

KOMPOZİT TABANLI ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR TASARIMI VE DOKUNSA ALGILAMA UYGULAMASI

COMPOSITE BASED FIELD EFFECT TRANSISTOR DESIGN AND TACTILE SENSING APPLICATION

İBRAHİM BOZYEL

DOÇ. DR. DİNÇER GÖKCEN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Haziran 2022

ABSTRACT

COMPOSITE BASED FIELD EFFECT TRANSISTOR DESIGN AND TACTILE SENSING APPLICATION

İbrahim Bozyel

Master of Science , Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Dinçer Gökçen

June 2022, 122 pages

Studies on the design and production of flexible field-effect transistors (FET) using nanocomposite structures were carried out within the scope of this thesis. The design, on which field effects occur on it, is similar to thin-film transistors (TFT) in topology and had been used as a functionally flexible tactile sensor. In today's technologies, in direct proportion to the increasing interest in wearable systems, the tendency towards flexible structures is increasing rapidly. Transistors, which are accepted as the basic unit of electronic devices, have their share of this development. The tendency to create field effect transistors using metal oxide structures has increased in this process. While the electrical values change with the pressure, which is a mechanical input, from the sensor outputs, the channel width on the TFT dielectric changes, and accordingly touch-current relation is observed. The mixing ratios and conductivity information of the composites were prepared before the experiments were carried out in the simulation environment. Material selection and comparison have been made for the use of field effect transistors, which will be created within the scope of the thesis, with low cost and sustainable sources. In addition, homemade systems were preferred for fast and widespread production, and it was desired to increase accessibility to production. Many other industrial production steps are explained and their benefits are

mentioned. In addition, parameter studies were carried out to optimize the channel width and the number of FETs per unit volume. In order to compare the gate electrodes of these FETs, graphene and copper electrodes were preferred. Characterization of graphene electrodes for post-production validation was achieved by Raman spectroscopy. With the created graphene electrodes, a two times better capacitive effect was achieved. The resulting semiconductor layers are expressed as P or N-type by the hot-point probe method. The distribution of additive particles was interpreted with the help of a scanning electron microscope and atomic force microscope. Then electrical characterizations were carried out. Machine learning algorithms were used to obtain meaningful data from the outputs of flexible sensing units. In the design produced with a bottom gate and bottom contact, accuracy values of over 95% have been reached in the classification of the data obtained as a result of the contact of triangle, star, square, and circle patterns on the sensor matrix.

Keywords: Field Effect Transistors, Flexible Transistors, Flexible Sensors, Composite, Micro & Nano Fabrication

ÖZET

KOMPOZİT TABANLI ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR TASARIMI VE DOKUNSAAL ALGILAMA UYGULAMASI

İbrahim Bozyel

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Dinçer Gökçen

Eylül 2021, 122 sayfa

Bu tez kapsamında nanokompozit yapılar kullanılarak esnek alan etkili transistör (FET) tasarım ve üretimine dair çalışmalar yapılmıştır. Alan etkilerinin gerçekleştiği tasarım topoloji olarak ince film transistörlere (TFT) benzer şekilde olup, işlevsel olarak esnek dokunsal sensör görevi görmektedir. Günümüz teknolojilerinde özellikle giyilebilir sistemlere artan ilgiyle doğru orantılı olarak esnek yapılara yönelim hızla artmaktadır. Elektronik aygıtların temel birimi olarak kabul gören transistörlerde bu gelişmeden nasibini almaktadır. Bu süreçte metal oksit yapılar kullanılarak alan etkili transistörler oluşturulma eğilimi artmıştır. Mekanik bir girdi olan, basınç ile değişen elektriksel değerler sensör çıktılarını oluşturarak, TFT dielektriği üzerindeki kanal genişliği değişmekte, buna bağlı olarak dokunma-akım gözlenmektedir. Deneyler öncesi hazırlanacak kompozitlerin karışım oranları ve iletkenlik bilgisi benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında oluşturulacak alan etkili transistörlerin, düşük maliyette ve sürdürülebilir kaynaklar ile kullanımı için materyal seçimi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Buna ek olarak hızlı ve yaygın üretim için kolay elde edilebilir sistemler tercih edilmiş, üretime erişilebilirlik artırmak istenmiştir. Diğer birçok endüstriyel üretim basamakları açıklanmış, getirileri bahsedilmiştir. Ayrıca kanal genişliği ve birim hacimdeki FET sayısını optimize

etmek için parametre çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu FET'lerin kapı elektrotlarının karşılaştırılmasını yapmak adına grafen ve bakır elektrotlar tercih edilmiştir. Üretim sonrası doğrulama adına grafen elektrotların karakterizasyonu Raman spektroskopisi ile sağlanmıştır. Oluşturulan grafen elektrotlar ile iki kat daha iyi kapasitif etki meydana gelmiştir. Elde edilen yarı iletken katmanlar sıcak-nokta probu yöntemiyle P veya N tipi olarak ifade edilmektedir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) yardımıyla katkı partiküllerinin dağılımı yorumlanmıştır. Ardından elektriksel karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Esnek algılama birimlerinin çıktılarından anlamlı veriler elde edebilmek adına makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. Alttan kapılı, alttan kontaklı üretilen tasarımda, üçgen, yıldız, kare ve daire desenlerinin üç kolonlu sensör matris üzerine teması sonucu elde edilen verilerin sınıflandırılmasında %95 üzeri doğruluk değerlerine erişilmiştir.

Keywords: Alan Etkili Transistörler, Esnek Transistörler, Esnek Sensörler, Kompozitler, Mikro ve Nano Üretim

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimde başlayan yol göstericiliği ardından, yüksek lisans eğitimim süresince de, bilgisi ve öngörüsüyle desteklerini esirgemeyen, akademik olarak her zaman ilerlemem için çaba sarf eden, çok değerli tez danışmanım Doç. Dr. Dinçer GÖKCEN'e,

Maddi manevi her anlamda yaptıkları destekler ve harcadıkları emeklerle tüm başarılarımın arkasındaki gizli güç olan annem Zeliha BOZYEL'e, babam Adnan BOZYEL'e ve kardeşim Zeyneb Esra BOZYEL'e,

Mutluluğumu paylaşan, zor anlarda desteğiyle motivasyon kaynağım olan yol arkadaşım Merve İBİŞ'e ve tez çalışmaları esnasında her an yüzümüzü güldürebilen Mine İBİŞ'e,

Her zaman yanımda olup beni destekleyen, enerjimi yükselten Ulaş ÇALI, Aybige ÇALI, Eren ÇALI ve Mert ÇALI'ya,

Lisans eğitiminden itibaren zorluklara göğüs germeyi birlikte öğrendiğimiz dostum Alper ENDEŞ'e ve en iyi deney arkadaşı olan Naim Yağız DEMİR'e,

Mühendisliğine olan ilgimi artıran ve her zaman öğrenmeye motive eden İbrahim ÇAKIR ve İsmail ÇETİNKAYA'ya,

Yüksek lisans tez çalışmam kapsamında destekleri ve katkıları için üyesi olduğum Mikro-Nano Sistem Çalışma grubu arkadaşlarım, Kübra SAKA YILDIRIM, Yasemen İNCE KESER, Yeter ŞEKERTEKİN ve Ömer YILDIRIM'a,

Sonsuz Teşekkürlerimle...

İbrahim BOZYEL

Haziran 2022, Ankara

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ABSTRACT	i
ÖZET	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı	3
1.2. Katkılar.....	4
1.3. Tezin Akışı.....	5
2. GENEL KAVRAMLAR VE TEORİK ALTYAPI.....	6
2.1. ENERJİ BANT ARALIĞI VE İLETKENLİK	6
2.2. SIZINTI EŞİĞİ VE YARIİLETKENLİK	9
2.3. KOMPOZİTLER	11
2.3.1. POLİMER MATERYALLERİ.....	12
2.3.1.1. Polivinilalkol.....	12
2.3.1.2. Termoplastik Poliüretan	13
2.3.1.3. Reçine	13
2.3.1.4. Polidimetilsiloksan	13
2.3.2. KARBON ALLATROPLARI	13
2.3.2.1. Grafit	14
2.3.2.2. Grafen	14
2.3.2.3. Nanotüpler	15
2.3.2.4. Fulleren	15
2.3.2.5. Elmas	15
2.3.2.6. Amorf Karbonlar	15

2.4. ESNEK ELEKTRONİK DEVRE ELEMANLARI VE TRANSİSTÖRLER.....	16
2.4.1. SENSÖRLER	16
2.4.2. PN EKLEMİ	17
2.4.3. MEMRİSTÖRLER	17
2.4.4. TRANSİSTÖRLER.....	18
2.5. MEKANİK ETKİLER VE PİEZO ALGILAMA	20
2.6. ÜRETİM YÖNTEMLERİ	22
2.6.1. Transfer Baskı (İng. Transfer Printing)	23
2.6.2. Sprey Kaplama (İng. Spray Coating)	23
2.6.3. Karıştırma	24
2.6.4. Serigrafi (İng. Screen Printing)	24
2.6.5. Mürekkep Püskürtmeli Yazıcı (İng. Inkjet Printing)	25
2.6.6. Dökme ve Düşürme (İng. Drop Casting)	25
2.6.7. Lazer Aşındırma, Lazer Endükleme (İng. Laser Ablation, Laser Induction)	25
2.6.8. Fotolitografi (İng. Photolithography)	26
2.6.9. Sıçratma Biriktirme (İng. Sputtering)	26
2.6.10. Elektro Lif Çekim Yöntemi (İng. Electrospinning)	27
2.6.11. 3B Baskı (İng. 3D Printing)	27
2.7. SÜRDÜRÜLEBİLİR ELEKTRONİK KONSEPTİ VE TRANSİSTÖR ÇALIŞMALARINA ETKİLERİ.....	28
2.8. YAPAY ZEKA İLE SINIFLANDIRMA	29
3. LİTERATÜR İNCELEMESİ	31
4. ÖNERİLEN YÖNTEM.....	34
4.1. ÜRETİM ÖNCESİ BENZETİM.....	34
4.1.1. EN KISA YOL BULMA ALGORİTMALARI.....	35
4.1.1.1. Derinliğine Arama Algoritması.....	37
4.1.1.2. Genişliğine Arama Algoritması.....	38
4.1.1.3. En İyi En Önce Arama Algoritması	38
4.1.1.4. Dijkstra'nın Algoritması	39
4.1.1.5. A* Algoritması	40

4.1.1.6. Derinlemesine A* Algoritması	40
4.2. YARIİLETKEN KATMANIN KARAKTERİZASYONU	42
4.3. TRANSİSTOR TOPOLOJİSİ ve MATEMATİKSEL İFADESİ	43
4.4. ÜRETİM YÖNTEMİ.....	47
4.5. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ.....	51
4.5.1. Görüntüleme ve Analitik Yöntemleri	51
4.5.2. Elektriksel Analiz için Ölçüm Yöntemleri.....	52
5. SONUÇLAR	54
5.1. YARIİLETKEN BÖLGENİN BELİRLENMESİ	54
5.2. KOMPOZİT KARAKTERİZASYONU.....	61
5.2.1. PVA/CB KOMPOZİT.....	61
5.2.2. TPU/CB KOMPOZİT	64
5.3. ÜRETİM OPTİMİZASYONU VE SAPTANAN PARAMETRE ETKİLERİ....	68
5.4. FET KARAKTERİZASYONU	72
6. KARAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR	81
KAYNAKLAR	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1 Algoritma Başarım Çizelgesi [1]	59
Çizelge 5.2 Farklı Örneklerin Malzemesi ve Elektriksel Karakteri [1]	59
Çizelge 5.3 Lazer Parametrelerinin Üretim Sonuçlarına Etkisi	70
Çizelge 5.4 Modellerin Performans Sonuçları	80



ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Donör, Alıcı, İletim ve Değerlik Bandı Enerji İlişkileri	7
Şekil 2.2 Yarıiletken, Yalıtkan ve İletkenlere ait Enerji Bant Seviyeleri	8
Şekil 2.3 Sızıntı Katkı Materyal Miktarı İlişkisi ([2]'den esinlenilmiştir.)	10
Şekil 2.4 Kompozitlerin Sınıflandırılması ([3, 4]'ten esinlenilmiştir.)	12
Şekil 2.5 Karbon Allatropoları ([5]'ten esinlenilmiştir.)	14
Şekil 2.6 Piezo Algılama Prensipleri ve Elektriksel Tepkileri ([6]'dan esinlenilmiştir.)	20
Şekil 3.1 Esnek Elektronik ve Sürdürülebilir Kavramlarının Trendleri [7]	32
Şekil 4.1 Arama Algoritmaları	36
Şekil 4.2 Sıcak-Nokta Prob Ölçümü ([8]'den esinlenilmiştir.)	43
Şekil 4.3 TFT Topolojileri ([9]'den esinlenilmiştir.)	44
Şekil 4.4 Üretim Yöntemleri ve Akışı	47
Şekil 4.5 Elektriksel ve Mekanik Ölçüm Sistemleri	53
Şekil 5.1 Farklı Arama Algoritmalarında İlk İletim Hattının Oluşturduğu Desenler [1]	56
Şekil 5.2 Farklı Arama Algoritmalarında Çoklu İletim Hattı Desenlerinin Gözlenmesi [1]	58
Şekil 5.3 İletkenlik - Katkı Miktarının Deneysel ve Benzetim Sonuçları [1]	60
Şekil 5.4 PVA/CB Kompozitten alınan empedans çıktıları, (a) direnç (R), (b) reaktans (X) ve (c) frekansa karşı empedans (Z) tepkisi [10]	62
Şekil 5.5 PVA/CB Kompozitin Karakterizasyon Çıktıları, (a) SEM Görüntüsü, (b) AFM Görüntüsü, (c) EDAX Grafiği [10]	63
Şekil 5.6 Kütlece (a)%7 CB (b)%17 CB içeren TPU/CB kompozitlerinden elde edilen empedans analizleri, fazör ve genlik ölçümleri [11]	65
Şekil 5.7 TPU/CB Kompozite ait (a)SEM, (b)AFM Görüntüleri, (c)FTIR Grafiği [11]	66

Şekil 5.8	Üretilen FET Kanal Yapısının Optik Mikroskop Görüntüsü	69
Şekil 5.9	Grafen ve Bakır Elektrotun I-V grafikleri.....	71
Şekil 5.10	PI üzerinde oluşan grafen plakaların raman spektroskopisi	72
Şekil 5.11	PDMS/CB Kompozit Yarıiletken Katmanına Sahip FET'in I-V Grafiği	73
Şekil 5.12	TPU/CB Kompozit Yarıiletken Katmanına Sahip FET'in I-V Grafiği .	74
Şekil 5.13	Reçine/CB Kompozit Yarıiletken Katmanına Sahip FET'in I-V Grafiği	76
Şekil 5.14	(a) Oluşturulan 3x5 matris yapısı, (b) Yarıiletken katman eklenmiş transistör matris, (c) Basınç sisteminde kullanılan değişik desenlere sahip küp.....	77
Şekil 5.15	(a) Daire, (b) Üçgen, (c) Kare, (d) Yıldız Desenleriyle Uygulanan Ağırlığın Oluşturduğu Normalize Akım Değişimleri	78
Şekil 5.16	Dokunsal Sensörün Şekillere Bağlı Olarak Anlık Gerçekleşen En Yüksek Akım Değişimi	80

KISALTMALAR

BJT	: B ipolar J unction T ransistor (Bipolar Eklem Transistörü)
IGBT	: I nsulated G ate B ipolar T ransistor (İzole Kapılı Bipolar Transistör)
FET	: F ield E ffect T ransistor (Alan Etkili Transistör)
TFT	: T hin F ilm T ransistor (İnce Film Transistörü)
MOS	: M etal O xide S emiconductor (Metal Oksit Yarıiletken)
JFET	: J unction F ield E ffect T ransistor (Birleşim Yüzeyle Alan Etkili Transistör)
MOSFET	: M etal O xide S emiconductor F ield E ffect T ransistor (Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör)
IC	: I ntegrated C ircuit (Entegre Devre)
HOMO	: H ighest O ccupied M olecular O rbital (En Yüksek Dolu Moleküler Orbital)
LUMO	: L owest U noccupied M olecular O rbital (En Düşük Dolu Olmayan Moleküler Orbital)
PCC	: P olymer C onductor C omposite (Polimer İletken Kompozit)
AR-GE	: A raştırma - G eliştirme
3D	: 3 D imension (3 Boyutlu)
PI	: P olyimide (Poliimid)
PVA	: P olyvinyl A lcohol (Polivinil Alkol)
TPU	: T hermoplastic P olyurethane (Termoplastik Poliüretan)
PDMS	: P olydimethylsiloxane (Polidimetilsiloksan)
PMMA	: P olymethyl methacrylate (Pleksi)
PLA	: P olylactic A cid (Polilaktik Asit)
CB	: C arbon B lack (Karbon Karası)
CNT	: C arbon N anotube (Karbon Nanotüp)
ITO	: I ndium T in O xide (İndiyum Kalay Oksit)
SWCNT	: S ingle- W alled C arbon N anotube (Tek Duvarlı Karbon Nanotüp)
MWCNT	: M ulti- W alled C arbon N anotube (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp)

MEMS	: Micro Electro Mechanical Systems (Mikroelektro-mekanik Sistemler)
LED	: Light-Emitting Diode (Işık Yayımlayıcı Diyot)
CPU	: Central Processing Unit (Merkezi İşlem Birimi)
MCU	: Micro Controller Unit (Mikrodenetleyici)
ADC	: Analog Digital Converter (Analog Dijital Çevirici)
CMOS	: Complementary MOS (Tümleyici MOS)
OFET	: Organic FET (Organik FET)
AFM	: Atomic Force Microscope (Atomik Kuvvet Mikroskobu)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
FTIR	: Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)
NIR	: Near Infrared (Yakın İnfrared)
MIR	: Middle Infrared (Orta İnfrared)
FIR	: Far Infrared (Uzak İnfrared)
EDAX	: Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi)
GF	: Gauge Factor (Gerinim Faktörü)
DMF	: Dimethylformamide (Dimetilformamid)
DMSO	: Dimethyl Sulfoxide (Dimetil Sülfoksit)
THF	: Tetrahydrofuran (Tetrahidrofur)
PVD	: Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
SLA	: Stereolithography (Stereolitografi)
DLP	: Digital Light Processing (Dijital Işık İşleme)
SLS	: Selective Laser Sintering (Seçkili Lazerli Sinterleme)
FDM	: Fused Deposition Modeling (Eriyik Biriktirmeli Modelleme)
TP	: True Positive (Gerçek Pozitif)
TN	: True Negative (Gerçek Negatif)
FP	: False Positive (Yalancı Pozitif)
FN	: False Negative (Yalancı Negatif)
RF	: Random Forest (Rastgele Orman)

KNN	: K-Nearest Neighbor (K-En Yakın Komşu)
TC	: Top Contact (Üstten Kontaklı)
BC	: Bottom Contact (Alttan Kontaklı)
TG	: Top Gate (Üstten Kapılı)
BG	: Bottom Gate (Alttan Kapılı)
SS	: Subthreshold Swing (Eşikaltı Salınımı)
RPM	: Revolutions Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)
VISA	: Virtual Instrument Software Architecture (Sanal Ortam Yazılım Mimarisi)



1. GİRİŞ

Esnek elektronik, elektronik uygulamalarının sınır tanımayan bir yaklaşım kazanmasıyla birlikte ortaya çıkmış, belli şekil ve yapıların ötesine geçilmesini hedefleyen elektroniğin alt çalışma kollarından biridir. Bu çalışmalar kapsamında araştırmacılar esneme, dayanım, kullanım yüzeyi, doğaya dönüşümünde oluşabilecek atık miktarı gibi elektronik endüstrisinde problemlili görülen birçok sorunu aşmayı hedeflemektedirler. Kullanılan devre elemanlarının (entegre devreler, kapasitörler, dirençler, antenler vb.) sert ve sabit yapıları, tüm devrenin rijit baskı devre üzerinde yerleştirilerek kullanılmasına neden olmaktadır. Bu durumda kısıtlı alanlara daha fazla çevresel bileşen yerleştirip bir kutu içerisinde muhafaza etme gibi zorunluluklar ortaya çıkmaktadır. Ancak en ufak devre elemanından, kompleks yapıdaki entegre devrelere, esnek yüzeylere (plastik, polimer türevleri gibi) uygulandığında, alttaş sınırı ortadan kalkacak buna bağlı olarak kullanım alanları da genişleyecektir. Ek olarak koruyucu kaplamaların polimerik bağları içerisinde güvende kalabilecektir. Biyo-uyumlu materyal tercihleriyle ise elektronik atık miktarı azaltılacaktır, doğa dostu aygıtlar üretilebilecektir. Elektronik endüstrisinin üretimindeki su miktarlarında iyileştirmelere gidilecektir. Daha ötesinde insan vücuduna tam uyumlu organlar ve eklentiler yapılabilecektir. Bu süreç doğası gereği, sert ve stabil yapıdaki elektronik devre elemanlarının gelişiminde yaşanan sürece benzer şekilde ilerlemektedir. Pasif devre elemanlarının üretimiyle hızlanan esnek elektronik uygulamaları, aktif devre elemanlarının optimal şekilde üretilmeye çalışmasıyla ivmesini artırarak devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında da elektronik sektörünün mihenk taşlarından biri olan transistörün esnek olarak gerçekleştirilmesi, optimize edilmesi ve üretim maliyetlerinin olabildiğince düşürülmesi hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda inilebilecek en küçük birim, hızlı uygulanabilir ev yapımı yöntemlerle elde edilmeye çalışılmıştır. Çünkü nano boyutlara inildikçe üretim alanının temizliği, izolasyonu ve üretim yöntemi o derece zorlaşmaktadır. Çalışma dahilinde mikron seviyelerinde üretimi gerçekleştirmiş ve yeni üretim yaklaşımlarıyla maliyet azaltılmıştır.

Birçok farklı elektronik devre elemanı esnek elektronik devre elemanı olarak da kullanılmaya

başlanmıştır. Özellikle temel elektrik ve elektronik kavramları olan, direnç ve kapasitansın mekanik etkiyle ilişkilendirilmesi sonucu sensörler ve eyleyiciler ortaya çıkmaktadır. Bu ürünler robotlara ve otonom sistemlere hızlıca uygulanabilmektedir[12–14].

Transistörler genel bir grubu ifade etmek için kullanılan bir terimdir. Bu başlık altında, bipolar eklem transistörleri (BJT), izole kapılı bipolar transistör (IGBT) ve alan etkili transistörler (FET) incelenebilir. IGBT, izole kapılı bipolar transistör, tek bir güç transistörü ve kapı bölümünde metal oksit yarıiletken (MOS) yapısının birleşimidir. IGBT'ler, yüksek voltajlı, yüksek akımlı uygulamalar için uygundur. Giriş gücü düşük olsa dahi yüksek güç gerektiren sistemleri çalıştırmak amacıyla üretilmiştir. BJT'ler, çift kutup yüzeyli transistörler, PN bağlantı birleşiminden meydana gelmiş bir transistör türüdür. FET'ler tek kutuplu bir aygıt iken, BJT'lerin çalışması iki yük taşıyıcısı (elektronlar ve delikler) içermesiyle gerçekleşir. Alan etkili transistörlerde ise izole edilmiş kapı sayesinde oluşturulan elektrik alan kontrolüyle diğer iki terminal arasında yük geçişi sağlanır. FET'ler de kendi içinde alt başlıklara ayrılmaktadır, birleşim yüzeyli alan etkili transistör (JFET), metal oksit yarıiletken alan-etki transistörü (MOSFET). Çalışmamız kapsamında alan etkili transistör yapısı incelenmiştir, matematiksel yaklaşımlar ve hedeflenen üretim bu amaçta gerçekleştirilmiştir. FET'lerde kapıdan elektrik akımı çok düşük seviyelerde olurken, anahtarlama kabiliyeti yüksek ve düşük gerilimlerle de sağlanabilmektedir. Esnekliğin, elektriksel karaktere etkisi direk olabilmekte buna bağlı olarak uygulamalar değişiklik göstermektedir[15]. Dış etkiyle elektriksel karakter (direnç, kapasitans, potansiyel fark) değiştiği durumlarda algılama operasyonlarında kullanımı çok daha uygun olurken, elektriksel etkiler ile şeklinde meydana değişiklik gelen elemanlar ise eyleyici olarak uygulama alanına sahiptir. Bu çalışmalar yanında sürtünme ile elektriklenebilen materyaller de esnek elektronik uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir, böylelikle kendi enerjisini üretebilen ve uzun çalışma ömrüne sahip, farklı yüzeylere uygulanan devre elemanları üretilmektedir[16]. Esnek FET'in dokunsal algılama operasyonlarında kullanımı incelenmiştir, bu sayede iletim kanalında oluşan genleşme veya daralmalar akış akımına bağlı olarak algılanmakta, uygulanan kapı gerilimine bağlı olarak algılama hassasiyetinde değişimler meydana gelmektedir.

FET'lerin bileşenleri temel olarak şu şekilde ifade edilebilir; elektrotlar, kapı dielektrik materyali, akaç ve kaynak elektrotları arasında yer alacak bir yarıiletken. Bu üç temel bileşen farklı şekilde konumlandırılarak farklı topolojilerde FET'ler oluşturulabilmektedir. Kapı elektrodu üstte veya altta olunca topoloji değişirken, yarıiletken katmanın akaç ve kaynak elektronlarına alttan veya üstten temas etmesine göre de değişkenlik meydana gelmektedir. Bu şekilde dört farklı yapıda transistör oluşturmak mümkün hale gelmektedir. Bu çalışma kapsamında alttan kapılı FET tercih edilmiştir. Hedefler doğrultusunda üretilen esnek FET ile dokunsal etkilerin algılanması gerçekleştirilmiştir.

1.1. Tezin Kapsamı

Bu tezde temel olarak, optimal üretim yöntemleri, düşük üretim maliyetleri sonucu ortaya çıkmış bir alan etkili transistörün algılama operasyonlarında kullanımı incelenmiştir. Esnek yapıda olan FET'in üretiminde en düşük seviyede atık oluşması hedeflenerek organik makromoleküller tercih edilmeye gayret edilmiştir. Performans kriterlerinin karşılaştırılması açısından sentetik polimerler de uygulamaya tabii tutulmuştur. Üretilen esnek transistörün karakterizasyonu, üretim aşamasında yapılan değişiklikleri ve günümüz üretim şartlarına göre getirileri bu tez kapsamında verilmiştir. Ayrıca FET'i oluşturan her bir katman ayrı şekilde düşünülüp, üretilmiştir. Buna bağlı aktif kanalın olduğu yarıiletken katmanın elektriksel özellikleri incelenirken, enerji bant seviyelerindeki değişiklik göz önünde bulundurulmuştur. Elektriksel iletkenlik ve bant enerjilerinde değişim ilişkilendirilerek, katkı materyaline bağlı olarak düşen direnç değerlerinin bilgisayar ortamında benzetimi hayata geçirilmiştir. Temel olarak tüme varım yaklaşımlarıyla, esnek transistörü oluşturan her bir elemanın karakterizasyonu, optimale ulaştırılması için deneysel çalışmaları ve doğaya dostu teknolojiler için bir çıkış noktası oluşturulmak istenmiştir. Çünkü bilinmektedir ki, transistörün keşfedilmesiyle birlikte dijital mantık devrelerinin ve bilgisayarın gelişim süreci başlamıştır. Benzer şekilde esnek elektronik çalışmalarının ivmesini artıracak deneylerin, transistör üretimiyle olacağı düşünülmektedir. Tüm bu çalışmanın sonucu olarak FET sensör ile elde edilen verilerin sınıflandırma uygulamasıyla yapılmıştır. Sensör üzerinden kaydedilen akım değerlerine bağlı olarak nesne şekilleri tespit edilebilmiştir.

1.2. Katkılar

Bu çalışma kapsamında basit bir üretim metoduyla, kompleks işlemler gerçekleştirebilen bir tasarım ortaya konmaktadır. Bunun ötesinden üretilen algılama biriminin sürdürülebilir esnek elektronik yaklaşımıyla gerçekleştirilmesi, günümüzde süren çip krizi gibi sorunların kolaylıkla üstesinden gelinmesi için de bir adım olacaktır. Dijital elektronik entegre devrelerinde temel birim FET'ler olup, bir araya gelmesiyle entegre devreler (çipler) ortaya çıkmaktadır. Endüstride silisyum plakalar üzerindeki birçok üretim basamağına buna bağlı olarak, yüksek su kullanımı ve atık madde oluşumuyla gerçekleşmektedir. Buna rağmen günümüzde entegre devrelere olan talep, arz edilenden çok daha yüksek seviyelerdedir. Buna bağlı olarak çip tedarik krizi de devam etmektedir. Karbon ayak izi günden güne evrensel sorun haline gelirken, tedarikte yaşanan sorunların da artışıyla daha kolay, düşük maliyetli üretim yöntemleriyle çok az atık oluşturacak şekilde doğa dostu aygıtlar oluşturmak bu tez kapsamında amaçlanmıştır. Tüm bu motivasyon ve bakış açısıyla üretim esnasında kompozit materyallerin uygun elektriksel karaktere ulaşması için gereken deneysel süreçlerin takviye malzemesinde atık miktarını artırdığı düşünülerek, benzetim ortamında sızıntı eşiği (İng. percolation threshold) adı verilen etkinin oluşumu dahi modellenmiştir. Böylelikle dene-yanıl gibi deneysel çalışmaların temeli olan yaklaşımlar da üretim basamaklarında indirgenerek; daha hızlı süreçlere geçilmiştir. Üretim esnasında kullanılacak katkı materyali (karbon parçacıkların) israfının da önüne geçilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın birden fazla basamaktan oluşması, üretim ve tasarım süreçlerinde çok farklı tekniklerin karşılaştırılıp, uygun olanının belirlenmesi adına da birçok çıkarıma sebep olmuştur. Farklı kapı, kanal konfigürasyonu ve topolojilerindeki FET'lerde üretim yöntemlerinin uygulanabilirliği de değişmekte, bu sebeple üretim-uygulama sonucu da bu tez kapsamında ortaya konulmaktadır. Sonuç olarak ortaya çıkan esnek elektronik aygıt ise dokunsal algılama amacıyla yapay deri uygulamalarında dahi kullanılabilecek bir tasarım olup, birçok elektronik alt dalında hem uygulama hem de araştırma konusu olabilmektedir. Çalışmada FET üretimi ve karakterizasyonu dışında uygulamalarda kullanılabilirliği de incelenmiştir.

