çözeltiler ayrı ayrı 30 dk sonikatörde çalkalanmıştır (Masoumi vd., 2017). Sonikatörden alınan rGO-NMP ve BC-Fe-Y-rGO numuneleri (Şekil 20a) 2 kere 30 dk, 4000 rpm’ de santrifüjlenmiş ve katısından ayrılarak (Şekil 20b) çözelti kısmı transistör aygıtında kanal malzemesi olarak için kullanılmıştır.



Şekil 20. rGO-NMP ve BC-Fe-Y-rGO- NMP çözeltileri (a), santrifüj sonrası rGO-NMP(b).

2.1.3. Karbon Malzemelerin Yapısal Karakterizasyonu

Sentezlenen karbon numunelerinin morfolojik yapısı, Jeol JSM-6610 marka modele sahip Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiştir.

X-ışınları Kırınım Deseni (XRD), Rigaku marka SmartLab model cihaz ile 40kV-30 mA'de CuK_α ($\lambda=1,5448 \text{ \AA}$) hedef kullanılarak $4 \leq 2\theta \leq 90^\circ$ aralığında ölçülmüştür.

Karbon malzemelerin organik bileşen içerikleri Perkin Elmer Spektrum 100 cihazıyla Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) belirlenmiştir.

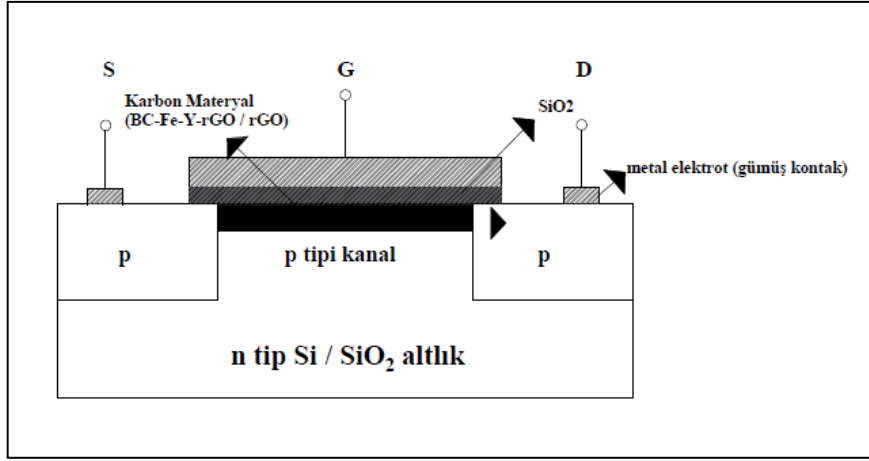
Raman Spektrometresi ölçümleri Doğu Anadolu İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi tarafından yapılmıştır.

rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerinin optik geçirgenlik ölçümleri 350 nm-1000 nm dalga boyları arasında ışığın normal durumunda Spectra Max M5 marka ve modeli aygıt ile gerçekleştirilmiştir. Geçirgenlik spektrumlarının doğru değerlendirilmesi için Ultraviyole Spektrometre Analizi Shimadzu marka UV-1610 Vıdıble modeli cihaz ile rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin NMP ile çözeltilerinin soğurma verileri elde edilmiştir. Karbon malzemelerin sıcaklıkta kararlılığını incelemek için Shimadzu marka TGA 50 Analyser model cihaz ile Termogravimetrik Analizleri (TGA) yapılmıştır.

2.2. Alan Etkili Karbon Transistör Üretimi

2.2.1. Altlık Hazırlanması

Literatürde alan etkili karbon transistörler arasında yapılan çalışmalarda çoğunlukla Si/SiO₂ altlıklar kullanılmıştır. Şekil 21' de üst kontak/üst kapı geometrisine sahip hazırlanan alan etkili transistör yapısı görülmektedir. Tüm deneysel çalışmalarda aygıt üretimi boyunca bir tarafı parlatılmış altlık olarak Crystec marka n tipi Si/ SiO₂ (3 inç, 380 μm , (100) yönelimli, 0.1-20 $\Omega\cdot\text{cm}$ yüzey direnci) altlıklar kullanılmıştır.



Şekil 21. Üst kapı-üst kontak yapıda alan etkili karbon transistor yapısı.

Alan etkili karbon transistörde kullanılan n tipi Si/SiO₂ altlıklar optik mikroskopla (Olympus BX51) incelendiğinde, altlıklar yüzeyinde kirlilikler olduğu gözlenmiştir (Şekil 22). Yüzey temizliği birçok kirliliği ortadan kaldıracağı için aygıtların performansı yüzey temizliğine çok bağlıdır. Kirlerden arındırılması için 3 basamaklı RCA içeren bir temizleme prosedürü gerçekleştirilmiştir (Munkholm vd., 1995; Garrido vd., 1992; Gök, 2015).

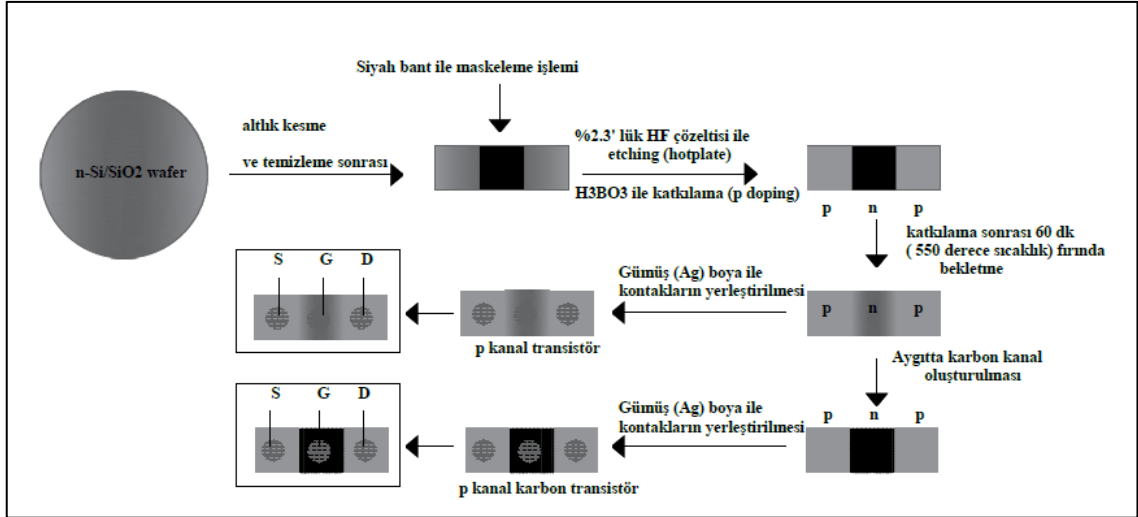
- 1.5 cm × 0.5 cm boyutlarında kesilen altlıklar 1:1:1:1 oranında NH₃: H₂O₂: Aseton: 2-Propanol içeren çözelti içerisinde alınıp 30 dk ultrasonik banyoda yıkama işlemi yapılmıştır (%25' lik NH₃-%30' luk H₂O₂, Tekkim).
- Temizlenen altlıklar yeterince saf su ile 2 dk ultrasonik banyoda durulanmıştır.
- Temiz altlıklar azot gazı ile kurutularak, oksit tabakalarının artması için termal olarak doğal kuru oksidasyona tabi tutulmuştur (550°C).



Şekil 22. n Si/SiO₂ altlık optik mikroskop görüntüsü.

2.2.2. Aygıt Üretimi

Alan etkili karbon transistör üretiminde Şekil 23’ de gösterilen işlem basamakları gerçekleştirilmiştir. Aygıt, temizlenen n tipi Si/SiO₂ altlık üzerinde üretilmiştir. Si altlıklarda transistör geometrisini sağlanması için, 1.5 cm × 0.5 cm boyutlarındaki altlıkların (orantılı olacak şekilde) orta kısımları bantlanmıştır. % 2.3’ lük HF:su çözeltisi içerisine daldırılan altlıkların bant dışında kalan bölgelerine aşındırma işlemi (etching) gerçekleştirilmiştir. Oksit tabakası aşındırılan altlıkların bu kısımlarına p katkılama için borik asitin doymuş çözeltisi kullanılmıştır. (Yeom vd., 2015; Wu vd., 2011; Chen vd., 2015).



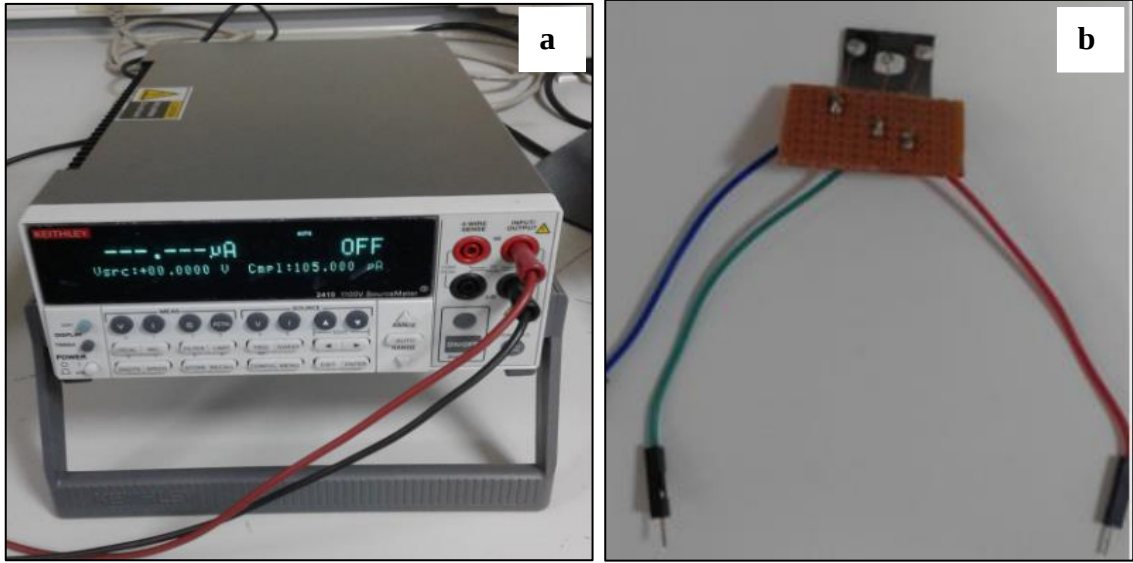
Şekil 23. Alan etkili karbon transistör işlem basamakları.

Şekil 24 (a)' de p katkılama yapılan n-tipi Si/SiO₂ altlıkların görüntüsü görülmektedir. p-n-p tipi yapıya sahip olan aygıt mimarisinin S, D ve G kontaktarı gümüş iletken boya ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 24 (b)).

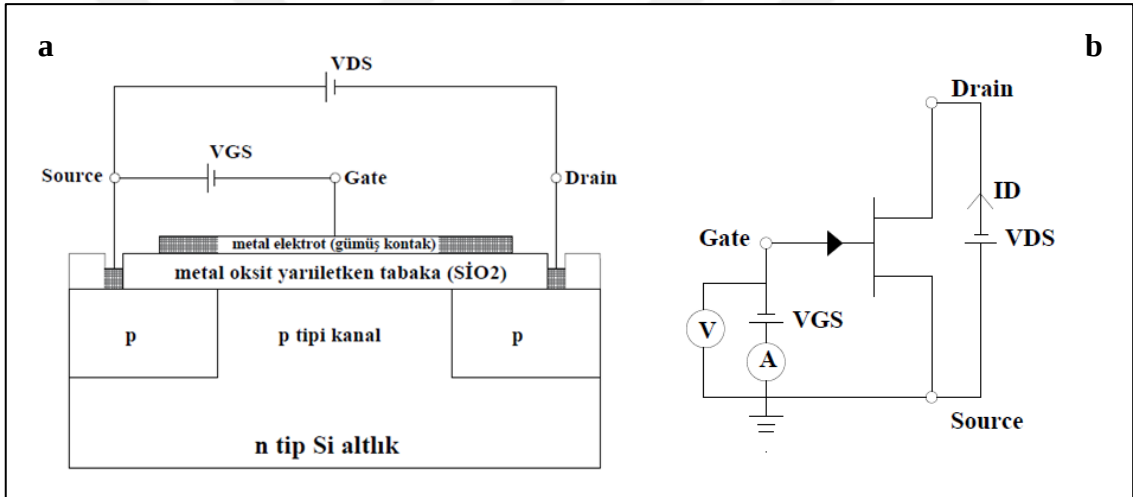


Şekil 24. Si/SiO₂ altlıkların p katkılanmış hali (a), Gümüş kontaklı p-n-p yapısı (b).

Karbonun alan etkili transistör davranışı üzerine etkisini incelemek için, kanal malzemesi kullanılmadan (p-FET), NMP çözgeniyle santrifüj sonrası elde edilen rGO karbon malzemesi kullanılarak (rGO p-FET) ve BC-Fe-Y-rGO karbon malzemesi kullanılarak (BC-Fe-Y-rGO p-FET) hazırlanan transistörler bu şekilde üretilmiştir. Kontaktarı yerleştirilen aygıtlardan bir tanesi Şekil 25b' de verilmektedir.

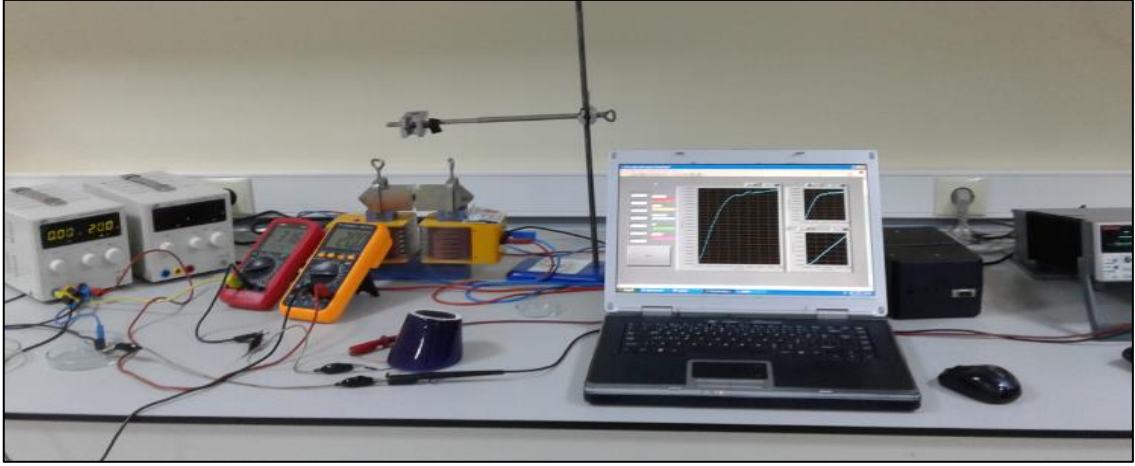


Şekil 25. Keithley 2410 aygıtı (a), Üretilen alan etkili karbon transistör aygıtı (b).



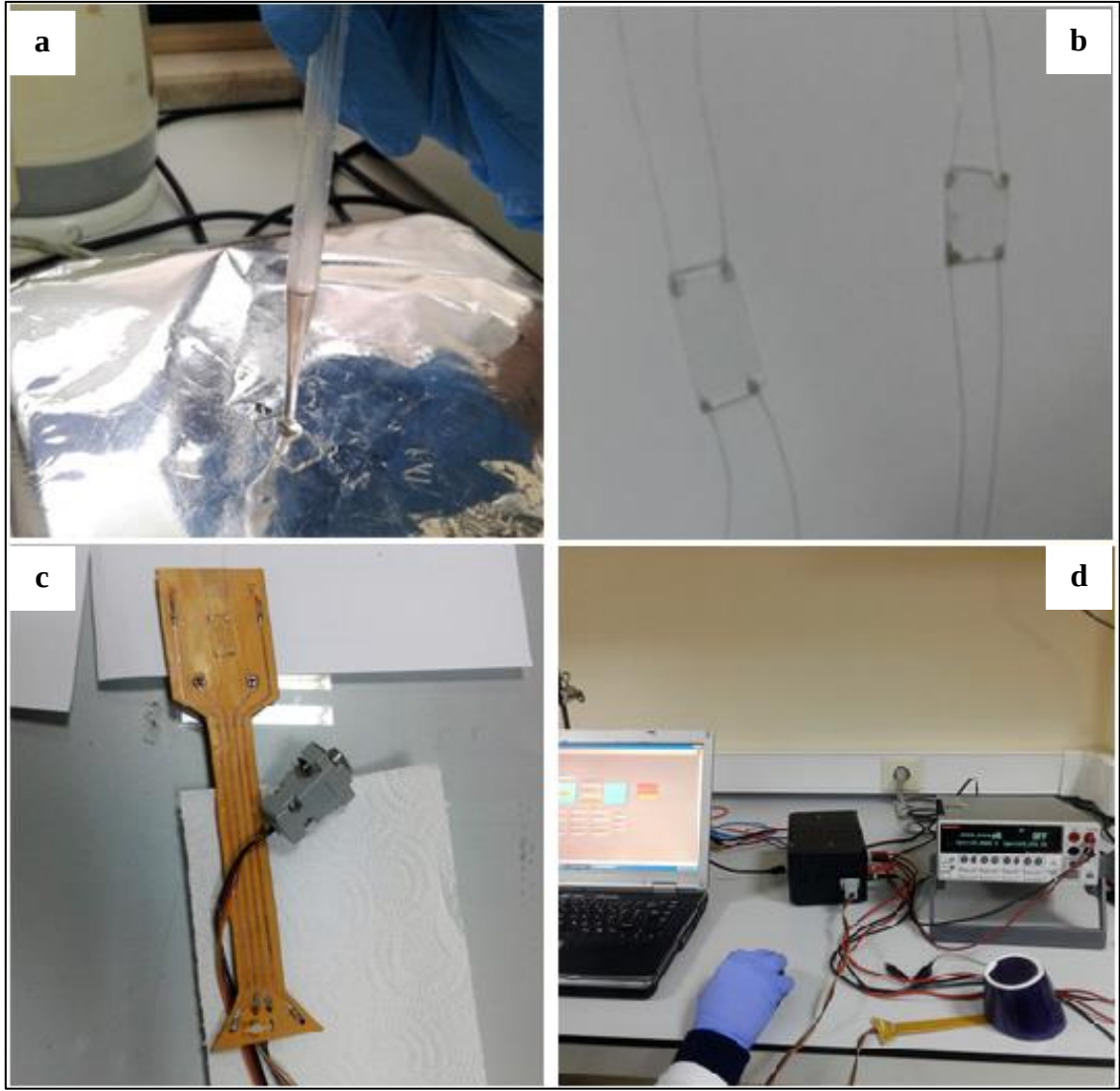
Şekil 26. p-tip alan etkili transistör, yapısı (a), elektriksel bağlantısı (b).