Tüm bu hedefler doğrultusunda elde edilecek çıktılar ve getirileri şu şekilde sıralanabilir:

- Kolay üretilebilir, uygulanabilir ve tekrarlanabilir en uygun üretim yönteminin belirlenmesi,
- Üretim basamaklarının azaltılması ve simülasyon ortamına taşınması,
- Esnek elektronik temel bileşeni olan FET tasarımı, karakterizasyonu,
- FET'i oluşturan bileşenlerin karakterizasyonu,
- FET ile algılama operasyonunun gerçekleştirilmesi,
- Dokunsal algılama uygulamalarında tasarımın kullanılması,
- Sürdürülebilir elektronik konseptine uygun çıktılar ortaya konulması

sağlanmaktadır.

1.3. Tezin Akışı

Tezin genel akışı ve organizasyonu şu şekildedir:

- Bölüm 1, tezin yapılma amacı, motivasyonu, getirileri, kapsamı
- Bölüm 2, tezi oluştururken ve takip ederken bilinmesi gereken temel yaklaşımlar ve yöntemler
- Bölüm 3, literatürde yapılan çalışmalar
- Bölüm 4, tezin çıktısı olacak FET'in tasarımında kullanılan yöntemler, topolojiler ve süreçte kullanılan simülasyon algoritmaları
- Bölüm 5, sonuçlar
- Bölüm 6, tez çalışmasında elde edilen verilerin kısa bir şekilde bir araya getirilmesi, çözümlenmesi ve gelecek çalışmalara dair bilgiler

2. GENEL KAVRAMLAR VE TEORİK ALTYAPI

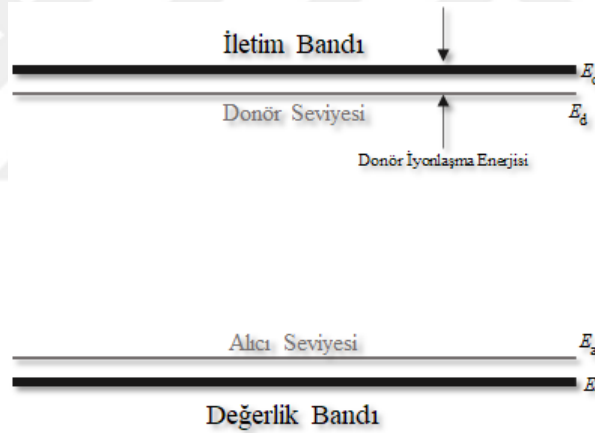
2.1. ENERJİ BANT ARALIĞI VE İLETKENLİK

Katı hal elektronik yaklaşımı ve moleküler yaklaşım açısından enerji bant kavramı farklı perspektiflerden değerlendirilmektedir. Bu tez kapsamında elektron hareketi ve hareketin gerçekleştiği ortam (polimerik matris ağı) düşünüldüğünde, moleküler orbitlerdeki elektron hareketleriyle, elektron-delik değişimi birlikte incelenmiştir.

Temel fizik öğretileriyle bakıldığında elektronikte de kullanılan yarıiletkenlerin kristal yapıda olduğu ve Miller indis adı verilen, abc koordinatlarına göre atomik dizilimini ifade eden bir yaklaşım söz konusudur[8]. İlk transistörün üretildiği germanyumda da kristal bir yapı mevcuttu ve elmas şeklindeydi. Sıcaklık değişimi gibi etkiler, kovalent bağ yapmış olan elektronların gevşeyip iletim elektronları olarak rol oynamasına sebep olacaktır. İletim elektronları kristal içinde hareketli olup, akım oluşumunu sağlamaktadırlar. Bu nedenle, çalışma prensipleri incelendiğinde değerlik elektronlarından daha aktif rol oynarlar. Öte yandan hareket eden elektron arkasında bir boşluk oluşturur ve buna delik adı verilir, deliklerin elektron kabul etme kabiliyeti yüksek olup elektrik akımının iletiminde rol oynayan diğer faktördür. Saf halde gerçekleşebilen bu etkilerin miktarı, dışarıdan yapılacak müdahale ile değiştirilebilir. Sonuçta safsızlık adını alır. Bu sayede elektron alma veya verme kabiliyetlerindeki değişim ile yarıiletkenlere ait bir tip belirtmek mümkün olur. Arsenik (As), Fosfor (P) donör adı verilen saflık değiştirici katkılamalar yapılabilir. Donör yapıdaki elementler katkıldığında, elektron verme kabiliyeti artar ve N-tipi olarak ifade edilen yarıiletkenler meydana gelir. Diğer taraftan elektron alma eğiliminde olan alıcı, Boron/Bor (B), katkılanmasıyla P-tipi yarıiletkenler oluşturulur.

Yarıiletken aygıtları anlamak için en kullanışlı model, enerji bant modeli olarak ifade edilmektedir. İki atomun birbirine göre konumları yakınsa Pauli dışlama ilkesi şunu ifade eder: “Her bir kuantum durumunda tek elektron yer alabilmektedir.”[17]. Bu da enerji seviyesinin ikiye bölünerek ifade edileceği anlamına gelmektedir. Oluşan iki bantta elektron dağılımı doğal olarak düşük enerji seviyesinde fazla olacak şekilde gerçekleşmektedir. Enerji

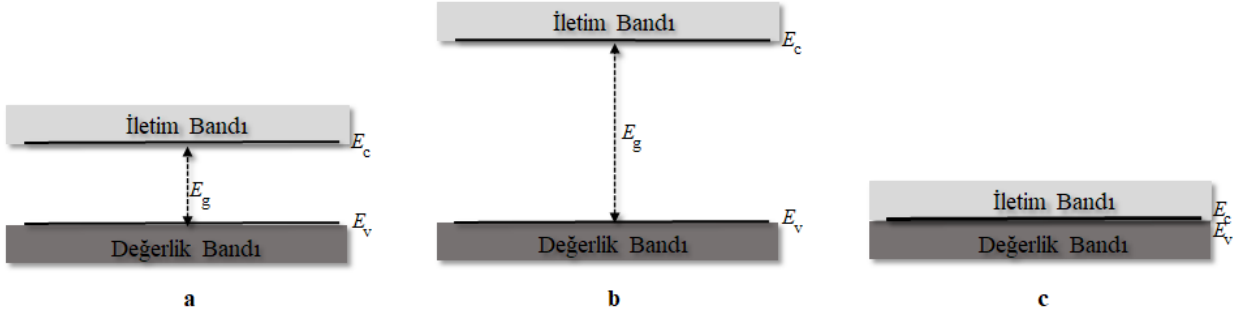
seviyesi düştükçe, banttaki elektron doluluk oranı o kadar artmaktadır. Bir yarıiletkende ise, enerji bantlarının mutlak sıfırda tamamen dolu olduğu ifade edilmektedir, yüksek enerji bantlarında ise durum tam tersi olup tamamen boştur. En üstteki hemen hemen tam dolu olan bant değerlik bandı, en alttaki tam olarak boş kabul edilebilecek bant ise iletim bandı olarak adlandırılır. Bu iki bant arasındaki boşluğuna bant açıklığı adı verilir. Enerji bant diyagramı ise bu ilişkinin ve bant açıklığı enerjisinin görsel olarak ifade edilmesidir. $E_g = E_c - E_v$ eşitliği ile bant açıklığı enerjisi elde edilebilir, E_c iletim bandının enerjisini, E_v ise değerlik bandının enerjisini seviyesini ifade etmektedir. Buna ek olarak elektron verme ve alma eğilimi bant modelinde gösterilmektedir. Bu seviyeler ile elektron vermek için gereken en düşük enerji seviyesi veya elektron alırken inilmesi gereken enerji seviyesinin neler olduğu yorumlanabilmektedir. Safsızlığa neden olan atomların sığ seviyeleri olarak da ifade edilirler ve oldukça düşük değerlerdedir[8]. Enerji bant seviyeleri ve ilişkileri Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Donör, Alıcı, İletim ve Değerlik Bandı Enerji İlişkileri

Kompozit yapılarda ise katkı malzemesinin karakterine bağlı olarak, direnci üzerinden yola çıkarak yapılan sınıflandırma ile enerji seviyelerinde ilişki kolaylıkla kurulabilmektedir, metot kısmında bu ilişkiye yer verilmiştir. Öte yandan bant açıklığı enerjisi arttıkça iletim kabiliyeti düşmekte yalıtkan olarak tanımlanmakta, bant daraldıkça iletken formuna dönüşmektedir. Yarıiletken, iletken ve yalıtkan materyallere ait enerji bant seviyeleri Şekil 2.2’de verilmiştir. Kompozitlerin tümüne bakıldığında katkılanan dolgu malzemesinin en-boy oranına, miktarına ve elektron verme kabiliyetine göre bant seviyesi değişirken, polimerler üzerinden kuantum tünelleme ve elektron atlama şartları da diğer bir engel

olarak ortaya çıkmaktadır. Uygun karaktere ulaşmak adına sızıntı eşiği kavramı üzerinden yarıiletken karakterin başlangıç noktası tespit edilip, oluşturulan FET'lerin aktif katman tasarımı bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir.



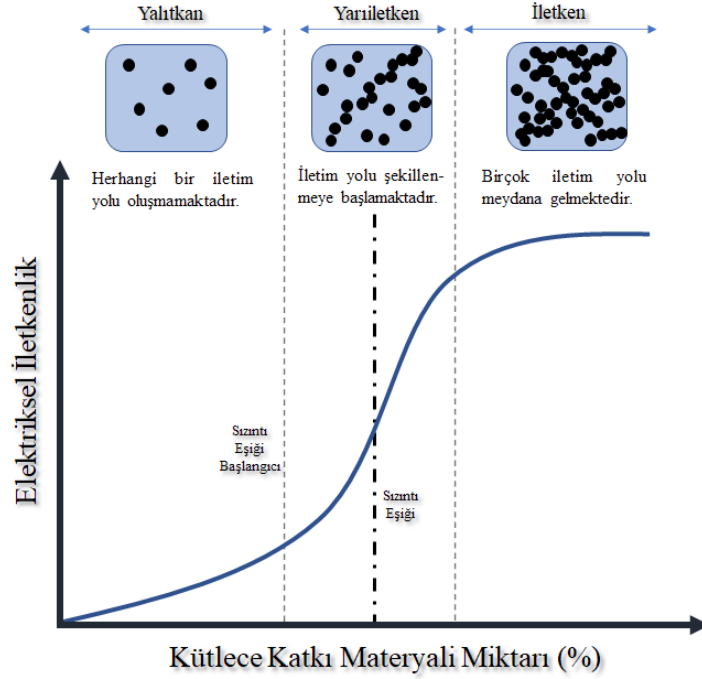
Şekil 2.2 Yarıiletken, Yalıtkan ve İletkenlere ait Enerji Bant Seviyeleri

Kimya penceresinden bakıldığından en yüksek dolu moleküler orbital (İng. highest occupied molecular orbital-HOMO) ve en düşük dolu olmayan moleküler orbitaldir (İng. lowest unoccupied molecular orbital-LUMO). İki enerji seviyesi arasındaki fark HOMO–LUMO açıklığı olarak verilmektedir. Organik molekül boyutunda bakıldığında, moleküler orbitaller ile atomik orbitallerin doğrusal olarak birleşimi şeklinde ifade edilmektedir[18]. Organik kimyada reaksiyonların moleküler bazda oluşu ve çalışılan miktarın az olmasından kaynaklı küçük hacimlerde tek bir HOMO'dan, veya tek bir LUMO'dan bahsetmek mantıklıdır. Molekül büyüklüğü arttıkça yörünge sayısı artar. HOMO ile LUMO arasındaki fark buna bağlı olarak azalabilir, ancak genel yaklaşımda tüm yapı hala moleküldür ve sonludur. İnorganik yaklaşımda ise, katı malzemeler genellikle kristal yapıda kabul edilir; kristallik tanımına bağlı olarak sonsuz uzantıları varmış gibi düşünülmektedir. Bu nedenle belirli seviyelerin çok sayıda bant içerdiği bilgisi verilmektedir. Bu yaklaşımlar zincir uzunlukları ve atomik dizilimleri nedeniyle polimerler ve karbon nanotüpler gibi organik yapılarda farklılık göstermektedir. Ancak genel olarak iki yaklaşımda da benzer ilişkiler ifade edilmektedir. Organik moleküller belli büyüklüklere ulaştıkça, HOMO/LUMO gösterimleriyle iletim ve değerlik bantları arasında fark azalmaktadır[19].

2.2. SIZINTI EŞİĞİ VE YARIİLETKENLİK

Kompozit malzemeler ile elektronik devreler tekrar şekillenmektedir. Esnek elektronik çalışmaları artarken uygulamaları da gün geçtikçe hayatımızda yer almaya başlamıştır. Sensör uygulamaları, kompozit malzemelerin sıkça tercih edilen çalışma konularından biridir. Sensörler biyomedikal sinyal işleme uygulamaları[20], robotik uygulamaları[21], rf-uygulamaları[22] gibi elektronik uygulamalar altında değerlendirilebilecek daha birçok uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Bu kadar geniş kullanım ve araştırma alanına sahip olan polimer iletken kompozitlerin (İng. Polymer Conductor Composite, PCC) araştırma geliştirme (AR-GE) maliyetleri de yüksek olabilmektedir. Özellikle dene-yanıl yöntemi kullanıldığı durumlar atık malzeme miktarı artmaktadır. Kompozit malzemelerin benzetimleri ve modellenmesi de bu sorunun üstesinde gelinecek bir çözüm olup, üretim maliyetlerini ve üretim süresini kısaltmak için kullanılmaktadır. Ancak markalaşmış ticari ürünlerde PCC'ler için karakter analizi yapılamamakta çünkü taşıyıcı miktarı ve elektriksel karakterleri üretimine, katkı materyaline ve katkı materyalinin yönelimine bağlı olarak değişmektedir[23, 24]. Benzetim programlarında kullanmak için de karakterizasyon yapılması, temiz oda gibi ulaşılması kolay olmayan ortamlardan ölçüm sonuçları elde etmek gerekmektedir. Bu noktada birkaç farklı yaklaşım ile olasılıksal dağılım fonksiyonları yardımıyla da modelleme işlemleri gerçekleştirilmeye çalışılmıştır[25]. Benzetimler ile eşik değerlerine karar verilebilmekte, ayrıca iletken kompozitlerin elektriksel karakterinin belirgin hale gelmesi için bu değer üzerinde dolgu malzemesi eklemesi gerekebilmektedir. Sızıntı eşiği olarak ifade edilen bu değere karar vermek, günümüzde yüksek hızlı bilgisayarların kullanılmasıyla mümkündür. Aksi takdirde benzetimler üretim öncesi aşamalarda zaman maliyetinde en yüksek paya sahiptir. Bu tez kapsamında, yukarıda verilen tüm kısıtlamaların üstesinden gelmek için deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırırken, kompozitin sızıntı eşiğinin belirlenmesi için en hızlı benzetim algoritmasını bulmak için farklı en kısa yol bulma algoritmaları kullanılmıştır.

Rastgele dağılmış katkı malzemesine sahip uzun kanallar halinde bağlantılar matematiksel bir yaklaşım olan sızıntı teorisiyle tanımlanır. Sızıntı eşiği de bu yaklaşımda önemli bir ara



Şekil 2.3 Sızıntı Katkı Materyal Miktarı İlişkisi ([2]'den esinlenilmiştir.)

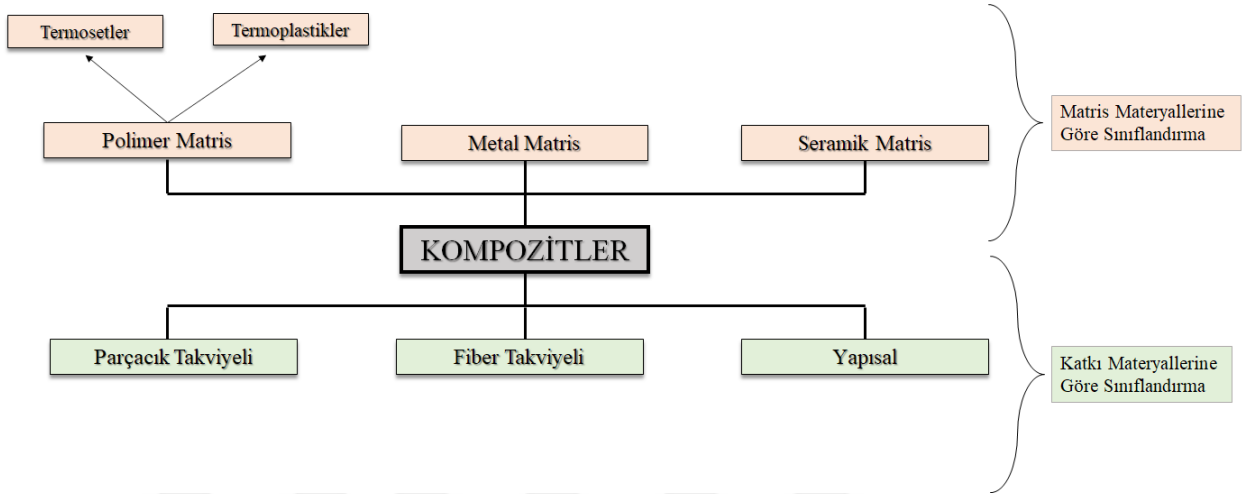
değerdir. Eşik değeri aşılmayınca bir bağlantı meydana gelmezken; eşik değeri üzerinde sistem boyutunda bir iletim ve bağlantı söz konusudur. Şekil 2.3'te bu geçiş gösterilmektedir. Mühendislikten, nanoteknoloji uygulamalarına, mutfak sanatlarına kadar birçok alanda sızıntı delikli yapılardan geçiş ile ifade edilmektedir, bunu matematik ve fizik tabanlarında ifade etmek için rastgele dağılan parçacıkların veya ağların indirgenmesi, kristal yapılar halinde incelenmesi söz konusu olmaktadır. Elektriksel iletim olarak sızıntı eşiğine ulaşıldığı noktada artık iki nokta arasında elektron atlama mümkün hale gelmektedir. Bu düşük de olsa bir iletkenlik mevcut yorumunu yapmamızı sağlamaktadır. Dolgu miktarı arttıkça eşik değerinden uzaklaşılır ve iletken olarak adlandırabileceğimiz bir karaktere ulaşılır, doyum gerçekleşir. İşte bu geçiş evresinde iletkenlik veya direnç değerleri incelendiğinde materyalin yarıiletken yapıda olduğu; tüm kompozit için incelendiğinde de enerji seviyeleri açısından yarıiletken özellikleri ortaya koyduğu gözlenmektedir. Genelde dolgu malzemelerinin birbirine doğrudan teması gerçekleşmemektedir. İletim olması için belli bir potansiyel gerilim uygulanır. Potansiyel etki sayesinde elektronlar kuantum tünelleme engeli veya direnci olarak adlandırılan bariyeri geçerek iletim sağlanır. Düşük gerilimde ise titreşen

elektronlar tünelleme bariyerini aşamayıp çarpıp geri döner[26, 27]. Matristeki parçacık miktarı arttıkça birçok iletken yol açılabilme ihtimali oluşur. Kuantum tünelleme engeli, parçacıklar arası mesafe, polimer matrisin özelliklerine ve uygulanan gerilime bağlıdır. Sızıntı eşiği, örgü yapısına, referans parçacığın sahip olduğu komşu parçacık sayısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu eşiğin altında ve üstünde bulunan değerler elektriksel olarak zıt özellikler gösteren kompozitler oluşturmaktadır. Sızıntı eşiğinin benzetim ile belirlenmesi, kullanılacak katkı malzeme miktarını deney öncesi kestirebilmeyi, buna bağlı olarak üretimlerin gerçekleştirilebilmesini sağlayacaktır[28]. En kısa yol bulma algoritmalarına elektronların tünelleme kabiliyetini bir kısıt olarak girip, dolgu miktarını artırarak deneysel çıktılar ile sonucu kontrol edilirse sızıntı eşiğinin başlangıç noktası kolaylıkla tespit edilebilecektir.

2.3. KOMPOZİTLER

Birden fazla malzemenin fiziksel veya kimyasal birleşimiyle meydana gelen ve yeni bir karaktere sahip materyallere kompozit materyaller denmektedir[29]. Kompozitler genellikle iki bileşenden oluşurlar, bunlar matris ve katkı (dolgu) malzemesidir. Matris malzemesi, Katkı malzemesine belli bir şekil vererek tutucu özellik gösterir. Katkı malzemesinin miktarı ve karakteristik özellikleri ise kompozite özgü davranışlar oluşturmaktadır. Dayanım, esneklik, elektriksel iletkenlik gibi daha birçok özellik katkı malzeme miktarı ve cinsine bağlı olarak değişmektedir. Kompozitler, katkı materyalleri şekil ve matris morfolojisine göre, parçacık-katkılı (İng. particle-reinforced), fiber-katkılı (İng. fiber-reinforced) ve yapısal olarak gruplara ayrılmaktadır[30]. Diğer taraftan kullanılan matrislerin fazlarına göre sınıflandırılmaktadır. Bu yapı da, polimer matris kompozitler, metal matris kompozitler ve seramik matris kompozitleri olarak alt birimlere ayrılmaktadır. Kompozitlerin sınıflandırılması Şekil 2.4'te verilmiştir. Bu tez kapsamında karşılaştırma ve anlatım yapılırken, matris materyallerine göre sınıflandırma baz alınmaktadır. Çünkü katkı yöntemleri kimyasal ve mekanik etkilerin birleşiminden meydana gelirken, esnek yapıların oluşması için polimer matris olarak tercih edilmiştir. Oluşturulan kompozitler aynı tür katkı malzemesiyle gerçekleştirilirken farklı matris polimeriyle karşılaştırılmalı sonuçlara

ulaşılmıştır. Matris polimerinin elektriksel özellikleri, oluşturulan yarıiletken katmanın belirlenmesi konusunda belirleyici husus olmuştur.



Şekil 2.4 Kompozitlerin Sınıflandırılması ([3, 4]'ten esinlenilmiştir.)

2.3.1. POLİMER MATERYALLERİ

Bu çalışma kapsamında elektrotlar bakır, kapı dielektrik materyali de poliimid (PI) film olarak tercih edilmiştir. Akaç ve kaynak terminalleri arasındaki geçişin sağlanacağı kanal yarıiletken katman üzerinden gerçekleştirileceği için burada farklı polimerlerin karakterleri ve elektriksel etkiye tepkileri incelenmiştir. Bu nedenle polivinilalkol (PVA), termoplastik poliüretan (TPU), reçine, polidimetilsiloksan (PDMS) katkılanarak testlere tabii tutulmuştur.

2.3.1.1. Polivinilalkol Renksiz kokusuz yapıda olan bu polimer, çözücüsünün su olması nedeniyle kolaylıkla katkılanabilmektedir. Bu sayede uygulama alanı geniş olup, üç boyutlu (3D) baskı elemanı olarak da tercih edilmektedir. Biyo-uyumlu ve düşük toksik oluşundan, biyomedikal uygulamalarında kullanımına yer verilmektedir[31]. Monomer yapıdan sentezlenmesi esnasında katkılama yapıldığında daha homojen dağılım elde edilebilirken, uygun ısı işlem ve mekanik karıştırma yöntemleriyle de polimer yapıdaki PVA zincirleri arasına katkı materyali yerleştirilebilmektedir.

2.3.1.2. Termoplastik Poliüretan Termoplastik poliüretanlar üç monomer materyalin blok olarak oluşturduğu bir kopolimerdir. Farklı sertliklerde üretilebilen ve geniş kullanım alanına sahip bu kopolimer, eklemeli üretim uygulamalarında da sıkça tercih edilmektedir. Organik çözücüler ile kolaylıkla polimer zincirleri modifiye edilebilir ve çapraz bağlar içermektedir[32]. Buna bağlı olarak polimerin elastiklik kabiliyetinde, mekanik dayanımında veya ultraviyole (UV) ışığa duyarlılığında farklılıklar meydana gelebilmektedir.

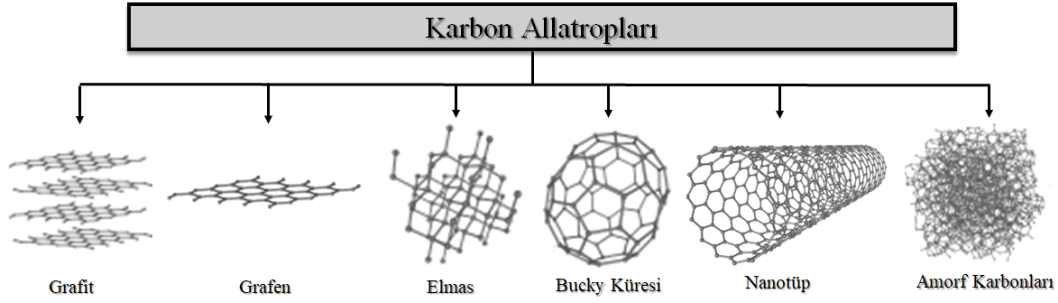
2.3.1.3. Reçine Doğal organik makromoleküllerden meydana gelen reçineler, aslında viskoz bitki salgılarından oluşmaktadırlar. Bu organik salgılar, polimerleştirilerek esnek elektronik uygulamalarında kullanılabilmektedir[33]. 3B üretim yöntemlerinden stereolitografi (SLA) ve dijital ışık işleme (DLP) yüksek hassasiyette çıktılar verebilmektedir. SLA ve DLP yazıcılarda baskı materyali olarak fotopolimer reçineler tercih edilmektedir. Bu polimerler, yapılarında bulunan foto başlatıcı (İng. Photo Initiator), monomer ve oligomerin, UV ile indüklenmesi sonucu belli şekil ve formlar kazanmaktadır. Bu sayede katman katman pozlamalar ile bir bütüne ulaşılmaktadır.

2.3.1.4. Polidimetilsiloksan Polidimetilsiloksan (PDMS), dimetilpolisiloksan veya dimetikon olarak da literatürde yer almaktadır. Silisyum grubunun bir elemanıdır. PDMS, dielektrik kabiliyeti, hidrofobik yüzey karakteri ve ısıl dayanımıyla geniş kullanılan alanına sahip silisyum bazlı organik polimerdir[34]. Yüksek saydam karakteri sayesinde kaplama amaçlı kullanımları da oldukça sık gözlenmektedir. Çapraz bağlar oluşturmaya adanmış bir baz (base) ve ajan (agent) karışımı oluşturulmaktadır. Baz:Ajan oranına göre fiziksel karakterleri değişiklik göstermektedir.

2.3.2. KARBON ALLATROPLARI

Kompozitlerin matris yapıları polimerlerden meydana gelirken, katkı materyali ise farklı tipte nano/mikro parçacıklar olabilmektedir. Metal nanoparçacık (gümüş, altın nanoparçacık) katkılı uygulamalar literatürde yer alsa da gelişen biyo-bozunur ve doğa dostu elektronik

aygıt üretiminde karbon tabanlı katkı malzemesi tercihi yükselen trendler arasındadır[35, 36]. Karbon atomların dizilime göre farklı kristal yapılar oluşturmakta, doğada karşımıza farklı formlarda çıkmaktadır. Karbon allatropaları Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5 Karbon Allatropaları ([5]’ten esinlenilmiştir.)

2.3.2.1. Grafit 3 Boyutlu yapıya sahip bu karbon allatropu endüstride hem yakıt olarak hem de yağ olarak tercih edilmektedir. Birden çok karbon levhanının üst üste istiflenmesiyle meydana gelmiş grafitte, katmanlara arasındaki bağlar çok güçlü olmamakla beraber parçalanıp tek katman haline de getirebilmektedir. Bu sayede kristal yapıda olan grafen elde edilebilmektedir. Ancak bu hareketli yapı dayanımda negatif olarak gözüксе de makine yağlarında kullanılarak, levhalar arasındaki hareket sayesinde pozitif çıktıları endüstride yer bulmaktadır[37].

2.3.2.2. Grafen Tek katman olarak bulunan karbon atomlarının bal beteği formunda kristal bir yapıya kavuşmasına grafen adı verilmektedir. 2010 yılı Nobel Fizik ödülüne layık görülen bu karbon formu elektronik endüstrisinde de gözde yatırım ve araştırma konularından biridir. Tek katmanlı yapısından kaynaklı istiflebilir oluşu, katmanlar arası modifikasyona izin vermekte bu sayede süperkapasitörlerde, pillerde, nano ve mikro elektro mekanik sistemlerde (NEMS/MEMS) kullanılmaktadır. Tek katmanlı yüksek dayanıma sahip bu yapılar 120° açılarla sp^2 hibritleşmesi gerçekleştirirken; boşta kalan p_z orbitali sayesinde ekstra elektriksel kabiliyetler kazanmaktadır[38].

2.3.2.3. Nanotüpler Tüp şeklinde olan nano boyutlardaki karbon zincileri de karbon allatropoları arasında yer almaktadır ve tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) olmak üzere iki temel grupta sınıflandırılır. Yüksek boy-en oranına sahip bu karbon allatropu fiber yapılar oluşturabilmektedir. Böylece düşük katkılama miktarlarıyla amorf karbonlara göre daha yüksek elektriksel iletkenlik sağlanabilmektedir[39]. SWCNT ve MWCNT'ler elektro lif çekimi yöntemi ile polimerle katkılanıp nanofiberler oluşturabilmektedirler.

2.3.2.4. Fulleren Bucky Küresi (İng. Buckyball) olarak da adlandırılan bu karbon allatropu, 60 karbon atomuyla meydana gelmiş bir moleküldür. Şeklinde farklılık meydana gelebilir ancak genelde küre şeklinde gösterilmektedir. Boyutları da 1 nanometredir ve C₆₀ olarak formülize edilmiştir. sp^2 hibritleşmesi yine söz konusuysen hegzagonal olarak bir küre meydana getirerek bu bağlar meydana gelmiştir[37].