Üretilen alan etkili karbon transistörlerin elektriksel karakterizasyonu, aygıtın üretimi sonucu nihai çalışma performansını değerlendirmek açısından önemlidir. Elektriksel bağlantı şeması Şekil 26 (b)' de gösterilen alan etkili karbon transistörlerin akım-voltaj verileri Keithley 2410 marka yarıiletken parametre analiz aygıtı (Şekil 26a) kullanılarak, Labview 2011 yazılımı ile hazırlanmış bilgisayar kontrollü program ile ölçülmüştür (Şekil 27).



Şekil 27. Alan etkili karbon transistörlerin elektriksel bağlantı düzeneği.

Çalışmada rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin optik geçirgenlik ve elektriksel özdirenç ölçümleri alınmıştır. Bunun için rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmleri altlık olarak $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ boyutlarında cam (mikroskop camı) üzerinde hazırlanmıştır. Cam altlıklar temizleme prosedürü ile 15 dk ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Durulandıktan sonra azot gazı ile kurutulmuştur. Cam altlık üzerinde rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince film kaplama işlemleri manyetik ısıtıcı üzerinde yapılmıştır. Cam altlık önce $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa ayarlanmış manyetik ısıtıcı üzerinde bekletilmiştir. İnce film NMP çözgeniyle hazırlanmış santrifüj işlemi sonrası, elde edilen rGO ve BC-Fe-Y-rGO numuneleriyle hazırlanmıştır. Altlığın üzerine mikro pipet yardımıyla rGO-NMP ve BC-Fe-Y-rGO-NMP çözeltileri homojen şekilde kaplanmıştır (Şekil 28a). Bu işlem ince film oluşturulması için 9-10 kere tekrarlanmıştır. Filmlerin homojen kaplanmasını sağlamak için azot gazından faydalanılmıştır. Sonuçta $\sim 150\text{ nm}$ boyutunda ince filmler hazırlanmıştır. Hazırlanan ince filmlerin dört köşesine gümüş pasta yardımıyla, Şekil 28 (b)' de görüldüğü gibi gümüş pasta üzerinden indiyum lehim ile temas kontaktları (omik kontak) yerleştirilmiştir Dört noktadan kontaktlar alınmıştır (Şekil 28b).



Şekil 28. rGO ve BC-Fe-Y-rGO numuneleri için, cam altlık üzerine ince film kaplanması (a), cam altlık üzerinde ince filmlerin dört nokta temas bağlantıları (b), ince filmlerin Van der Pauw dört nokta öz direnç ölçüm düzeneği (c-d).

2.2.3. Karbon Numunelerin Elektriksel Ölçümleri

Alan etkili karbon transistör kanalında kullanılan rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin ince film elektriksel öz direnç ve taşıyıcı yoğunluğunun belirlenmesinde Van der Pauw dört nokta prob yönteminden ve Hall Etkisi yönteminden yararlanılır. Ölçüm düzeneği Şekil 28 (c-d)' de görülen bu yöntemde 1. ve 4. kontaklar arasından akım (I_{14}) verilir ve 2. ve 3. kontaklar arasından ise gerilim (V_{23}) ölçülür. Yani sırasıyla I_{14} , I_{43} , I_{32} , I_{21} akımları uygulanarak V_{23} , V_{12} , V_{41} , V_{34} gerilimleri ölçülür. Aynı düzen tersi durum için gerçekleştirilir. Sırasıyla I_{41} , I_{34} , I_{23} , ve I_{12} akımları uygulanan yüzeyde

V_{32} , V_{21} , V_{14} , V_{43} gerilimleri ölçülür. Sonuçta ohm yasasına göre; $R_{21,34} = V_{34} / I_{21}$ direnç değerinde olduğu gibi sekiz adet direnç değeri ($R_{21,34}$, $R_{12,43}$, $R_{32,41}$, $R_{23,14}$, $R_{43,12}$, $R_{21,34}$, $R_{14,23}$ ve $R_{41,32}$) elde edilir. Burada önemli olan örneğin $R_{21,34}$ ve $R_{12,43}$ direnç değerlerinin yaklaşık eşit çıkmasıdır. Bu sekiz adet direnç değerlerinden R_A ve R_B dirençleri edilir.

$$R_A = \frac{R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21}}{4} \quad (4)$$

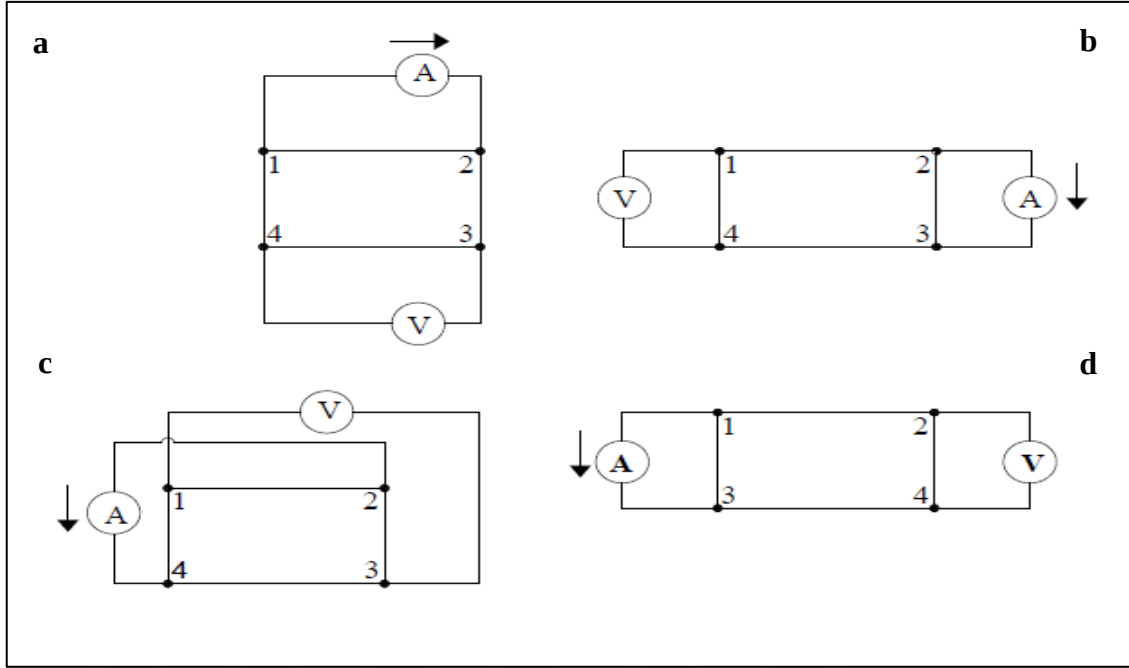
$$R_B = \frac{R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,23}}{4} \quad (5)$$

Eşitlik 4 ve 5' den öz direnç değeri;

$$\rho = \frac{\pi \cdot d}{\ln 2} \left(\frac{R_A + R_B}{2} \right) f \left(\frac{R_A}{R_B} \right) \quad (6)$$

eşitliğiyle bulunur. Burada $f(R_A/R_B)$ düzeltme faktörüdür. Düzgün homojen yapıya sahip numuneler için genellikle 1 alınır. d ise problar arası mesafedir.

Şekil 29 (a-b)' de rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin Van der Pauw dört nokta öz direnç ölçüm yöntemindeki akım ve gerilim noktalarını göstermektedir. Çalışmada oda sıcaklığında ve karanlık ortamda Van der Pauw 4 nokta prob yöntemiyle elektriksel öz direnç verileri labview 2011 yazılımı ile kaydedilmiştir.



Şekil 29. Van der Pauw dört nokta öz direnç ölçüm yönteminde kullanılan temas noktalarının gösterimi (a-b), Hall etkisi taşıyıcı yoğunluğu ölçüm yönteminde kullanılan temas noktalarının gösterimi (c-d).

İnce filmlerin taşıyıcı yoğunluğunun hesaplanmasında ise Hall etkisi yönteminden faydalanılır. Hall etkisinde akım taşıyan bir iletken tel, tel yüzeyine dik bir manyetik alan içerisine yerleştirildiğinde iletkenin genişliği doğrultusunda bir elektrik alan oluşur. Yarıiletken malzemelerin taşıyıcı yoğunluğunun hesaplanmasında Hall sabitinin bulunması zorunludur. Hall etkisi ile taşıyıcı yoğunluğunun bulunmasında Hall gerilimi (V_H) ölçümü filmin yüzeyine dik bir manyetik alanda sabit bir akım uygulanır ve farklı değerlerde gerilimin ölçülmesi esasına dayanır.

$$V_H = R_H \times \frac{\vec{I}\vec{B}}{b} \quad (7)$$

sırasıyla, V_H Hall voltajı, R_H Hall sabiti, I uygulanan akım (A), B uygulanan manyetik alan (Gauss), b ise numunenin boyutudur. n tipi yarıiletken $n \gg p$, p tipi yarı iletken $p \gg n$ olduğundan;

$$R_H = -\frac{1}{n_e} \quad (8)$$

$$R_H = + \frac{1}{p_e} \quad (9)$$

Eşitlik (8) ve (9)' dan;

$$n = 8 \times 10^{-8} \frac{I \vec{B}}{q V_H d} \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (10)$$

eşitlik (10) ile yarıiletkenlerde taşıyıcı (yük) yoğunluğu bulunur. Sırasıyla; B uygulanan manyetik alan, I akım (A), d ince film kalınlığı (cm), V_H Hall voltajı, e elektron yükü, p ise delik yüküdür.

V_H ' nin ölçülmesi için Şekil 29 (c-d)' de gösterildiği gibi I akımı karşılıklı 1 ve 3 noktalarından geçirilir, 2 ve 4 numaralı kontaklardan ise (V_{24}) V_H ölçülür. Bu olay akımın 2 ve 4 noktalarından geçirilip, 1 ve 4 noktalarında ise gerilimin ölçülmesiyle tekrarlanır. Yani ince film yüzeyine sırasıyla I_{13} , I_{31} , I_{24} , I_{42} uygulanır, V_{24} , V_{42} , V_{13} , V_{31} değerleri elde edilir. Hall voltajında alınan ölçümlerde hatayı en az indirmek için V_H ' nin ölçüldüğü noktalar arasındaki oluşan parazit gerilimlerin ortadan kaldırılması gerekir. Çoğunlukla elektrik akımının ve manyetik alanın yönüne bağlı olan bu durum akımın ve manyetik alanın yönü değiştirilerek mümkün kılınır. Bu çalışmada bu V_H ' nin doğru ölçülmesi için öz direnç ölçümlerinde olduğu gibi sekiz ölçüm alınmıştır. V_{13P} , V_{13N} , V_{24P} , V_{24N} , V_{31P} , V_{31N} , V_{42P} ve V_{42N} ile $V_D = V_{42P} - V_{42N}$, $V_C = V_{24P} - V_{24N}$, $V_E = V_{13P} - V_{13N}$, $V_F = V_{31P} - V_{31N}$ değerleri Hall etkisi ölçüm düzeneğinde karanlık ortamda ve oda sıcaklığında Labview 2011 yazılımı ile kaydedilmiştir. rGO ve BC-FeY-rGO ince film numunelerinin taşıyıcı yoğunluk değerleri Hall voltajı ($V_H = V_C + V_D + V_E + V_F$) yardımıyla eşitlik 10 ile bulunmuştur.

2.2.4. Karbon Numunelerin Optiksel Ölçümleri

Yarıiletken malzemelerin iletim bandı ve valans bandı arasındaki enerji bandının hesaplanmasında optik ölçüm etkili yöntemlerden birisidir. Mor ötesi ve görünür bölge soğurma tekniği belirli dalga boyu aralığındaki ışının ince film tarafından absorplanması ilkesine dayanır. Monokromatörden geçerek dalga boylarına ayrılan ışık demeti, malzemenin içerisinden geçerek dedektöre ulaşır. Her bir dalga boyu için dedektörden okunan foton miktarına karşılık soğurma-dalga boyu grafiği çizdirilir. Böylece malzeme içerisinde ne kadar foton absorplandığı görülmüş olur. rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerinin yasak enerji band aralığı (E_g)' nı belirlemede;

$$\alpha = -\ln\left(\frac{1}{T}\right) \frac{1}{d} \quad (11)$$

eşitliği kullanılmıştır. İfadede verilen sırasıyla; α soğurma katsayısı, d ince film kalınlığı, T ise λ dalga boyunda ölçülen geçirgenlik değeridir. Doğrudan bant aralığının olduğu malzemelerde soğurma katsayısı ile yasak enerji band aralığı (E_g) değerinin arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlik ile verilir:

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (12)$$

Burada; $h\nu$ ince film yüzeyine gelen fotonun enerjisi, E_g yasak band enerji aralığı, A ise bir sabittir.

$$h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{Joule}) \quad (13)$$

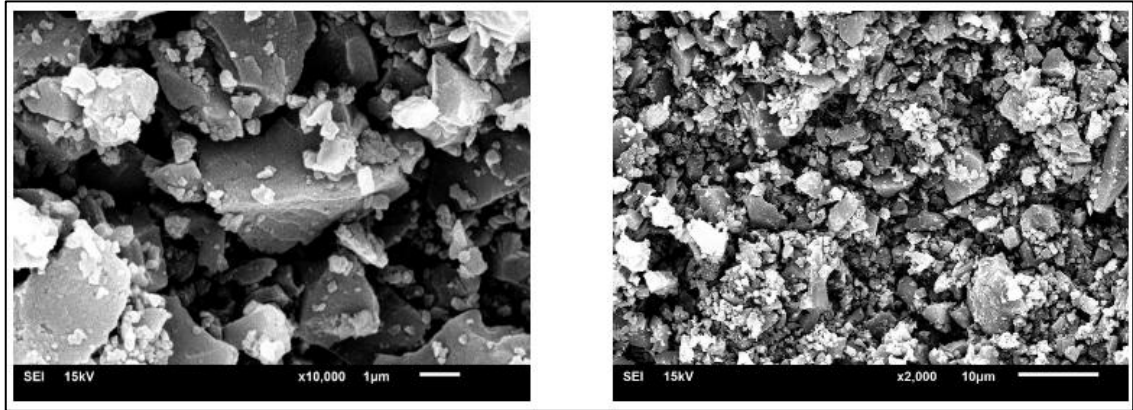
$h\nu$ eşitlik (13) kullanılarak bulunur. h , Planck sabitidir. c ise ışık hızıdır (3×10^8 m/sn). Burada önemli olan $h\nu$ ifadesinin eV'a dönüştürülmesidir ($1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ Joule). Elde edilen parametreler ile, ince filmlerin E_g değerlerinin hesaplanmasında $(\alpha \cdot h\nu)^2 - h\nu$ grafiğinin x eksinini kestiği yer band aralık değeri olarak bulunur.

3. BULGULAR

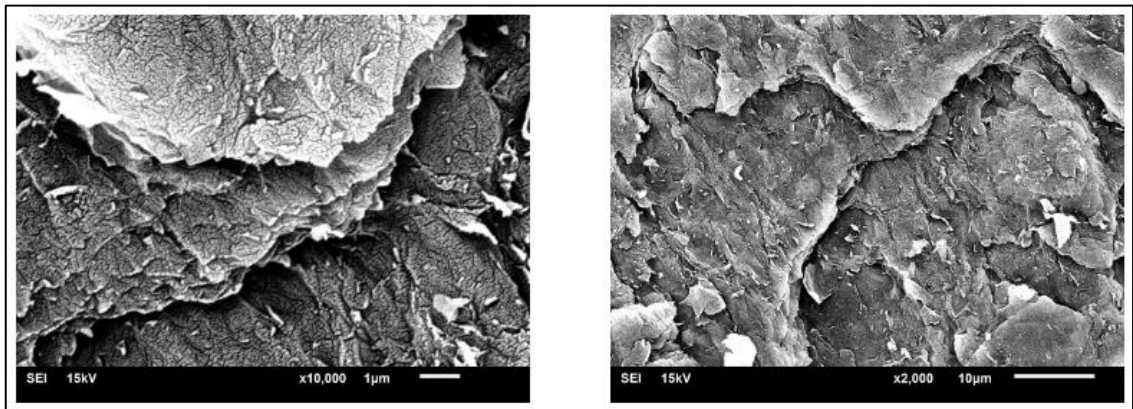
3.1. Karbon Malzemelerin Karakterizasyonu

3.1.1. SEM Analizleri

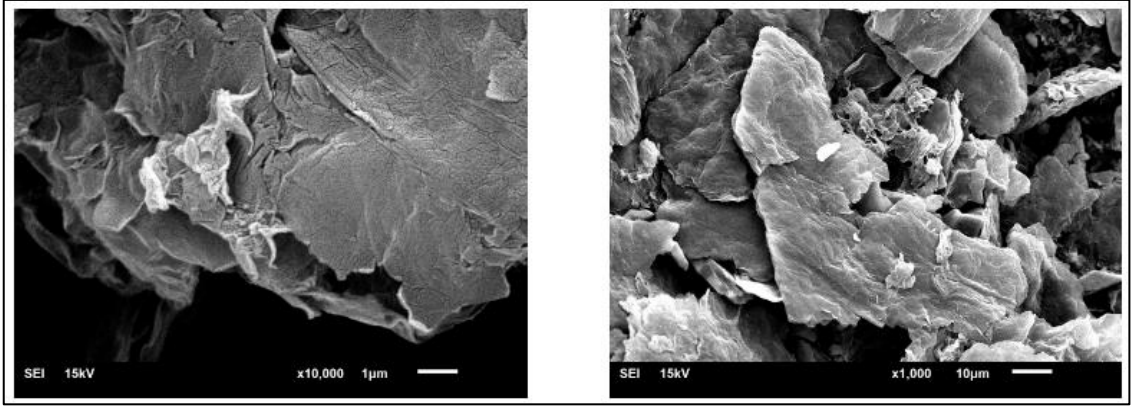
Ticari Grafit Tozu, GO, BC-Fe-Y ve BC-Fe-Y-GO numunelerine ait SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 30, Şekil 31, Şekil 33 ve Şekil 34’ de verilmiştir. Grafit tozunun rGO’ ya dönüşümünde SEM görüntüleri incelendiğinde Modifiye Hummers yöntemiyle grafit tabakalarının incelendiği ve açıldığı görülmektedir. Görülen karbon malzemenin SEM görüntülerindeki gelişimi literatürdeki Şekil 36’da görülen çalışma ile uyumludur (Jaafar vd., 2018). Görüntüler rGO ve GO yapısını desteklemektedir. BC-Fe-Y’ nin BC-Fe-Y-rGO’ ya gelişiminde bariz olarak tabakaların açılması değişimi gözlenmemiştir (Şekil 33,34,35). Bu görüntülerden elde edilen sonuç, BC ile grafenik yapıların oluşumu var ise de yüzde olarak az miktardadır.