2.3.2.5. Elmas Elmas, çokça tanınan bir karbon allotropudur. Mekanik dayanımı çok yüksek olan elmanın, yüksek kırılma indisi ve yüksek ışık dağılımı, endüstride tercih sebebi yaparken, görüntüsü ve nadir oluşu takı olarak tercih edilmesini sağlamaktadır[40]. Doğal mineral olarak en sert materyal elmasken, doğadaki başka bir madde elması kesemez, işlenmesi için başka bir elmasa ihtiyaç duyulur[41]. Karbonun en pahalı formu olup, elektronik uygulamalarda pek tercih edilmemektedir.

2.3.2.6. Amorf Karbonlar Amorf karbonlar veya aktif karbonlar spesifik bir dizilim göstermeyen, hala π bağları yapabilecek şekilde aktif olan karbon allatroplarıdır[42]. Amorf karbonlar kendi içinde de birçok alt başlığa ayrılabilir ancak bu çalışmada kullanılan karbon karası (CB) bu ailenin bir üyesidir. Tez kapsamında üzerinde durulacak amorf karbon, CB'dir. Boyutları 10nm-500nm aralığında değişkenlik gösterebilen CB, CNT'ler kadar yüksek en-boy oranına sahip değildir ve genelde çalışmalarda 1 civarında değerlerde olduğu ifade edilmektedir[43]. Bu nedenle aynı elektriksel iletkenliğe erişmek adına, kompozite katılacak CB miktarı CNT miktarından fazla olabilmektedir. Ancak üretimi ve elde

edilmesinin çok kolay olduğu için CB'ler, düşük maliyetli sistemler ortaya koymak için daha uygun bir katkı elemanıdır.

2.4. ESNEK ELEKTRONİK DEVRE ELEMANLARI VE TRANSİSTÖRLER

2.4.1. SENSÖRLER

Algılama işlemi elektronik sinyal üretmek için olmazsa olmaz aşamalardan biridir. Algılanan veriler biyomedikal uygulamaların çıktısı olabilirken, büyük bir veri tabanı elemanı olabilir, ve işleme süreçleri sonrasında anlamlandırılabilir[44, 45]. Veri üretme, kontrol etme ve işleme temel akış basamaklarıdır ve ilk basamakta sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmaların çoğu sensörün yapısal karakterinden öte elde edilen verilere odaklanmış durumdadır. Ancak sert ve sabit yapıdaki cihazlar tüm yüzeylerde ve uygulamalarda kullanıma uygun olmadığından, veri elde etmede oluşacak dar boğaz esnek yapıdaki sensörler yardımıyla aşılabilecektir. Bu noktada araştırmacılar için bükülebilir, esnetilebilir ve katlanabilir algılama birimleri oluşturmak ciddi bir araştırma konusu haline gelmektedir[46].

Sensörler aktif elektronik devre bileşenleri arasında sınıflandırılmaktadırlar. Mekanik[47], kimyasal[48], optik[49] gibi dış etkilerin elektriksel sinyal karşılıklarını çıktı olarak sunarlar. Kapasitans, direnç, indüktans veya empedans değerlerinde değişimler olurken, direk elektriksel potansiyeldeki bir değişim de olabilmektedir. Sensörlerin biyomedikal uygulamalarında, elektronik deri konsepti sıkça çalışılmaktadır. Doğadan ilham alan reseptörler üretme motivasyonundan ortaya çıkmıştır[50]. Ciltte tedavi amaçlı kullanılabilecek bu tasarımlar, algılama yeteneklerini istenen seviyede tutarken, ekstra kabiliyetler kazandırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma kapsamında elektromekanik esnek sensörlere değinilip elektromekanik algılama ilkelerine yer verilmektedir. Çünkü çalışmanın amacı olan dokunsal algılama operasyonu temelde polimer matrislerin hareketi, şekil değiştirmesiyle meydana gelmektedir.

2.4.2. PN EKLEMİ

P-tipi ve N-tipi iki malzemenin birleşiminden oluşan PN eklemi yarıiletken çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. PN eklemeler oluşturduğu fiziksel yapı sayesinde, ışık yayan diyotlar (LED'ler), fotodiyotlar, lazer diyotlar veya güneş hücreleri (fotovoltaik) verimli şekilde uygulanabilmektedir. PN eklemelerini kapsayan çalışmalar hem fotonik hem de elektronikte büyük ilgi görmektedir. P-tipi malzemeler, çoğunluk taşıyıcıları olarak delikler içerir ve elektron alma kapasiteleri, çoğunluk taşıyıcısı elektron olan N-tipi malzemelerden daha yüksektir. Malzeme türleri sıcak nokta probu (İng. hot-point probe) yaklaşımı, Hall Etkisi ölçümü ve Mott-Schottky yöntemi kullanılarak belirlenebilir[51, 52]. Bu tez kapsamında PN eklemi cihazlarının özelliklerinden öte onları oluşturan P ve N tipi malzemelerin karakterizasyonu işlenmiştir. Böylelikle transistör kanal ve aktif katmanlarının karakterini yorumlanabilmektedir. Değerlik ve iletim bantları arasındaki mesafe olarak gösterilen fark, bant aralığı enerjisini ifade eder ve bant aralığının farklı malzemeler kullanarak ayarlanması başlı başına bir çalışma konusudur, bu çalışma dahilinde iletken katkı materyali ile bant karakteri özelleştirilmeye çalışılmıştır. Malzemeye özgü olan Fermi enerji seviyesi, termodinamik etkileri doğrultusunda yük enerjisi bilgisini verir[53]. P tipi malzemelerde, Fermi seviyesi ve değerlik bandı arası fark düşük olup elektron alma özelliği gösterir. N-tipi malzemeler için ise durum tam tersidir. Bu geçiş fotonik etkilerle de oluşabilmekte böylece güneş hücreleri oluşturulmaktadır. Günümüz iletişim teknolojilerinde bant genişliği ve hızlı iletişim gelişirken, teraHertz çalışmaları gibi başlıklar da yükselen trendler haline gelmektedir[54]. Görünür ışık dalga boyuna yakın değerlerde çalışabilen aygıtlar tasarlanması hedeflenirken, geleneksel malzemelerin aşırı kullanımı nedeniyle yüksek toksin/metal atık miktarında bir artış olması muhtemel görünmektedir[55]. Bu noktada sürdürülebilir kaynakların yine göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

2.4.3. MEMRİSTÖRLER

Pasif devre bileşenleri, gerilim (V), akım (I), yük (q) ve manyetik akı (Φ) arasındaki ilişkinin donanımsal karşılıklardır. Kapasitörler yük gerilim ilişkisini, indüktörler manyetik akı akım

ilişkisini ve dirençler gerilim akım ilişkilerini ifade etmektedirler. 1971’de Leon Chua, dördüncü temel pasif bileşen olan memristörü sunmuştur. Böylece, pasif aygıtlarda temel ilişkiler memristör ile tamamlanmıştır[56].

$$d\Phi = M dq \quad (1)$$

Memristif özellikler Eşitlik 1 kullanılarak ifade edilebilir. Akı değişiminin ($d\Phi$), yük hareketi (dq) ve memristans (M) ile ilişkili olduğu gösterilmektedir. Gerilime bağlı değişen direnç karakteri memristif olarak ifade edilirken aynı gerilimde sabit direnç değerleri elde edilmektedir. Bu nedenle hafıza özelliği gözlenmektedir.

$$M(q) = R_{off} \left(1 - \frac{\mu_\nu R_{on}}{D^2} q(t) \right) \quad (2)$$

Memristörün bu özelliği, kalıcı bir bellek aygıtı olarak kullanımını gösterir. Eşitlik 2, yükün bir fonksiyonu olarak memristansı verir. μ_ν katkılayıcı hareketliliği, D kalınlığı ve $q(t)$ zamana bağlı yük miktarıdır. Çok seviyeli direnç belirleme kabiliyeti, tek bellek hücresinde daha yüksek boyutta bilgi depolama imkanı sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında ise denenmiş olan bazı polimerlerde memristif karakterler gözlenmiştir. Bu elemanın, yapısal olarak transistöre benzer oluşu karakter olarak da belli durumlar yakın ilişkiler ortaya koyabilmektedir.

2.4.4. TRANSİSTÖRLER

Transistörler, kavramsal bir devrimin simgesidir. Transistör, girişine uygulanan akım veya gerilime bağlı olarak özelleşmiş işlevi olan, kontrol edilebilir bir anahtarlama ve yükseltici devre bileşenidir. Bipolar eklem transistörleri (BJT), baz terminalindeki akım değerine bağlı kontrol edilen üç terminalli bir kontrollü devre elemanıdır. Bu akım ilişkisi, her BJT için özelleşmiş ve materyale bağlı, kazanç ile verilir. BJT’lerin N ve P tipi olmak üzere iki tip yarıiletkeni de barındırırlar. NPN veya PNP yapıları, çoklu P–N eklemleri

içerdiklerinden, sandviç yapıdaki terminaller olarak tercih edilir. Uygulanan baz akım, delik ve elektron hareketini etkiler bu sayede esnek BJT'ler uygulama olarak nanogeneratörler veya fototransistörler olarak tercih edilebilmektedir[57]. Baz akımı çok düşük seviyelerde olsa dahi, alan etkili transistör (FET) teknolojisi BJT'lere göre genellikle daha verimli çıktılar ortaya koymaktadır. FET'lerin kontrol terminaline kapı denir ve kaynak ile akaç terminalleri arasındaki akım akışı için gerekli elektrik alan kontrolü kapı ile sağlanır. Yapılarına bağlı olarak bir çok FET türü mevcuttur. Metal oksit yarıiletken FET (MOSFET) en yaygın olanıdır. Merkezi işlem birimleri (CPU), mikrodenetleyici birimleri (MCU) vb. dahil tümleşik devre (IC) uygulamalarının temel birimidir. Bir entegre devrenin içinde bulunan milyarlarca transistör göz önüne alındığında, transistörlerin büyük çoğunluğunun MOSFET olduğu söylenebilmektedir. Kaynak ve akaç terminalleri üzerinden akan akım (I_{DS}) Eşitlik 3'te matematiksel olarak ifade edilmektedir.

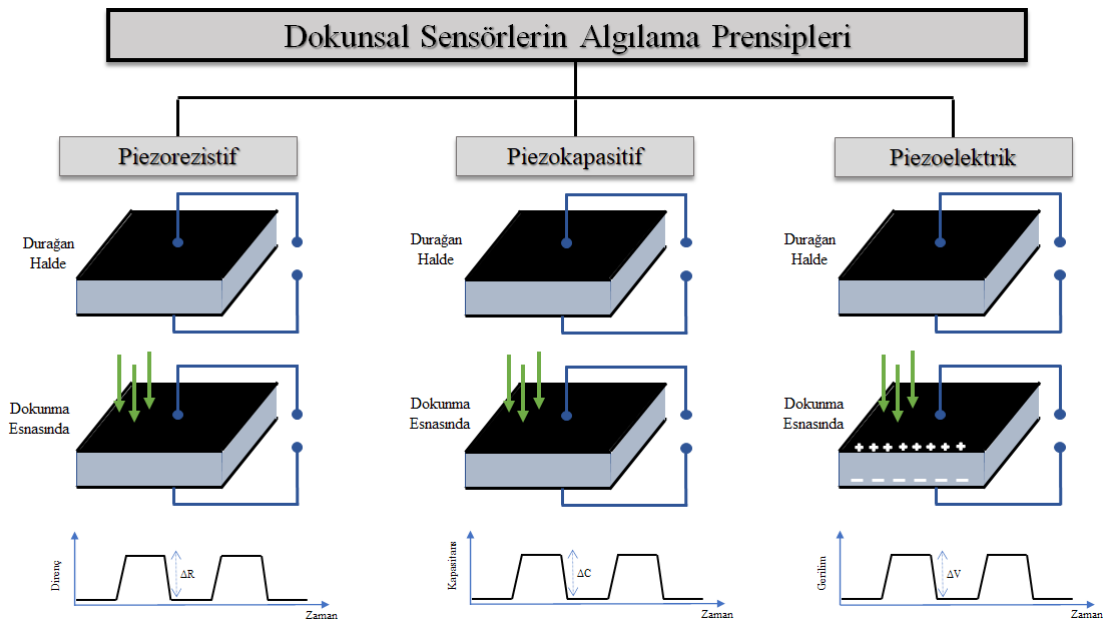
$$I_{DS} = \frac{\mu_p C_{ox} W}{2 L} (V_{GS} - V_{Th})^2 \quad (3)$$

Burada, μ_p , katkılı bölgenin hareketliliği, C_{ox} , kapı terminalindeki oksit tabakasının kapasitansı, W kanal genişliği ve L de kanalın uzunluğudur. V_{Th} , MOSFET'in doğrusal ve doyum bölgelerinde çalışması için gerekli eşik gerilimini temsil ederken, kapı terminaline uygulanan gerilim V_{GS} 'nin eşik geriliminden büyük olması gerektiğini bilgisini de eşitlikten çıkarabiliriz. Belli kapı geriliminde akıtabilecek akım değerleri sabit olup akaç ile kaynak arasındaki gerilim farkındaki artış bir noktada doyuma ulaşmaktadır. IC endüstrisinde tasarımlar, tamamlayıcı-MOS (CMOS) yaklaşımıyla sağlanmaktadır[58]. Artan talep, üretimin kolay olmayışı ve geri dönüşümü düşük seviyede olan malzemelerin kullanımı, silisyum plaka tedarikinde zorluklara neden olmuştur. Bu da çip krizi adı verilen bir süreci doğurmuştur. Öte yandan günümüzün giyilebilir teknolojileri, sert ve sabit şekilli devre kartlarından uzaklaşmaktadır. FET teknolojilerinde sürdürülebilir malzemelerin kullanımı artan bir eğilim göstermektedir ve özellikle organik-FET (OFET) araştırmacılar tarafından büyük ilgi gören bir alanı temsil etmektedir[59]. Esnek FET yapılarının kullanımı uygulamalarda kolaylık sağlamaktadır. Böylece, farklı esnek yapılar

geliştirilmiştir. Belirtilen eşitlikler, FET'ler kullanılarak, gerilim, esneme gibi etkilere bağlı olarak kuvveti belirlemek için de uyarlanabilir. Bu tez dahilinde, kapı-kanal genişliğine ve uzunluğuna, yarıiletken katman tipi ve elektrot tipine bağlı, farklı karakterde esnek FET'ler üretilmiştir.

2.5. MEKANİK ETKİLER VE PİEZO ALGILAMA

Piezo anlam olarak basınç, basınca bağlı sıkışma olmakla beraber, elektroniğe girişi piezoelektrik etkinin açıklanmasıyla olmuştur[60]. Piezoelektrik ise giriş elemanı bası olup çıkışında elektriksel özelliği değişen tüm materyalleri ifade eden bir sınıftır. Materyal yapısı ve kullanılacağı uygulamaya bağlı olarak direkt etki ve ters etki olarak iki başlıkta incelenmektedir. Direkt etki ve ters etki aslında sensör ve eyleyici farkındakiyle aynı olup elektriksel etkinin iş yapması veya çıktı olmasına göre değişmektedir. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), ağırlık sensörleri, disk sürücülerin okuma yapma prensibi direkt etkinin birer örneğidir. Ters etkiye ise antenlerin yayılım yapması, püskürtmeli yazıcıların çalışma mekaniği gibi örnekler verilebilir. Piezo etkinin matematiksel olarak ifade edilmesi ise stres (İng. stress) ve gerinim (İng. strain) kavramlarıyla yapılmaktadır.



Şekil 2.6 Piezo Algılama Prensipleri ve Elektriksel Tepkileri ([6]'dan esinlenilmiştir.)

Piezo etkiler Şekil 4’da gösterilmektedir. Bu etkiler incelendiğinde, yük durumunda rezistif özellik azalıp, iletken parçacıklar birbirine yaklaşarak daha iletken bir yapı oluşurken, rahatlama esnasında uzaklık açılıp, dirençte artış meydana gelmektedir. Bu durum gerilim çıktısı için incelenecek olursa stres altında bir dipol hareketi meydana gelmektedir ve sinyal oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Paralel plaka kapasitör yapısında ise kısalan paralel plakalar arası mesafeyle, kapasitans değerinde yükseliş gözlemlenmektedir. Çalışma kapsamında FET’lerde MOS kapasitansı olarak ifade edilen ara yüzeydeki değişimden kaynaklı akım çıktısında farklılaşmalar meydana gelirken, akaç kaynak arasındaki gerilime bağlı olarak rezistif karakterinde oldukça baskın olduğu aralıklar mevcuttur. Alan etkili transistörün kanal şeklindeki değişim akımda sapmaya neden olmakta, bu sayede yük-kuvvet ilişkisi ortaya konulmaktadır. Sebep-sonuç ilişkisi kapasitörde depo edilen yükün, elektrik alan ve stresle olan bağı aşağıdaki şekilde ispatlanabilir.

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{Q}{V} \\
 U &= \frac{1}{2}CV^2 = \frac{Q^2}{2C} \\
 E &= \frac{Q}{\varepsilon A} \\
 C &= \frac{Q}{V} = \frac{E\varepsilon A}{Ed} = \frac{\varepsilon A}{d} \\
 F &= \left| \frac{\delta U}{\delta x} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{\delta C}{\delta x} \right| V^2
 \end{aligned} \tag{4}$$

Birbirine bakan, üst üste gelmiş iki adet plakadan oluşan kapasitör yapısında, plakalar arası mesafe d olarak düşünülmektedir. Q depolanan yük, V potansiyel enerji olarak ifade edilebilir. Depolanan toplam enerji ise U ile verilmiştir. Tez kapsamında etkiye maruz kalan yapı paralel plaka kapasitör şeklinde olduğu için farklı yöntemler (interdigitated kapasitörler gibi) detaylandırılmamıştır. Paralel plaka kapasitörün eşitliği, Gauss formülüyle ilişkisi sonucu ortaya çıkmıştır[61]. Elektrik alan, yükün alan başına dağılımı olarak ifade edilmektedir, bu dağılımda dielektrik kat sayıda ters orantılı olarak kapasitif etkiyi değiştirmektedir.

2.6. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Bu çalışma kapsamında esnek elektronik devre bileşenleri olan polimer ve katkı malzemesi mekanik ve kimyasal işlemler sonrası karıştırılarak kompozit haline getirilmiştir. Ancak hem polimerlerin sentezi hem de nano katkı malzemesinin elde edilmesi başlı başına çalışma konularıdır ve iki temel kategoride incelenebilir. Bunlar yukarıdan aşağı (İng. top-down) üretim ve aşağıdan yukarı (İng. bottom-up) üretimdir. Polimerler elde edilirken monomerlerden sentezlenebilmektedir, ve aşağıdan yukarıya üretim için bir örnektir. Nanoparçacıkların üretiminde ise yukarıdan aşağıya üretim tekniklerinden öğütme, dağlama, litografi lazer uzaklaştırma vb. ile elde edilebilmektedir. Bahsi geçen üretim yöntemleri esnek elektronik bileşenini oluşturmada kullanılırken, tüm sistemin tasarımı için benzer yöntemler tercih edilmektedir. Üretimi için bilindik sabit şekilli elektronik devre elemanlarında olduğu gibi silisyum plakalar üzerinde birbirini takip eden kimyasal ve fiziksel işlemler uygulanabilir. Normalde alttaş olarak kullanılan silisyum plakalar yerine esnek genellikle organik polimer tabanlı materyaller tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında kompoziti oluşturan katkı materyali ve polimerin üretim yöntemi verilirken benzer teknikler endüstriyel entegre devre üretim yöntemleri ile birleştirilerek tüm dokunsal algılama sisteminin tasarımında kullanılmıştır. Diğer taraftan karmaşık ve gelişmiş bir sistem olan entegre devrelerin üretim yöntemleri optimize edilmiş ve büyük hacimli üretimler için özelleşmiştir. Ancak görülmektedir ki alternatif üretim sistemleri ve yöntemleri olmadığı sürece günümüzde süren ve çip tedarik sorunu olarak adlandırılan ekonomik problemler yaşanabilmektedir. Bu nedenle çalışmanın kapsamında kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli üretim yöntemi de geliştirilmeye çalışılmıştır. Temel olarak entegre devre üretim yöntemleri endüstride şu basamaklardan meydana gelmektedir; plakanın temizlenmesi hazırlanması, oksidasyon, difüzyon, iyon yerleştirme, kimyasal buhar biriktirme, fotolitografi, metal katmanların eklenmesi ve paketlenme. Bu üretim yöntemlerinin bazı basamakları esnek elektronik üretiminde de kullanılmaktadır. Özellikle fotolitografi nano boyutta desenlendirme için sıkça tercih edilmektedir[62]. Literatürde yer bulmuş ve üretimde kullanılabilecek yöntemler aşağıdaki başlıklarla verilmiştir.

2.6.1. Transfer Baskı (İng. Transfer Printing)

Bir polimerik damga ile istenilen bölgeye kaynak alttaştan, hedef alttaşa hazırlanmış mürekkep veya iletken polimer aktarılabilmektedir. Hem kaynak hem de hedef alttaşı için önemli kriterlerden biri yüzey gerilimidir. En büyük getirisi bir baskı esnasında birçok desenin aynı yüzeye aktarılabilesidir. Böylelikle birkaç farklı birimden oluşan yapılar meydana gelmektedir[63]. Eksi yönleri ise aktarma çözünürlüğünün limitli olması ve transfer öncesinde bir kaynak yüzeyin oluşturulup tasarlanması ihtiyacıdır. Öte yandan üretim sonrasında fotolitografi gibi yüzey sağlamlığını arttıracak ek işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Mikrokontakt baskı, transfer baskı yöntemlerinden birisi olup yaygın kullanımından dolayı özelleşmiş bir başlıktır[64]. Damga kompozit mürekkebe seçici (desenlendirilmiş) şekilde temas eder ve istenilen alttaşa mürekkebi aktarır. Transfer baskı ise daha genel bir yaklaşım olup eklemeli transfer, çıkarmalı transfer gibi çeşitli alt işlemlere sahip bir üretim yöntemidir. Transfer baskıda kaynak yüzey önceden şekillendirilmiş olmayıp hedef yüzeyde desenler bulunabilir buna bağlı olarak aktarım gerçekleştirilebilir.

2.6.2. Sprey Kaplama (İng. Spray Coating)

Genellikle polimer alttaşı üzerine bir spreyl tabancası yardımıyla direkt olarak aktarım gerçekleştirilir[65]. Daha homojen bir kaplama için alttaşı istenilen hızda dönen bir döner kaplama cihazına yerleştirilebilir ardından spreyl kaplama uygulanabilir. Bu sayede homojenlik artarken hıza ve spreyl tabancası-polimer yüzey arasındaki mesafeye bağlı olarak kaplama kalınlığı ayarlanabilir. Her yüzeyde aynı yapışma gücü gözlemlenmediği durumda heterojen sonuçlar meydana gelebilmektedir. Benzer şekilde üretim sonrası yapılan kaplamanın fırınlanması veya fotolitografiye tabi tutulması gerekebilmektedir. Öte yandan özelleşmiş bir spreyl tabancası olmadığı durumda nanoparçacıkların birikmesi sonucu enjektörde tıkanmalar oluşabilmektedir. Ancak oldukça hızlı uygulanabilir ve maliyeti çok düşüktür.

2.6.3. Karıştırma

Karıştırma temel olarak kompozit materyal elde etme için gerekli olan başlangıç basamaklarındandır. Genellikle planet mikser veya manyetik karıştırıcı yardımıyla gerçekleştirilir. Hızlı şekilde farklı katkı materyal oranına sahip kompozitler elde edilebilir. Buna ek olarak karıştırıcının dönme hızı nano boyuttaki katkı materyalinin kümelenmesine veya tam olarak polimer içinde yayılımına imkan tanımaktadır[66]. Bu nedenle karıştırıcı hızının optimize edilmesi gerekmektedir. Karıştırma yöntemleri, direkt ve indirekt karıştırma metodu olarak ikiye ayrılır. Direkt metotta polimer içine katkı materyali eklenir gerek duyulursa organik çözücü veya uygun çözücü ile solüsyon haline getirilebilir. Bu yöntemde karbon gibi fonksiyonlaştırmaya ihtiyaç duyan katkı parçacıklarının dağılımı için ekstra mekanik etkileri ihtiyaç duyulabilmektedir. İndirekt metotta ise kompozit oluşturan matris bir çözücüde katkı materyali ise ayrı bir çözücüde aktive edilip ikisi birleştirilebilir. Bu durumda her iki bileşeninde ortak bir çözücü ile karıştırılması kimyasal reaksiyonların kontrolü açısından çok daha uygun olacaktır. Çalışmalarda sıklıkla organik çözücü olan DMF, DMSO, Toulene, Choloroform, THF vb tercih edilmektedir[67–69].

2.6.4. Serigrafi (İng. Screen Printing)

Bu yöntem görsel sanatların oluşturulması aşamasında sıkça tercih edilmektedir. Elektronik endüstrisinde ise viskozitesi yüksek sıvıların baskısında yaşanan zorlukların üstesinden gelebilmek için tercih edilmiş bir yaklaşımdır. Üretim için bir maske gerekli olup bu maske genellikle ipek kumaştan yapılmaktadır. Maske materyali olan ipek fotofilm emülsiyon tabaka ile kaplanıp ışıktaki pozlanarak istenilen desen maske olan ipek kumaş üzerine çıkar. Maske üzerine istenilen kompozit veya mürekkep çekilir. Böylelikle hedeflenen yapı istenilen alttaş üzerinde oluşturulmaktadır. Devre kartı üretim tekniklerinden birisidir[70]. Serigrafi farklı maskeler ile birden fazla kez tekrar edilerek çok katmanlı çıktılarda elde edilebilmektedir[71].

2.6.5. Mürekkep Püskürtmeli Yazıcı (İng. Inkjet Printing)

Günlük hayatta kullandığımız yazıcıların evrtilmesi veya uygulama için özel yapılmış farklı parçacık ve viskozitede baskı yapabilen yazıcılar yardımıyla yapılan üretim yöntemidir. Birçok esnek devre elemanı kolaylıkla ince film üzerine basılmıştır[72]. Çok düşük atık, bir sistemden farklı materyal baskı imkanı ve yüksek hassasiyeti sayesinde uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Nanoparçacıkların toplanması veya yüksek viskozitedeki kompozitlerin basılması ile beraber enjektör ucunda deformasyonlar ve tıkanıklıklar oluşabilmektedir. Uygulamala esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli husus bunlardır.

2.6.6. Dökme ve Düşürme (İng. Drop Casting)

Dökme ve düşürme kullanılan kompozitin viskozitesi ve yüzey tutunma etkisi sayesinde yayılması üzerine gerçekleşmektedir. Düşürme hacimce kontrollü olarak şırınga pompası ile yapılabilmektedir[73]. Böylelikle zamana bağlı kontrollü olarak materyal eklenmiş olacaktır. Dökmede ise benzer fiziksel etkiler (Poisson kuvvetleri gibi) önemli rol oynarken, düşürmeden farklı olarak önceden şekil verilmiş bir kalıp kullanılmaktadır[11]. Genelde üç boyutlu yazıcı çıktıları olan kalıplar tercih edilmektedir. Bu üretim aşaması sonrasında yüzeyde şekillendirme için ekstra basamaklar gerekebilmektedir. Özellikle düşürme sonrasında litografi veya lazer kazıma gibi basamaklar kullanılmaktadır.

2.6.7. Lazer Aşındırma, Lazer Endükleme (İng. Laser Ablation, Laser Induction)

Lazer aşındırma uygulama açısından iki farklı şekilde tercih edebilir. Bir yaklaşımda lazer aşındırma ile yüzeye düşürülmüş olan eşit miktarda dağılmış katman kazınır. İstenilen desen ek kimyasal veya fiziksel aşındırma aşamaları sonrasında elde edilir[74]. Direkt lazer aşındırma yönteminde ise lazer ile polimer yüzeyler kazınarak desen oluşturulur. Başka bir lazer uygulaması ise lazer endükleme ile grafen levhaların elde edilmesidir. Lazer düşen noktada bölgesel olarak sıcaklıktaki hızlı artış ile karbon oksijen (C-O, C=O) ve azot oksijen (N-O) bağları kırılır, bunlar yerine soğuma esnasında karbon azot atomları

arasında birleşme gerçekleşir bu sayede grafen levhalar oluşur[75]. En büyük getirileri hızlı şekilde prototiplenmesi maske ihtiyacını ortadan kalkması ve düşük maliyetli özgün tasarımların ortaya konulmasıdır. Genellikle poliimid film üzerine desenlendirilerek elde edilmektedir[76].

2.6.8. Fotolitografi (İng. Photolithography)

Eski çağlarda kullanılan litografi (taş baskı) kökenine dayanan günümüzde endüstride kullanılan en yaygın desenlendirme yöntemlerinden biridir. Bir fotomaske ve foto etkiye reaksiyon gösterecek bir fotoreziste ihtiyaç duyulmaktadır. Pozitif ve negatif olmak üzere iki çeşit fotorezist bulunmaktadır. Pozlama sonrası ışınların düşürüldüğü fotorezist polimer sertleşerek geliştirici (İng. developer) adı verilen çözücü (İng. solvent) içinde çözünürlüğünü kaybediyorsa negatif, tam tersi durumda ise pozitif olarak adlandırılmaktadır. Bahsedildiği üzere fotolitografi desenlendirme öncesi ve sonrasında ek üretim basamaklarından, maske tasarımına, geliştirme aşamasına ve çözme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır[77].

2.6.9. Sıçratma Biriktirme (İng. Sputtering)

Bu üretim yöntemi birçok mikro nano sistem oluşturma aşamalarında yer alabilmektedir. İnce film kaplamalarda sıçratma biriktirme sıkça tercih etmektedir[78]. Vakum ortamında gerilim ile katı bir malzeme üzerinden elektrik alan yönüne bağlı olarak atomlar koparılmaktadır. Hedef yüzey iyonlar ile bombardıman edilerek ince film tabakası meydana getirilir. Esnek elektronik metal katmanları için kullanılabilir (elektrotlar vb.)[79]. Vakum ortamında genellikle argon iyonları ile sıçratmanın yapılacağı metal yüzeyinden atomlar kopararak alt taşa ilerlemesi gerçekleştirilir. Günümüz elektronik endüstrisinde fiziksel buhar biriktirme (PVD) olarak karşımıza çıkmakta ve metal bağlantıların oluşturulmasında sıklıkla tercih edilmektedir.