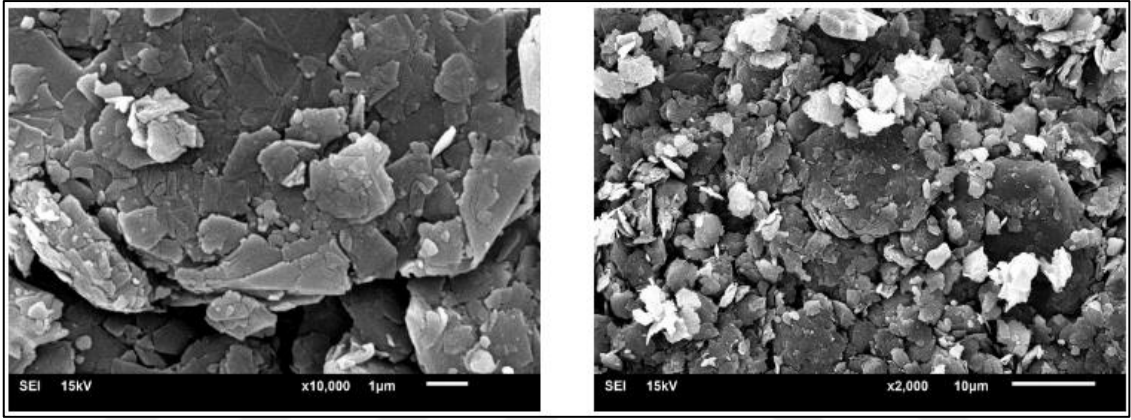
Şekil 30. Ticari Grafit Tozu SEM görüntüleri (1 ve 10 µm).



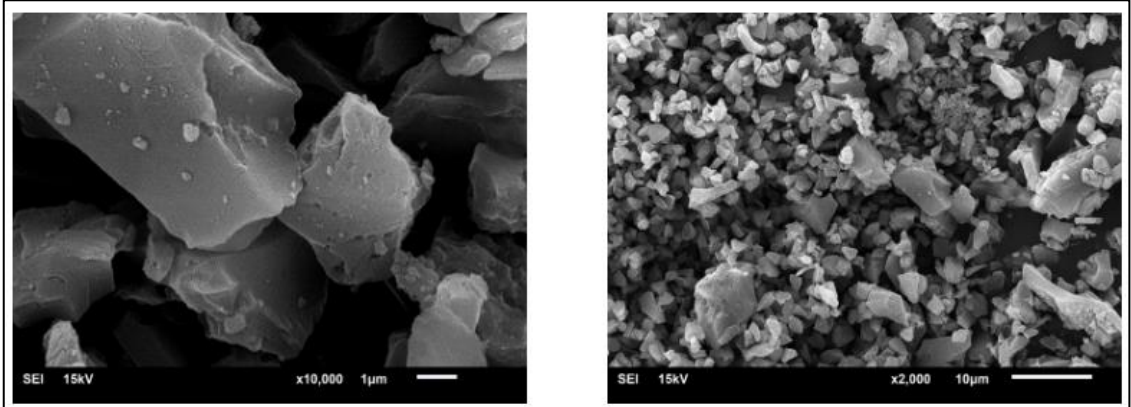
Şekil 31. GO SEM görüntüleri (1 ve 10 µm).



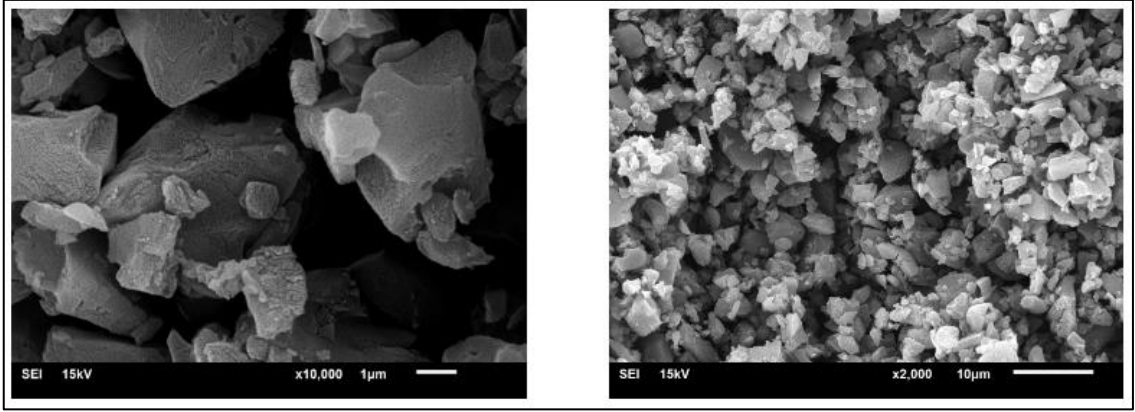
Şekil 32. rGO SEM görüntüleri (1 ve 10 μm).



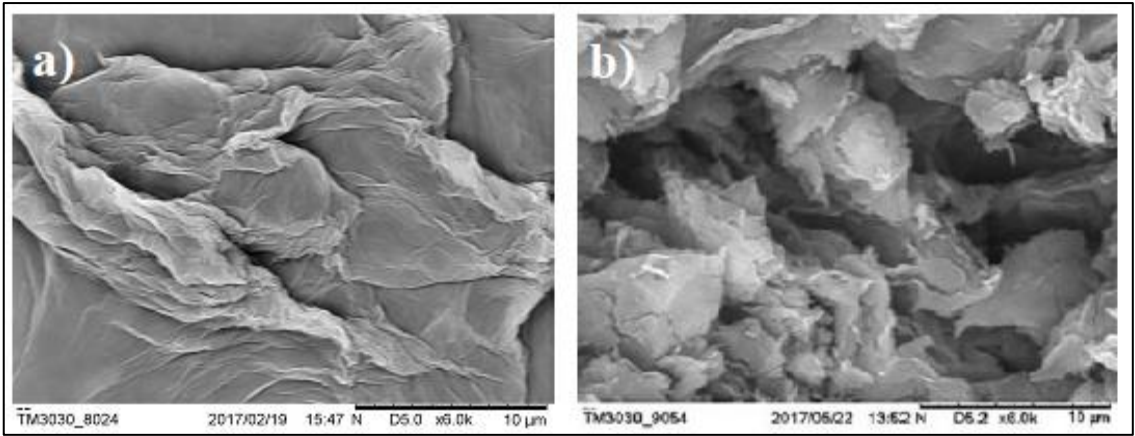
Şekil 33. BC-Fe-Y SEM görüntüleri.



Şekil 34. BC-Fe-Y-GO SEM görüntüleri (1 ve 10 μm).



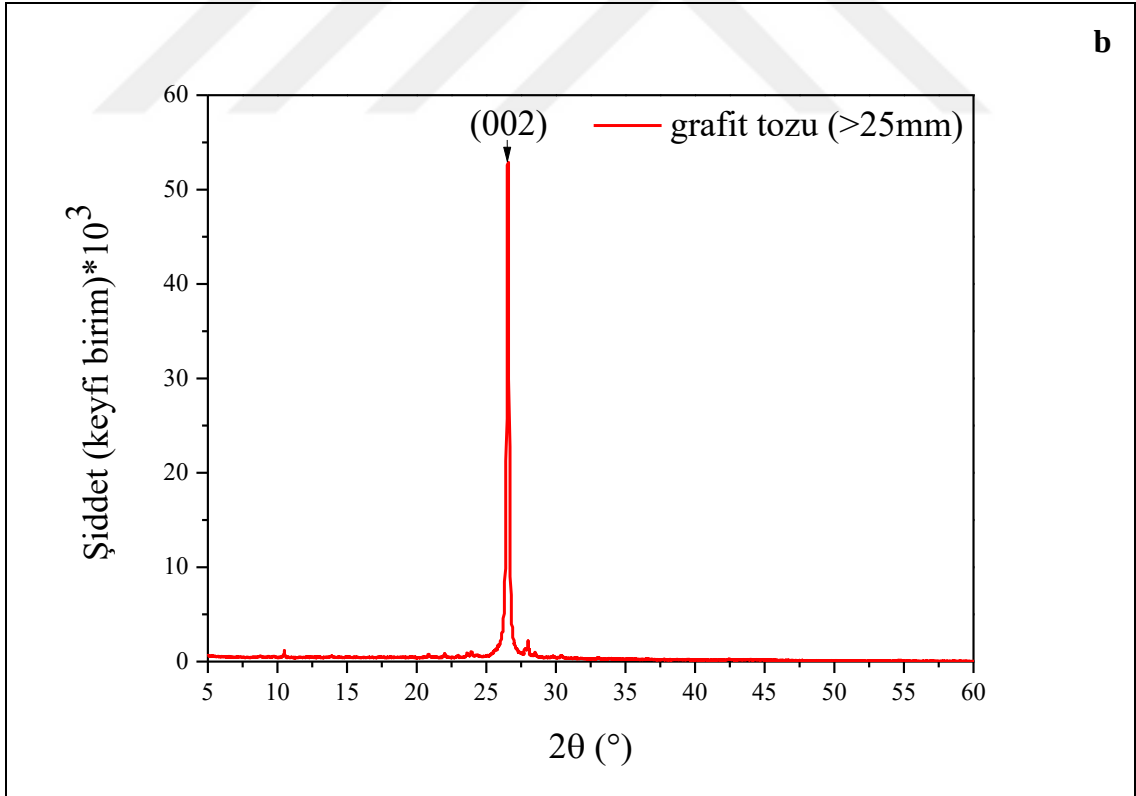
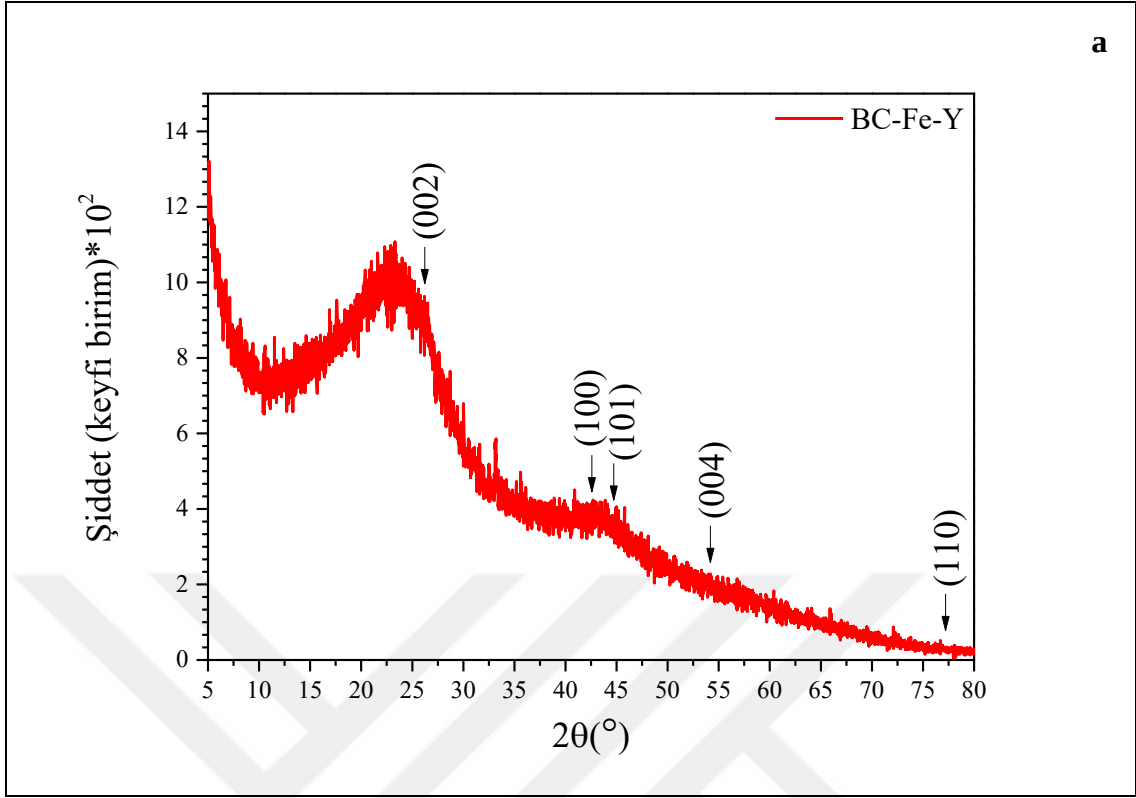
Şekil 35. BC-Fe-Y-rGO SEM görüntüleri (1 ve 10 μ m).



Şekil 36. GO (a) ve rGO (b) SEM görüntüleri (Jaafar vd., 2018).

3.1.2. X-ışını Kırınım Difraktometri (XRD) Analizi

X-ışını kırınım yöntemi, her kristalin kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik düzende kırması olayına dayanmaktadır. Sentezlenen karbon numunelerinin XRD ile kristal yapılarındaki gelişim incelenmiştir. Şekil 37 (a-b)' de başlangıç karbon malzemeler olan grafit tozu ve BC-Fe-Y toz numunesinin XRD desenlerinde grafit için görülmesi beklenen piklerin (002), (100), (004), (110) yansıma düzlemleri verilmektedir. Bu indislerin belirlenmesinde Rigaku marka Smartlab modeli XRD cihazının kütüphanesindeki PDF kart 00-001-0640 ve PDF kart 00-002-0456 adlı dosyalar dikkate alınmıştır.



Şekil 37. BC-Fe-Y XRD Deseni (a), Ticari Grafit Tozu XRD Deseni (b).

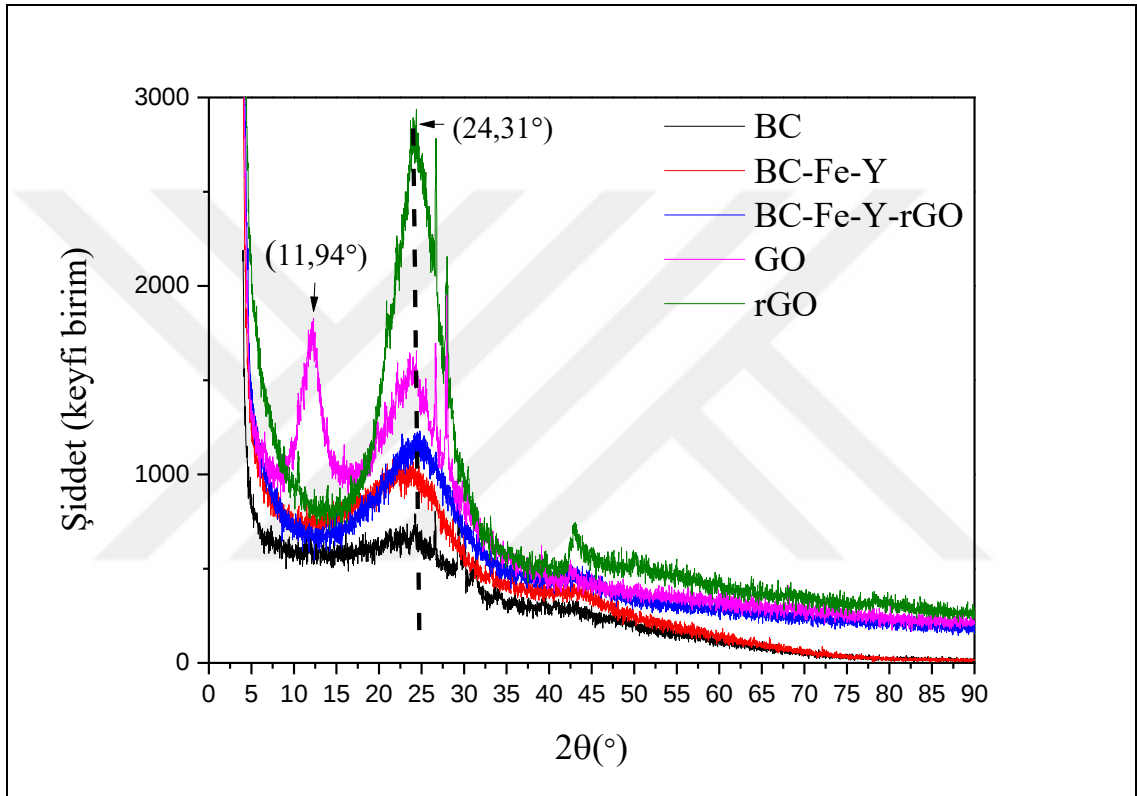
Tablo 2. BC-Fe-Y tozu ile 00-001-0640 ve 00-002-0456 kart numaralı grafit tozunun hkl, 2 Θ ve d değerleri.

	(hkl)	(002)	(100)	(101)	(004)	(110)
00-001-0640	2 Θ (derece)	26,35	42,61	44,83	54,23	77,55
	d (Å)	3,38	2,12	2,02	1,69	1,23
00-002-0456	2 Θ (derece)	26,51	41,99	44,60	54,94	77,55
	d (Å)	3,36	2,15	2,03	1,67	1,23
Çalışmada	2 Θ (derece)	26,25	42,59	44,72	54,28	77,58
	d (Å)	3,395	3,62	2,026	1,69	1,23

X ışınlarının numune üzerine geldiği atomsal düzlemde düzlemler arası mesafe Bragg Kırınım yasasından $n\lambda=2d\sin\Theta$ eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte; n X-ışınlarının dalga boyu sayısıdır (genellikle 1 alınır), λ X-ışınlarının dalga boyu (CuK α için bu değer 1,5418 Å), d atomik düzlemler arası mesafe, Θ ise gelen X-ışını ile kristal düzlem arasındaki mesafedir. Tablo 2’ de görüldüğü üzere BC-Fe-Y toz numunesi için XRD cihazında elde edilen kırınım deseninde görülen verilerden yararlanarak, BC-Fe-Y numunesine ait d parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar XRD cihazından alınan grafit tozuna ait veriler ile uyumludur. Grafit tozundaki (002) yansıması BC-Fe-Y için 2 Θ =26,25° değerinde görülmesi istenen şiddetli pik görülememiştir. Bu durum BC-Fe-Y numunesinin daha amorf yapıya sahip iken grafitin daha kristal yapıya sahip olduğunu ifade etmektedir.

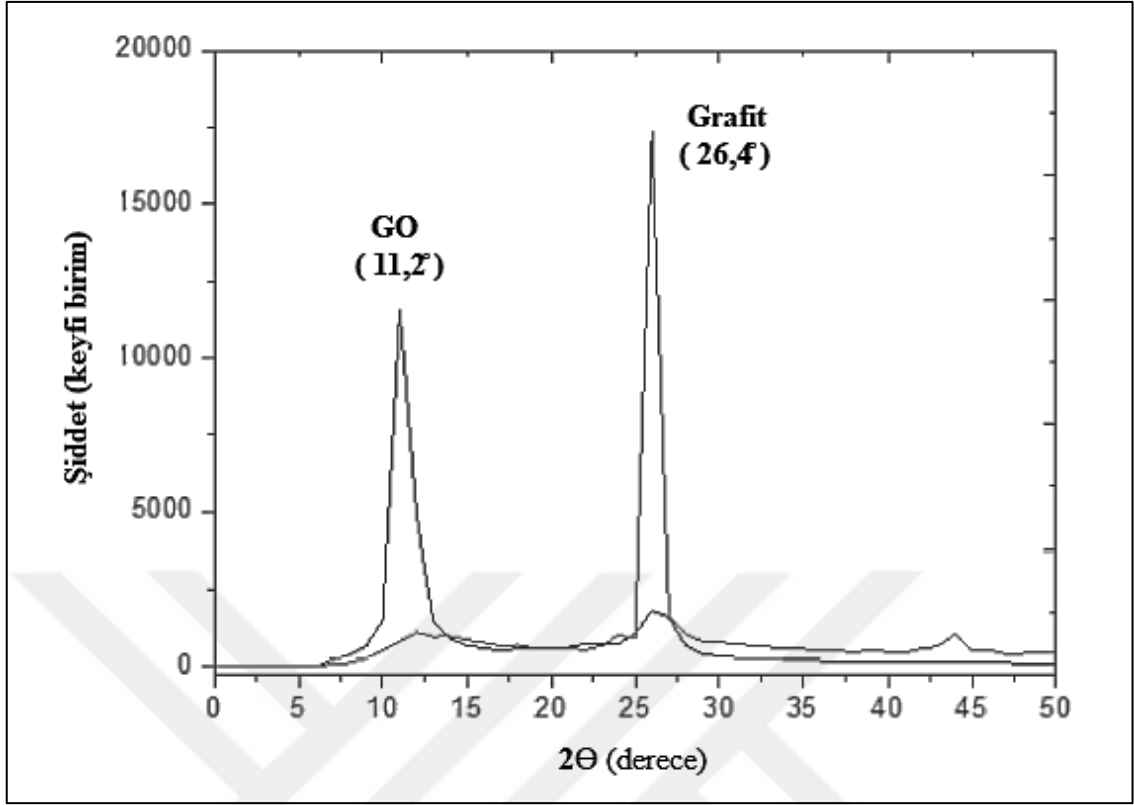
X ışınları kırınım deseniyle kristal yapıya ait örgü parametreleri bulunabilir. Karbon malzemeler hegzagonal yapıda olduklarından, hegzagonal yapıdaki kristaller için; $\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2+hk+k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}$ eşitliği kullanılır. Hegzagonal yapı için a=b≠c’ dir. Eşitlikte; d X ışınlarının toz numune üzerine geldiği düzlemler arası mesafeyi, a ve c kristal örgü düzlemindeki örgü parametrelerini ve h,k,l ise Miller indislerini ifade etmektedir. Çalışmada X-ışını kırınım deseni alınan karbon malzemelerin kırınım desenlerinde görülen piklerden d değerleri ile a, b ve c örgü parametreleri hesaplanmaya çalışılmış, ancak BC-Fe-Y-rGO materyalinin çok saf olmaması nedeniyle anlamlı katsayılar elde edilememiştir.

Modifiye hummers yöntemi ile hidrazin ile indirgenerek üretilmiş olan ticari grafit tozundan ve biyokömürden rGO numunelerinin XRD desenleri Şekil 38’ de gösterilmiştir. 550°C’ de pirolizle üretilen BC numunesinin XRD karakteristiği de Şekil 38’ e eklenmiştir. Biyokömürden, indirgenmiş grafen oksite gidişte karbon malzemenin amorfluluğundaki değişim ve bunun grafitten elde edilen rGO’ ya benzerliği karşılaştırılmaktadır.



Şekil 38. Karbon malzemelerin XRD Deseni.

Grafit tozunun aksine GO XRD deseninde $2\theta = 11,2^\circ$ derecede şiddetli bir pik verir. Modifiye Hummers yöntemi ile sentezlenen GO numunesinin XRD piki Şekil 39’ da gösterilen literatür çalışması ile benzer özellik göstermektedir (Rao vd., 2018).



Şekil 39. Grafit ve GO XRD desenleri (Rao vd., 2018).

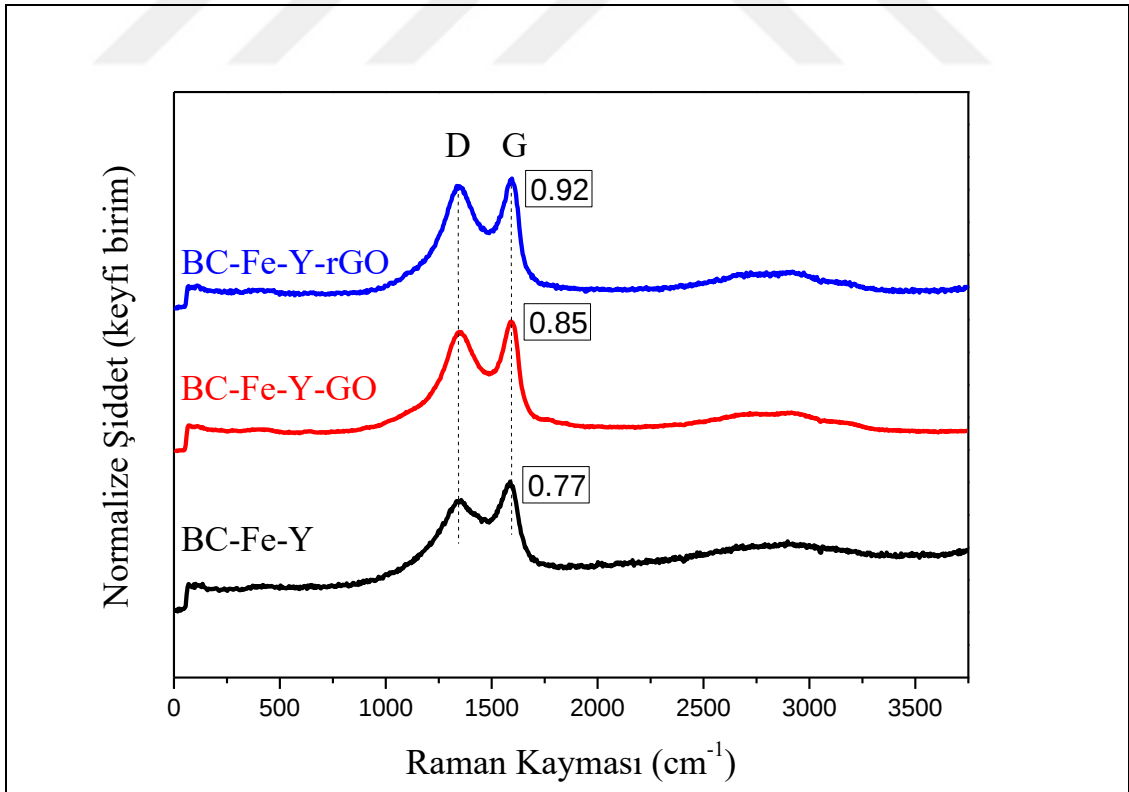
GO ve rGO, BC-Fe-Y-GO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerindeki kristal özellikler XRD yöntemi ile incelendiğinde, biyokömürün (BC) grafitizasyonu (BC-Fe-Y) ve kimyasal yöntemle grafenik yapıya doğru gitmek için muamelesi, BC' nin kristal yapısını geliştirmektedir (XRD şiddeti artmaktadır). Grafitten GO' ya doğru malzeme geliştirildiğinde yapıya katılan oksijen grupları yapıyı amorf yapmaktadır. İndirgeme işlemi ise oksijen gruplarını azalttığından yapı tekrar daha düzenli duruma geçmektedir.

3.1.3. Raman Spektroskopisi Analizi

Karbon yapılı materyallerin kristal yapılarının incelenmesinde Raman Spektroskopisinden faydalanılır. Raman spektroskopisinde üç ana karakteristik tepe (pik) bulunur. Bunlar G, D ve 2D pikleridir. Raman spektroskopisinde 1360 cm^{-1} ve 1585 cm^{-1} civarında görülen pikler D ve G pikleridir. G tepe noktası birinci dereceden, 2D ve D tepe noktaları ise ikinci dereceden Raman saçılması olarak isimlendirilir. D band, grafenik yapıların özellikle köşelerinde translasyonel simetrideki bozunma veya kırılmaları (defect) ifade ederken, G bandı sp^2 hibritleşmesindeki enerji saçılımlarından

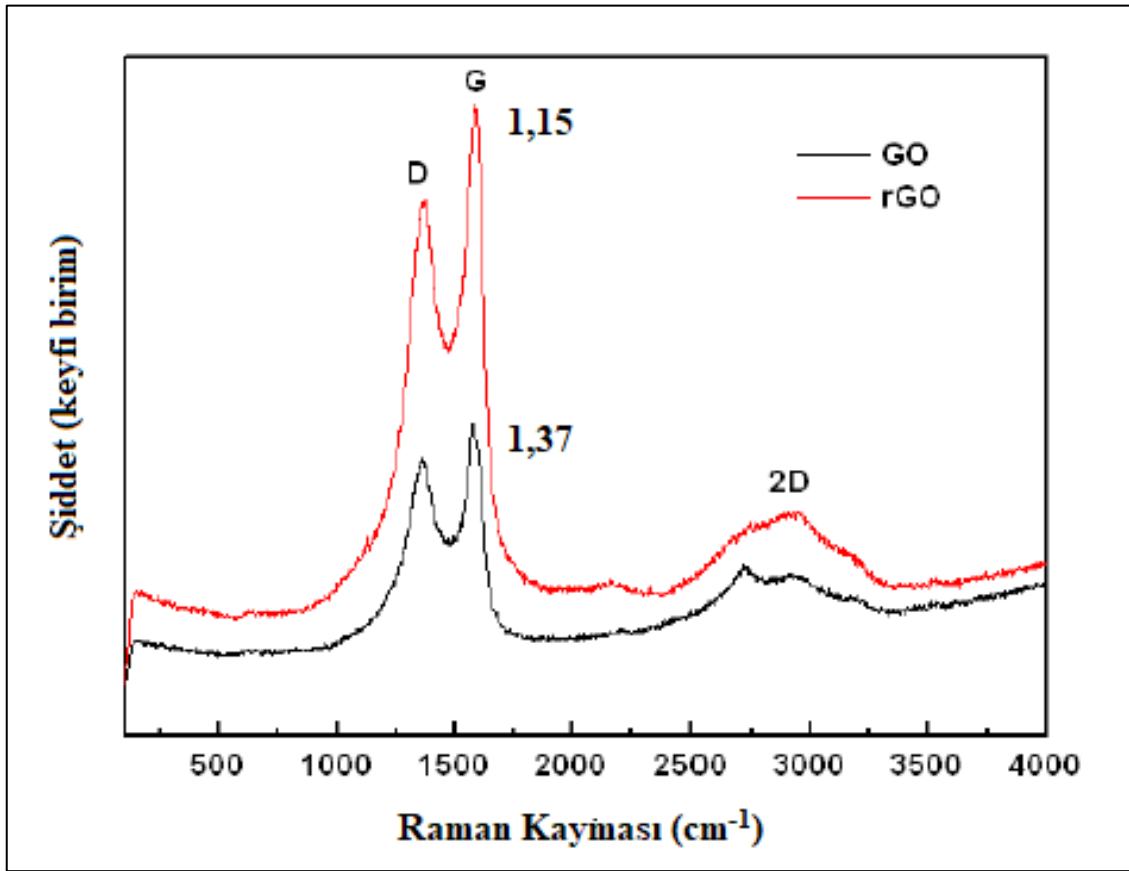
sorumludur. Yani, D band yapıdaki düzensizliği, G bandı düzenliliği gösterir. Bu iki pik şiddetinin birbirine oranının (I_D/I_G) büyümesi, yapıdaki sp^2 hibritleşme oranının artmasını ifade eder.

D bandı, grafen kafesindeki kusurlar tarafından indüklenir (uyarılır) ve genellikle yüksek düzenli grafen katmanlarında görülmez. G bandı sp^2 karbon atomlarının düzlem içi titreşiminden kaynaklanır ve çoğu grafit malzemeye özgüdür. G ve D bandının yoğunluk oranı karbon yapısının kusurlarını karakterize etmek için kullanılabilir. D bandı ve G bandı arasındaki yoğunluk oranı (I_D/I_G) genellikle numunelerin yüzeyindeki kusurların yoğunluğunu tahmin etmekte kullanılır. I_D/I_G oranı yapıdaki düzensizliğin ölçüsüdür. 2D tepesinin şekli ve G tepe noktasına göre yoğunluğu, grafen katmanlarının sayısını tanımlamak için standart bir yoldur. G pikinin iki katından daha fazla yoğunluğa sahip keskin ve simetrik 2D piki tek tabakalı grafenin tipik halidir. 2D piki (tepe noktası) daha geniş ve daha az simetrik hale gelir ve katman sayısı arttığında yoğunluk azalır (Bartolomeo, 2015).



Şekil 40. Kullanılan Biyokütle Kaynaklı Karbon Materyallerin Raman Spektroskopileri.

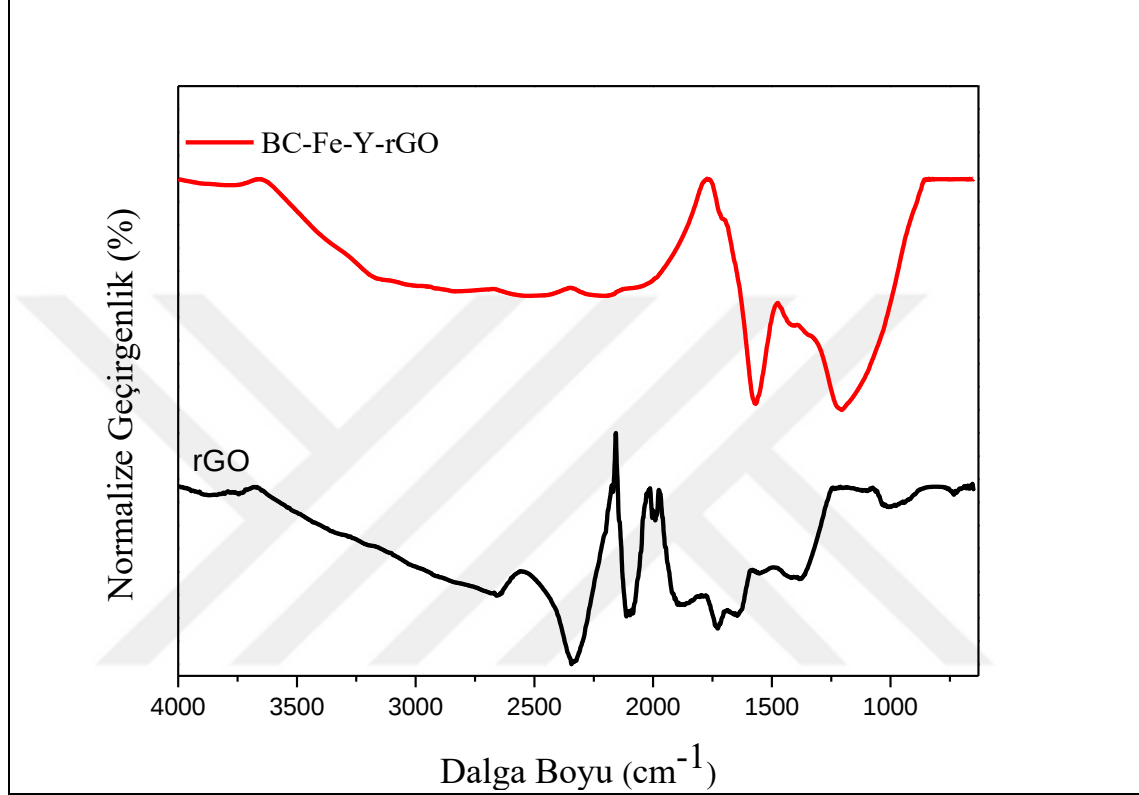
BC-Fe-Y-rGO' ya ait Raman spektrumları Şekil 40' da verilmiştir. Raman Spektrumları incelendiğinde BC-Fe-Y' den BC-Fe-Y-rGO' ya doğru malzemenin gelişiminde I_D/I_G oranı 0,77' den 0,92' ye yükselmiştir. Literatürdeki gibi Şekil 41' de gösterilen grafikte $I_D/I_G=1,15$ değeri bu çalışmadaki 0,92 değerine yakındır. Bu durum indirgeme reaksiyonu sonucu GO yapıdan fonksiyonel grupların uzaklaşırken yerlerine sp^2 düzenli kristal yapılarının oluşarak yapının düzenliliğinin arttığını göstermiştir. Yapının sp^2 hibritleşmesine doğru gittiği anlaşılmaktadır.



Şekil 41. GO ve rGO' nun Raman Spektroskopisi (Fu vd., 2013).

3.1.4. FT-IR Spektroskopisi Analizi

Şekil 42, rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin FT-IR spektrumunda fonksiyonel grupların analiz sonuçlarını göstermektedir.