2.6.10. Elektro Lif Çekim Yöntemi (İng. Electrospinning)

Bu yöntemde yüksek gerilim altında polimer ve eklenebilecek katkı malzemesi elektrik alan etkisiyle fiber forma dönüşmektedir[80]. Üretim esnasında uygulanan gerilim, desen oluşacak yüzeyin mesafesi oluşan fiber yapıların geometrik dağılımını etkilemektedir. En-boy oranı değişmektedir, bu şekilde üretilen transistörde yarıiletken katman için kullanılabilir. Böylece elde edilecek yarı-iletken katmanların enerji bant seviyelerinde ve eşik gerilimlerinde modifikasyonlar ufak parametre değişimleriyle kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Öte yandan her polimer ve katkı malzemesi için kullanışlı olmamaktadır, daha dar bir kullanım aralığında uygulanması mümkündür.

2.6.11. 3B Baskı (İng. 3D Printing)

Üç boyutlu üretim eklemeli üretim yöntemlerinin günlük hayatta en sık tercih edilen şeklidir. Bir eklemeli üretim döngüsünde ardışık malzeme katmanları ile hedef nesne oluşturulur. Yöntemlerin arasında özelleşmiş üç temel başlık bulunmaktadır. Yukarıda bahsedilen birçok farklı üretim tekniğinin içinde yer aldığı özelleşmiş üç boyutlu üretim çeşidi vardır. Stereolitografi teknolojisi bir foto-polimerin istenildiği desende pozlanarak elde edilmesine verilen isimdir, UV spektrumunda ışınlar kullanılır. Dijital Işık İşleme teknolojisi SLA'ya benzer olur DLP'de ışık kaynağı bir projektördür. SLA'da ise ışık kaynağı bir lens ile odaklanmıştır. Seçici lazer sinterleme yönteminde ise SLA'ya benzer olup SLS'de toz hammadde kullanılmaktadır. Düşük maliyetli ev tipi sistemlerde en sık tercih edilen eriyik biriktirmeli modelleme (İng. fused deposition modeling FDM) olup bir filamanın sıcaklıkla eritilip eş zamanlı olarak üç eksenli hareketle şekil kazanmasına dayanmaktadır. Tüm bu yöntemler esnek elektronik aygıt üretiminde polimerlerin şekillenmesi için kullanılabilir. Üretim yöntemlerinden dökme için kalıp baskısı veya özel maske baskıları için de tercih edilmektedir[81].

2.7. SÜRDÜRÜLEBİLİR ELEKTRONİK KONSEPTİ VE TRANSİSTÖR ÇALIŞMALARINA ETKİLERİ

Esnek elektronikte sürdürülebilirlik, doğal dengenin korunumunu sağlamaya çalışıldığı konuların başında gelmektedir. Bu noktada üretilen aygıtların malzemelerinin ve atıklarının geri dönüştürülebilir olması veya en azından çevreye zararlı olmaması için malzeme seçimi çok önemlidir. Sürdürülebilir bir döngü ve yaşam işleyişi açısından üretilen elektronik aygıtlar ile tüketilen ürün açısından doğrusal bir ilişki kurulmalıdır. Böylelikle endüstrideki üretim süreçlerinin uzunluğu, atık miktarı ve karbon ayak izi artışı denetim altında tutulabilsin. Tüm bu nedenlerden, baskı devre kartlarından, entegre devrelere kadar çevre dostu ve geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı elektronik endüstrisinde devrim niteliği taşıma ihtimaline sahiptir. Sürdürülebilirlik kavramı mühendislik, üretim ve çevre getirileri yanında ekonomik kalkınmada da önemli rol oynayan bir konudur. Ev aletlerinden, kripto para madenciliği için gereken alt yapıdan, giyilebilir teknolojilere tüm donanımların düşük maliyetli, elde etmesi kolay malzemeler içerdiği durumda kaynakların verimli kullanılması sağlanabilir olacaktır. Günümüz entegre devre üretiminde temel hammadde olan silisyum, düşük maliyeti ile tercih sebebiyken üretim süreçleri bir o kadar karmaşıktır. Öte yandan artan performans istekleriyle entegre devrelerin ebatlarında küçülmeler artmakta bu isteklere yetişmek için daha karmaşık ekipman ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Yer kürede en çok bulunan ikinci element olan silisyum, bahsedilen üretim yöntemlerine tabii tutularak birçok basamaktan geçirilmektedir[82]. Günümüzde IC üretimi için gereken ekipmanların temini kolayca karşılanabilecek düzeyde değildir. Ayrıca 2021 çip tedarik krizi bizlere, spesifik malzemelerin ve üretim süreçleriyle kısıtlı bir endüstrisinin dar boğaz yaşayacağı ve olumsuz sonuçlar doğuracağını mesajını vermiştir. Uzun soluklu bir teknoloji serüveni için elektronik endüstrisinde sürdürülebilir malzemeler ve temel, ev-tipi üretim teknikleri kullanılmalıdır. Bu noktada, yeşil ve sürdürülebilir fabrikasyon süreçleri açısından değerlendirmek oldukça gerekli bir yaklaşımdır. Bu nedenle malzemelerin doğada bulunma miktarı, yenilenebilirlik ve biyo-bozunur özellik gibi konuların araştırılması ciddi önem taşımaktadır. Esnek elektronik ile gündeme gelen yeşil aygıtların üretimi kadar hammaddenin yenilebilir veya

döngüsel süreçlerde kullanılan bir kaynaktan elde edilmesi de oldukça önemlidir. Bu sayede tekrar kullanım imkanı, üstel olarak karbon ayak izinin azaltılması anlamına gelecektir. Esneklik kriterinden de kaynaklı olarak polimer kullanımı ön plana çıkmaktadır. Sıkça kullanılan sentetik polimerlerin bugüne kadar dokuz milyar tonu aşan miktarlarda üretildiği düşünülürken, geri dönüştürülmüş veya biyo-bozunur polimerlerin tüm kütlenin en çok onda biri olduğu ifade edilmektedir[83–85]. Dahası, plastiklerin ve atıklarının yakılarak imha edilmesi de doğayı etkileyecek faktörler arasındadır. Transistörlerin, entegre devre tasarımlarında temel birim oluşu ve buna bağlı olarak literatürde transistörlerin yıllık olarak kullanımındaki artışı birçok çalışmada bahsedilmiştir[86]. Bu yaklaşım ve bakış açısı doğrultusunda uygulama alanı esnek, çevre dostu malzemelerden oluşturulmuş, ve doğayı ve gezegeni canlı tutmamızı sağlayacak transistörlerden meydana gelmiş tasarımların elde edilmesi, bu çalışma kapsamında ve devamında yapılacak çalışmalarda araştırılmaktadır.

2.8. YAPAY ZEKA İLE SINIFLANDIRMA

Yapay zeka, bir bilgisayarın ve aygıtın insan davranışlarını taklit edebilmesinden türetilmiş bir kavramdır. Bu kavram, makine öğrenmesini, yapay sinir ağlarını, derin öğrenmeyi kapsamaktadır[87]. Otonom çalışan sistemlerin hayatımıza girmesi ve endüstri 3.0'ın yanında getirdiği üretim süreçlerinin otomatik bantlar üzerinden sağlandığı süreç kritik bir dönüm noktasıdır. Makinelerin kontrol edilebilir olması ve üretimde sağladıkları katkılar sonucunda bir adım ötesi olan yapay zeka kavramını oluşturulmuştur. Hedef, makinelerin kendilerince karar verip, sonuçlar ortaya koyabilmeleridir. Ardından özelleşerek makine öğrenmesi adını almış, daha detaylanarak insan beyni taklit edilmiş, bu sürecin sonucunda da yapay sinir ağları kavramları güncel konular arasına girmiştir[87]. Derin öğrenme ise bu akışın son basamaklarından biri olup, kompleks sinir ağlarının oluşturduğu yapıları temsil etmektedir[87]. Öğrenmenin temel bileşeni verilerdir. Genellikle sensör çıktıları olan veriler, akım, direnç, gerilim, kapasitans gibi elektriksel kavramlardır. Kayıt esnasında oluşabilecek gürültü ve çevresel faktörlerden verilerde bozulmalar yaşanabilmektedir. Diğer taraftan karşılaştırılma yapabilmek, dış etkilerden, gürültüden veya anlamsız verilerden kurtulabilmek adına veri ön-işleme basamağı veri madenciliğinde

sıklıkla tercih edilmektedir. Normalizasyon ön-işleme yöntemleri arasında öne çıkanlardan biridir. Böylelikle ortak bir paydaya veriler oturtulabilmektedir. Veri ön-işleme basamağının ardından gerekli algoritmalar için öğrenme ve test verileri olarak sınıflandırılıp girdi olarak verilebilir. Sensör uygulamalarında, sensör hassasiyetinin yüksek olduğu durumlarda çıktılara bakarak dahi sonuçlar yorumlanabilmektedir. Bu nedenle yapay sinir ağlarından oluşan bir sınıflandırma yaklaşımı yerine makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak aşırı uyum olmadan ve düşük maliyette öğrenme tamamlanmaktadır. Çalışma kapsamında, karar ağacı, rastgele orman ve k-en yakın komşu sınıflandırıcıları tercih edilmiştir. Karar ağacı gözetimli öğrenme algoritmaları arasında yer almaktadır. Karar ağaçları çok kolay okunabilir ve yorumlanabilir sonuçlar ortaya koyabilirken, kompleks uygulamalarda durum tam tersine dönebilmektedir. Aşırı uyum karar ağaçlarında yaşanabilecek diğer bir sorundur. Birçok düğümden oluşan karar ağaçları, diğer makine öğrenme algoritmalarını oluşturmakta ve sınıflandırma problemleri için sıkça tercih edilmektedir. Rastgele orman sınıflandırıcısı çoklu öğrenme algoritmalarında tercih edilen bir yöntemidir. Rastgele orman birçok karar ağacı içerir. Çıktı entropi ifadesi olarak adlandırılan, Eşitlik 5'e göre elde edilmektedir[88].

$$Entropi = \sum_{i=1}^C -f(i) \log f(i) \quad (5)$$

C, veriler için kullanılan etiket sayısını, f(i) ise belli bir düğümdeki, spesifik 'i' etiketinin sıklığıdır. Parametrik olmayan bir sınıflandırma yöntemi olan k-en yakın komşu, sınıflandırma çıktısını komşularından aldığı bilginin yoğunluğa göre oluşturmaktadır. En yakın komşular belli mesafe hesaplamalarına göre belirlenmektedir (Öklityen, Manhattan, Minkowski)[89]. En basit makine öğrenmesi algoritmaları arasında yer alan k-en yakın komşu kullanılırken, Eşitlik 6'da matematiksel modele bağlı kalınarak mesafe hesabı yapılmıştır[89].

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^k (x(i) - y(i))^2} \quad (6)$$

Burada k , seçilen en-yakın komşunun k değerini ifade ederken, $x(i)$ ve $y(i)$ noktaya en yakın noktalar. K değeri 1 olduğunda aşırı uyum söz konusu olabilmektedir[90].

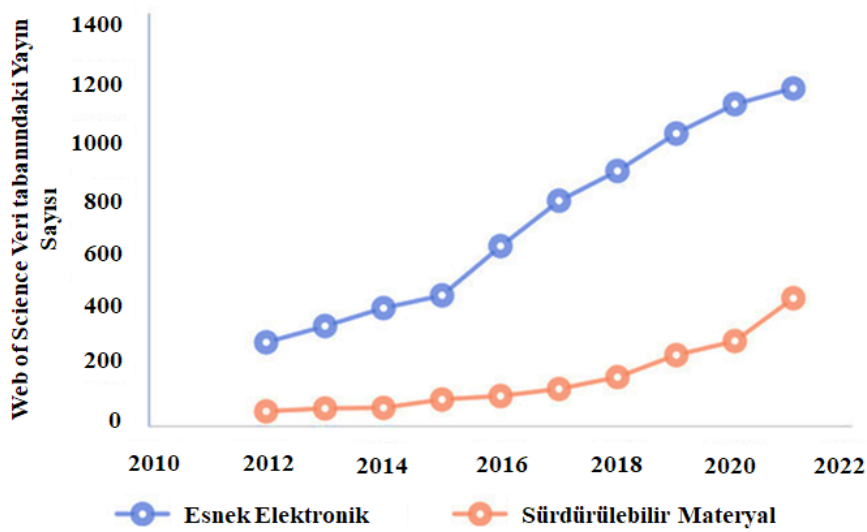
Performans çıktıları ise doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1 skor gibi temel parametre ile verilmektedir[88]. Hata çizelgesi adı verilen bir ifade üzerine yerleştirilen bu 2x2 ebatlarındaki çizelgeden bu veriler türetilmektedir. Bir çıktının pozitif veya negatif oluşunun doğru olarak etiketlenebilmesi temel kriterdir. Pozitif olan ifade doğru olarak tespit edilirse TP, negatif ifade doğru olarak tespit edilirse TN, yanlış bir sonuç doğru olarak değerlendirilirse FP, doğru bir sonuç yanlış olarak sınıflandırıldığında ise FN olarak ifade edilmektedir. Doğruluk, tüm doğru sonuçların, toplam sınıflandırma çıktılarına oranı olarak, $(TP + TN)/(TP + TN + FP + FN)$ şekliyle verilir[88]. Ancak sınıflandırma yapılacak girdileri arasında sayısal olarak ciddi bir fark varsa doğruluk değeri yanıltıcı olabilir. Bu nedenle duyarlılık ve kesinlik performans kriteri tamamlayıcı rol oynamaktadır. Duyarlılık, TP olan değerlerin, gerçekten pozitif olanlara yani TP+FN'ye oranıdır[88]. Kesinlik, TP değerlerinin, hatalı da olsa pozitif olarak yorumlanmış (TP+FP) tüm çıktılara oranını vermektedir[88]. F1 skor ise duyarlılık ve kesinliğin geometrik ortalaması olup yüksek olan değeri değil daha düşük olan parametreye yakınsayarak modeli daha gerçekçi değerlendirmeyi sağlayan ifadedir.

3. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Yapılan tez kapsamında süreçler birden farklı aşamaya bölüldüğü için her bir basamağın özgün ve literatüre katkı sağlayacak yönleri olmuştur. Bu nedenle ilgili çalışmalarla karşılaştırma ve alaka kurulurken; sızıntı eşiğinin tespitine dair önceki yöntemler ele alınmış, üretimdeki konvansiyonel metotlar ifade edilmiş, son olarak da tasarım çıktısı olan FET'in literatürdeki geçmiş versiyonlarına değinilmiştir. Böylelikle sonuç bölümünde verilecek olan çıktıların, literatüre kazandırdığı faydalar daha belirgin hale gelecektir.

Modellenme yapılırken, genellikle kristal yapılar üzerinden veya amorf halde olsalar da birime indirgeyerek, homojenleştirilmesiyle ifade edilmektedir. Mikromekanik model sonlu analiz yöntemleri de bu şekilde gerçekleştirilmektedir, ancak gelişen bilgisayarlar

ile homojenleştirme basamağı ortadan kaldırılabilir[91–93]. Elektron hareketleri de mikromekanik model ile ifade edilebilmektedir[94]. Makromekanik modellerde ise sızıntı eşiğinin hesaplaması daha uzun döngülere sebep olur. Her noktayı tek tek hesaplamak yerine olasılıksal olarak dağılımlardan Monte-Carlo benzetimleri tercih edilir[95–97]. Diğer bir analiz yöntemi ise görüntü işleme, pikselleri 1 ve 0'lara dönüştüren, ardından iletim hattını bulmak adına kümelenmeleri değerlendiren bir uygulamadır[98, 99]. Ancak sonuç görüntü kalitesine çok bağımlıdır ve nano-boyutta 3B görüntüleme yöntemlerinin kısıtlı oluşundan modellemeler genelde 2B olarak yapılmaktadır. Analitik ve matematiksel modeller, kompozit modellere de uygulanabilir. Bazı modeller birçok modelin kombinasyonundan meydana gelmektedir, hibrit model olarak ifade edilmektedir[100]. Rezistif ağ modeli ve mikromekanik modelin birleşmesiyle başka yaklaşımlar da ortaya konulmaktadır, bu çalışmada da hibrit bir model seçilmiştir ve direnç-ağ modeli tünelleme temellerine dayandırılarak mikromekanik model oluşturulmuştur. Öte yandan bu mesafe literatüre 10nm civarında olarak kazandırılmıştır. Bu mesafe tünelleme kısıtlarını oluşturarak dirençli ağ oluşturulmuştur. Monte Carlo benzetimleri, rastgele dağılmış karbon karasının iletim modellerini bulmak için sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biridir[101, 102]. Literatür taramasında ise “Monte Carlo” ve “Percolation” anahtar kelimeleriyle araştırma yapıldığında Web of Science veri tabanında 2 bin 8 yüz yayın çıkmaktadır.



Şekil 3.1 Esnek Elektronik ve Sürdürülebilir Kavramlarının Trendleri [7]

Son on yılda, esnek elektronikte birçok gelişme ve çalışma literatüre kazandırılmıştır. Web'deki yayın sayısı incelendiğinde Web of Science platformunda “esnek elektronik” anahtar kelimesi 8bin sonuç verirken, aynı veri tabanında “sürdürülebilir malzemeler” anahtar kelimesi bin sekiz yüz makaleye ulaşılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmaların yüzde 50'den fazlası son 3 yıl yayınlanan çalışmalar olup, bu konunun yükselen trendde oluşunun göstergesidir(Şekil 3.1). Çünkü esnek, dayanımı yüksek ve düşük maliyetli elektronik aygıtları oluşturan bileşikler veya kompozit materyal arayışı hızla devam etmektedir. Bu noktada çalışmanın karşılaştırılmalı çıktılarına sahip olmanın adına sentetik materyaller kullanılmıştır, ancak bilinmektedir ki sentetik materyaller elde etme süreci yeşil üretim yöntemlerinden uzaktır. Üretim sürecinde çıkan atık miktarı ötesinde cihazların bertaraf edilmesinde de ciddi kirlilik oluşmaktadır. Benzer şekilde “esnek FET”, “esnek transistör”, “esnek TFT” kavramları aynı veri tabanlarında aratıldığında 100 civarı yayın çıkmaktadır, esnek elektronik konseptinin büyük kısmını sensörler ve yumuşak robotlar oluştururken, transistör konseptinin bu başlığın yaklaşık olarak %1.25'ini ifade ettiğini görmekteyiz. Bu da esnek elektronik başlığı altında esnek transistör çalışmaları ve geliştirmeleri yapmanın cazip bir alan olduğunu kanıtlar niteliktedir.

Organik alan etkili transistörler (OFET) çalışma alanı olarak esnek elektronik kapsamında olup, bu yaklaşımda araştırmalar devam etmektedir. TFT topolojilerinin kolay uygulanabilir olmasından kaynaklı da OFET üretimi ve tasarımları tercih edilmektedir. Önceki çalışmalarda görülmektedir ki, sıklıkla indiyum kalay oksit (İng. indium tin oxide (ITO)) üzerine büyütme yöntemleriyle tasarımlar yapılmaktadır[103–105]. Öte yandan ITO kullanılmadığı durumlarda da esnek cam yüzey, Polymethyl methacrylate (PMMA,Pleksi) kullanılabilir. Asetat da tasarımlarda kullanılabilen kolay işlenen yüzeyler arasındadır. Alttaş olarak kullanımı uygundur. Diğer bir unsur da transistörün aktif katmanın belirlenmesidir. Çalışmalarda görülmektedir ki aktif katman HOMO-LUMO karakterine bakılarak yarıiletken polimerik özelliklere sahip PEDOT:PSS gibi polimerlerden oluşturulabilmektedir, veya başka bir yöntem de tek katmanlı kristal yapıda malzemeler seçmektir, molibden disülfid (MoS_2) buna örnek olabilmektedir[106, 107]. Elektrolitlerden meydana getirilebilirken, asidik solüsyonların da tercih edildiği

çalışmalar bulunmaktadır[108–110]. Dielektrik katman için ise sıklıkla oksit tabakası oluşturulmakta ve endüstrideki yöntemlerin etkisi tasarımlarda görülmektedir. Sürdürülebilir elektronik adına yapılan çalışmalarda ise selüloz, ipek, PLA, kitosan, aljinat, ferritin gibi biyo-bozunur malzemeler tercih edilmektedir.

4. ÖNERİLEN YÖNTEM

Tezin tüm işleyişine bakıldığında, üretim öncesi benzetim süreci, üretim süreci, bu sürece dahil olan uygun materyal kombinasyonlarının oluşturulması, üretim sonrası test ve karakterizasyon yöntemleri ve ortaya çıkan tasarımın uygulamasının gerçekleştirilmesi şeklindedir. Bu noktada her bir basamak için ayrı bir yaklaşım ve yöntem tercih edilmiştir. Bu bölümde de her birine, neden-sonuç ilişkileriyle, diğer yöntemlere göre getirisine değinilerek bahsedilmiştir.

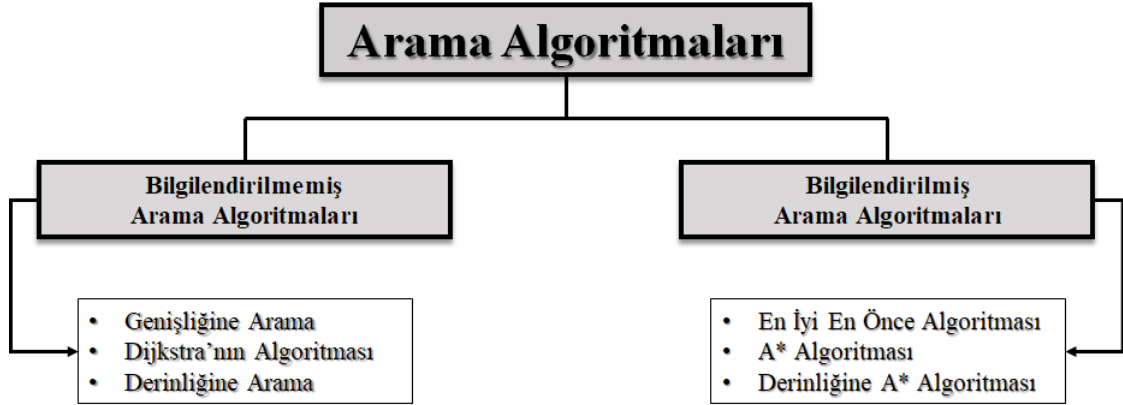
4.1. ÜRETİM ÖNCESİ BENZETİM

Kompozitlerin elektriksel özelliklerini değiştirmek için en basit yöntem dolgu madde miktarını veya cinsini değiştirmektir. Dolgu malzemeleri gümüş nanoparçacıklar, altın nanoparçacıklar, grafit, karbon nanotüpler, karbon siyahı vb. olabilmektedirler. Normal işleyişte yalıtkan olarak ifade edilen polimerler CB veya CNT gibi elektro etkin katkıları sayesinde iletkenlik kazanırlar. Farklı karbon allotropu içeren kompozitlerde, ortaya çıkan karışık birden fazla karakterin karışımı ile tek tip dolgulu kompozitlerle kıyaslanınca daha düşük içerikle benzer elektriksel iletkenliklere ulaşılabilir[99, 111]. Bu çalışma dahilinde, diğer allotroplara göre düşük maliyetlerde olduğu için CB dolgu malzemesi tercih edilmiştir. CB en-boy oranı, CNT'lerin en-boy oranına göre daha düşüktür. Genellikle literatürde bu değer 1 olarak verilmektedir[43, 112]. Uygun karıştırma hızı ile kümelenmenin önüne geçilmesi hedeflenmiştir. 2009 yılında, bu yöntemin optimize edilmesi için Wolfgang Bauhofer ve diğerlerinin literatür çalışmasında hızın parçacık dağılımı ve kümelenmeye etkisi incelenmiştir[113]. Birim hacimdeki katkı malzemesi, yüklenme kapasitesini, manyetik özelliklerini de doğrudan etkilemektedir. Kompozitler için kritik noktalardan biri

de sızıntı eşiğidir. Bu nokta sonrasında elektriksel iletkenlik ortaya çıkmaktadır. Sızıntı eşiği, polimer ve dolgu türüne bağlıdır. Sızıntı teorisi model olarak “Analitik-Matematiksel modelin bir alt birimidir. Bu araştırmada, verilen model mikromekanik temeller üzerine inşa edilmiştir, kısıt olarak CB parçacıkları arasında tünelleme direnci olarak ifade edilmiştir. CB takviyeli polimerin sızıntı eşiğine ulaşınca kadar geçen adımlarda ise direnç-ağ analizi düşünülmüştür. Genel olarak dolgu malzemelerinin bir diğeriyle direkt teması bulunmamaktadır. Gerilim yardımıyla iletim sağlanmaktadır. Elektronlar, uygulanan potansiyel etki ile kuantum tünelleme bariyerini aşabilmektedir. Düşük gerilim değerlerinde, elektronların titreşimiyle oluşan enerji bariyeri aşacak kadar yükselmemektedir. Bu nedenle bariyeri aşamazlar ve çarpıp dönerler. Polimer matris içindeki parçacık sayısı arttıkça birden fazla iletim yolunun açılması mümkün kılınır. Bu noktada ilk iletim hattının oluştuğu durumu tespit etmek adına, kısıtlarla oluşturulmuş en kısa yol bulma algoritmaları kullanılmıştır ve algoritmaların çalışma döngüleri zaman bazında incelenmiştir. Tespit edilen hacimce dağılım ile deneysel sızıntı eşiği de doğrulama adına karşılaştırılmıştır.

4.1.1. EN KISA YOL BULMA ALGORİTMALARI

Hızlanan bilgisayar hesaplama kabiliyetleri, bu gibi tekrar eden süreçleri saniyeler içinde gerçekleştirebilmeyi sağlamıştır. Bu nedenle, karbon katkı miktarı taranırken, her bir değer için yol-bulma algoritmalarının çalıştırılması ilk meydana gelen iletim yolunun bulunmasıyla sonlanacaktır. Bu değer de bizler için sızıntı bölgesinin başlangıç değerini verecektir. Bu sayede yalıtkan bölgeden yarıiletken bölgeye geçişi tespit edilerek üretimdeki polimerlerin katkılama miktarı sayısal ve olasılıksal temellerde belirlenebilecektir. Her bir nokta arasındaki maliyet ve buna bağlı olarak ağırlıklandırılmış hesaplamalar ile yol bulma süreci gerçekleşmektedir. Tünelleme mesafesi ve CB parçacıklar arasındaki mesafe bizlerin maliyet fonksiyonunu oluşturmaktadır. En kısa yol bulma yaklaşımı aslında birçok alanda, araştırma konularında tercih edilmektedir. Özellikle lojistik, proje yönetimi ve zaman organizasyonu, ağ yönetimi, oyun teknolojileri ve yapay zeka uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır[114–116]. Bu algoritmalar üç boyut veya iki boyutta kullanılabilir.



Şekil 4.1 Arama Algoritmaları

Arama algoritmaları, bilgilendirilmiş ve bilgisiz arama algoritmaları olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Şekil 4.1’de bu sınıflandırma görülmektedir. Bilgilendirilmiş arama, probleme özgü çözüm ile yola çıkıp, bir ipucuna sahiptir[117]. Arama yönteminin temel amacı çözüme dair bilgiye sahip olup hata durumunun engellenmesidir. Bilgilendirilmiş arama yöntemleriyle, optimuma ulaşmaktan öte arama maliyetlerinin azaltılması sağlanırken, zaman açısından bir getirisi vardır. Optimal yol hesabında, uygun noktalar (n), sezgisel olarak ifade edilen $h(n)$ fonksiyonunda tutulmaktadır[118]. Ardından hedef noktadan başlangıç noktası arasındaki maliyetlerin analizi ile sonlanmaktadır. Bu yaklaşımda işleyişi kolaylaştıran etken sezgisel fonksiyondur. Sezgisel yöntem ile ilerlenecek yön ağırlıklı olarak her döngüde belirlenerek, yönelim sağlanmış olur. A-Star algoritması bu yaklaşıma bir örnektir. Bu yöntem hem yol maliyetini hem de sezgisel bilgileri göz önünde bulundurarak, her yol için tahmini bir maliyet oluşturabilmektedir. Bilgisiz aramada ise sorunun tanımı dışında sonuç noktası algoritmaya verilmemektedir ve kör arama yöntemi olarak da adlandırılan bu yaklaşımda sürekli olarak kapalı çevrim kontrol sağlanarak ilerlenir[117]. Böylece zaman açısından sezgisel yaklaşımlara göre daha uzun sürebilmektedir. Son giren ilk çıkar şeklinde bir yığın kullanılmaktadır. Her döngüde bir nokta eklenip, yığından çıkarılır. En kısa yol arandığında, yakın noktalar arasında oluşturulan yol, hedeflenen nokta olmasa dahi çıktı olmaktadır. Geriye doğru tekrar tarama yapılarak en kısa yol bulunur. Bu da daha uzun döngüler anlamına gelmektedir.

4.1.1.1. Derinliğine Arama Algoritması İki tepe arasındaki yolu bulmak için kullanılan derinliğine arama, ilişkili olan bir ağacın dallanmalarını hesaplayarak bağlantı durumunu denetler[119]. Grafik dallanmasını hesaplarken, iki nokta arasındaki yol hesaplanır. Eşdeğer bir yol olmadığı tespit edilir. Temel bilgisiz arama algoritmalarından biridir. Arama ilerlerken hedeflenen ilerleyiş, daha çok sıralı bir yığının uygun olduğu durumlarda son eleman veya sona en yakın elemanını çağırmak üzere kurulmuştur.



Algorithm 1 Derinliğine Arama Algoritması

```
Başlangıç Noktasının Atanması
Başlangıç Noktasını Yığıtı Ekle
while Yığıt Doluyken do
    Yığıttan son noktayı (N) getir
    if N hedef nokta then
        Sonucu yazdır, Döngüden çık
    end if
    if N noktasının maliyeti en yüksek derinlikten fazla then
        Döngüden çık
    else
        N'i gezilen noktalara ekle
        N'e bağlı olan dalları belirle
        DFS ile devam et
    end if
end while
```

4.1.1.2. Genişliğine Arama Algoritması Derinliğine aramaya benzer şekilde, genişliğine arama, ağacın bağlantılı olan her bir dalını gezer ve tüm ağacı tanımlar[120]. İlk giren ilk çıkar mantığı ile çalışır ve gezilebilecek bütün noktaları tamamlamak için arama yapmaktadır Tüm noktalar gezildiği için en kısa yolu bulmayı garanti eder.