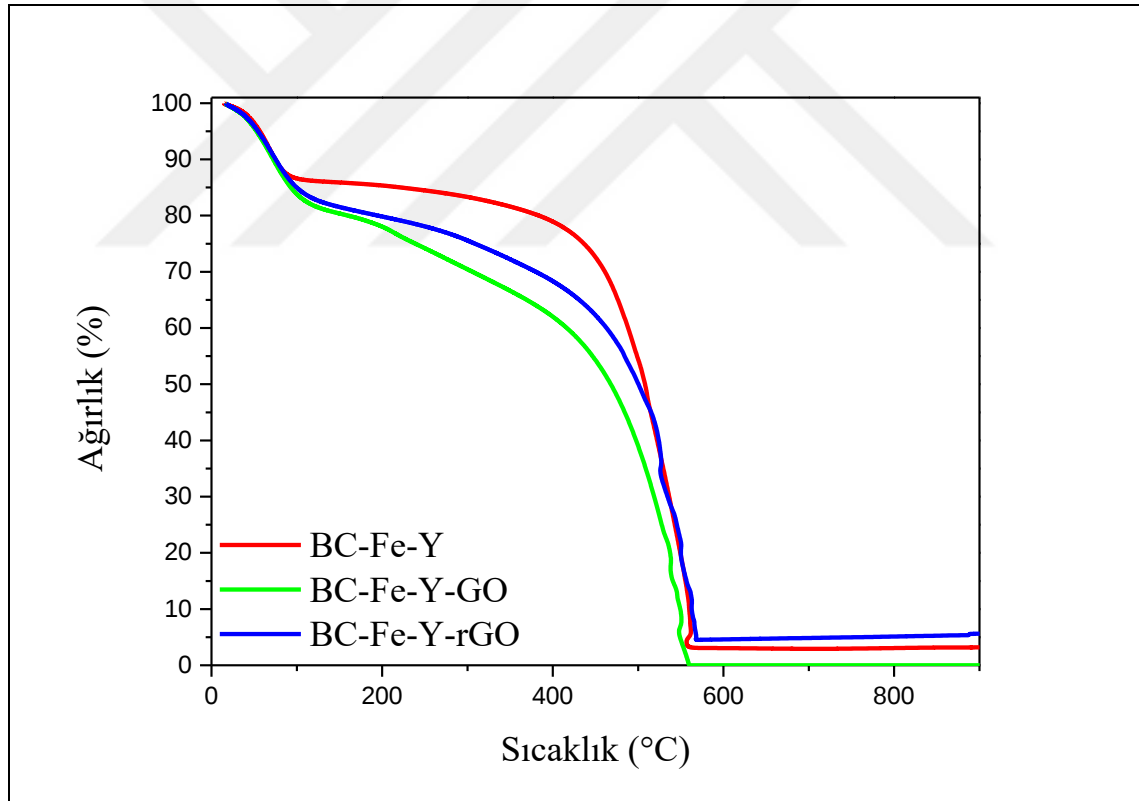


Şekil 42. rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin FT-IR görüntüleri.

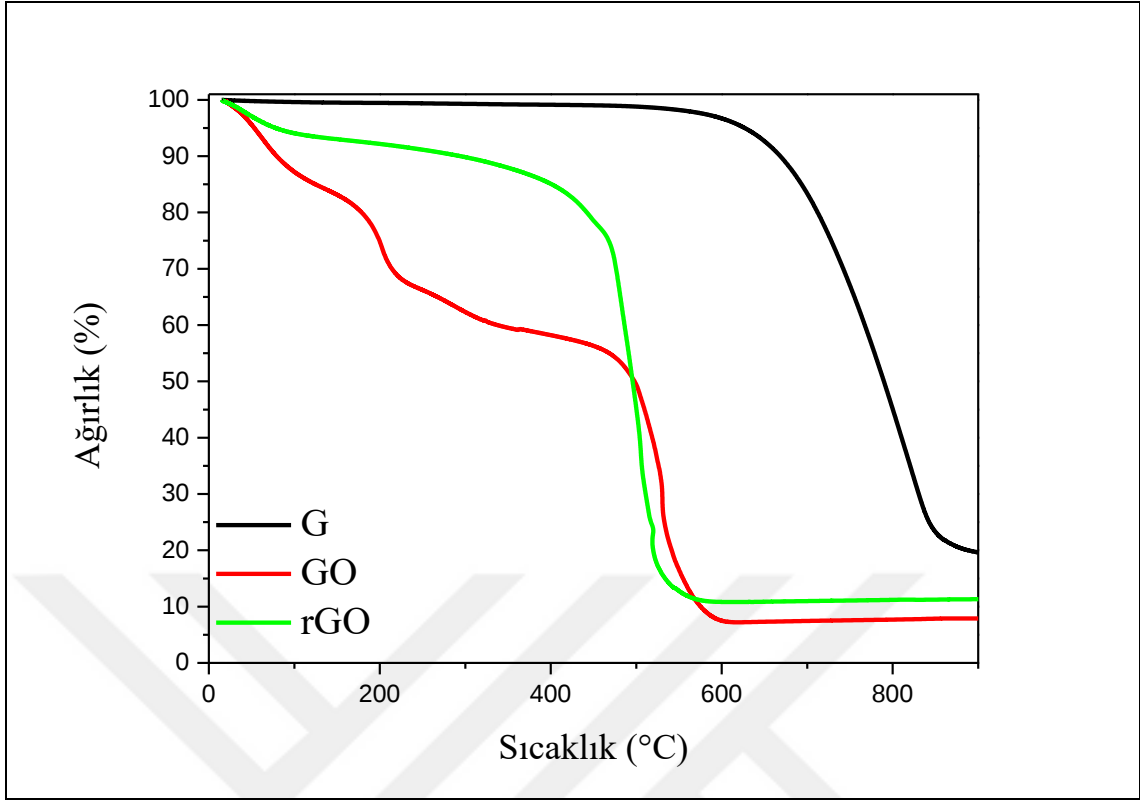
Şekil 42, 3600-2400 cm^{-1} dalga boyu bölgesi her iki malzeme için OH ve C-H gerilimlerini göstermektedir. rGO için 2340 cm^{-1} civarında ve 1727 cm^{-1} 'de belirgin olan pik, C=O gerilimini belirtmektedir. 2340 cm^{-1} civarında olan pik, BC-Fe-Y-rGO için önceki piklerin gölgesinde kalmıştır. 2100 cm^{-1} civarında rGO' da belirgin olan pik $\text{C}\equiv\text{C}$ bağıını göstermektedir. BC-Fe-Y-rGO' da 1570 cm^{-1} ' de olan pik aromatik C=C gerilimlerini, 1200 cm^{-1} civarındaki pik ise C=O gerilimini göstermektedir. Sonuç olarak biyokömür numunesi aromatiklik ve C-H bakımından zengin görünmektedir. rGO'da ise kararlı C=O bağları bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu da oksitlenme özelliği bakımından grafitin daha istekli olduğunu gösterebilir. Dolayısıyla grafit tabakalarının açılması ve grafene dönüşüm, grafit için daha kolay olabilir.

3.1.5. TGA Analizi

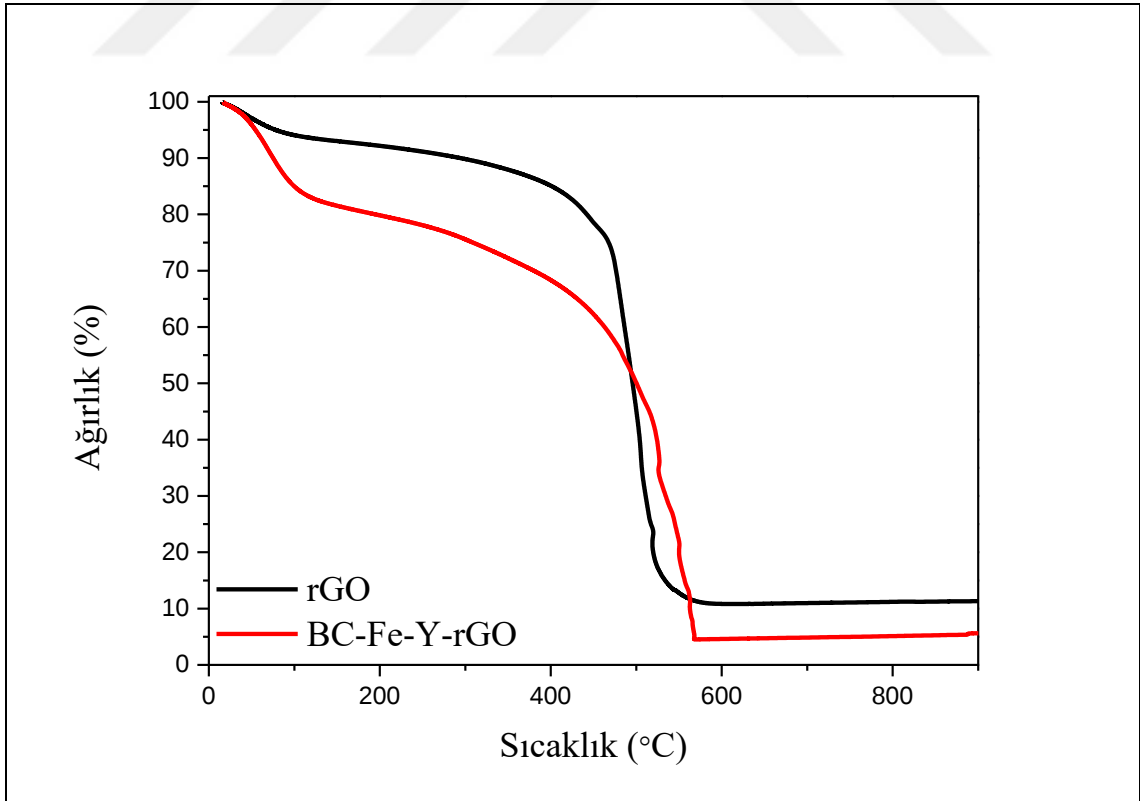
Termogravimetrik analiz, malzemenin sıcaklıktaki davranışını inceler. Malzeme ne kadar kararlıysa, kaç derecede bozunmaya başlıyorsa, son sıcaklıkta hava ortamında geriye mineral kaldığını ifade eder. Şekil 43, Şekil 44 ve Şekil 45’ de geliştirilen karbon numunelerinin hava atmosferinde termogravimetrik analizleri verilmektedir. 100 °C’ ye kadar olan sıcaklıklarda numuneden nem uzaklaşır. 550 °C’ den sonra tamamen bozunmaktadırlar. Yapıya oksijen katılması (GO ve BC-Fe-Y-GO), kararsızlığı tüm numunelerde arttırmaktadır. Şekil 43 ayrıca göstermektedir ki, asit ile biyokömür numunesinin yıkanması, mineral içeriğini % 5’ in altına düşürmektedir. Dolayısıyla biyokömür numunesinin transistör uygulamasında soru işareti yaratabilecek mineral varlığının yarı iletkenliğe etkisi çok düşük olacaktır.



Şekil 43. Biyokömür karbon numunelerinin TGA eğrileri.



Şekil 44. Grafit, GO ve rGO numunelerinin TGA eğrileri.

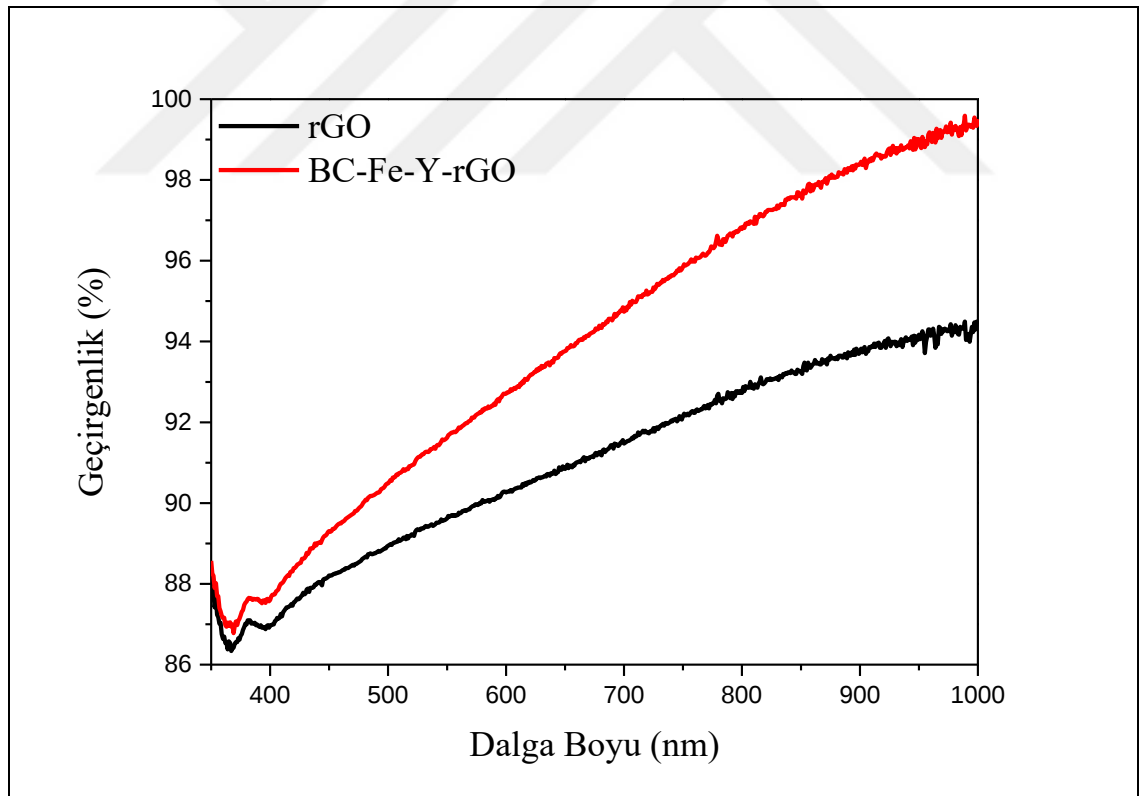


Şekil 45. rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin TGA eğrileri karşılaştırması.

Şekil 45’ de rGO’ nun BC-Fe-Y-rGO’ dan daha kararlı olduğu görülmektedir. Bu da biyokömür numunesinde mümkün olan farklı karbon yapılarının ve fonksiyonel grupları varlığının bir sonucudur. FTIR analizleri ile de bu durum doğrulanmaktadır.

3.1.6. Karbon Numunelerin Optik Özellikleri

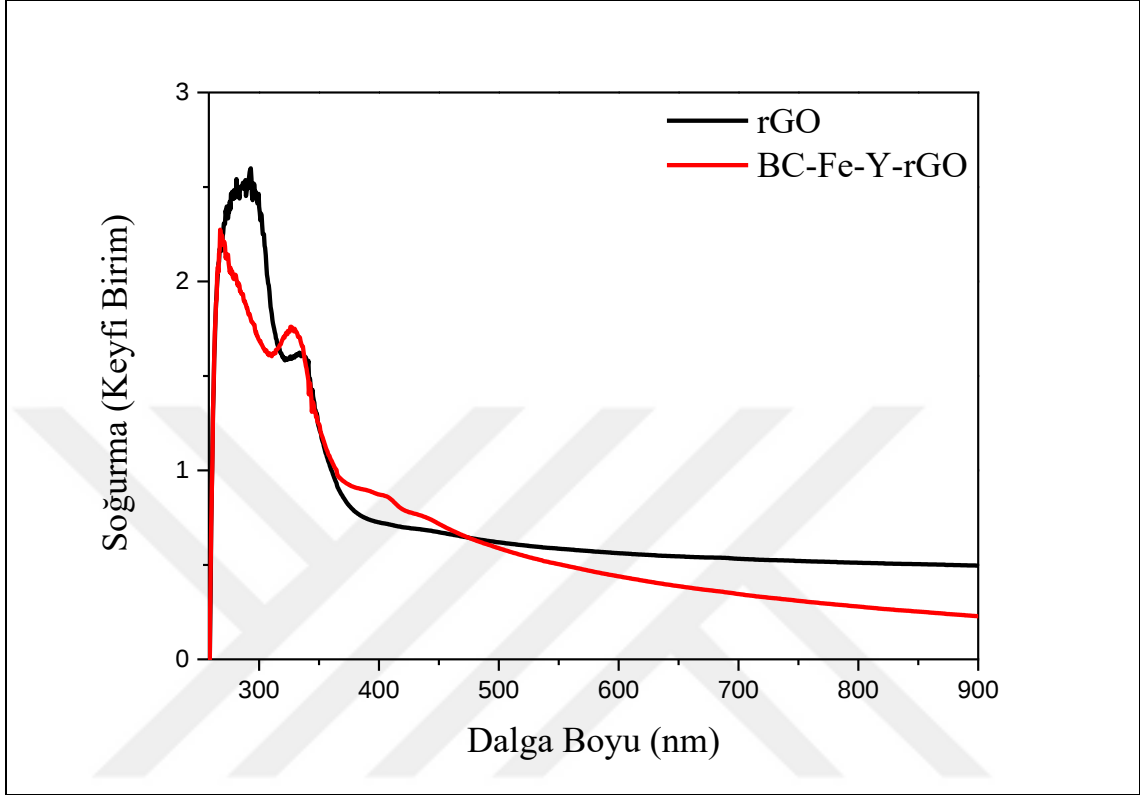
Elde edilen rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerin optiksel incelemeleri 350 nm-1000 nm dalga boyu arasında UV Spektrometresi ile oda sıcaklığında yapılmıştır. Şekil 46’ da belirtilen dalga boyu aralığındaki girişim saçakları görülmektedir. İnce filmlerin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik değerleri elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde (400-700 nm) rGO ince filminde % 80’ lerden başlayarak ~% 90’ lara kadar çıkmakta, aynı durumda BC-Fe-Y-rGO ince filminde ise % 86’ lardan başlayarak neredeyse %100’ e kadar çıkmaktadır.



Şekil 46. Elde edilen rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerin geçirgenliğinin dalga boyu ile değişimi.

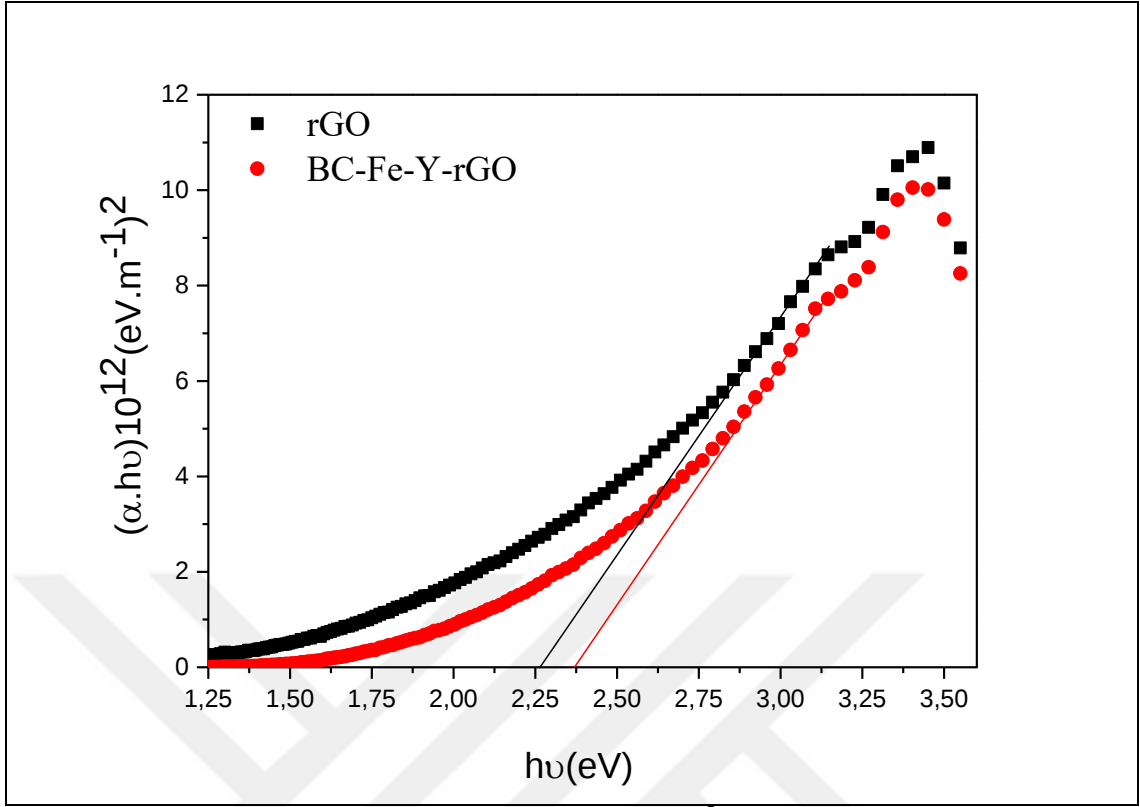
Şekil 46’ da 400 nm dalga boyuna doğru görünen piklerin karakterizasyonu için karbon numunelerin NMP’ li doymuş çözeltilerinin UV spektrumları alınmıştır (Şekil

47). Yine aynı bölgede piklerin görülmesi, rGO ve benzer olarak BC-Fe-Y-rGO’ da C=O gibi ve sp^2 bağlarının mevcut olmasındandır.



Şekil 47. rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin soğurma-dalga boyu grafiği.

Şekil 46’ daki girişim etkilerinden faydalanılarak rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerinin yasak enerji aralığı değerleri soğurma değerleri yardımıyla eV olarak hesaplanmıştır (Şekil 48). Elektron bant aralığı soğurma katsayısı ile foton enerjisi ($\alpha^2 \propto hv - E_g$) arasındaki ilişkiden Tauc yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntemde Şekil 48’ de verilen grafikte eğrilerin x ekseninin y ekseninin 0 olduğu noktalardaki değerler enerji bant değerleridir (Tablo 3). Literatürdeki doğal gün ışığından faydalanarak indirgenen (NSRGO) güncel çalışmada enerji bant aralığı 2,2 eV bulunmuştur. İndirgenmiş grafen oksit numunelerinin enerji bant değerleri ile bu değer ile uyumludur (Mohandoss ve Nelleri, 2018).



Şekil 48. rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerin $(\alpha \cdot h\nu)^2$ değerlerine karşılık foton enerjisi ($h\nu$) grafiği yasak enerji aralıklarının gösterimi.

Tablo 3. rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerinin enerji bant aralıkları.

İnce Film Numune	E_g (eV)
rGO	2.264
BC-Fe-Y-rGO	2.375

3.1.7. Karbon Numunelerin Elektriksel İletkenlik Özellikleri

Cam altlıklar üzerine hazırlanan rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerinin elektriksel iletkenlik özellikleri, Wan der Pauw 4 nokta direnç düzeneği ve Hall etkisi ölçüm düzeneği kullanılarak öz direnç ve taşıyıcı yoğunluk değerleri ile belirlenmiştir. Hall etkisi taşıyıcı yoğunluğunun doğrudan ölçülebildiği bir tekniktir. Bu yöntem ile yarıiletkenlerin tipi, taşıyıcı yoğunlukları belirlenebilir. Eşit aralığa sahip 4 prob, nokta temasıyla 4 nokta kontakla temas eder. İki dış uç sabit bir akım kaynağına, iki iç taraftaki uç ise gerilimi (potansiyel fark) ölçmek için multimetreye bağlanır. Hall etkisi ölçüm düzeneğinde ise elde edilen öz direnç, iletkenlik ve taşıyıcı yoğunluğu Tablo 5’ de verilmektedir. Numunelerin elektriksel iletkenlik değerleri (σ) eşitlik (14)

kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \text{ (Siemens)} \quad (14)$$

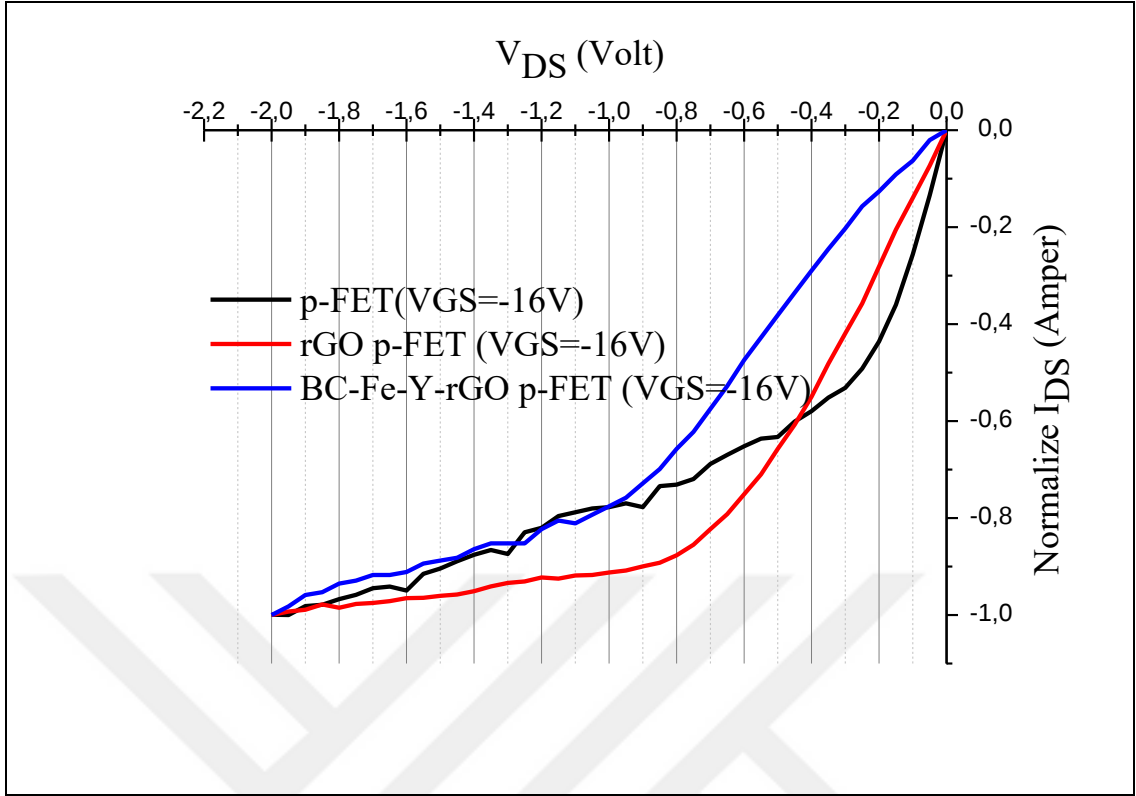
Her iki rGO numunesi için iletkenlik aynı seviyelerdedir. Her ne kadar konsantrasyon olarak grafitten elde edilen grafene oranla konsantrasyonu düşük olsa da biyokütleden de grafenik karbon türetilmiştir. Taşıyıcı yoğunluğu yani elektronların ve deliklerin materyal üzerinde taşınma özelliği ise BC-Fe-Y-rGO için çok daha küçüktür. Ancak her iki rGO numunesinin de taşıyıcı yoğunluk değerlerine bakıldığında 10^{13} ve 10^{14} değeri iletkenliğin iyi olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Wan der Pauw 4 nokta direnç ve Hall ölçüm sonuçları.

Numune	Özdirenç [ρ (Ω .cm)]	Elektriksel İletkenlik [σ (1/ Ω .cm)] (Siemens/cm)	Taşıyıcı Yoğunluğu [n (cm^3)]
rGO	3.16×10^3	3.16×10^{-4}	6.76×10^{14}
BC-Fe-Y-rGO	3.28×10^3	3.28×10^{-4}	9.96×10^{13}

3.2. Alan Etkili Karbon Transistörlerin Karakterizasyonu

Yüksek performans karbonlardan hazırlanan p kanal alan etkili karbon transistörlerin I-V karakteristikleri incelenmiştir. Üretilen alan etkili karbon transistörlerin transfer (çıkış) ve giriş karakteristikleri sırasıyla Şekil 49 ve Şekil 50’ de görülmektedir. Transistörlerde akım taşıma görevini boşluklar sağladığı için aygıt p kanal etkisi göstermiştir. Bu sebeple p tip FET olarak isimlendirilmiştir.

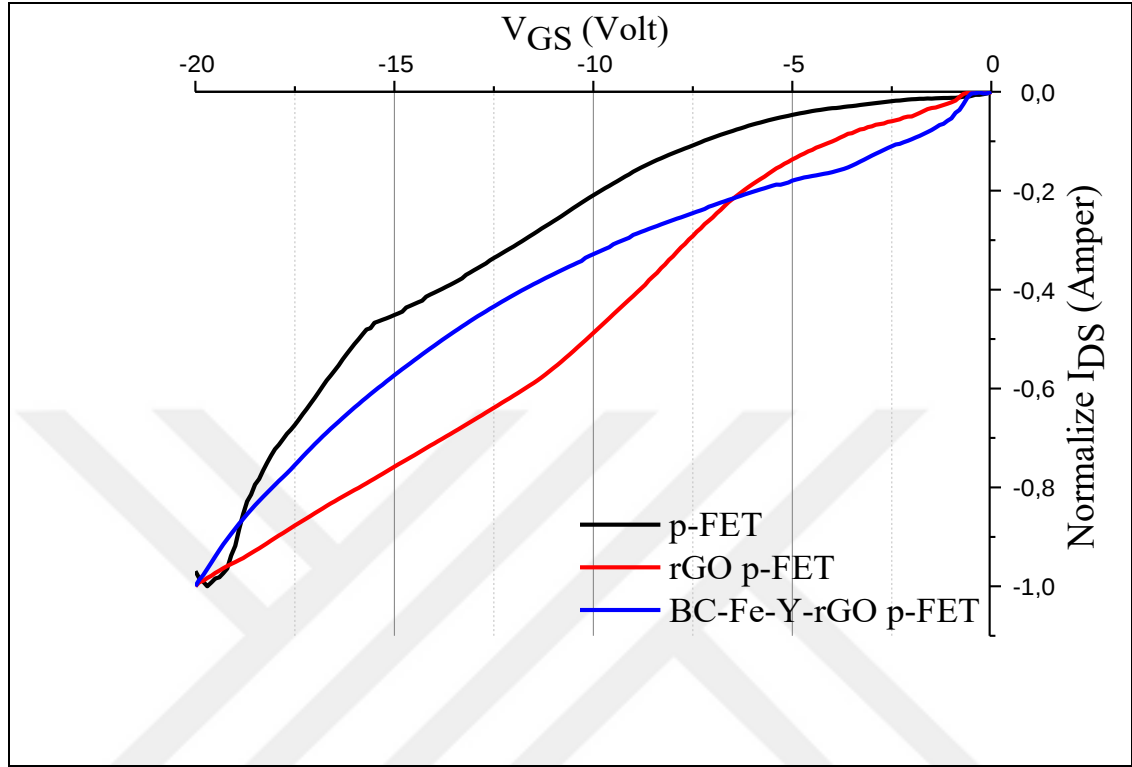


Şekil 49. Alan Etkili Karbon Transistörlerin oda sıcaklığında çıkış karakteristiklerinin karşılaştırması (V_{GS} ; 4V adımlarla -4,-20 V arasında değişmiştir.).

Alan etkili transistör davranışı üzerine karbonun etkisini incelemek için önce transistörlerin çıkış karakteristikleri sırasıyla transistörlerin kapı terminaline (G) -4, -8, -12, -16 ve -20 V kapı voltajları (V_{GS}) uygulanarak, I_{DS} - V_{DS} (çıkış karakteristiği) eğrileri elde edilmiştir. Şekil 49’ da oluşturulan eğrilerin $V_{GS}= -16$ V altındaki değerlerde normalize I_{DS} - V_{DS} eğrisi gösterilmektedir. Çalışma karakteristikleri gösterilen tüm FET yapıları kapı gerilimine bağlı olarak p kanal transistör temel performans özelliği göstermektedir. Grafikte $V_{GS}= -16$ V’ ta I_{DS} akımının alan etkili transistörlerde negatif değerlikli 0.8-0.9 A normalize olmuş değerlere çıktığı görülür.

Karbon malzemeler transistörlerin doyum davranışına olumlu etki sağlamıştır. Çıkış karakteristiğinde aygıtlar kademeli olarak doyum davranışı göstermiştir. p-FET, $V_{DS}= -0.3$ V civarında doyuma geçerek, en erken doyuma ulaşan transistör olmuştur. Diğer taraftan, transistörlere karbon malzeme eklendiğinde doyuma geçme süresi uzamıştır. rGO p-FET $V_{DS}= -0.9$ V civarında, BC-Fe-Y-rGO p-FET ise $V_{DS}= -1$ V civarında doyuma ulaşmıştır. Bu durum Şekil 49’ da -0.2 V $> V_{DS} > -1.0$ V aralığına bakıldığında anlaşılır. p-FET, rGO-FET’ e göre daha erken doyum davranışı

göstermiştir. BC-Fe-Y-rGO p-FET, doyum davranışı neredeyse rGO p-FET davranışıyla benzerlik göstermiştir.



Şekil 50. Alan Etkili Karbon Transistörlerin oda sıcaklığında giriş karakteristiği ($V_{DS} = 0.1$ V sabit).

Bir transistörün performansını belirleyen bir diğer öge, giriş (transfer) karakteristiğidir. Şekil 50, p tip alan etkili transistörlerin G-S gerilimine (V_{GS}) göre D-S akım (I_{DS}) eğrisini göstermektedir. I_{DS} - V_{GS} eğrisinde p tipi özellik oda koşulları altında sabit $0.1 \text{ V} = V_{DS}$ de incelenmiştir. V_{GS} ' nin fonksiyonu olarak akım nerdeyse doğrusal özellik göstermiştir. Drain-Source gerilimine göre akım doygunluğunun başlangıcı bu eğride daha net anlaşılabilir. p-FET $-10 \text{ V} > V_{GS} > 0 \text{ V}$ aralığında, rGO p-FET $\sim -6 \text{ V} > V_{GS} > 0 \text{ V}$ ve BC-Fe-Y-rGO p-FET ise $\sim -6 \text{ V} > V_{GS} > -20 \text{ V}$ aralığında düzgün doyma davranışı göstermektedir. Bu noktalara kadar aygıtlar doyma davranışına geçmemiştir. V_{Th} , bu eğriden çıkartılabilir. V_{GS} arttıkça, I_D 'nin yükseldiği eşik gerilimine ulaşılır. p-FET için eğriden V_{Th} ' nin -5 V olduğu görülür. $V_{GS} = -5 \text{ V}$ değerine ulaştığında akım hızlı bir şekilde belirli noktaya kadar artmıştır. Fakat aygıt üretimi laboratuvar koşullarında el ile yapıldığı için ölçüm koşulları da düşünüldüğünde karbon materyalin transistör davranışı üzerine etkisi aygıtların giriş karakteristiğinden yorumlanamamıştır.

4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Transistör iki terminalden geçen akımın üçüncü terminaldeki akım veya gerilimde yapılan küçük değişiklikler ile kontrol edildiği üç terminalli bir elektriksel aygıttır. Transistörün bu kontrol özelliği, küçük doğru akım sinyallerinin yükseltilmesine (amplifikasyon) veya aygıtın açık (on) durumdan kapalı (off) duruma veya tersine çevrilmesine (anahtarlama) dayanır. Bu iki işlem tüm elektronik devrelerin temel yapı taşıdır.

Güncel transistör aygıtlarında Si kullanılmaktadır. Elektriksel ve elektronik aygıtların gitgide minyatürize olması nedeniyle Si kullanılan transistör devrelerinde daha yüksek performans eldesi giderek zorlaşmıştır. Bu nedenle transistörlerde kanal materyali olarak yeni nesil nano karbon malzemeler tercih edilir duruma gelmektedir. Nanotüpler ve grafen gibi alternatif materyaller kullanılan yeni nesil transistörler hakkında güncel ve popüler araştırmalar sürmektedir. Karbon materyaller elektriksel özellikleri nanometre mertebesinde çok geniş bir frekans aralığında çalışan, daha az güç gerektiren, daha hızlı ve daha verimli elektronik bileşenler anlamına gelir. İşlenmesi kolay ve boyutları küçültülebildiğinden birçok elektriksel aygıtın yapımı için elverişlidir. Karbon yapısı sp^2 düzenine sahip olduğunda elektriksel özellikleri iyidir. Karbonun allotropik yapısı, son yıllarda, elektrik, optik, ve mekanik özelliklerinden dolayı elektronik, sensör ve enerji uygulamaları için bir işlevsel malzeme olarak önemli bir ilgi yaratmıştır.