Algorithm 2 Genişliğine Arama Algoritması

```
Başlangıç Noktasının Atanması
Başlangıç Noktasını Sıraya Ekle
while Sıra Doluyken do
    Sıra içerisindeki aynı mesafedeki kriterini sağlayan en iyi noktayı (N) getir
    if N hedef nokta then
        Sonucu yazdır, Döngüden çık
    else
        N'i gezilen noktalara ekle
    end if
    N'e bağlı ilerlenebilecek tüm noktaları belirle
end while
```

4.1.1.3. En İyi En Önce Arama Algoritması En iyi en önce algoritması bazı ekstra bilgilere sahiptir, bunlar herhangi bir noktanın hedeften uzaklığı gibi sezgisel bilgilerdir. Başlangıç noktasına en yakından başlayıp ilerlemek yerine hedef noktaya en

yakını seçmektedir[121]. Sezgisel yaklaşımlar dahil edildiğinde iletim yolu daha hızlı bulunabilmektedir.

Algorithm 3 En İyi En Önce Arama Algoritması

```
Başlangıç Noktasının Atanması
Başlangıç Noktasını Sıraya Ekle
while Sıra Doluyken do
    Sırayı maliyet fonksiyonuna göre artan şekilde düzenle
    Sıranın ilk elemanını bir sonraki nokta olarak (N) belirle
    if N hedef nokta then
        Sonucu yazdır, Döngüden çık
    else
        N'i gezilen noktalara ekle
    end if
    N'e bağlı ilerlenebilecek tüm noktaları belirle
end while
```

4.1.1.4. Dijkstra'nın Algoritması Dijkstra'nın algoritması, başlangıç noktasından ilerleyerek köşelere doğru yönelim gösterir[122]. Ardından incelenmemiş yakındaki köşe konumundaki noktaları gezer ve gezilenler kümesine ekler. Hedefe doğru ilerlerken, dışa doğru genişler. Dijkstra'nın algoritmasının, başlangıç noktasıyla hedefe giden en kısa yolu bulmak garanti edilir. Birden fazla eş maliyete sahip yol olacağından çalışma süresi uzun olabilmektedir.

Algorithm 4 Dijkstra'nın Algoritması

```
Başlangıç Noktasının Atanması
Başlangıç Noktasını Sıraya Ekle
while Sıra Doluyken do
    Sıra içerisindeki aynı mesafedeki kriterini sağlayan en iyi noktayı (N) getir
    if N hedef nokta then
        Sonucu yazdır, Döngüden çık
    else
        N'i gezilen noktalara ekle
    end if
    N'e bağlı ilerlenebilecek tüm noktaları belirle
    if N diagonal yönde then
        Maliyet fonksiyonunu güncelle
    end if
end while
```

4.1.1.5. A* Algoritması A* birden fazla alternatifle, hedefe ulaşılabilecek en hızlı şekilde yolu bulabilen grafiksel arama algoritmasıdır[123]. Arama esnasında gezilen noktaların ifadesi, mesafe ve buna ek olarak maliyetin sezgisel fonksiyonudur $f(x)$ ile gösterilir. Sezgisel fonksiyon olan $h(t)$, ve yol-maliyet fonksiyonu $g(x)$ 'in toplamıdır. Yol-maliyet fonksiyonu $g(x)$, çıkış noktasından varış noktasına kadar oluşan toplam maliyeti ifade etmektedir. Her döngüyle birlikte bu fonksiyonlar da güncellenerek kümülatif olarak incelenir.

Algorithm 5 A* Algoritması

```
Başlangıç Noktasının Atanması
Başlangıç Noktasını Sıraya Ekle
while Sıra Doluyken do
    Sırayı  $f(N)$  fonksiyonuna göre artan şekilde düzenle
    Sıranın ilk elemanını bir sonraki nokta olarak (N) belirle
    if N hedef nokta then
        Sonucu yazdır, Döngüden çık
    else
        N'i gezilen noktalara ekle
    end if
    N'e bağlı ilerlenebilecek tüm noktaları belirle
     $f(N)$ 'yi  $g(N)$  ve  $h(N)$ 'ye göre güncelle
end while
```

4.1.1.6. Derinlemesine A* Algoritması Bu yaklaşım ise yeni bir arama yaklaşımı olup, gerçek zamanlı strateji oyunu uygulamasında doğrulanmıştır[124]. Çalışma yönteminde ulaşılacak noktanın başlangıç noktasıyla olan doğrusal ilişkisi bir eğim fonksiyonu ile ilişkilendirilmiştir. Bu sayede türetilen ek sezgisel bilgi adım sayısını azaltmaktadır.

Kuantum tünelleme mesafesi ve sızıntı eşiğine dair yaklaşımlar direk olarak maliyet fonksiyonunu etkilerken, sezgisel bilgi kısmını da karbon parçacıkların büyüklükleri ve buna bağlı olarak en-boy oranı olarak düşünülerek kod içinde kısıtlar eklenmiştir. Kirkpatrick'in klasik sızıntı teorisine dayanan güç yasasına göre, 3D örgü sahip bir nanokompozitin parçacıkların karakterizasyonu Eşitlik 7 ile ifade edilmiştir[125].

Algorithm 6 Derinlemesine A* Algoritması

Başlangıç Noktasının Atanması
Başlangıç ve bitiş noktasına göre doğrusal bir fonksiyon oluştur(m)
Başlangıç Noktasını Sıraya Ekle
while Sıra Doluyken **do**
 Sırayı f(N) fonksiyonuna göre artan şekilde düzenle
 Sıranın ilk elemanını bir sonraki nokta olarak (N) belirle
 if N hedef nokta **then**
 Sonucu yazdır, Döngüden çık
 else
 N'i gezilen noktalara ekle
 end if
 N'e bağlı ilerlenebilecek tüm noktaları belirle
 if Engel durumu **then**
 Algoritmayı A* şeklinde ilerlet
 end if
 if Mevcut konuma çok yakın **then**
 Yeni N'yi getir
 end if
end while

$$\sigma = \sigma_0(p - p_c)^k \quad (7)$$

Sızıntı eşiği (p) ile iletim (σ) ilişkisi üstel olarak verilmektedir. Öte yandan dolgu malzemesinin hacimce fraksiyonu da etkili olup Eşitlik 8'de gösterildiği gibi, parçacıklar arası mesafeyle ilişkilendirilmektedir.

$$d\alpha\varphi^{-1/3} \quad (8)$$

Tüm dolgu malzemesinin tam temas halinde olması mümkün olmadığı için oluşacak ufak boşluklar ve temazsızlıklar ise gerilim etkisiyle aşılmaktadır. Meydana gelen bu akış “tünelleme” ile açıklanmaktadır. Tünelleme belli bir mesafe altında olan parçacıkların uygulanan uyarım sonucu elektron transferi gerçekleştirebilmesine verilen isimdir. Hesaplamalar ve benzetimler yapılırken, kompozit içerisindeki iki karbon parçacık

iletimi için belli bir mesafenin altın olmalıdır ve bariyer olabilecek tünelleme direnci Eşitlik 9 ifade edilmektedir[102].

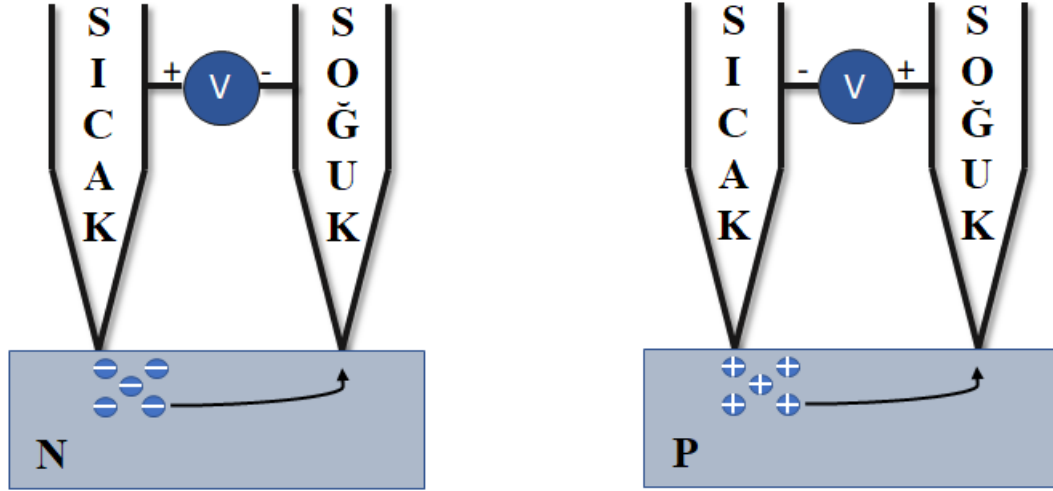
$$\rho = \frac{h^2}{e^2 \sqrt{2m\lambda}} e^{(\frac{4\pi d}{h} \sqrt{2m\lambda})} \quad (9)$$

d , parçacıklar arası mesafe diğer bir deyişle tünelleme mesafesi, h , Plank sabiti, λ tünelleme için potansiyel bariyer yüksekliği, m , elektron kütlesi, e ise elektron yüküdür. Yukarıdaki ifadeden, λ ve d 'nin parçacık dolu nanokompozitlerin iletkenliğini etkilediği açıkça görülmektedir. Yığın halinde katı malzemelerinde veya polimer matrislerde bariyer yüksekliklerinin ölçülmesi için genel geçer bir yöntemin bulunmamasıyla beraber, bu tez kapsamında literatürdeki benzer polimerik matrislerin değerlerine dayanılarak elde edilen TPU reçine matris malzemesi için λ değeri 1 eV olarak kabul edilmiştir[126].

4.2. YARIİLETKEN KATMANIN KARAKTERİZASYONU

Yarıiletken karakter, elektron ve deliklerin dağılımına, hareketlerine ve rekombinasyonuna bağlıdır. Bu hareket iki temel fenomen olan sürüklenme ve difüzyon üzerinden gerçekleşmektedir, bu bağlamda sürüklenme akımı ve difüzyon akımı ile açıklanmaktadır. Sürüklenme, elektrik alan kaynaklı yük taşıyıcıları hareketidir. Termal olarak hızlanan parçacık hareketinden öte sürüklenme hareketi parçacıklar için hareketi ifade etmektedir. Parçacıklar için hız konuşulduğunda ise sürüklenme hızı ifade edilir. Elektronlar ve delikler termal etkiyle hareket geçer, ancak bu hareket doğrusal değildir[8]. Hareket doğrultusu kristaldeki farklılaşmalar ile yön değiştirmektedir. Çarpışmalar arasındaki ortalama geçen süre 10^{-13} s bandındadır[8]. Termal etkinin hareketliliğe sebep olmasından kaynaklı bir ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem sıcak-nokta probu olarak ifade edilmektedir. Termal farklılaşma, sıcaklık farkına bu da bir akım oluşumuna neden olur. N-tipi bir yarıiletken için, örnek üzerine sıcak bir probun teması sağlanır, sıcak probun yanına da ölçümün yapılacağı soğuk (oda sıcaklığında) metal prob yerleştirilir. Sıcak probun etrafındaki elektronlar daha yüksek termal hıza kavuşurlar, bu sayede soğuk prob

yönünde hareket başlamaktadır. Dengesizlik, elektronların soğuk tarafta birikmesine bu da potansiyelde negatif gerilim okunmasına neden olur. (Şekil 4.2)



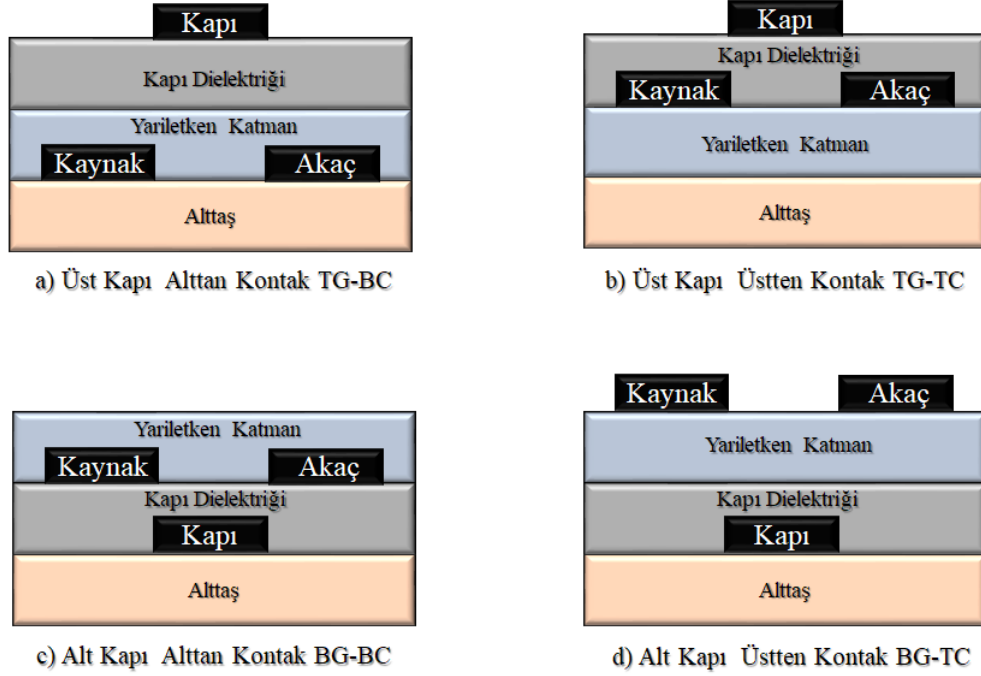
Şekil 4.2 Sıcak-Nokta Prob Ölçümü ([8]'den esinlenilmiştir.)

4.3. TRANSİSTOR TOPOLOJİSİ ve MATEMATİKSEL İFADESİ

İnce film transistörler (TFT), organik elektronik çalışmalarında sıkça gündeme gelmekte ve oluşturulan topolojilerin TFT'lerden esinlenildiği gözlenmektedir[127]. Çalışma prensibi, MOSFET'ler gibi olup, TFT'leri oluşturan katmanlar da üç terminalli elektronik aygıtlarla benzer şekildedir. MOSFET'te kapı üzerinde gerilime bağlı olarak dielektrik/yarıiletkenin kapıya yakın yüzeyinde taşıyıcıların hareketleri oluşur. Kapı dielektriği ve elektrik alan etkilerinin gözlendiği bu yapı bir kapasitör gibi davranmaktadır ve MOS kapasitör olarak terminolojide yer almıştır[128]. MOSFET'ler ile TFT'ler arasındaki en büyük fark ise kaynak ve akış terminallerinde p-n eklemenin olmamasıdır. TFT'lerde de terminaller arasındaki akış elektrik alan kontrollü olup, akışın olduğu terminaller metallere meydana gelebilmektedir. Safsızlık oluşturmak için ekstra bir difüzyon basamağına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu çalışma kapsamında da elektrotlar bakır olarak tercih edilmiş ve alan etkili transistörlerden olan TFT'lerden esinlenilmiştir.

TFT'lerin genel geçer birkaç formu vardır ve Şekil 4.3'te verilmiştir[129]. Bunlar, kapı elektrotuyla ilişkili olarak ifade edilmiş, üst kapı (TG) ve alt kapı (BG) olarak ikiye

ayrılmaktadır. Ayrıca, akaç ve kaynak terminallerinin, yarıiletkenle olan durumuna göre de üstten kontaklı (TC), veya alttan kontaklı (BC) olarak farklı şekilde ifade edilmektedir. Tüm bu kombinasyonlara bakıldığında aslında dört farklı topolojiden bahsetmek mümkündür.



Şekil 4.3 TFT Topolojileri ([9]'den esinlenilmiştir.)

Tüm konfigürasyonların kendilerine göre getirileri bulunmaktadır. Bunlar üretimde kullanılan malzemelere ve üretim koşullarına (sıcaklık vb.) bağlıdır. TG topolojisinde kapı diğer iki elektrot üst üste gelmemektedir ve bu da parazitik kapasitansın azalmasına fayda sağlamaktadır. Konvansiyonel üretim yöntemleri ve endüstride tercih edilen TG yapısında yarıiletken yüzeylerin kolay işlenmesi ve kristal yapısının deforme olmaması için caziptir. Böylelikle yüksek sıcaklık altında dahi kesintisiz şekilde üretim yapabilmek mümkün hale gelmektedir. Bu getirilere ek olarak, kapı elektrodu tüm yapıyı koruyan bir katman görevi görüp sarmal bir desen oluşturmaktadır. Dış etkileri engelleme kabiliyeti sayesinde koruyucu katman maliyetini düşürebilmektedir. BG yapılarda ise süreçler daha basit olup üretim açısından kolaylıklar sağlanmaktadır. Kararlı elektriksel özellikler nedeniyle TFT'lerin sık tercih edilen üretim yapılarından[127]. Bu sayede elektrotların dış etkilere maruz kalma durumu da azalmakta özellikle BG-BC topolojisinde oksitlenme ve elektrotların ömründe

kısaltmalar azalmaktadır. Bu çalışmada, BG-BC yapısı tasarım açısından uygun görülmüş ve bu şekilde ilerlenmiştir. Kullanılan üretim yöntemde de BG-BC tasarımının getirileri ifade edilmektedir.

Alan etkili transistörlerin çalıştığı aralıklar, doyum bölgesi, doğrusal bölge ve kesim bölgesi olarak ifade edilmektedir ve karakterinin analizi yapılırken, doğrusal ve doyum bölgelerindeki tepkileri önemli bulgulardır. Çalışma kapsamında da akım-gerilim ($I - V$) ilişkisi incelenmiştir. Doğrusal bölgede çalışırken, V_{DS} değeri göreceli olarak daha düşük olup, kanalın taşıyıcı hareketine gösterdiği dayanım kapı-kaynak gerilimi (V_{GS}) tarafından kontrol edilmektedir. Gerilim kontrollü bir direnç gibi de düşünülen bu yapıda, elektrik alan ile biriken yükler homojen bir dağılım göstermektedir. Akaç akımı (I_{DS}) Eşitlik 10'de verilmiştir.

$$I_{DS} = \mu_{FE} C_{ox} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right) \quad (10)$$

burada μ_{FE} doğrusal bölgedeki hareketlilik (İng. mobility), C_{ox} birim alana düşen oksit kapasitörü olarak ifade edilen değer olup bu çalışma dahilinde kapı ve yarıiletken katman arasında oluşan kapasitif yüküdür. W kanal genişliği, L de kanal uzunluğudur. Doyum bölgesi için ise durum daha farklı olup, V_{DS} değeri V_{GS} 'e göre daha büyüktür. V_{GS} sabit tutulduğunda V_{DS} 'teki değişim akımı değiştirmemekte ve sabit bir akım çıktısı sunmaktadır. Akım artırıldığında ise akaç elektrotuna yakın kısımda yüklerin tükenmesiyle kanal bölgesinde daralma oluşur ve "pinch-off" olarak adlandırılır.

$$I_{DS} = \mu_{sat} C_{ox} \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (11)$$

μ_{sat} doyum bölgesindeki hareketliliği ifade etmektedir. TFT'lerde performans kriterleri değerlendirilirken, yük taşınımı ve çıkış değerleri incelenmektedir. Bunun yanında, açma/kapama oranı, eşik gerilimi ve eşik altı salınımı ve hareketlilik gibi bazı önemli parametreler de cihaz performansını etkileyebilmektedir. Açık ve kapalı durumlardaki akım oranı (I_{ON}/I_{OFF}) en yüksek I_{DS} (doyumdaki değer) ile en düşük I_{DS} oranıyla ifade

edilmektedir. Eşik gerilimi diğer bir kriter olup doğrusal ve doyum bölgeleri için farklı şekilde ifade edilebilmektedir. Ancak genel olarak, kesim durumundan iletim kanalının oluşmasını sağlayan kapı gerilim değerini ifade eder (V_{Th}). Çalışmalarda akış-kaynak akımının karekökü ($\sqrt{I_{DS}}$) ve kapı gerilimi (V_{GS}) ilişkisiyle gösterilmektedir. Açılma gerilimi (V_{ON}) belirli bir V_{GS} değerinde akımın oluştuğu gerilimi ifade eder. Yarıiletken katmanda bulunan safsızlığa neden olan tuzaklar, eşik altı salınım(SS) sonucunda saçılmalar göstermektedir. Tuzak yoğunluğu (D_{it}), SS ile ilişkili olup Eşitlik 12’de verilmiştir[127].

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left(\frac{qSS}{2.3kT} - 1 \right) - C_{ox} \quad (12)$$

k Boltzmann sabitini, T mutlak sıcaklığı, q elektronun yükünü tanımlamaktadır. Kanal içerisindeki hareketlilik sabit olmayabilir ve elektrik alan etkileriyle değişkenlik gösterebilmektedir. Bunun için etkin hareketlilik (μ_{eff}), alan etkisiyle hareketlilik (μ_{FE}) ve doyumdaki hareketlilik (μ_{sat}) sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir. Doyumdaki hareketlilik V_{DS} yüksek seviyelerde kabul edilmektedir[127].

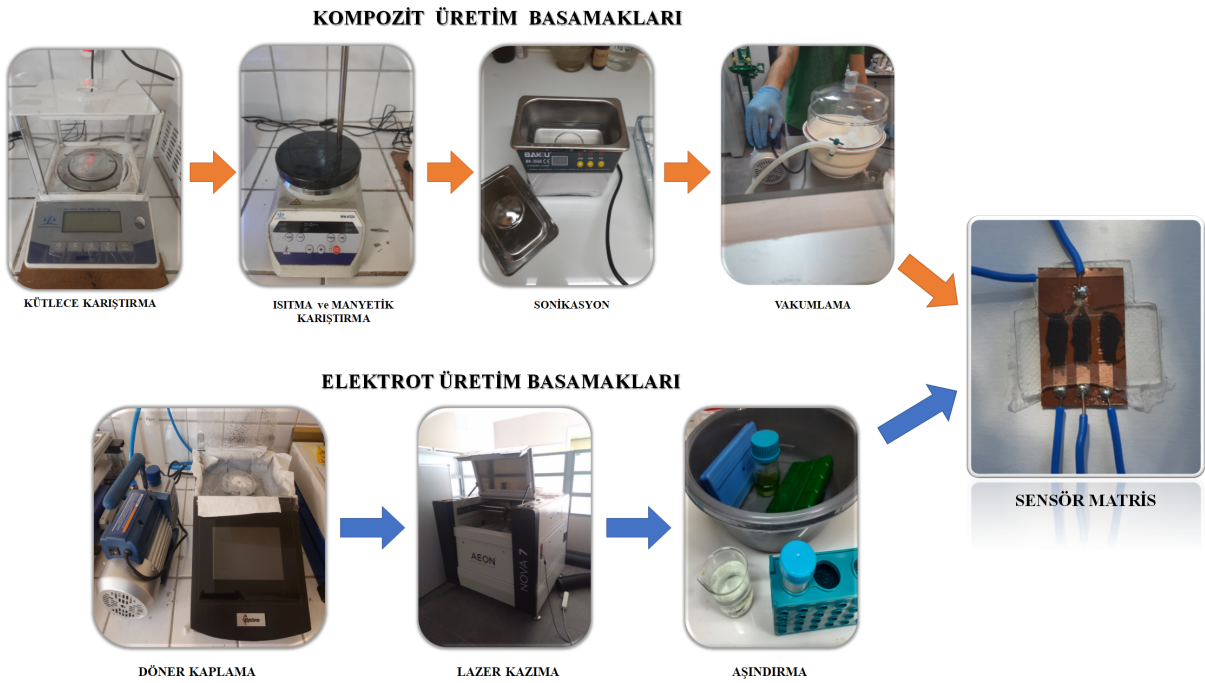
$$\begin{aligned} \mu_{eff} &= \frac{g_d L}{WC_{ox}(V_{GS} - V_{Th})} \\ \mu_{FE} &= \frac{g_d L}{WC_{ox} V_{DS}} \\ \mu_{sat} &= \frac{2L}{WC_{ox}} \left(\frac{\delta \sqrt{I_{DS}}}{\delta V_{GS}} \right)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

Genel bir performans yorumu yapılması gerektiğinde, μ_{sat} daralmış bir kanal durumunda hesaplandığı için, dengeli karşılaştırma adına μ_{FE} çok daha sağlıklı olacaktır. Tüm bu yaklaşım ve kriterler değerlendirildiğinde dışarıdan etkiyen bir kuvvet ile kanal formunun değişmesi, hareketlilik üzerinde, kapasitif etki üzerinde ilişkili olarak etkilere sahiptir. BG-BC yapısında üretilmiş bir esnek FET’in akım değişiminin kuvvete bağlı olarak

elde edilmesi ve bunların bir sınıflandırma algoritması ile sonuçlandırılması, mekanik etkinin transistör matris üzerinden algılanarak bir dokunsal uygulama yapılmasını mümkün kılacaktır. Bu şartlar çerçevesinde üretim yöntemi ve malzeme seçimi de karakteri etkileyecek algılama operasyonunun hassasiyetini değiştirecek etkenlerdir.

4.4. ÜRETİM YÖNTEMİ

Genel geçer mikroelektronik yapıların ve MEMS ve NEMS aygıt tasarımında kullanılan yöntemlerin esnek elektronik uygulamalarında da sıkça tercih edildiği bir önceki bölümde detaylı olarak ifade edilmiştir. Bu üretim örneklerine değinilmiş ve süreçler pozitif-negatif yönleriyle ele alınmıştır. Tüm bu bilgiler dahilinde, esnek FET tasarımı BG-BC olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yukarıdan aşağıya üretim yöntemi benimsenerek, endüstride kullanılan birkaç üretim basamağı azaltılmış, üretim süreçleri kısaltılmıştır. Üretim akış şeması Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 Üretim Yöntemleri ve Akışı

Elektrotların ana malzemesi olan bakırların kaplama ile elde edilmesi mümkündür. Bunun için sıçratma kaplama yöntemi tercih edilmektedir. Ancak kaplama sonrası tüm yüzeyde oluşan ince filmin, uzaklaştırılması ve spesifik alanın kaplanması adına öncesinde bir maske tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu basamakların indirgenmesi adına hali hazırda polimer üzerine bakır kaplanmış pyralux adı verilen bakır plakaların kullanımı daha uygun bulunmuştur. Ayrıca bu yaklaşım ile yüksek teknoloji üretim sistemlerinden öte ev tipi yöntemlerle bu basamak belirli seviyelerde hayata geçirilebilecektir. Pyralux (DuPont™ Pyralux® AP), iki yüzeyi bakır ile kaplı arasında PI barındıran DuPont firmasına ait bakır plakadır. Yukarıdan aşağı üretimde kullanılan materyalin desenlenmesi ve şekillendirmesi söz konusu olacağından, pyralux üzerindeki bakır istenilen forma getirilmelidir. Bunun için bakır yüzeye dökme, takibinde döner kaplama yöntemleri veya alternatif olarak döner kaplama cihazında spreycaplama kullanılarak akrilik boya serilmektedir. Farklı renkte boyalar (Polisan Akrilik Düz Renkler Serisi- Altın, Siyah, Gri) kullanılmıştır. Her birinin içerdiği farklı renk pigmentlerinden dolayı aynı lazer ve dalga boyunu soğurma oranının değişeceği düşünülerek renk değişimine gidilmiştir. Bu iki yöntemden spreycaplamanın daha hızlı ve homojen sonuçlar verdiği elde edilmiştir sonuçlarda buna dair çıkarımlar anlatılmıştır. Dökme kaplama işlemi için akrilik boyanın aseton ile seyreltilmesi gerekebilmektedir. Spreycaplamayla, bakır yüzey dakikadaki devir sayısı (RPM) 2000 olacak şekilde 3 saniye boyunca akrilik boyayla kaplanmıştır. Buradaki RPM değeri ve dönme süresi, kaplama kalınlığını doğrudan etkilemektedir. Bunun için denemeler yapılarak uygun kalınlık elde edilmiştir. Her iki yüzeyi kaplanmış ve bir yüzeyi kaplanmış iki farklı pyralux parçası, fotorezist etkiye benzer amaçlarla kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Benzer maskeleme işlemi çok ince bir katman oluşturacak şekilde 3B baskı ile de elde edilebilir, ancak baskı esnasında pyraluxun ısıyla işleme tabi tutularak yüzey tutunma kuvvetinin artırılması gerekmektedir. Öte yandan 3B baskı ile direk desen yüzeye aktarılabilir kimyasal aşınma işlemiyle üretime devam edilebilir. Ancak bu çalışmada akrilik boya kaplı yüzey CO_2 lazer (AEON Nova 7) ile aşındırılmıştır. Lazer parametrelerinin oluşan desen niteliklerine etkisi sonuç kısmında çizelge ile ifade edilmiştir. Temelde 22mm/s hızla hareket eden lazerin gücü %15 olarak, oluşturulan kazıma çizgileri arası 0.04mm olarak ayarlanmıştır, bu sayede $50\mu m$ kanal genişliğine inilmek hedeflenmiştir. Farklı güç, ve hız değerlerinde