Bu çalışmada, amorf karbonların transistör uygulamalarında kullanılmadan önce karbon yapılarının düzenlenmesi gerekmiştir. Çay atıkları biyokütlesi, termokimyasal proses olan piroliz ile karbonize biyokömüre dönüştürülmüştür. Biyokömür, düzenli kristal yapısı olmayan, H ve O gibi fonksiyonel gruplarca zengin karbonize amorf bir materyaldir. Amorf karbon yapısının Fe katalizörü ile grafitizasyonu ile grafenik karbon elde edilebilmiştir (Liu vd.,2017). Böylece, yenilenebilir karbon kaynağından elektronik aygıtlara uygulanabilecek yüksek performans karbon türetilmiştir. Karbon yapısının gelişimi literatür ile benzerlik sağlamıştır (Jaafar vd., 2018; Rao vd., 2018; Mohandos ve Nelleri, 2018).

Grafit tozunun rGO' ya dönüşümünde SEM görüntüleri incelendiğinde Modifiye Hummers yöntemiyle grafit tabakalarının incelendiği ve açıldığı görülmektedir. Karbon malzemenin SEM görüntülerindeki gelişimi literatürdeki çalışma ile uyumludur (Jaafar vd., 2018). Görüntüler GO ve rGO yapısını desteklemiştir. BC-Fe-Y' nin BC-Fe-Y-rGO' ya gelişiminde bariz olarak tabakaların açılması değişimi gözlenmemiştir. SEM görüntülerinden, BC ile grafenik yapıların oluşumu var ise de yüzde olarak az miktardadır.

GO ve rGO, BC-Fe-Y-GO ve BC-Fe-Y-rGO tabakalarındaki kristal özellikler XRD yöntemi ile incelenmiştir. Biyokömürün (BC) grafitizasyonu (BC-Fe-Y) ve kimyasal yöntemle grafenik yapıya doğru gitmek için muamelesi, BC' nin kristal yapısındaki XRD şiddetinin artmasından geliştiği görülmektedir (Şekil 38). Grafiten GO' ya doğru malzeme geliştirildiğinde yapıya katılan oksijen grupları yapıyı amorf etmektedir. İndirgeme işlemi ise oksijen gruplarını azalttığından yapı tekrar daha düzenli duruma geçmektedir. BC-Fe-Y toz numunesi için XRD cihazında elde edilen kırınım deseninde görülen verilerden yararlanarak, BC-Fe-Y numunesine ait d parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar XRD cihazından alınan grafit tozuna ait veriler ile uyumlu olmuştur. Grafit tozundaki (002) yansıması BC-Fe-Y için $2\theta=26,25^\circ$ değerinde görülmesi istenen şiddetli pik görülememiştir. Bu durum BC-Fe-Y numunesinin daha amorf yapıya sahip iken grafitin daha kristal yapıya sahip olduğunu ifade etmiştir. Grafit tozunun aksine GO numunesi XRD deseninde $2\theta= 11,2^\circ$ derecede şiddetli bir pik verir. Modifiye Hummers yöntemi ile sentezlenen GO numunesinin XRD piki literatür çalışması ile benzer özellik göstermiştir (Şekil 39) (Rao vd., 2018).

Çalışmada sentezlenen biyokütle kaynaklı karbon yapıları materyallerin kristal yapılarının incelenmesinde Raman Spektroskopisinden faydalanılmıştır. Şekil 39' daki Raman Spektrumları incelendiğinde BC-Fe-Y' den BC-Fe-Y-rGO' ya doğru malzemenin gelişiminde I_D/I_G oranı 0,77' den 0,92' ye yükselmiştir. Literatürdeki $I_D/I_G=1,15$ değeri bu çalışmadaki 0,92 değerine yakındır. Bu durum indirgeme reaksiyonu sonucu GO yapıdan fonksiyonel grupların uzaklaşırken yerlerine sp^2 düzenli kristal yapılarının oluşarak yapının düzenliliğinin arttığını ifade etmektedir. Yapının sp^2 hibritleşmesine doğru gittiği anlaşılmaktadır (Fu vd., 2013).

rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin Şekil 42' deki FT-IR spektrumunda fonksiyonel grupların analizinde biyokömür numunesi aromatiklik ve C-H bakımından zengin görünmektedir. rGO'da ise kararlı C=O bağları bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu da oksitlenme özelliği bakımından grafitin daha istekli olduğunu ifade etmiştir. Dolayısıyla grafit tabakalarının açılması ve grafen yapısına dönüşümün, grafit için daha kolay olabileceği sonucuna varılabilir.

Karbon malzemelerin sıcaklıktaki davranışını analiz etmek için TGA ölçümleri yapılmıştır. Çay atığı biyokütlesinden geliştirilen karbon numunelerinin hava atmosferinde termogravimetrik analizlerinde 100 °C' ye kadar olan sıcaklıklarda numuneden nemin uzaklaştığı ve 550 °C' den sonra ise numunelerin tamamen bozunduğu anlaşılmıştır. Grafen oksit sentezi sonucu yapıya oksijen katılması (GO ve BC-Fe-Y-GO), kararsızlığı tüm numunelerde arttırmıştır. Grafit tozundan indirgenmiş grafen oksite doğru gidildiğinde asit ile biyokömür numunesinin yıkanması, mineral içeriğini % 5' in altına düşürmektedir. Dolayısıyla biyokömür numunesinin transistör uygulamasında soru işareti yaratabilecek mineral varlığının yarı iletkenliğe etkisi çok düşük olacağı sonucuna varılabilir.

Şekil 45' de T-λ eğrisi incelendiğinde, rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik değerleri elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde (400-700 nm), rGO ince filminde % 80' lerden başlayarak ~% 90' lara kadar çıkmakta, aynı durumda BC-Fe-Y-rGO ince filminde ise % 86' lardan başlayarak neredeyse %100' e kadar çıkmıştır. Optik geçirgenlik (T-λ) grafiğinde 400 nm dalga boyuna doğru görünen piklerin karakterizasyonu için karbon numunelerin NMP' li doymuş çözeltilerinin UV spektrumları alındığında yine aynı bölgede piklerin görülmesi, rGO ve benzer olarak BC-Fe-Y-rGO' da C=O gibi ve sp² bağlarının mevcut olmasından kaynaklanmaktadır. rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerinin yasak enerji aralığı değerleri soğurma değerleri yardımıyla eV olarak hesaplanmıştır. Elektron bant aralığı soğurma katsayısı ile foton enerjisi ($\alpha^2 - \alpha \cdot h\nu - E_g$) arasındaki ilişkiden Tauc yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntem ile sırasıyla rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin yasak enerji bant aralığı değerleri 2,264 ve 2,375 eV olarak bulunmuştur. Literatürdeki doğal gün ışığında indirgenerek (NSRGO) elde edilen indirgenmiş grafen oksit ile ilgili güncel çalışmada enerji bant aralığı 2,2 eV bulunmuştur. İndirgenmiş

grafen oksit numunelerinin enerji bant değerleri ile bu değer uyum göstermiştir (Mohandoss ve Nelleri, 2018)

rGO ve BC-Fe-Y-rGO ince filmlerinin elektriksel ölçümler sonucu, Wan der Pauw 4 nokta direnç düzeneği ve Hall etkisi ölçüm düzeneği kullanılarak Özdirenç (ρ) değerleri rGO ve BC-Fe-Y-rGO için sırasıyla; $3,16 \times 10^3$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) ve $3,28 \times 10^3$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) olarak bulunmuştur. Yük taşıyıcı yoğunluk değerleri (n) $6,76 \times 10^{14}$ (cm^{-3}) ve $9,96 \times 10^{13}$ (cm^{-3}) olarak bu yöntemler ile bulunmuştur. Özdirenç değerleri belirlenen numunelerin elektriksel iletkenlik değerleri ise $3,16 \times 10^{-4}$ (S/cm) ve $3,28 \times 10^{-4}$ (S/cm) olarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan gözenekli yapıya sahip karbon malzemelerin özdirenç değerleri düşüktür. Ayrıca karbon malzemenin ayrı bir elektriksel alan yaratmaması da önemlidir. Karbon malzeme çıkış karakteristiğinde kararlılık sağlamıştır, yani malzemeler gürültüyü engellemiştir.

Üretilen transistörlerde kanaldaki akımın D-S arasında taşınma görevini boşluklar sağladığı için aygıt p kanal etkisi göstermiştir. Bu sebeple p tip FET olarak isimlendirilmiştir. Alan etkili transistör davranışı üzerine karbonun etkisini incelemek için önce transistörlerin çıkış karakteristikleri sırasıyla transistörlerin kapı terminaline (G) -4, -8, -12, -16 ve -20 V kapı voltajları (V_{GS}) uygulanarak, I_{DS} - V_{DS} (çıkış karakteristiği) eğrileri elde edilmiştir. Normalize I_{DS} - V_{GS} eğrisi oluşturulan çıkış karakteristiğinde $V_{GS} = -16$ V' ta I_{DS} akımının alan etkili transistörlerde 0.8- 0.9 A normalize olmuş değerlere çıktığı görölmüştür.

Karbon materyal içermeyen alan etkili transistör aygıt performansı ile alan etkili karbon transistör performansları karşılaştırıldığında, şekil 49' daki çıkış karakteristiğinde p-FET aygıtında normalize $I_{DS} = -0.6$ A iken rGO ve BC-Fe-Y-rGO p-FET aygıtlarında doyma akımı ~ -0.8 A civarındadır. Yani alan etkili karbon transistörde doyma akımı Si alan etkili transistörden daha yüksektir. Bu doyma davranışı giriş ve çıkış karakteristiklerinde şekil 15' de gösterilen literatür ile benzerlik sağlamıştır. (Rabieefar ve Dideban, 2019; Kreupl, 2014).

Karbon malzemeler transistörlerin doyum davranışına olumlu etki sağlamıştır. Çıkış karakteristiğinde aygıtlar kademeli olarak doyum davranışı göstermiştir. p-FET,

$V_{DS} = -0.3$ V civarında doyuma geçerek, en erken doyuma ulaşan transistör olmuştur. Diğer taraftan, transistörlere karbon malzeme eklendiğinde doyuma geçme süresi uzamıştır. rGO p-FET $V_{DS} = -0.9$ V civarında, BC-Fe-Y-rGO p-FET ise $V_{DS} = -1$ V civarında doyuma ulaşmıştır. Bu durum Şekil 49’ da -0.2 V $> V_{DS} > -1.0$ V aralığına bakıldığında daha iyi anlaşılır. p-FET, rGO-FET’ e göre daha erken doyum davranışı göstermiştir. BC-Fe-Y-rGO p-FET, doyum davranışı neredeyse rGO p-FET davranışıyla benzerlik göstermiştir.

Bir transistörün performansını belirleyen bir diğer öge, giriş (transfer) karakteristiğidir. Şekil 50, p tip alan etkili transistörlerin G-S gerilimine (V_{GS}) göre D-S akım (I_{DS}) eğrisini göstermektedir. I_{DS} - V_{GS} eğrisinde p tipi özellik oda koşulları altında sabit 0.1 V= V_{DS} ’ de incelenmiştir. V_{GS} ’ nin fonksiyonu olarak akım nerdeyse doğrusal özellik göstermiştir. Drain-Source gerilimine göre akım doygunluğunun başlangıcı bu eğride daha net anlaşılabilir. p-FET -10 V $> V_{GS} > 0$ V aralığında, rGO p-FET ~ -6 V $> V_{GS} > 0$ V ve BC-Fe-Y-rGO p-FET ise ~ -6 V $> V_{GS} > -20$ V aralığında düzgün doyma davranışı göstermektedir. Bu noktalara kadar aygıtlar doyma davranışına geçmemiştir. V_{Th} , bu eğriden çıkartılabilir. V_{GS} arttıkça, I_D ‘ nin yükseldiği eşik gerilimine ulaşılır. p-FET için eğriden V_{Th} ’ nin -5 V olduğu görülür. $V_{GS} = -5$ V değerine ulaştığında akım hızlı bir şekilde belirli noktaya kadar artmıştır. Fakat aygıt üretimi laboratuvar koşullarında el ile yapıldığı için ölçüm koşulları da düşünüldüğünde karbon materyalin transistör davranışı üzerine etkisi aygıtların giriş karakteristiğinden yorumlanamamıştır.

Sonuç olarak, alan etkili transistör aygıtlarında uygulanan karbon materyaller fosil kaynaklıdır (Schwierz, 2010). Fosil kaynakların giderek azaldığı ve fosil kaynaklı CO_2 emisyonunun çevreye verdiği zararlara bakıldığında alternatif, temiz ve yenilenebilir kaynakların önemi artmaktadır. Tek yenilenebilir karbon kaynağı biyokütle, elektronik aygıtlarda uygulama alanları bulacaktır.

Çalışmada, alan etkili transistörlerde karbon materyalin transistör davranışına etkisini araştırmak ve bu araştırmayı yaparken de transistörün giriş ve çıkış karakteristiklerinde performansını arttırmak için indirgenmiş grafen oksit ve çay atıklarından türetilmiş indirgenmiş grafen oksit materyalleri kullanılmıştır.

Çevreci, yerli ve milli imkanlarla elektronik aygıt tasarımına katkı sağlayan bir çalışma yapılmıştır. Atık olarak görülen, değerlendirilmeyen endüstriyel çay atıkları biyokütlesinin yerli ve yenilenebilir enerji kaynağı (YEK) olarak kullanımı için metot geliştirilmiştir. Ayrıca, transistör teknolojisinin biyokütle kaynaklı tasarımı ve karakterizasyonları, ileri çalışmalara öncü olması beklenmektedir.

Yukarıdaki tüm sonuçlar dikkate alındığında, endüstriyel çay atıkları biyokütlesi işlenerek iletken özellik gösteren karbonize materyale geliştirilmiştir. Transistör aygıtına geliştirilen karbon materyal uygulanarak aygıtın sinyale olumlu etkisi görülmüştür. Biyokütleden karbon malzemeler kolay ve ucuz üretilmeleri sayesinde elektronik aygıtların performansının iyileştirilmesi açısından gelecekteki çalışmalarda ilgi çekici olacaktır.

5. ÖNERİLER

Karbonun transistör, diyot ve benzeri elektronik aygıtta uygulanması, güncel ve gelişmekte olan bir uygulamadır. Transistör, diyot ve benzeri elektronik aygıtta kullanılan karbon malzemeler fosil kaynaklardan elde edilmektedir. Grafen oksit elektronik, optik, kimya, enerji depolama ve biyolojideki grafen bazlı uygulamalar için faydalı ve ümit verici bir malzemedir. Yakıt pili, süperkapasitör, polimer nanokompozitler, ilaç ve güneş pilleri teknolojisi gibi çeşitli uygulamalarda ideal bir malzemedir.

Endüstriyel çay atıklarının yüksek performans karbon materyaline dönüştürülmesi, çevreci, sürdürülebilir, yenilenebilir, yerli kaynakların değerlendirilmesinde başlı başına önemlidir. Atık ve yerli biyokütle enerji kaynaklarının katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi ve bir ileri basamak olarak kullanım teknolojilerinin geliştirilmesi, ülkemizin dışa bağımlılığını azaltma ve teknoloji ihracatı yapabilmesi bakımından çok daha önemlidir.

Malzeme sentezi bu araştırmanın esas basamağı olmuştur. Literatürdeki bilgilere dayanarak yeşil ve atık enerji kaynağından katma değeri yüksek indirgenmiş grafen oksit eldesi en önemli başarı ölçütü olmuştur ve bu malzemenin elektronik aygıtlara uygulanabilmesi bir ileri başarı ölçütü olmuştur. Biyokütleden grafen benzeri karbon malzeme üretiminde oluşan karbon yapı farklı yöntemlerle geliştirilebilir. Bunun için gerek piroliz sırasında gerekse kimyasal uygulamalarda farklı katalitik malzemeler kullanılarak metodlar geliştirilebilir. Böylece kusur miktarı en aza indirgenebilir. Çünkü yapıda az miktarda da olsa var olan kusurlar transistör aygıtında kullanılacak karbon yapının elektriksel özelliklerini etkilemiştir.

Biyokütle kaynaklı karbon materyal içeren transistör aygıtında ince film oluşumu için, döndürerek kaplama gibi daha profesyonel metotlar tercih edilebilir. Aygıtın metal kontakları için iletkenliği yüksek Au, Pt gibi yaygın kullanılan kontak malzemeleri buharlaştırılarak biriktirilebilir. Geleneksel litografi işlemi gibi, daha farklı üretim yöntemleri uygulanarak kusurları az transistörler geliştirilebilir.

Burada n tip Si/SiO₂ altlık üzerine inşa edilen aygıt p kanal özellik göstermiştir. p kanalda iletkenliği arttıran karbon materyal olmuştur. Daha iyi performans için kullanılan biyokütle kaynaklı ve ticari grafit tozu kaynaklı indirgenmiş grafen oksit numunelerinin yarı iletkenlik özellikleri p tipi katkılama ile artırılabilir, böylece transistör aygıtındaki p kanalın iletkenliği artmış olur.

Bu çalışma, çok yönlü araştırma alanına sahip bir çalışma olduğundan farklı elektronik aygıtların farklı altlık malzemelerle (cam kağıt, safir altlık gibi) geliştirmesi araştırılabilir. Karbonun transistör performansına etkisi bu tezde incelenmiştir. SiO₂ gibi yalıtkan malzeme seçimi bu çalışmada arayüzey durumlarında meydana gelen bozukluklar nedeniyle her zaman olumlu sonuçlar vermeyebilir. Transistörün elektronik parametrelerinin performansı belirlenebilir, farklı kapı dielektrikleri ve farklı teknikler kullanılabilir. Aygıt üretimi litografi maske hizalama yöntemi ile gerçekleştirilebilir. Transistör aygıtının önemli belirleyici elektronik parametreleri hesaplanabilir.