kanal uzunluğu değişmektedir. Lazer ile istenilen desenin negatifi lazer kazıma girdi olarak tasarlanıp, lazer yazıcıya verilmektedir ve desen akrilik yüzeyde oluşturulmaktadır. Ardından 10ml deiyonize su (İng. DI Water) üzerine 10ml hidroklorik asit (HCl) 40ml de hidrojen peroksit (H_2O_2) çözeltisi oluşturulmaktadır. Bu çözelti metal yüzeyin aşındırıp çözerken, organik materyalleri çözücü görev üstlenmemektedir. Böylelikle, elektrotların, yüzeyi akrilik boya ile kaplı kalarak çözünmemiş, kanal ve tek yüzeyi kaplı olan pyralux plakanın bir yüzeyi tamamen çözünmemiştir. İki yüzeyi akrilik boya ile kaplanmış örneklerin kapıları da bakır elektrottan meydana gelirken, bir yüzeyi kaplı olan tasarımın arka yüzeyi tamamen aşınmış ve PI film tamamen erişilebilir hale gelmiştir. Bu noktada PI film üzerine lazer endükleme ile grafen elektrotlar desenlendirilirken, aşınan filmdeki MOS kapasitörünün, d parametresi de azalmaktadır. Bu noktada bakır elektrot ve grafen elektrotlu iki örneğin performansları sonuç kısmında karşılaştırılmıştır. Grafen birçok yöntemle üretilebilirken, son çalışmalarda lazer endükleme ile grafen (LIG), düşük maliyeti ve basit üretimi ile ön plana çıkmaktadır. BG elektrota ve akımın akacağı iki elektrota sahip yapının, elektrik alan ile kontrolü için aktif bölgeye ihtiyacı vardır. PI kapı dielektriği görevi görürken, üst yüzeyde bulunan elektrotlar, birçok kompozit ile BC yapısına kavuşturulmuştur. Kompozitler, PDMS/CB, PVA/CB, TPU/CB ve Reçine/CB olarak hazırlanmıştır. Katkılanacak CB miktarı yapılan benzetimlerde elde edilen sızıntı eşiğine göre karar verilmiştir. Sızıntı eşiğinin başlangıcı olan %5.6 değerıyla %20 arasında değişkenlik göstermiştir, bu değerlere bağlı olarak yarıiletken karakterde değişimler oluşturulmuştur. 2gr TPU içerisine 0.1gr CB eklenerek 20:1 oranında karışım hazırlanmış, farklı karakter incelemek adına 1gr TPU içerisinde 0.1gr CB ile 10:1 oranında da başka bir örnek elde edilmiştir. Her bir polimerin farklı karakteri sonuçların da farklı çıkmasına sebep olmuştur. PDMS-CB hazırlanırken, Silyard-184 (Dow Corning) PDMS kullanılmış olup, ajan ve baz oranı 10:1 oranında tutulmuştur. Ancak elastomer yapısına ulaşmasını sağlayan ajan katılmadan önce PDMS bazı Dimetilformamid (Sigma-Aldrich, DMF) ile çözölüp direkt karıştırma yapılarak içerisine CB parçacıklar eklenmiştir. 500 RPM'de 85° derecede 2 saat karıştırılmıştır, çözücü uzaklaştırılırken, kümelenme engellenmesi adına dönüş hızı çok artırılmamıştır bu işlem sonunda 10:1 oranına sadık kalınarak ajan eklenerek polimerik çapraz bağlar oluşturulmuştur. Diğer bir kompozit olan PVA-CB, hazırlanırken, PVA granöl halde alınmış

olup, DI içerisinde 70°’de 700RPM’de 30 saat çözündürülmüştür, ardından DMF içerisinde bulunan CB parçacıklar, indirekt metotla karıştırılmıştır. Oluşturulan kompozit, 500RPM’de 2 saat daha manyetik karıştırıcıyla karıştırılmıştır. Kütlece karışım oranı 20:1 olacak şekilde üretim gerçekleştirilmiştir. TPU-CB karışımı da PDMS-CB karışımına benzer şekilde direkt metotla DMF içerisinde çözülmüş ardından manyetik karıştırıcıda çözücü ısıtılarak karıştırılırken uzaklaştırılmıştır. Öte yandan kullanım öncesinde her kompozit ultrasonik banyo içerisinde 15 dakika sonikasyona tabii tutulmuştur, böylelikle kullanım öncesinde parçacık dağılımı homojen tutulmaya gayret edilmiştir. Tüm bu adımlar çeker ocağın içerisinde gerçekleştirilmiştir, çünkü hem bakır çözücüsünde reaksiyonlar sonucu H_2 gazı meydana gelmekte, hem de uçan DMF bulunduğunda toksik etki oluşturabilmektedir. Makromolekül yapıda olan ve geri dönüşüme uygun olan reçine ise bir organik polimerdir. CB ile karıştırılması işlemi organik çözücü içinde gerçekleştirilmiştir. Foto duyarlı olan reçinenin çözünme ve karıştırılma basamaklarında alüminyum folyo ile kaplı bir beher içinde gerçekleştirilerek, kontrolsüz olarak foto-polimerizasyonu engellenmiştir. Elde edilen farklı kompozit örnekleri her biri 15ml olacak şekilde dökme yöntemi ile bakır elektrotlar üzerine eklenmiştir. Yarıiletken miktarının etkisini araştırmak adına 30ml olacak şekilde yarıiletken katmanlar oluşturulmuştur. BG-BC topolojisinin oluşturulduğu bu tasarımda eksik kalan alttaş veya koruyucu katman olarak ifade edilecek unsur ise PDMS olarak seçilmiştir. PDMS hem kristal yapısından dolayı ışığa olan dayanımından, hem de yüksek hidrofobik karakterinden dolayı tasarımın uzun soluklu kullanımını mümkün kılmaktadır. Benzer şekilde alttaş olan PDMS de 10:1 oranında hazırlanarak benzer elastik kabiliyet korunmuş ve bükülebilir yapıların korunması sağlanmıştır. 3B tasarım programında çizilmiş olan bir kalıp içerisine yerleştirilen FET matrisimiz PDMS ile kaplanmış koruyucu tabaka bu şekilde elde edilmiştir. PDMS içerisindeki saflığı etkileyebilecek baloncuklar, vakuma tabii tutularak uzaklaştırılmış ve daha homojen bir katman oluşturulmuştur. Mekanik etkinin gözlemlenmesi için yüzeyinde farklı desenler bulunan bir küp üretilmiş ve küp, basınç sistemine yerleştirilip dokunsal sensör matrise kuvvete uygulanmıştır. 3B modelleme için Ender-3 Pro yazıcı kullanılmıştır. Üretim süreçleri Şekil 4.4’te verilmiştir.

Tüm üretim süreci incelendiğinde, düşük maliyette hızlı denenebilir, farklı elektriksel

karaktere sahip örnekler hazırlanmıştır. Bu sayede optimal algılama niteliği için deneylerde kullanılacak elemanlar elde edilmiştir. Çıktıları etkileyen üretim parametreleri sonuç kısmında karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

4.5. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

4.5.1. Görüntüleme ve Analitik Yöntemleri

Genellikle bir nesneye ait tanımda bulunmadan önce, insan doğası gereği görünüşü üzerinden yola çıkarak hareket etmektedir. Aynı yaklaşım bilimsel olarak da kabul görmüş ve bu amaç doğrultusunda nano boyutlarda görüntüleme için kullanılan bazı metotlar geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın ve bilineni taramalı elektron mikroskopudur (SEM). Odaklanmış bir elektron demeti örnek üzerine düşürülür ve ardından yüzeyden saçılan birincil ve ikincil elektronların algılamasıyla yüzey hakkında bilgi toplamımızı sağlamaktadır[130]. Maddesel özelliklerini, enerji dağılımlı X-Işını spektroskopisi (EDAX) kullanarak, saçılan X-ray ışınlarının atomik olarak farklı içeriğe sahip örneklerin bilgileri elde edilmiştir. Atomların farklı katmanlarındaki elektronların bu saçılmalara etkisi gözlenerek maddesel yapısı da yorumlanabilmektedir. Diğer bir görüntüleme yöntemi ise atomik kuvvet mikroskopuyla görüntülemedir. Bu görüntüleme yönteminde detaylı bir maddesel analizden öte morfolojik bilgiler elde edilir. Yüzeyin pürüz durumu ve uygun görüntüleme parametreleriyle içeriği oluşturan maddelerin (bu çalışma için CB'lerin) oluşturduğu tepe çukur noktaları tespit edilebilmektedir. Yüzey analizi yapılırken, AFM parametreleri örneklere göre değişiklik gösterirken, "tapping" modda çalıştırılmıştır. SEM için kullanılan parametreler ise şekil altında verilmektedir ve her biri görüntüleme netliğini elde edebilmek için değişiklik göstermiştir; 'HV' elektronların ivmelenmesi için kullanılan gerilim değerini ifade ederken, 'WD' çalışma mesafesini, 'mag' büyütme oranını vermektedir. Kullanılan SEM ve AFM marka ve model olarak şöyle sıralanabilir, FEI-Quanta 200 FEG ESEM, Nanomagnetic ezAFM. Bunun yanında örneklerin üretimi sonrasında oluşan desenlerin hızlı kontrolü için optik mikroskoplardan yararlanılmıştır.

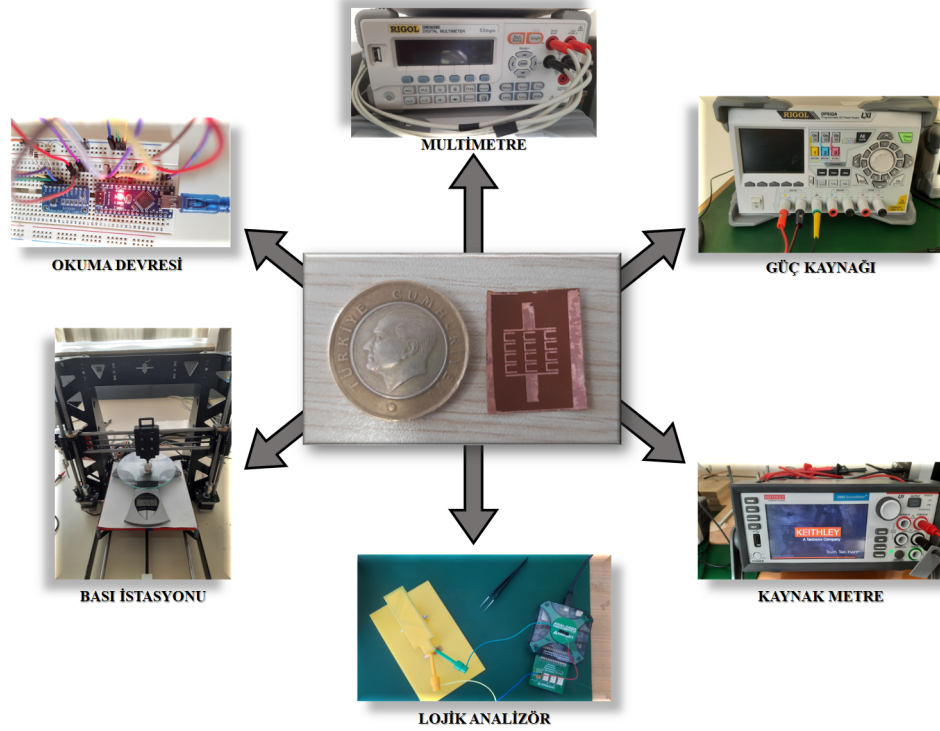
Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), bir tür titreşim spektroskopisidir. FTIR infrared yoğunluğuna karşı dalga sayısını ve bunların Fourier dönüşümü yöntemiyle ilişkilendiren bir analitik yöntemdir. FTIR çoklu IR bölgenin birleşiminden meydana gelmiştir, ve bunlar şöyle sıralanabilir; yakın dalga boyu (NIR; $4000\sim14000\text{ cm}^{-1}$), orta dalga boyu (MIR; $400\sim4000\text{ cm}^{-1}$) ve uzak dalga boyu (FIR; $4\sim400\text{ cm}^{-1}$) kızıl ötesi spektrumdur[131]. FTIR yardımıyla da bağ yapılarına dair bilgi edinmek mümkün hale gelmektedir. Moleküler titreşimler IR ışınlarının soğurmakta buna bağlı olarak katı, sıvı, gaz, çözeltiler gibi organik bileşiklerin bağ yapıları, bağlandığı yer bilgisi elde edilmektedir[131].

Hall etkisi, yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğunu, elektriksel direnci, taşıyıcılara ait hareketlilik bilgisini vermektedir. Hall etkisi ölçümü basit bir yonteme inşa edilmiştir bu sayede düşük maliyeti ve hızlı geri dönüş alınabilmektedir ve endüstride de tercih edilmektedir. Uygulanan gerilimin oluşturduğu bir kanal üzerinden elektron hareketine dayanan bu yöntemde, taşıyıcı yoğunluğunu da elde etmek oldukça kolay ve doğru sonuç vermektedir, temelde manyetik alan yük hareketi prensiplerine dayanmaktadır.

Raman spektroskopisi adı verilen başka bir karakterizasyon yöntemi de bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Raman spektroskopisi temelde moleküllerin titreşim modlarını anlayabilmemizi sağlayan bir analitik yaklaşımdır[132]. FTIR'a benzer elde sonuçlar elde edilen Raman'da hedef dipol momentlerin incelenmesi değildir. Moleküllerin polarizasyonlarındaki değişimler Raman için ölçülen parametredir. Işığın moleküler girişimi, elektronların konumlarındaki değişime sebep olup polarizasyonda farklılaşmayla sonuçlanır. Raman modları da bu polarizasyon sonucunda algılanabilmektedir. Atomik bağlar içeren moleküller, fotonlar sayesinde polarize olur. FTIR için algılanması zor olan bağlar Raman spektroskopisi kullanımı daha uygun görülmektedir.

4.5.2. Elektriksel Analiz için Ölçüm Yöntemleri

Benzetim ortamı kişisel bilgisayarda gerçekleştirilmiştir ve bilgisayar özellikleri şöyledir: CPU: Intel Core i7-6700HQ, 2.6 GHz 8 core, Display Card: NVIDIA GeForce GTX 1070. Visual Studio Code üzerinde Jupyter Notebook kullanımı sağlanmıştır. Python dili



Şekil 4.5 Elektriksel ve Mekanik Ölçüm Sistemleri

ile oluşturulan benzetim ara yüzü ve kodu, Pandas, NumPy, Matplotlib kütüphaneleri üzerine inşa edilmiştir. Zaman kütüphanesiyle döngülerin süreleri ve performansları kaydedilmiştir. Laboratuvar ortamında elektriksel ölçümler esnasında da oluşturulan kod parçaları kullanılmıştır. Böylelikle döngüsel ölçümler ve uzun soluklu kayıt işlemleri kolaylıkla sağlanmıştır. Virtual Instrument Software Architecture (VISA) olarak adlandırılan Python içerisindeki PyVISA kütüphanesi olarak erişilebilen bir kütüphane bulunmaktadır. Bu kütüphane yardımıyla USB ara yüzüyle; multimetre ve güç kaynağından (Rigol DP830A) anlık veri kaydedilmiştir. Örneklerin elektriksel karakterini incelemek adına farklı laboratuvar ekipmanları kullanılmıştır. Temel elektriksel bilgilerin hızlı elde edilmesi için Rigol DM3058E multi-metre tercih edilmiştir. Empedans karakteri için NI Elvis II+ Impedance Analyzer ve Keysight LCR Meter (U1730C)'den yararlanılmıştır. Frekans tepkileri de yine benzer şekilde elde edilerek dielektrik karakter yorumlanmıştır bunun için de Digilent Analog Discovery 2 kullanılmıştır. FET karakterizasyonu için Keithley 2450 Source Meter kullanılırken, dokunsal etkilerin çıktılarını elde etmek için ADS1115

16bit-ADC (İng. Analog Digital Converter) kullanılmış ve MCU üzerinden bilgisayara kaydedilmiştir. Tasarlanan veya kullanılan elektriksel/mechanik ölçümler aygıtları, Şekil 4.5'te verilmiştir.

5. SONUÇLAR

5.1. YARIİLETKEN BÖLGENİN BELİRLENMESİ

Kompozit karakterizasyonu ve iletkenlik özelliklerinin benzetim ortamında düzenlenmesi adına, en kısa yol bulma algoritmalarından faydalanarak bir kod oluşturuldu. Deneysel sonuçlar da elde ederek tutarlılık karşılaştırılmak istenmiştir. En önemlisi getirisi de yarıiletken bölgenin belirlenip üretilecek FET'in, aktif katmanında katkılanacak CB miktarını kestirebilmek olacaktır. Bu doğrultuda benzetim, "pandas" kütüphanesi kullanılarak Python diliyle koda dökülerek gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Rigol DM3058E multimetre ile yapılmıştır, gerçek zamanlı veri kaydını da GPIB/Ethernet/RS232/USB ara yüzlerinden PyVisa kütüphanesi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Böylelikle veri kaydı yapılırken, görselleştirmek ve analizi için sınıflandırmak çok daha özele indirgenebilmiştir.

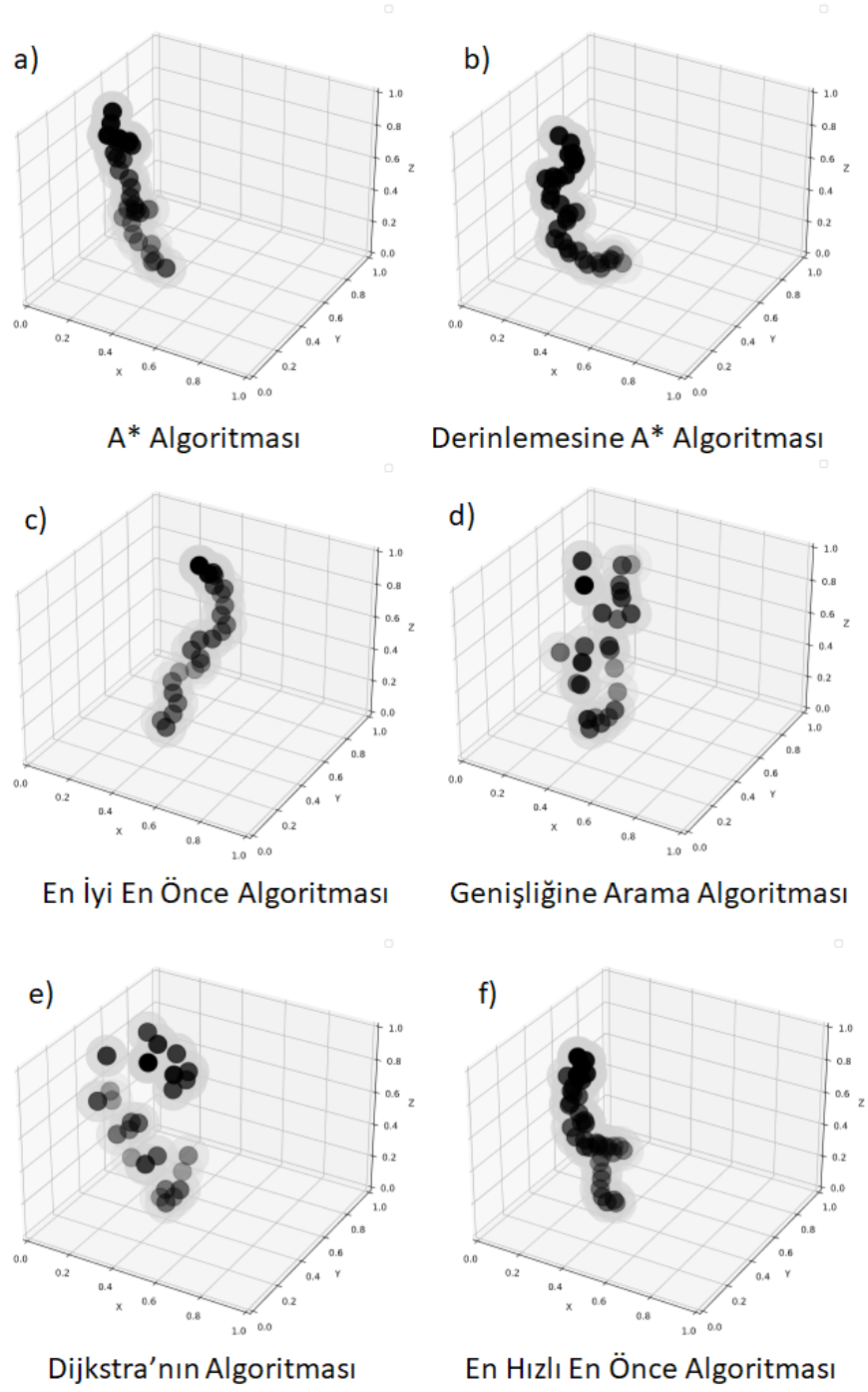
Algorithm 7 Yinelemeli Katkı Malzemesinin Benzetim Kodu [1]

```
Rastgele CB parçacıkları dağıtılır
CB parçacıkların konumları(X,Y,Z) .csv uzantılı dosyaya kaydedilir
while İletim hattı yokken do
    Arama Algoritmasını Çalıştır
    if Hedef noktaya ulaşıldı then
        CB miktarını yazdır, çık
    else
        CB miktarına rastgele ekleme yap
        .csv uzantılı kayıt dosyasına yeni noktaları ekle
        Başlangıç ve bitiş noktalarını güncelle
    end if
end while
```

Kompozit içerisindeki CB miktarı her döngüde artırılarak, yol bulma algoritmaları uygulanmaktadır. Üretimde kullanılan CB parçacıkların çapları 5 nm ile 100 nm

arasında değişkenlik göstermektedir. Bu farklılaşma alınan SEM görüntülerinde de açıkça görölmektedir. Bu nedenle CB parçacıkların çapı benzetimler dahilinde 20 nm olarak kabul edilmiştir. Benzetim $1\mu m^3$ içerisindeki parçacık dağılımı üzerine bir mikromekanik modele oturtulmuştur. En iyi senaryoda üç boyutlu kübik yapı hacimce 238732 adet parçacığı içerebilir. Diğer çalışmalarda da belirtilen kütlece karıştırma oranları incelenip parçacık yoğunlukları kullanarak %5-6 bandındaki, sızıntı eşiği başlangıcı parçacık sayısı 9310 olarak ulaşılmıştır. Hacimce birleşme oranları ise %3,921 değeri olarak belirlenmiş ve sızıntının bu değer sonrasında gerçekleştiği literatüre kazandırılmıştır. Metodolojide belirtilen kuantum tünelleme mesafesi polimerler cinsine bağlı olup PVA için 0.38eV, TPU için 1eV olarak alınmıştır[133]. Bu değerlere bağlı olarak yol bulma algoritmalarında kısıt değiştirilerek iteratif olarak iletim hattının oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir. Sıfır olan parçacık miktarı her döngüde düzenli olarak artırılmıştır. Büyük döngünün içinde arama algoritmaları koşturulmuştur. TPU/CB Kompozitinde iletim hattının oluştuğu kütlece karışım oranı %5.6 veya diğer bir deyişle parçacık miktarı 9312 olarak bulunmuştur. Tüm algoritmaların temel hedefi en kısa yolu bulmak olduğu için izlediği yolda farklılıklar oluşsa dahi kütsel olarak elde ettikleri karışım oranları aynı çıkmaktadır.

İlk iletimin gerçekleştiği anda elde edilen iletim formları Şekil 5.1’de verilmiştir. Her bir algoritmanın kendine ait karakteri sonuçlarda görölmektedir. A* ve en iyi en önce algoritmaları belirli bir yönetime sahip olup, ilerleyişini daha dikey olarak gerçekleştirmiştir, A* algoritması kullandığı sezgisel karakter ve ekstra bilgilerden kaynaklı olarak aralarında en doğrusal yolu seçme gayretindedir ve sonuç noktasına yakınsarken sürekli maliyet değerleri ve başlangıç bitiş bilgisiyle kontrol etmiştir. Derinliğine A* algoritması yeni bir önerme olup daha çok engellerin aşılmasında hızlı kararlar verme üzerine kuru bir algoritmadır, bu çalışmada CB parçacıklar arası geçişlerin daha homojen bir karakter göstermesi bu algoritmanın parlak yönünün ön plana çıkmasını bir nebze baskılamıştır. Genişliğine aramada ise elde edilen iletim hattı çok dağınık gözükmemekte ancak elektron atlamaların gerçekleşebileceği en uzak mesafeler tercih edilmiştir, genişliğine arama ve Dijkstra’nın algoritması benzer dağılımda yönelimler göstermiştir. Bu iki algoritma gezilebilecek noktaları en yüksek seviyede analiz edip alternatifleri sürekli



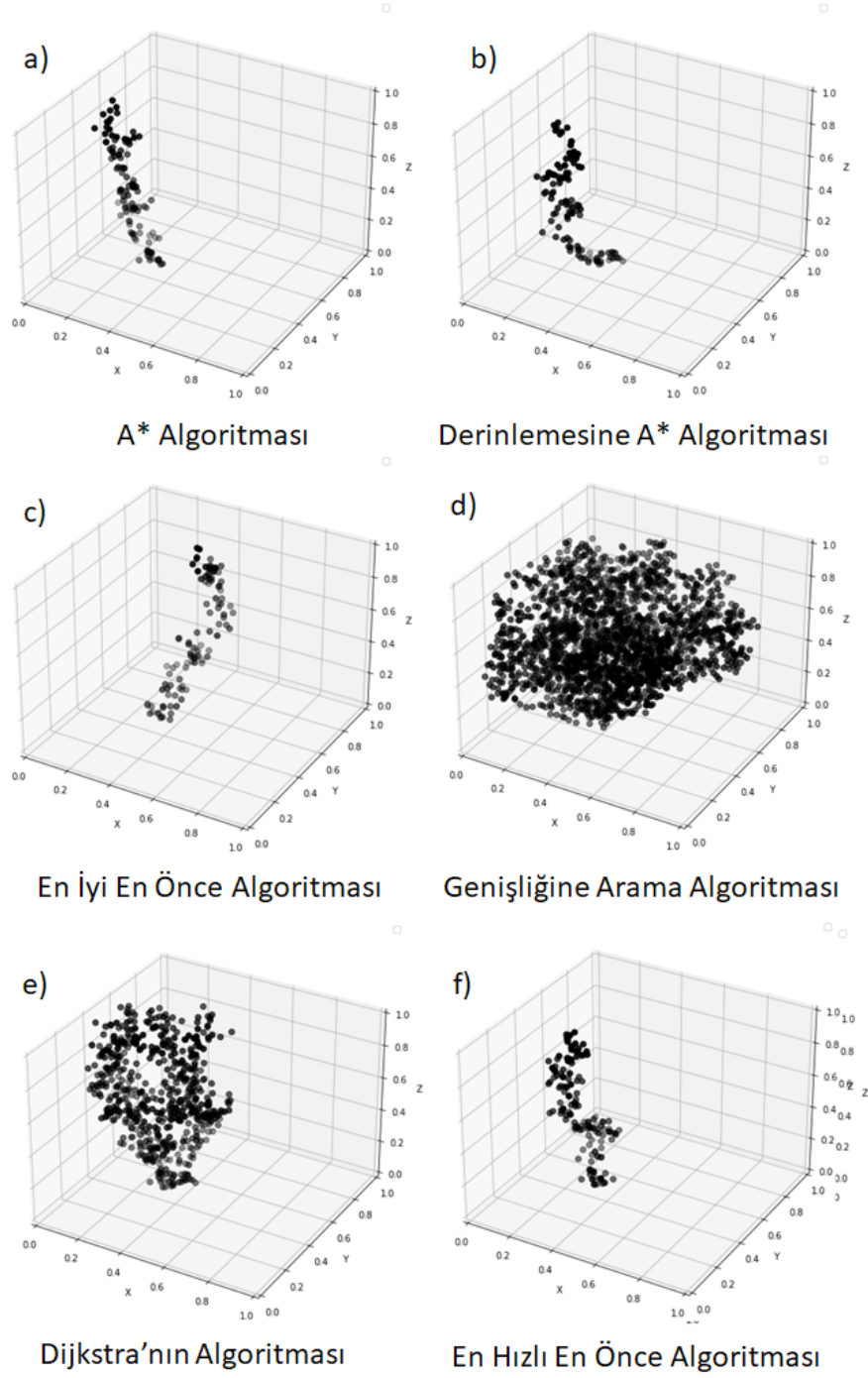
Şekil 5.1 Farklı Arama Algoritmalarında İlk İletim Hattının Oluştugundaki Desenler [1]

değerlendirmemizi sağlar. Sonucunda ise en kısa yolu bulmayı garanti eder. Oluşan iletim yollarındaki parçacık miktarına bakıldığında da dağınık olmasına rağmen daha düşük sayıda noktaya sahip olduğu görülmektedir. "En Hızlı En Önce Algorithması" olarak ifade

edilen sonuçta ise bizlerin önerdiği bir yaklaşımdır. Olasılıksal olarak en yakın noktayı seçerek diğer alternatifleri hiç taramadan ilerlenirse sonuca varılabileceği, ancak dallanmalar hesaba katılmadığı için zamandan kazanç sağlanırken, sonuçta hatanın artabileceği bir algoritma uygulanmıştır. Bu algoritma çıktılarında da CB parçacıkların neredeyse üst üste olduğu durumlar, kümelenmenin en yüksek olduğu senaryolar gösterilebilmekte ancak sonuca ulaşırken en yakın noktanın belirleniyor olması, optimal duruma erişme konusunda uzaklaştırmaktadır. Sızıntı eşiği sonrasında katkı malzemesi eklenmesiyle oluşan iletim hattı sayısı artmaktadır. Buna dair yaklaşımların grafiksel gösterimi için aynı arama algoritmaları kullanılarak malzeme miktarı artırılmaya devam edilmiştir. Bu durumda oluşan iletim desenleri genişliğine aramada daha net meydana gelirken, diğer arama algoritmalarında eksensel bir ilerleme meydana gelmiştir. Bu da göstermektedir ki, sızıntı eşiğinin başlangıcını tespit etmek için performans kriteri önemliyken, bu kriter çalışmamızda döngünün aldığı süreyle gösterilmiştir. Öte yandan dallanmanın ve meydana gelen iletim desenlerinin tespitini, genişliğine aramayla gerçekleştirmek çok daha uygun gözükmektedir. (Şekil 5.2)

Buna dair farklı kompozitler (PVA/CB ve TPU/CB) kullanılarak deneysel olarak da benzetim ortamında çözümler elde edilmiştir. Farklı polimerde tünelleme mesafesinin değişiminden kaynaklı oluşan desenler değişirken, gezilen nokta sayısı da azalmaktadır. TPU'da bu değer 1eV iken PVA'da bu değer 0.38eV olmakta ve bariyer yüksekliği daha rahat aşılabilir hale gelmektedir. Öte yandan her bir algoritmanın kendine özgü karakterinden dolayı farklı döngü süreleriyle sonuçlanmaktadır, iletim hattının ilk oluştuğu an tespit edildiğinde gezilen ortalama nokta sayısı ve geçen ortalama süre Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çünkü oluşan iletim hattı tespit edilirken, tek bir döngünün aldığı süre CB miktarının sıfırdan başlanarak artırıldığı senaryoda önemli bir hal almaktadır. Ek olarak belirtilmelidir ki, iletim hattının oluşmadığı durumlarda CB miktarı sıfıra yaklaştıkça her bir algoritmanın çalışma hızı eş duruma gelmektedir. Bu nedenle çizelgede verilen süreler ve gezilen düğüm sayıları sızıntı eşiğinin başlangıç noktasına aittir.

Çizelgede de görülmektedir ki, en iyi en önce algoritması 2.288s performans ile TPU/CB kompozitlerin iletim hattını belirlemek konusunda uygun gözükmektedir. Katkı malzemesinin yarıçapı ve polimerin karakteri de etkileyen faktörler olduğu için bu



Şekil 5.2 Farklı Arama Algoritmalarında Çoklu İletim Hattı Desenlerinin Gözlenmesi [1]

parameterlerde benzetimde kullanılmış ve değişimi incelenmiştir. PVA kompozitte iletim daha kolay meydana gelirken, daha düşük gezilen düğüm değerleri elde edilmiştir. Benzetim süreçlerinde ilk iletim hattını belirlemek için, en iyi en önce algoritmasının kullanımı zaman

Algoritma	Kompozit	Katkı Malzemesi Yarıçapı (nm)	Gezilen Düğüm Sayısı	İletim Hattını Bulma Süresi (s)
A*	TPU/CB	10	32	2.444
Derinliğine A*	TPU/CB	10	35	2.869
En İyi En Önce	TPU/CB	10	25	2.288
Genişliğine Arama	TPU/CB	10	2090	185.507
Dijkstra	TPU/CB	10	577	44.363
En İyi En Hızlı	TPU/CB	10	44	4.218
En İyi En Önce	TPU/CB	15	19	1.706
En İyi En Önce	PVA/CB	10	7	1.128
Genişliğine Arama	TPU/CB	15	3215	327.411
Genişliğine Arama	PVA/CB	10	3872	1050.506

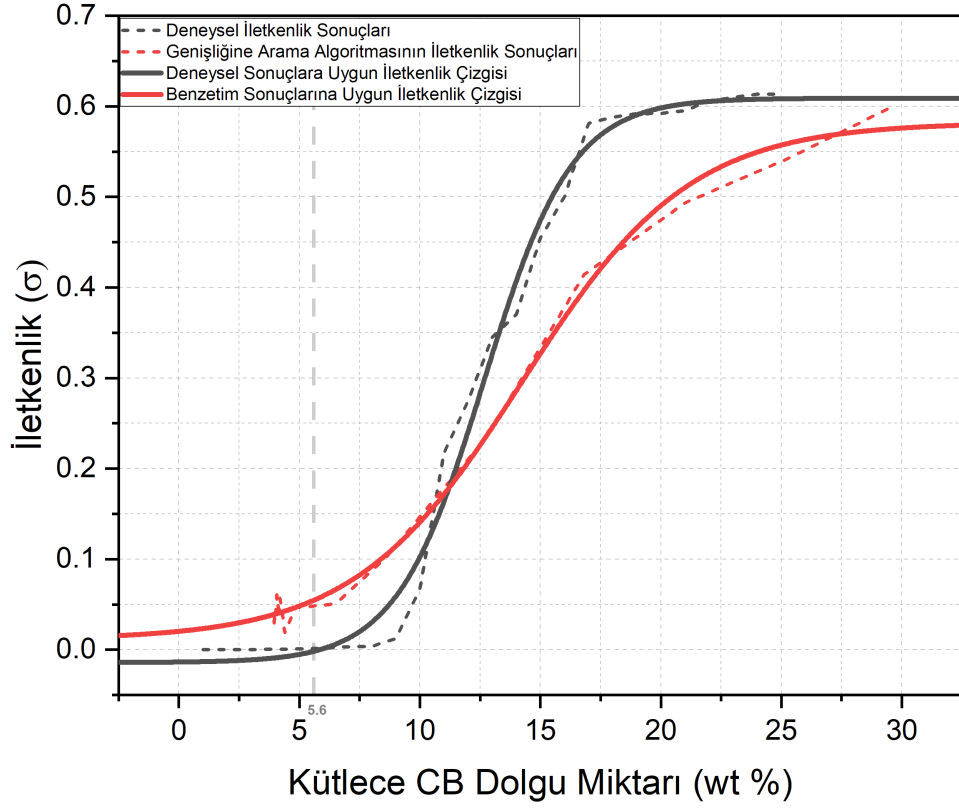
Çizelge 5.1 Algoritma Başarım Çizelgesi [1]

kazancından dolayı uygun görülmüştür. Oluşacak çoklu hatlar için ise genişliğine arama algoritması kullanışlıdır. Tüm bu benzetim sonuçlarının tutarlılığını anlamak adına deneysel olarak farklı CB oranlarına sahip örnekler üretilmiştir.

Sample	Kütlece CB %	Hacimce CB%	Resistivity ($\Omega.cm$)
TPU/CB	5	3.25	-
TPU/CB	7	4.55	7.11×10^4
TPU/CB	9	5.85	1.21×10^4
TPU/CB	13	8.45	6.2×10^3
TPU/CB	15	9.75	2.33×10^3
TPU/CB	17	11.05	1.62×10^3
PVA/CB	17	11.05	217.4

Çizelge 5.2 Farklı Örneklerin Malzemesi ve Elektriksel Karakteri [1]

Kütlece madde miktarının değiştirildiği örneklerde alınan birçok ölçümün ortalama değerleri Çizelge 5.2’te verilmiştir. Katkı miktarına bağlı olarak dirençte azalma yaşandığı gözlenirken, aynı madde miktarına sahip iki farklı polimerin farklı direnç değerlerine sahip oluşu da elektron bariyer yüksekliğinin çalışma mekanizmasıyla örtüşmektedir. Ancak katkı miktarının artışı bir noktada doyuma ulaşmış, baştaki yalıtkan bölgeden iletken bölgeye geçişindeki kadar net olmamaktadır.



Şekil 5.3 İletkenlik - Katkı Miktarının DeneySEL ve Benzetim Sonuçları [1]

Geçiş bölgesi yarıiletken bölge olup FET'in tasarımında aktif bölgenin karakterinin bu aralıkta olması istenmektedir. DeneySEL çıktılar ve genişliğine arama algoritmasının çıktıları değerlendirilerek benzetimin çalışması doğrulanmıştır. Literatürde yer alan değer aralığı ve yapılan deney-benzetim sonuçları bir grafik üzerinde Şekil 5.3'te verilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki benzetim sonuçlarıyla deneySEL sonuçlar birbirlerine yakın olup sadece yarıiletken bölgenin genişliğine dair bir farklılaşma söz konusudur. Sızıntı eşiği başlangıcı net şekilde gözlenmekte ve %5.6 değerlerinde elde edilmiştir. Çoklu hat oluşumu, genişliğine arama algoritması ile sağlanmıştır. Genişliğine arama ile ilk iletim hattı oluşmasına rağmen gezilecek tüm noktalar ve gidilebilecek her düğüm kaydedildiği için, katkı malzemelerini tümüyle kıyaslanarak ne kadarlık bir ağ oluştuğu kestirilmektedir. Böylelikle iletkenlik ilişkisi gözlenmiştir. Bu değerlere sadık kalınarak, deneylerde kütlece en yüksek %10

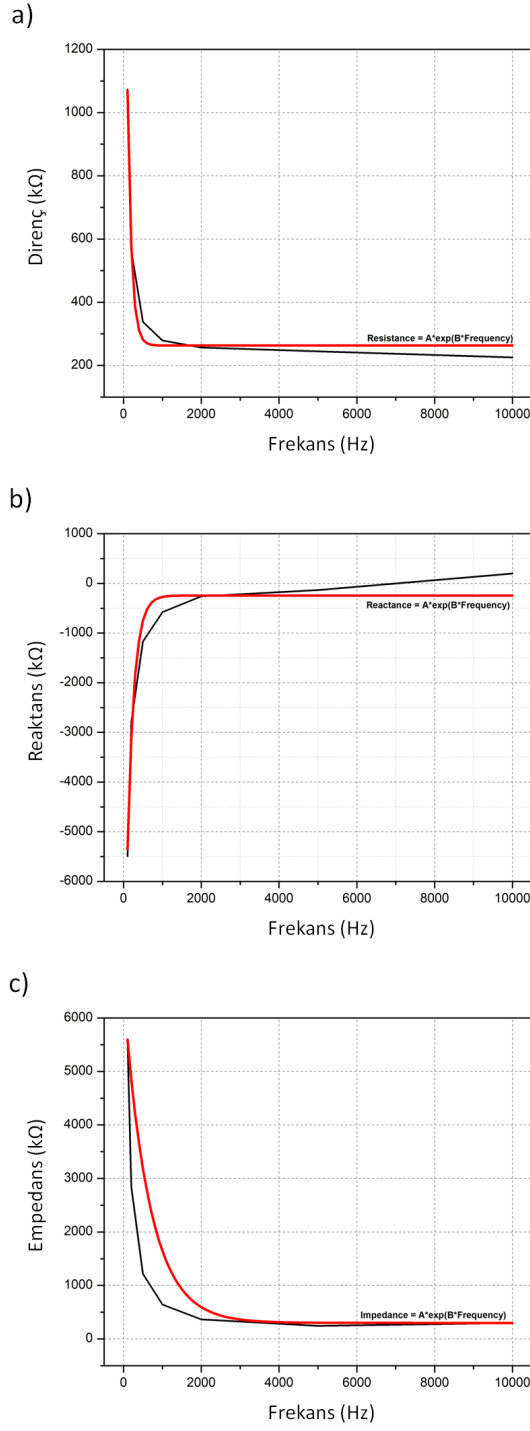
civarında katkı malzemesi kullanılmıştır, dahası düşük elektriksel aktiflik istenildiğinde ise sızıntı eşiğine yakın değerlerde katkılama gerçekleştirilmiştir.

5.2. KOMPOZİT KARAKTERİZASYONU

Çalışmalara, PVA ve TPU polimerlerine CB katkılayarak başlanmıştır, literatürde de sıkça tercih edilmiş olan bu iki polimerin çözünmesi ve çözünen polimer zincirlerine takviye malzemesinin eklenmesi oldukça kolaydır. TPU için organik çözücü gerekirken, PVA daha kolay yöntemlerde DI su ile belli sıcaklıkta çözünmektedir. Üretim ve sentez süreçleri en kolay olan kompozitten başlanarak elektriksel, morfolojik ve maddesel karakterleri incelenmiştir.

5.2.1. PVA/CB KOMPOZİT

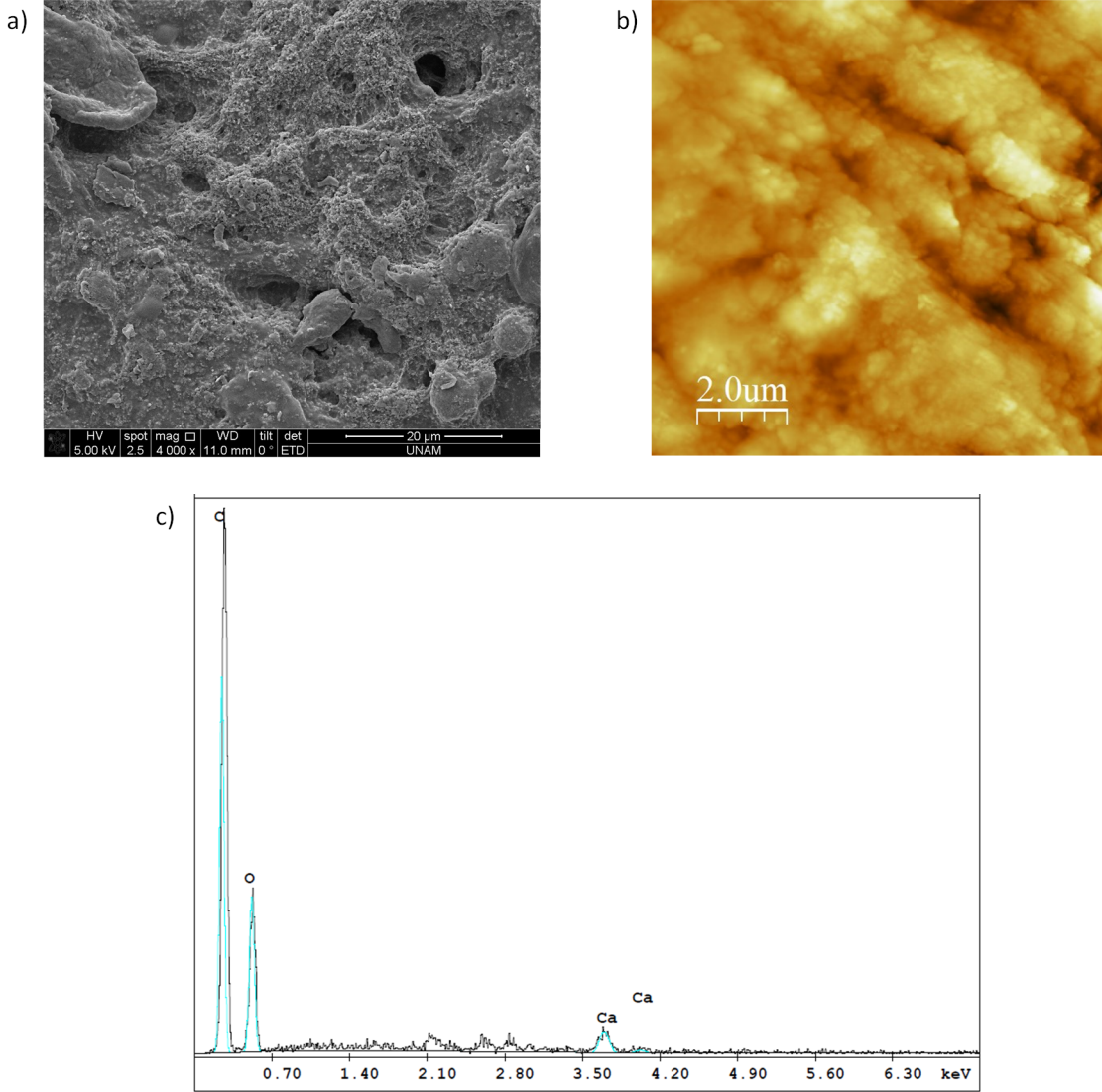
Metotta da belirtildiği üzere, DI su içerisinde farklı PVA/CB kompozitler oluşturulmuştur, yarıiletken bölge olarak belirlenen aralık PVA/CB için kütlece TPU/CB'ye göre daha düşük değerlerde başlayıp, doyuma ulaşmaktadır. Bunun nedeni de PVA polimer zincirlerinin tünelleme bariyer yüksekliğiyle kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Tüm bu yaklaşımlar doğrultusunda PVA/CB yarıiletkenden oluşan FET'in elektriksel tepkileri çok doğrusal ve gerilime bağlı değişimin oldukça düşük olduğu gözlenmiştir, bunun üzerine polimer miktarı artırılarak kapasitif özelliğin yoğunluğu artırılmaya çalışılmıştır. Şekil 5.4'te verilen ölçümlerde de görüldüğü üzere frekansa bağlı olarak tepkiler incelendiğinde yüksek frekanslarda artık empedans değerinin 0'a yaklaşırken, DC (Doğrusal Akım) ölçümlerinde daha negatif bir reaktans bileşeni olduğu gözlenmektedir. Açısal olarak da faz açısı düşünüldüğünde empedansı oluşturan bileşen kapasitif olduğu gözlenmekte ve buna bağlı dokunsal kapasitif uygulamalarda kullanımının daha mümkün olabileceği düşünülmüştür. Özellikle elektrik alan etkisiyle de hareketin mümkün olabilmesi adına sadece rezistif bir karakterin olması yarıiletken katman olarak kullanımı konusunda problem oluşturmaktadır. Şekil 5.4'te elektriksel karaktere ait ölçüm sonuçları verilmiştir. Kırmızı ile belirtilen sonuçlar matematiksel uydurmaya ait olup, deneysel veriler siyah çizgiler ile belirtilmiştir.



Şekil 5.4 PVA/CB Kompozitten alınan empedans çıktıları, (a) direnç (R), (b) reaktans (X) ve (c) frekansa karşı empedans (Z) tepkisi [10]

Düşük tünelleme karakteri ve hızlı değişen frekans tepkisinden dolayı PVA/CB kompozit denemeleri yapılmıştır ancak FET uygulamalarında elektrik alan etkisiyle kontrol edilebilir

etki oluşturulamaması nedeniyle uygulamada yarıiletken katman olarak kullanımının diğerk örneklergöre daha az tercih edilebilir olduğu düşünölmüştür. Uygun çalışma frekansı ve katkı malzemesi ile çok ufak esnemelerde dahi değışimin algılanabileceği sensörlerin oluşturulmasının mümkün olabileceği de düşünölmüştür, buna dair çalışmalar gerçekleştirilmiştir[10].



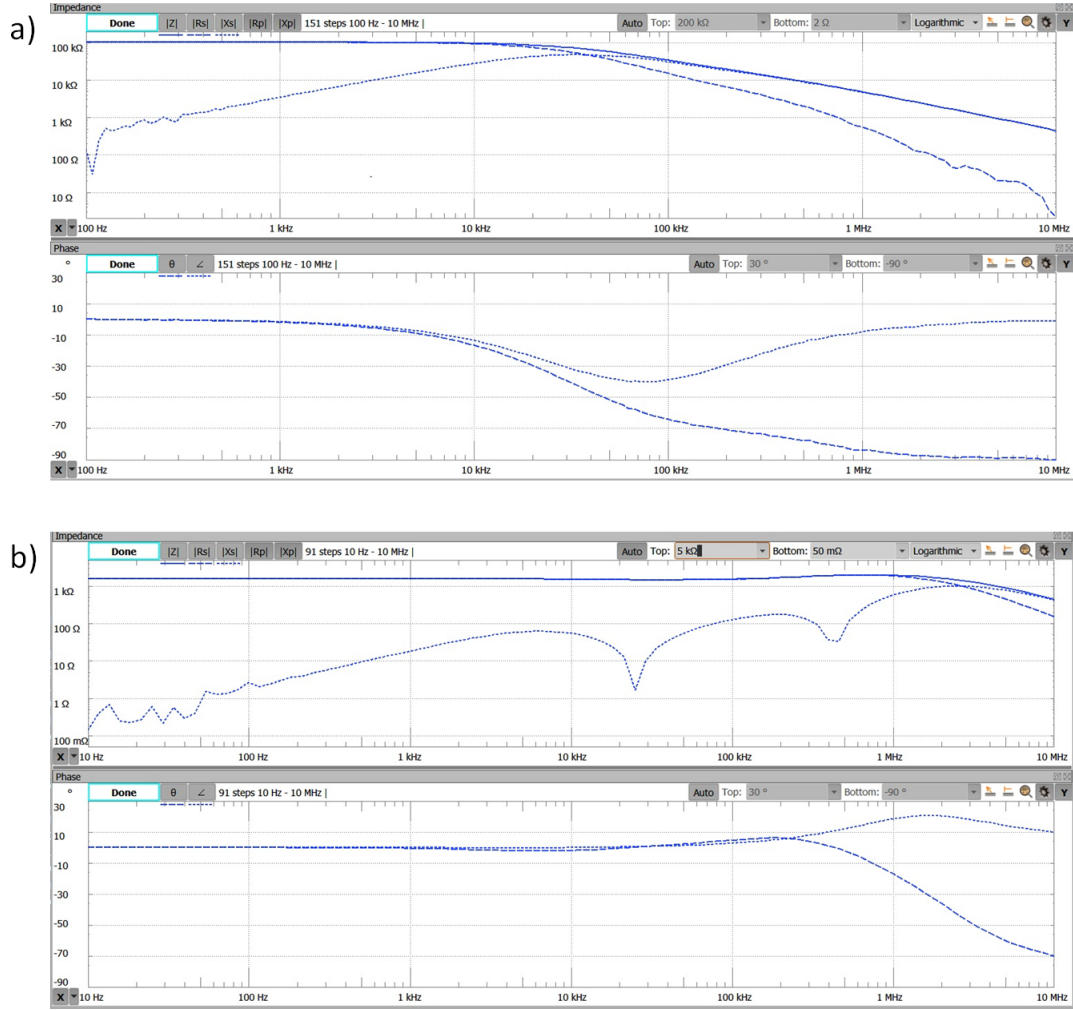
şekil 5.5 PVA/CB Kompozitin Karakterizasyon Çıktıları, (a) SEM Görüntüsü, (b) AFM Görüntüsü, (c) EDAX Grafiği [10]

PVA/CB kompozitin SEM/AFM görüntüleri ve EDAX sonucu şekil 5.5’de verilmiştir. AFM görüntüleri WSXM adı verilen ücretsiz yazılım kullanılarak görselleştirilmiştir[134]. SEM görüntülerine bakıldığında PVA polimerin çok büyük ölçüde eriyip CB parçacıkları

kapsayacak forma geldiği gözlenmektedir. Yer yer boşluklu yapılar oluşarak süngerimsi ve gözenekli bir form kazanabilmekte bu da kullanılan polimer:katkı miktarı oranına bağlı değişmektedir. Aynı oranda katılan CB miktarına rağmen polimerin içerisindeki dağılımı daha yüksek olduğu SEM görüntüsünde gözlenirken, yüzey bilgisi ve dağılıma dair çıkarımlar AFM görüntüsü ile desteklenmiştir. Yer yer kümelenme eğilimi gözlenen CB parçacıklarının oldukça yüksek homojenlikte dağılımı gözlenebilmektedir. Örnek üzerinde yapılan ölçümde ise tepe çukur noktaları arasında farkın ciddi olabildiği ve açık renkte oluşan tepelerin, koyu olarak elde edilmiş çukurların geçişleri keskin olabilmektedir. Bunlar elektriksel karakteri etkilemesinden öte kullanımına bağlı olarak yüzey sertliği ve pürüzlülüğüne bağlı olarak değerlendirilmelidir. Ancak PVA/CB kompozitin kıvam olarak daha akışkan olup, kuruma sonrasında pudramsı form alması çözücüsünün ve uygulandığı yüzeyin tercihi konusunda önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle PVA/CB kompoziti bir mürekkep olarak selüloz bir yüzeye uygulamak, hem kullanım ömrü açısından hem de stabilite konusunda büyük faydalar sağlayacaktır. Maddesel özelliklerinin verildiği Şekil 5.5c'de ise yüksek oranda karbon (C) atomu çıktısı yanında oksijen (O) tepe noktası açıkça görülmektedir, eser miktarda kalsiyum (Ca) atomu da içermektedir ve elde edilen bileşenler içinde yer almamasına rağmen bulgularda yer almaktadır. PVA, $C - H - O$ atomlarından meydana gelirken, katılan CB miktarıyla C çok daha baskın hale gelmektedir.

5.2.2. TPU/CB KOMPOZİT

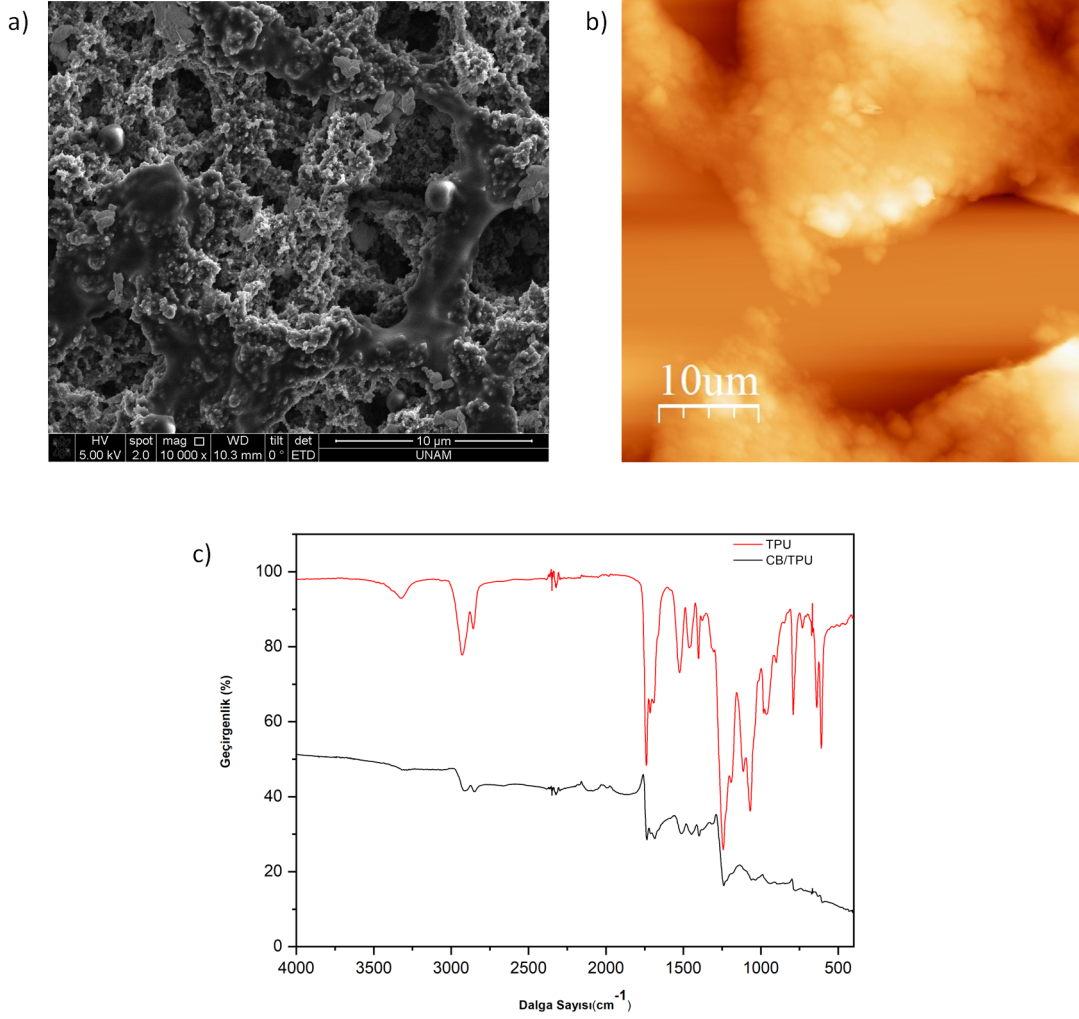
TPU/CB kompozitin sentezlenmiş birçok örneğine dair temel elektriksel bilgiler benzetim başlığı altında verilmiştir, bu bilgilerden yola çıkarak katkı miktarının iletkenlik ilişkisi ve benzetimdeki karşılığı da Şekil 5.3'te elde edilmiştir. Kütlece 10:1 oranında bir TPU/CB kompoziti hazırlayıp bu kompozitin yarıiletkenlik özellikleri incelenmiştir. %10 eşiği elektriksel karakterin değiştiği kritik bir eşik olarak fark edilmiştir. Buna bağlı olarak hazırlanan örneklerin frekans tepkisi elde edilmiştir. Hazırlanan iki farklı karışım kütlece %7 (TPU/CB-7) ve %17 (TPU/CB-17) oranında CB içermektedir. Frekans tepkisi ise Şekil 5.6'da verilmiştir[11].



Şekil 5.6 Kütlice (a)%7 CB (b)%17 CB içeren TPU/CB kompozitlerinden elde edilen empedans analizleri, fazör ve genlik ölçümleri [11]

Frekans tepkisi incelendiğinde TPU/CB-7’de çok ciddi bir frekansa karşı duyarlılık gözlenmektedir. Özellikle 100kHz’teki tepkisi incelendiğinde fazın neredeyse 90° dönmüş olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle kapasitif bir malzeme kullanımı ancak daha düşük polimer katkısında uygun olacağı öngörülmektedir. TPU/CB-17 için ise CB miktarının artışına bağlı olarak parçacıklar arası mesafenin azalması ve mikro boyutta oluşan kapasitör etkilerinin azaldığı saptanmıştır. Böylece daha iletken ama direnç karakteri baskın yapılar elde edilmiştir. Özellikle çoklu ölçüm testlerinde de histerik etkilerin en alt seviyede olduğu örneklerin CB oranı artışıyla elde edildiği saptanmıştır[11].