Daha hızlı ve verimli elektriksel aygıtlar yenilenebilir, sürdürülebilir ve yerel başka biyokütle kaynakları kullanılarak geliştirilebilir. Böylece düşük değerli atık malzemeler yüksek değerli karbon materyallere dönüştürülebilir. Daha ileri çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Ahopelto, J., Ardila, G., Baldi, L., Balestra, F., Belot, D., Fagas, G., De Gendt, S., Demarchi, D., Bolanos, M.F., Holden, D., Ionescu, A.M., Meneghesso, G., Mocuta, A., Pfeffer, M., Popp, R.M., Sangiorgi, E. and Torres, C.M.S., 2019.** Nanoelectronics roadmap for europe: from nanodevices and innovative materials to system integration. *Solid-State Electronics*, 155, 7-19.
- Ahmad, S., 2014.** Organic semiconductors for device applications: current trends and future prospects. *Journal of Polymer Engineering*, 34(4), 279-338. doi:10.1515/polyeng-2013-0267
- Alma, M.H., Yazıcı, M. Yıldırım, B., Salan, T. ve Tiye, İ., 2017.** Spunbond dokusuz tekstil yüzeyi üzerine elektro çekim yöntemi ile nano boyutta grafen kaplanması ve karakterizasyonu. *Journal of Textiles and Engineer*, 24(108), 243-253. doi:10.7216/1300759920172410803
- Amiri, I.S. and Ghadiry, M., 2018.** Analytical modelling of breakdown effect in graphene nanoribbon field effect transistor. Springer, ISBN: 978-981-10-6549-1, 86s.
- Arco, L.G.D., Zhang, Y., Kumar, A. and Zhou, C., 2009.** Synthesis, transfer, and devices of single-and few-layer graphene by chemical vapor deposition. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 8(2), 135-138. doi:10.1109/TNANO.2009.2013620
- Avouris, P. and Dimitrakopoulos, C., 2012.** Graphene: synthesis and applications. *Materials Today*, 15(3), ISSN: 1369 7021
- Barbera, K., Frusteri, L., Italiano, G., Spadaro, L., Frusteri, F., Perathoner, S. and Centi, G., 2014.** Low-temperature graphitization of amorphous carbon nanospheres. *Chinese Journal of Catalysis*, 35(6), 869-876. doi:10.1016/S1872-2067(14)60098-X
- Bark, H., Lee, W. and Lee, H., 2013.** Correlation between seebeck coefficients and electronic structures of nitrogen-or boron-doped reduced graphene oxide: via thermally activated carrier transport. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(32), 15577-15584. doi:10.1039/c8ta03545h
- Bartolomeo, A.D., 2015.** Graphene schottky diodes: An experimental review of the rectifying graphene/semiconductor heterojunction. *Physics Reports*, 606, 1-58. doi:10.1016/j.physrep.2015.10.003
- Bayaya, E., 2016.** Fabrication and Electrical Characterization of field-effect transistors with carbon-based materials. Doktora Tezi. Friedrich-Alexander University, Erlangen-Nunberg. 125s.
- Bedeloğlu, A. ve Taş, M., 2016.** Grafen ve grafen üretim yöntemleri. Afyon Kocatepe

Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(3), 544-554.
doi:10.5578/fmbd.32173

- Bernal, R.V., 2016.** State-of-the-Art Electronic Devices Based on Graphene. Nanoelectronics and Materials Development, 1-22. doi:10.5772/64320
- Bhuyan, M.S.A., Uddin, M.N., Islam, M.M., Bipasha, F.A. and Hossain, S.S., 2016.** Synthesis of graphene. International Nano Letters, 6(2), 65-83.
doi:10.1007/s40089-015-0176-1
- Chen, N., Huang, X. and Qu, L., 2015.** Heteroatom substituted and decorated graphene: preparation and applications. Physical Chemistry Chemical Physics, 17(48), 32077-32098. doi:10.1039/c5cp04391c
- Dathbun, A., Kim, S., Lee, S., Hwang, D.K. and Cho, J.H., 2019.** Flexible and transparent graphene complementary logic gates. Molecular Systems Design & Engineering. doi:10.1039/c8me00100f
- Dehkhoda, A., 2016.** Development and Characterization of Activated Biochar as Electrode Material for Capacitive Deionization. Doktora Tezi. The University of British Colombia, Chemical and Biological Engineering, 237s.
- Disa, N.M., Bakar, S.A., Alfarisa, S., Mohamed, A., Isa, I.M., Kamari, A., Hashim, N. and Mahmood, M.R., 2015.** A review: synthesis methods of graphene and its application in supercapacitor devices. Advanced Materials Research, 1109, 40-44. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1109.40
- Dissanayake, D.M.N.M. and Eisaman, M.D., 2016.** Chemical-free n-type and p-type multilayer-graphene transistors. Applied Physics Letters, 109 (5). doi:10.1063/1.4960530
- Eigler, S., Enzelberger-Heim, M., Grimm, S., Hofmann, P., Kroener, W., Geworski, A., Dotzer, C., Röckert, M., Xiao, J., Papp, C., Lytken, O., Steinrück, H.P., Müller, P. and Hirsch, A., 2013.** Wet Chemical Synthesis of Graphene. Advanced Materials, 25(26), 3583-3587. doi:10.1002/adma.201300155
- Fu, C., Zhao, G., Zhang, H. and Li, S., 2013.** Evaluation and characterization of reduced graphene oxide nanosheets as anode materials for lithium-ion batteries. International Journal of Electrochemical Science, 8(5), 6269-6280.
- Gabhi, R.S., Kirk, D.W. and Jia, C.Q., 2017.** Preliminary investigation of electrical conductivity of monolithic biochar. Carbon, 116, 435-442. doi: 10.1016/j.carbon.2017.01.069
- Garrido, B., Samitier, J., Morante, J.R., Fonseca, L. and Campabadal, F., 1992.** Influence of the silicon wafer cleaning treatment on the Si/SiO₂ interfaces analyzed by infrared spectroscopy. Applied Surface Science, 56, 861-865.

- Gebreegziabher, G.G., Asemahegne, A.S., Ayele, D.W., Dhakshnamoorthy, M. and Kumar, A., 2019.** One-step synthesis and characterization of reduced graphene oxide using chemical exfoliation method. *Materials Today Chemistry*, 12, 233-239. doi:10.1016/j.mtchem.2019.02.003
- Generalov, A.A., Andersson, M.A., Yang, X., Vorobiev, A. and Stake, J., 2017.** A 400-ghz graphene fet detector. *THz Letters*, 7(5), 614–616.
- Gök, H., 2015.** Organik Alan Etkili Transistörlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 57s.
- Harris, P.J.F., 2017.** Engineering carbon materials with electricity. *Carbon*, 122, 504-513. doi:10.1016/j.carbon.2017.06.084
- Hummers, W.S. and Offeman, R.E., 1958.** Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339. doi:10.1021/ja01539a017
- Hyun, W.J., Secor, E.B., Rojas, G.A., Hersam, M.C., Francis, L.F. and Frisbie, C. D., 2015.** All-printed, foldable organic thin-film transistors on glassine paper. *Advanced Materials*, 27(44), 7058-7064. doi:10.1002/adma.201503478
- Jaafar, E., Kashif, M., Sahari, S.K. and Ngaini, Z., 2018.** Study on morphological, optical and electrical properties of graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (rGO). *Materials Science Forum*, 917, 112-116. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.917.112
- Jahan, M., Bao, Q., Yang, J.X. and Loh, K.P., 2010.** Structure-directing role of graphene in the synthesis of metal-organic framework nanowire. *Journal of the American Chemical Society*, 132(41), 14487-14495. doi:10.1021/ja105089w
- Jiang, B., Yang, Z., Liu, X., Liu, Y. and Liao, L., 2019.** Interface engineering for two-dimensional semiconductor transistors. *Nano Today*, 25, 122-134.
- Kathalingam, A., Senthilkumar, V. and Rhee, J.K., 2014.** Hysteresis I-V nature of mechanically exfoliated graphene fet. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25(3), 1303-1308. doi:10.1007/s10854-014-1727-3
- Kreupl, F., 2014.** Advancing cmos with carbon electronics. 2014 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, Dresden, Germany, 24-28 March 2014, 1-6. doi:10.7873/date2014.250
- Lee, H., Paeng, K. and Kim, I.S., 2018.** A review of doping modulation in graphene. *Synthetic Metals*, 244, 36-47. doi:10.1016/j.synthmet.2018.07.001
- Lehmann, J. and Joseph, S., 2009.** Biochar for environmental management: an introduction. In *Biochar for environmental management*, Routledge, 33-46.

- Li, S., Li, X., Chen, C., Wang, H., Deng, Q., Gong, M. and Li, D., 2016.** Development of electrically conductive nano bamboo charcoal/ultra-high molecular weight polyethylene composites with a segregated network. *Composites Science and Technology*, 132, 31-37. doi:10.1016/j.compscitech.2016.06.010
- Liu, F., Chen, Y. and Gao, J., 2017.** Preparation and characterization of biobased graphene from kraft lignin. *BioResources*, 12(3), 6545-6557.
- Maiti, S., Banerjee, P., Purakayastha, S. and Ghosh, B., 2008.** Silicon-doped carbon semiconductor from rice husk char. *Materials Chemistry and Physics*, 109(1), 169-173. doi:10.1016/j.matchemphys.2007.11.011
- Manukyan, S., 2009.** Mechanically Exfoliated Single and Multilayer Graphene Sheets and Graphene Field Effect Transistor. Yüksek Lisans Tezi. Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 62s.
- Marcano, D.C., Kosynkin, D.V., Berlin, J.M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L.B., Lu, W. and Tour, J.M., 2010.** Improved synthesis of graphene oxide. *ACS Nano*, 4(8), 4806-4814. doi:10.1021/nn1006368
- Masoumi, S., Hajghssem, H., Erfanian, A. and Rad, A.M., 2017.** Fabrication of field-effect transistor based on rgo. *American Journal of Engineering Research*, 6(7), 364-373.
- Mohandoss, M. and Nelleri, A., 2018.** Optical properties of sunlight reduced graphene oxide using spectroscopic ellipsometry. *Optical Materials*, 86(July), 126-132. doi:10.1016/j.optmat.2018.09.035
- Morgül, A., 2016.** Elektronik Devre Elemanları. Papatya Bilim, 2. Baskı, ISBN: 978-605-4220-48-9, 248s.
- Munkholm, A., Brennan, S. and Googbread, J.P., 1995.** Wafer cleaning influence on the roughness of the Si/SiO₂ interface. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 386. doi: 10.1557/PROC-386-303
- Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V. and Firsov, A., 2004.** Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306 (October), 666-669.
- Novoselov, K.S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T.J., Khotkevich, V.V., Morozov, S.V. and Geim, A.K., 2005.** Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), 10451-10453.
- Park, S. and Ruoff, R.S., 2009.** Chemical methods for the production of graphenes, 4(march), 45-47. doi:10.1038/nnano.2009.58
- Pei, S. and Cheng, H.M., 2012.** The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50(9), 3210-3228. doi:10.1016/j.carbon.2011.11.010

- Peng, Q., Dearden, A.K., Crean, J., Han, L., Liu, S., Wen, X., and De, S., 2014.** New materials graphyne, graphdiyne, graphone, and graphane: review of properties, synthesis, and application in nanotechnology. *Nanotechnology, Science and Applications*, 7, 1. doi:10.2147/nsa.s40324
- Pince, E. and Kocabas, C., 2010.** Investigation of high frequency performance limit of graphene field effect transistors. *Applied Physics Letters*, 97(17), 173106, 95-98. doi:10.1063/1.3506506
- Poniatowska, A., Trzaskowski, M. and Ciach, T., 2019.** Production and properties of top-down and bottom-up graphene oxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 561(July 2018), 315-324. doi:10.1016/j.colsurfa.2018.10.049
- Rabieefar, F. and Dideban, D., 2019.** Utilizing graphene nano-ribbon transistor in data converters: A comparative study. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 8(3), M30-M37. doi:10.1149/2.0161903jss
- Ravichandran, A.V., 2016.** The Graphene Field Effect Transistor: A Large Scale Integration Approach. *Doktora Tezi. The University of Texas, Materials Science and Engineering*, At Dallas, 73s.
- Rahimi, R., Ochoa, M. and Ziaie, B., 2016.** Direct laser writing of porous-carbon/silver nanocomposite for flexible electronics. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(26), 16907-16913. doi:10.1021/acsami.6b02952
- Rao, S., Upadhyay, J., Polychronopoulou, K., Umer, R. and Das, R., 2018.** Reduced graphene oxide: effect of reduction on electrical conductivity. *Journal of Composites Science*, 2(2), 25. doi: 10.3390/jcs2020025.
- Reddy, V., Babu, K.K.C.S., Torati, S.R., Eom, Y.J., Trung, T.Q., Lee, N.E. and Kim, C.G., 2018.** Scalable production of water-dispersible reduced graphene oxide and its integration in a field effect transistor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 63, 19-26. doi:10.1016/j.jiec.2018.01.033
- Roy, S., 2017.** Synthesis of graphene oxide using tea-waste biochar as green substitute of graphite and its application in de-fluoridation of contaminated water. *American Journal of Chemical Research*, 1(1). doi: 10.28933/ajcr-2017-03-2101
- Roy, S., Sengupta, S., Manna, S. and Das, P., 2018.** Chemically reduced tea waste biochar and its application in treatment of fluoride containing wastewater: batch and optimization using response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 553-563. doi:10.1016/j.psep.2018.03.009
- Rufford, T.E., Jurcakova, D.H., Zhu, Z. and Lu, G.Q., 2010.** A comparative study of chemical treatment by FeCl₃, MgCl₂ and ZnCl₂ on microstructure, surface chemistry, and double-layer capacitance of carbons from waste biomass. *Journal of Materials Research*, 25(8), 1451-1459. doi: 10.1557/jMR.2010.0186

- Schwierz, F., 2010.** Graphene transistors. *Nature Nanotechnology*, 5(7), 487.
doi:10.1038/NNANO.2010.89
- Semple, J., Georgiadou, D. G., Wyatt-Moon, G., Gelinck, G. and Anthopoulos, T. D., 2017.** Flexible diodes for radio frequency (rf) electronics: A materials perspective. *Semiconductor Science and Technology*, 32(12). doi:10.1088/1361-6641/aa89ce
- Smith, A.T., La Chance, A.M., Zeng, S., Liu, B. and Sun, L., 2019.** Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites. *Nano Materials Science*, 1(1), 31-47.
doi:10.1016/j.nanoms.2019.02.004
- Temel, N.K., Sertakan, K. ve Temel, Ü.N., 2017.** Grafen oksitin hummers metodu ile sentezlenmesine etki eden parametrelerin iyileştirilmesi. *Cumhuriyet Science Journal CSJ*, 38-4, 748-758.
- Tiyek, İ., Dönmez, U., Yıldırım, B., Alma, M.H., Ersoy, M.S., Karataş, Ş. ve Yazıcı, M., 2016.** Kimyasal yöntem ile indirgenmiş grafen oksit sentezi ve karakterizasyonu. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 20(2), 349-357.
- Tozlu, C., 2010.** Yeni Perilen ve Naftalen Türevi Organik Yarıiletkenlerin Alan Etkili Transistör Uygulamalarında Karakteristik Özelliklerinin Analizi. *Doktora Tezi.* Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 123s.
- Trung, T.Q., Tien, N.T., Kim, D., Jang, M., Yoon, O.J. and Lee, N., 2013.** A flexible reduced graphene oxide field-effect transistor for ultrasensitive strain sensing. *Advanced Functional Materials*, 24(1), 117-124. doi:10.1002/adfm.201301845
- URL-1, 2019.** <https://www.electronicdesign.com/power/what-s-difference-between-pnp-and-npn> (10.05.2019)
- URL-2, 2019.** <https://teknolojiprojeleri.com/teknik/transistor-nedir-nasil-calisir> (14.05.2019)
- URL-3, 2017.** <https://maker.robotistan.com/transistor-nedir/> (14.05.2019)
- URL-4, 2018.** <https://www.electrical4u.com/mosfet-characteristics/> (10.05.2019)
- Yeh, C.H., Teng, P.Y., Chiu, Y.C., Hsiao, W.T., Hsu, S.S.H. and Chiu, P.W., 2019.** Gigahertz field-effect transistors with cmos-compatible transfer-free graphene. *ACS applied materials and interfaces*, 11(6), 6336-6343.
doi: 10.1021/acsami.8b16957
- Yeom, D. Y., Jeon, W., Tu, N. D. K., Yeo, S. Y., Lee, S. S., Sung, B. J., Chang, H., Lim, J. A. and Kim, H., 2015.** High-concentration boron doping of graphene nanoplatelets by simple thermal annealing and their supercapacitive properties.

Scientific Reports, 5(May), 1-10. doi:10.1038/srep09817

Yoo, M.J. and Park, H.B., 2019. Effect of hydrogen peroxide on properties of graphene oxide in Hummers method. Carbon, 141, 515-522. doi:10.1016/j.carbon.2018.10.009

Zhijie, Y., Qingyi, S. and Juan, Z., 2019. Super tiny nanoscale graphene nanoribbon field-effect transistor. Chinese Journal of Physics. 59(February), 572-577. doi: 10.1016/j.cjph.2019.03.015

Zhou, X., Huang, X., Qi, X., Wu, S., Xue, C., Boey, F.Y.C., Yan, Q., Chen, P. and Zhang, H., 2009. In situ synthesis of metal nanoparticles on single-layer graphene oxide and reduced graphene oxide surfaces. The Journal of Physical Chemistry, 113(25), 10842-10846. doi:10.1021/jp903821n

Wu, Z.S., Ren, W., Xu, L., Feng, L. and Cheng, H.M., 2011. Doped graphene sheets as anode materials with superhigh rate and large capacity for lithium ion. ACS Nano, 5(7), 5463-5471. doi:10.1021/nn2006249

Zhang, S., 2010. Organic Nanostructured Thin Film Devices and Coatings for Clean Energy. 1. Baskı, ISBN: 9780429150975, 254s. doi: 10.1201/b11846

ÖZGEÇMİŞ

Saliha Nur BIÇAKÇI, 16/02/1992 tarihinde Rize’de doğdu. İlköğretimini 2006 yılında Rize ilinde Özel İlgı İlköğretim Okulu’nda ve Ortaöğretimini 2010 yılında Rize ilinde Rize Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 08/09/2011 yılında başladığı lisans eğitimini 05/02/2016 tarihinde Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde tamamladı. 2016 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladığı yüksek lisans öğrenimine halen devam etmektedir. Orta seviyede İngilizce bilmektedir.

Bilimsel Çalışmaları ve Yayınları;

Bıçakçı, S.N., 2019. Nesnelerin interneti. Takvim-i Vekayi, 7 (1), 24-36.
<http://dergipark.org.tr/takvim/issue/44522/498857>

Akgül, G. ve Bıçakçı, S.N., 2019. Çay atıklarından türetilen amorf karbonun grafen benzeri materyale geliştirilmesi ve transistör uygulaması. International Congress of Energy Economy and Security. 6-7 Nisan 2019. İstanbul