TPU/CB kompozit için SEM ve AFM görüntüleri alınmış olup, FTIR spektroskopi sonuçları



Şekil 5.7 TPU/CB Kompozite ait (a)SEM, (b)AFM Görüntüleri, (c)FTIR Grafiği [11]

da bu çalışma kapsamında elde edilmiştir. SEM görüntülerinde beyaza yakın tonlarda daha yüksek elektron konsantrasyonu olduğu bilinmekte ve bu doğrultuda incelendiğinde CB miktarının şiddeti yorumlanabilmektedir. Ancak PVA/CB kompozite göre çok daha büyük boşluklara sahip bu örneğin içinde süngerimsi olarak ifade ettiğimiz yapının oluşumu daha yüksektir. Katkı miktarındaki azaldıkça vakumlanmamış bir örneğin dökme işlemi sonunda yapısında bu gibi boşluklar oluşması mümkün hale gelmiştir. Bu da daha düşük CB oranlarına sahip örneklerin FET dielektriği olarak kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır. Birçok çalışmada oksit parçacık katkılanmasıyla dielektrik karakterin değiştirilebileceği vurgulanmaktadır[135, 136]. CB gibi iletken bir katkı malzemesinin

miktarına bağı olarak iletkenlik, diğr bir deyişle tüm kompozitin E_g bandında daralma yaşanmaktadır. Bu da elektriksel olarak faz bileşeni barındırmayan, reel ifadelerin elde edilmesini sağlamaktadır. Eklenen katkı malzemesi burada önemli hale gelmektedir. Metal oksit vb. miktarıyla daha iyi bir C_{ox} elde etmek mümkünken, CB, gümüş NP vb. ile kapasitif karakter düşebilmektedir. AFM sonuçlarına bakıldığında PVA/CB’de değışimlerin çok daha keskin olduğı bir yüzey varken TPU/CB birleşimi daha pürüzsüz bir yüzey yapısına sahip, oluşan yapılar çok daha boşluklu olabildiğı için alınan görüntüde CB katkılı yüksek alanlar arasında uzaklıklar z-eksenine bakılarak da elde edilebilmektedir. DMF organik çözücü ortamdan uzaklaştırıldıktan sonra elde edilen kompozit kıvamı çok daha esnek bir plastik formdadır. Bağların durumları ve maddesel yapıyı analiz etmek için ise FTIR sonuçlarından yararlanılmıştır. Kızılötesini geçirebilmek kabiliyeti, çalışmada kullanılan karışımdaki kimyasal bağları belirlemek için Şekil 5.7’de verilmiştir. Sadece TPU içeren örnekte, N-H gerilme titreşimini tepe değeri olan $3321cm^{-1}$ ’de gözlemlenmektedir. C-H bağlarının karakteristik tepe değeri ise 2930 ve $2858cm^{-1}$ ’de, karbon atomlarıyla oksijen atomlarının yaptığı çiftli bağlar ise 1740 , 1715 ve $1526cm^{-1}$ ’dedir[137]. 1242 ve $1069cm^{-1}$ ’de C-O-C gerilmesine denk gelen tepe değeri ve 790 ve $609cm^{-1}$ ’de halojen bileşenine (C-Cl) karşılık gelen tepe değeri elde edilmiştir[138]. Bu karakteristik tepe noktaları TPU’nun saflığını teyit etmek için kullanılmıştır, literatürdeki diğr çalışmalarla karşılaştırılmıştır [137, 138]. Eklenilecek CB’nin üretan ve ester grupları ile hidrojen bağları oluşturması beklenmektedir. Bu bağlar ile sahip olduğı hidroksil (-OH), karbonil (C=O) ve karboksilik asit (-COOH) gruplarıyla oluşturduğı kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığı bilinmektedir[139]. CB/TPU kompozit malzemelerdeki hidrojen bağları, saf TPU’daki C=O bağının gücünü etkilemektedir. TPU’nun hidrojen bağ indeksi (R) olarak ifade edilir ve bu indeks, $1730cm^{-1}$ ’deki tepe değeri ile $1700cm^{-1}$ ’deki tepe değeri oranı olarak tanımlanmaktadır. İndeksin artışı, hidrojen bağı olduğunu göstermektedir. CB takviye miktarının kütlece birleşimi %10’un üzerine çıktığında R’deki değışim miktarı azalmaktadır. Bu durum CB’nin bir noktadan sonra kompozit malzemede birikmesi ve hidrojen bağlarının oluşumunun engellenmesine dayanmaktadır[140]. Bizlerin ölçümelerini aldığı örneklerde hidrojen bağlarının oluşumu ve buna bağı olarak tepe değeriindeki değışimler açıkça gözlenmektedir. Tüm bu karakterler incelendiğinde TPU/CB kompozitinin CB oranına bağı

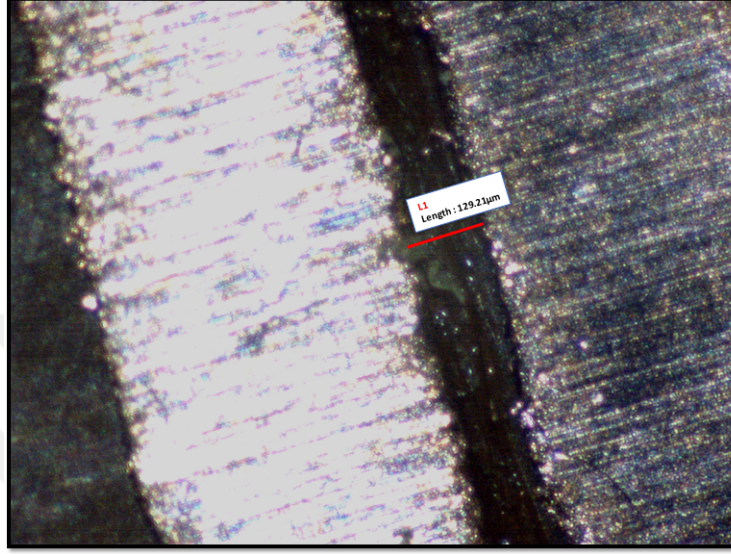
olarak FET yarıiletken katmanı olarak kullanılabileceği, yüksek oranda CB içerdiği takdirde ise iyi bir gerinim sensörü olabileceği bulgusuna erişilmiştir.

5.3. ÜRETİM OPTİMİZASYONU VE SAPTANAN PARAMETRE ETKİLERİ

Tek FET ve matris formdaki FET sensörün üretiminde birçok parametrenin, üretim basamaklarını etkilediği saptanmıştır. Üretimde yukarıdan-aşağıya bir ilerleyiş benimsendiği için 'Pyr lux'un işlenmesi ve şekillendirilmesine dayanan bir akış söz konusu yer almaktadır. Pyralux yüzeyine dökme kaplama veya spre y kaplama uygulanması büyük farklar oluşmaktadır. Kullanılan akrilik boyalar Polisan, Spre y Akrilik Düz Renkler serisi olarak tercih edilmiştir. Akrilik boyanın incelt ilip dökme işlemiyle döner kaplama cihazında kaplanması hızlı kuruyan karakteri ve çözücünün uçmasıyla heterojen desenlerin meydana gelmesine yol açmıştır, bu nedenle spre y kaplama çok daha verimli ve düz bir yüzey elde etmek için uygun bir yöntem olarak benimsenmiştir. 20 cm yükseklikten döner kaplama cihazına yerleştirilmiş pyralux üzerinde 2000 RPM'de 3 saniye boyunca dinamik kaplama modunda spre y uygulanmıştır. Dönme hızının daha az olduğu çalışmalarda kalınlık artmakta ve buna bağlı olarak lazer işlemlerde kanal genişliğinde artışlar meydana gelmektedir. Bu nedenle elde edilen hız ve süreler bu çalışma için optimize edilmeye gayret edilmiştir. Kullanılan boyaların aynı seriden olmasına rağmen içerdikleri renk pigmentlerinin lazerin kırınım ve yansımaya sebep olduğu için her üründe aynı sonuç elde edilememiştir. Parlak Siyah, Gri ve Altın olarak ifade edilmiş boya renkleri denenmiştir. Parlak siyah ile yapılan kaplamalarda lazer gücünün %50 seviyelerine çıkarılmasına rağmen desenlendirme yapılamamıştır. Altın renginde ise lazer çizgileri arasında bakır ile renk pigmentlerinin karışımı gözlenmektedir. Bu nedenle desenlendirmenin en iyi şekilde gri renk akrilik kaplama ile gerçekleştirildiği sonucuna varılmıştır.

İstenilen kalınlıkta ve homojenlikte elde edilen kaplamalar sonrasında lazer ile şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir, ancak bu basamakta da kullanılan lazerin gücü, hareketi esnasındaki çizgiler arası mesafe ve adım hızı önemli rol oynamaktadır. Tam güçte 90-100

Watt değerlerine ulaşabilen lazerin, gücünün yüzdece değiştirilmesi, kanal mesafesinin yüksek oranda değişimine yol açmaktadır. Bu gibi etkiler incelenip sonuçlar Çizelge 5.3'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.8 Üretilen FET Kanal Yapısının Optik Mikroskop Görüntüsü

Elde edilen FET'lerin kapı elektrotlarının iki farklı şekilde üretimi gerçekleştirilmiştir. Bakır elektrot ve grafen elektrot olarak farklılaşmış tasarımlarda, grafen oluşumunu doğrulamak adına; polimide film üzerindeki grafen plakaların görüntüleri elde edilmiş, elektriksel ölçümleriyle beraber Raman spektroskopi sonuçları kaydedilmiştir. Raman tepe değerleri incelendiğinde ise bağların literatürdeki grafen çıktılarıyla da örtüşmektedir[141, 142]. Karbon-karbon bağ değerlerinin bulunduğu tepe değerleri ile elde edilen Raman sonuçlarının, Şekil 5.10'da literatürdeki sonuçlarla tutarlılığı gözlenmektedir. Yüzeyde lazer şiddeti ve aralıklarına bağlı olarak oluşan desenlerin de yapısı değişmektedir, buna bağlı olarak çalışma hızı, gücü gibi değişkenler denenerek optimal seviyelere çekilmiştir. Lazer gücü arttıkça daha düşük direnç değerleri elde edilmesine rağmen PI filmde yıpranmalar oluşmaktadır.

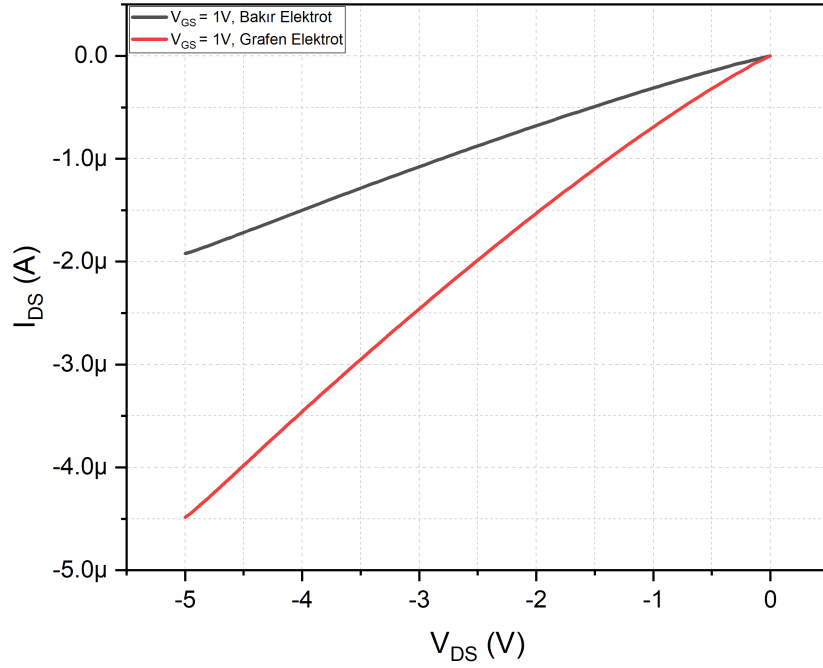
üretimlerde 1cm^2 'lik pencereler içerisinde kazıma yapılmıştır, bu da yüzeyde ısınma ve lazerin git-gel hareketi esnasında sonuçları etkileyen başka bir faktördür. $50\mu\text{m}$ olarak hedeflenen kanal genişliği, lazer gücü ve hızına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Diğer

Hız (mm/s)	Güç Yoğunluğu (%)	Hat Aralığı (mm)	Yorum
35	10	0.04	Kazıma sonunda akrilik katman çok az aşındırıldı ve iyi bir sonuç elde edilemedi.
30	10	0.04	Akrilik katmanda açılmalar söz konusu ancak çözeltiyle bakırı uzaklaştıracak kadar yüzey erişebilir değil.
30	15	0.04	Bakır yüzey erişilebilir ancak asitle oymak işleminin önce yüzeyi parlatma işlemi gerekmektedir. Bu da deformasyona yola açabilmektedir.
25	15	0.04	Çok ince akrilik bir yüzey kalmaktadır, mekanik bir etki gerekmeden tamamlamak için lazer gücünün artırılması planlanmaktadır.
25	20	0.04	Gücün artmasıyla elde edilen sonuçlarda pamuk ile kalan parçacıkların temizlenmesiyle sonuç elde edilebilir hale geldi.
22	20	0.04	Toz katman hala yüzeyde kalmakta ancak gücün düşmesiyle bakırın oksitlenme miktarı azalmaktadır.
25	22	0.04	Yüzey hızlı ısınmakta ve bakır deforme olmaktadır, kazıma başarısı artmasına rağmen kanal genişliğinde ciddi artışlar gözlenmiştir.
22	15	0.04	Hızın azalmasıyla birlikte gücün etkisi artmakta ancak yakacak ve ısıtacak kadar da güçlü olmadığı için istenilen seviye kanal oluşturulmaktadır.

Çizelge 5.3 Lazer Parametrelerinin Üretim Sonuçlarına Etkisi

bir etken de çözünme esnasından istenmeyen korozyonların oluşmasıydı, bu etkiler dahilinde elde edilen kanal genişliği 100 – 150 μ m arasında değişmiştir. (Şekil 5.8)

Öte yandan bakır ve grafen elektrot karşılaştırılmasını elde edebilmek için, bir yüzeyi tamamen çözündürülmüş olan pyraluxun, PI katmanını erişebilir hale gelmiştir. PI üzerinde kazıma esnasında yüksek güçlere çıkılırken grafene yoğunluğu artmış ancak polimerde delinmeler meydana gelmiştir. Bu noktada hızı 150mm/s, gücü %13.7 ve hareket adım aralığı 0.1mm olarak ayarlanmıştır. PI film yeterince incelirken iki yüzey arasında

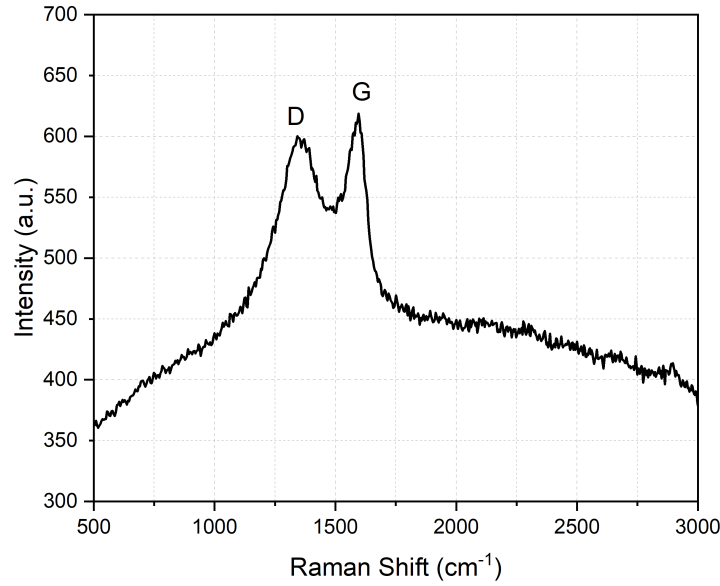


Şekil 5.9 Grafen ve Bakır Elektrotun I-V grafikleri

ayırıcı özelliğini kaybetmemiştir. Dahası, gücün olabildiğince yükseltilmesi yüzeyde yanma miktarının artmasına böylelikle dağınık halde bulunan grafen plakaların miktarının da yükselmesini sağlamaktadır, sonucunda da düşük direnç değerlerine sahip bakıra alternatif düşünülebilecek elektrotlar meydana gelmektedir. Ancak direnç değerlerinin hala bir metal kadar düşük olmaması elektrot olarak kullanımında metal katkılanma ihtiyaçları doğurabilmektedir. TPU/CB kompozite sahip FET üzerinde grafen ve bakır elektrotun karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir, gerilim-akım ilişkisi Şekil 5.9'da verilmiştir.

Yanma sonucu iletken bir yapı meydana gelirken, dielektrik katmanın daralmasıyla C_{ox} değerinde artış yaşanmaktadır. Bu da aynı özelliklere sahip FET'te daha yüksek bir elektrik alan etkisi oluşturabilmeyi sağlamaktadır. Ayrıca kazıma sonrasında PI film üzerindeki grafenlerin bir kısmı bölgesel sıcaklıktaki artışla polimere dahil olup dielektrik değerinin değiştiği düşünülmektedir.

Şekil 5.10'da PI film üzerinde oluşturulan grafen plakalara ait Raman tepe bilgileri



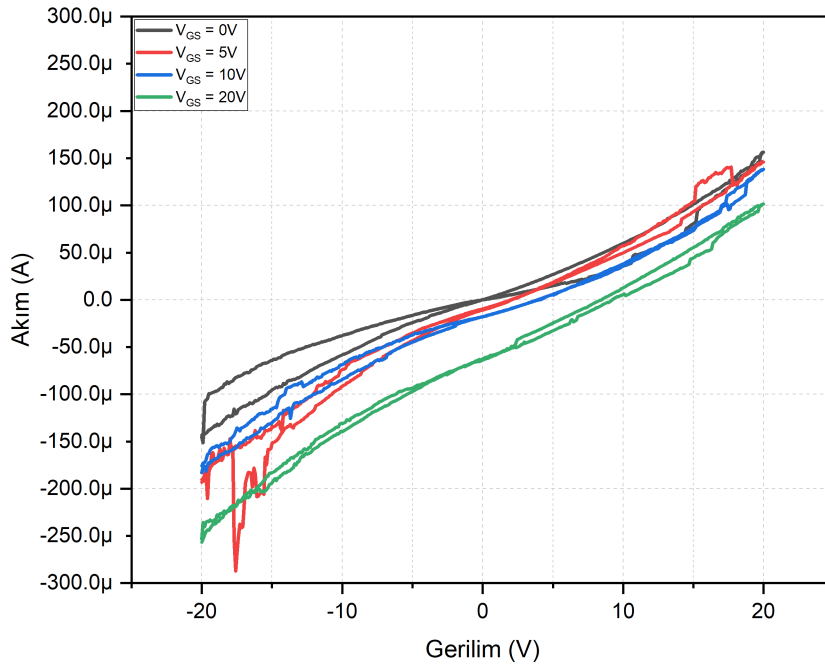
Şekil 5.10 PI üzerinde oluşan grafen plakaların raman spektroskopisi

verilmiştir. G-bandı, birincil bant olup Grafene özgü temel banttır. Sp^2 bağı yapmış karbonların düzlemsel durumuna dair bilgi vermektedir. Bandın bulunduğu konum lazer konumundan bağımsızdır, bu sayede diğer grafen bantlarından kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. D-bandı "defect" bandı veya "kusur" bandı olarak ifade edilebilir, ve bal peteği yapısında bulunan grafen kristal yapısındaki bozulmalardan kaynaklı oluşmaktadır. Kusursuz yapılarda gözlenmemektedir. G tepe değeri, tüm sp^2 atom çiftlerinin bağ gerilmelerinden meydana gelirken, D tepe değeri, halkalardaki sp^2 birleşimindeki deformasyonlardan oluşmaktadır. Literatürde de D tepe değerinin 1350cm^{-1} 'de, G tepe değerinin 1580cm^{-1} 'de yer aldığı verilmektedir[143].

5.4. FET KARAKTERİZASYONU

Kurulan ölçüm sisteminde, Keithley 2450 kaynak biriminden, V_{DS} için gerilim taraması yapılarak; akım değerleri kaydedilmiştir. Her bir döngüde sabit bir V_{GS} değeri Rigol DP830A güç kaynağından verilmiştir. Döngüler bitince V_{GS} değerlerinin etkilerini gözlemleyebilmek adına çıktılar kaydedilmiştir. Alan etkisinin olup olmadığını anlayabilmenin temel

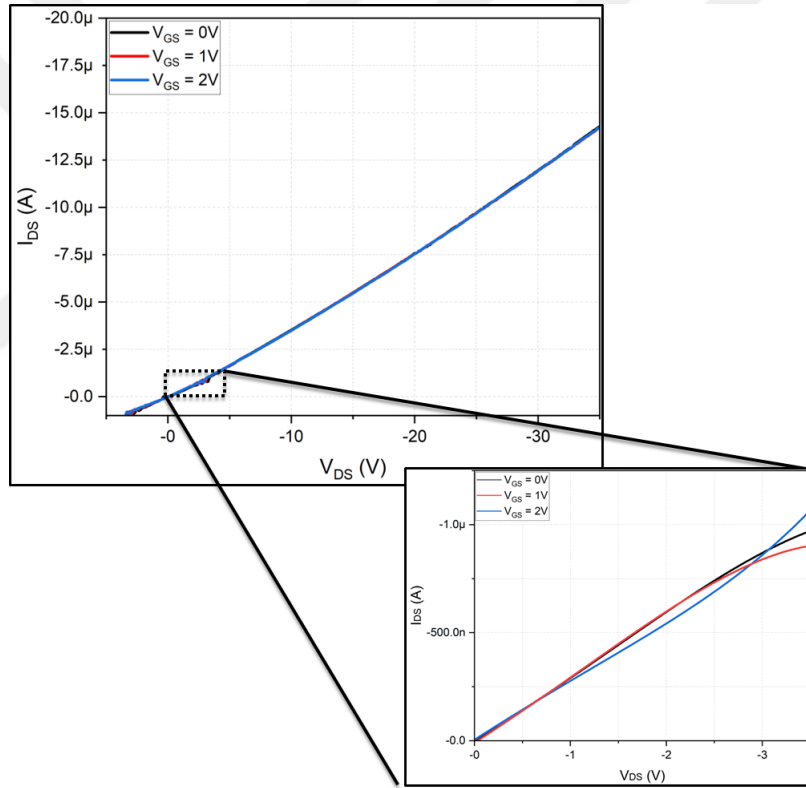
yöntemlerinden birisi V_{DS}/I_{DS} grafiğini elde etmektir. Kapı akımı da gözlenmiş ve elektrik alan etkisinden kaynaklı akım değişimi olması açısından kapı akımının da, akçe-kaynak akımından daha düşük olması beklenen kriterler arasında yer almaktadır. Ölçümler boyunca nano-amper mertebesinde dahi akımın olmadığı kaydedilmiştir. PVA/CB karışımından elde edilen kompozit ile yapılan uygulamalarda aynı CB oranında hazırlanması sonucu düşük direnç değerlerinin elde edilmesi tünelleme bariyerinin düşük olmasının etkisi gözlenmiştir. Çıktılarda yüksek seviyede direnç karakteri gösteren PVA/CB karışımının katkı malzemesini artırarak elektrot görevinde kullanılması, sensör uygulamalarında mürekkep olarak veya düşük kapı dielektrik gerektiren uygulamalarda kullanılmasının iyi sonuçlar ortaya koyduğu literatürde de yer almaktadır[144, 145].



Şekil 5.11 PDMS/CB Kompozit Yarıiletken Katmanına Sahip FET'in I-V Grafiği

PDMS/CB kompozitinin elektriksel çıktıları da aynı şekilde Keithley kaynak metre üzerinden kaydedilmiştir. Amorf yapıların etkisi oldukça net gözükmele beraber, direnç-hafıza ilişkisi elde edilmiştir. FET tasarımı olması adına yapılan çalışmanın çıktılarının memristör karakterine çok yakın olduğu Şekil 5.11'de gözlenebilmektedir. Artan

DS gerilimiyle akım değerinin üstel artışı, gerilim azaldığında ise histerik bir etkiyle sıfır konumuna dönmektedir. Bu da fiyonk veya papyon olarak adlandırılan memristör karakterini yansıtmaktadır. V_{GS} değerinin artmasıyla birlikte performansında düşüş yaşandığı gözlenmiştir. Bilinmektedir ki memristörlerin performansları açılma ve kapanma akımlarının oranındaki artışla yükselmektedir. 20V'luk kapı gerilimi uygulandığında bu farkın iyice azaldığı hatta neredeyse aynı hattı takip ederek akım değişimi yaşanmaktadır. Diğer bir kazanım ise değişen V_{GS} değeriyle birlikte çalışma akım aralığında sapma gözlenmesidir. V_{GS} 0V olduğu durumda papyon şeklinin orijine göre simetrik karakteri saparak negatif bölgede yoğunlaşmıştır.

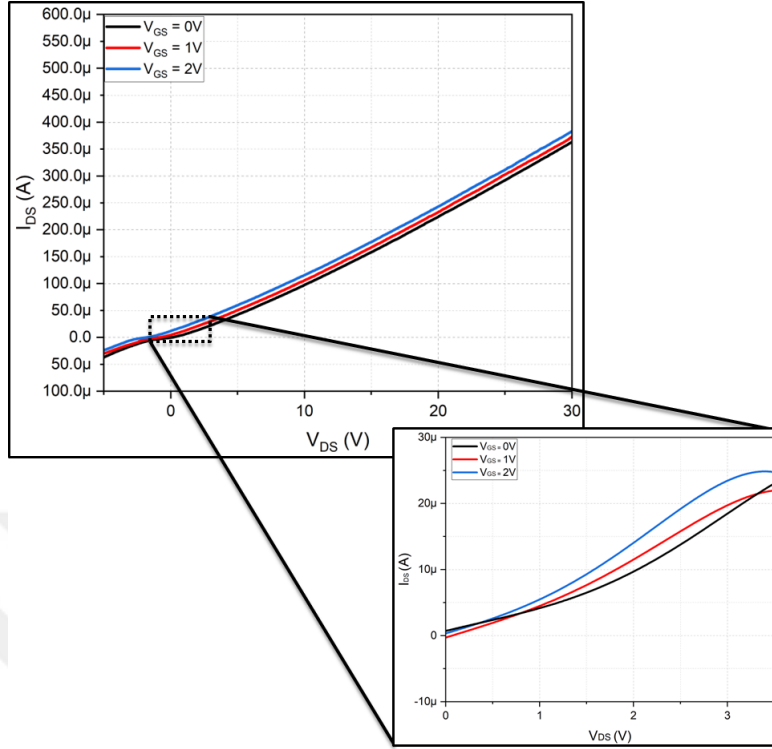


Şekil 5.12 TPU/CB Kompozit Yarıiletken Katmanına Sahip FET'in I-V Grafiği

TPU/CB, akım-gerilim sonuçları Şekil 5.12'de verilmiştir. Uygulanan kapı geriliminin etkileri çok az da olsa gözlenebilmektedir. Burada önemle belirtilmesi gereken husus oluşturulan yapıların büyüklüğü ve malzemelerin katkılanma seviyelerinin I-V karakteristiğine olan etkileridir. V_{GS} arttıkça, akım değerinde nanoamper seviyesinde azalma gözlenebilmektedir. İdeal bir anahtarlama kabiliyeti söz konusu olmasa da düşük

seviyelerde bir değişim kontrollü olarak gerçekleştirilebilmektedir. V_{DS} değerinin daha kısıtlı bir aralıkta incelendiği çıktıda ise sonuçlar polinomiyal uydurma ile görselleştirilmiştir. TPU/CB kompozit yarıiletken katmanlı FET, büyük ölçüde direnç karakterine sahiptir. Net bir kanal katkılanması olmamasından, spesifik bir doyum bölgesi formasyonu yerine zayıf doyum adı verilen bir bölge oluşumu gözlenmiştir. Öte yandan elde edilen aktif katmanın doğrusal bölgedeki karakterinin güçlü ve stabil oluşundan kaynaklı olarak rezistif gerinim sensörlerinde uygulamalarının verimli sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Hızlı şekilde çözücüsünden uzaklaştırılabilen TPU/CB karışımı organik çözücü içerdieği için farklı polimer yüzeyler içenisine eklenebilmekte ve yüzeylerde bağ yapabilmektedir. Bu çıkarımlar ile esnek PLA, esnek TPU gibi 3B yazıcılardan modellenerek elde edilen kalıplar içine dökülerek gerilebilir sensörle elde edilmiştir. Çalışma da esnek TPU filaman kullanılarak baskı yapılmış ve TPU/CB kompozit bu kalıba enjekte edilmiştir[11]. Sıcak-nokta probu ölçümlerinde, TPU/CB yarıiletken karakteri incelenmiştir. Multimetrenin pozitif terminaline ısı etki uygulanmış ve okunan değerin negatif yönde sapma yaptığı gözlenmiştir. $-5.3mV$ değerine kadar oluşan sapma sonunda P-tipi karakterin olduğu saptanmıştır. Elde edilen çıktılarda da artırılan V_{GS} gerilimine bağlı olarak düşük de olsa bir akaç-kaynak akımında azalma yaşanmaktadır. P-tipi aygıtlarda pozitif gerilim arttıkça akımın azalması beklenen bir sonuçtur. Sıcak-nokta problu ölçüm taşıyıcı konsantrasyonu bilgisini vermese de gerilimdeki sapmanın gücü ve okunan değerin işaretine bağlı olarak hangi karakterin ne kadar baskın olduğu yorumlanabilmektedir. $-5.3mV$ sapma değeriyle P-tipi özelliğin oluştuğu bilinmektedir.

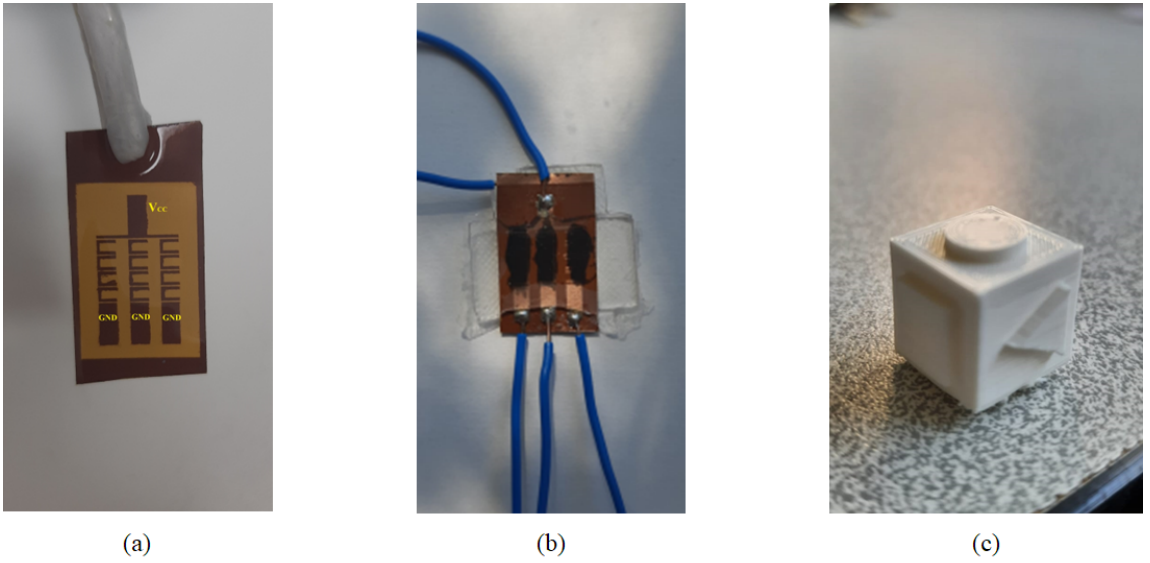
Yarıiletken bölgede bulunan direnç karakterine sahip bir katman bakır elektrotlar üzerine serilerek, Reçine/CB kanalına sahip FET tasarlanmıştır. Benzer şekilde BG-BC topolojisi kullanılmıştır. $320k\Omega.cm$ rezistif değerlere sahip kanalın, gerilim-akım ilişkisi Şekil 5.13’da verilmiştir. Artan akaç-kaynak akımıyla hafif bir üstel artış göstermektedir. OFET araştırmalarında materyal karakteri ve fabrikasyona bağlı olarak V_{DS} çalışma aralığı $-50V \sim +50V$ olarak tercih edilmektedir[146]. TPU/CB kompozitin yüksek rezistif karakteri nedeniyle doğrusal bölge karakteri de daha baskın görölmektedir. Reçine/CB için de uzun kanal etkisi, düşük katkılanmış materyal etkileri gözükse de oluşturulan alan



Şekil 5.13 Reçine/CB Kompozit Yarıiletken Katmanına Sahip FET'in I-V Grafiği

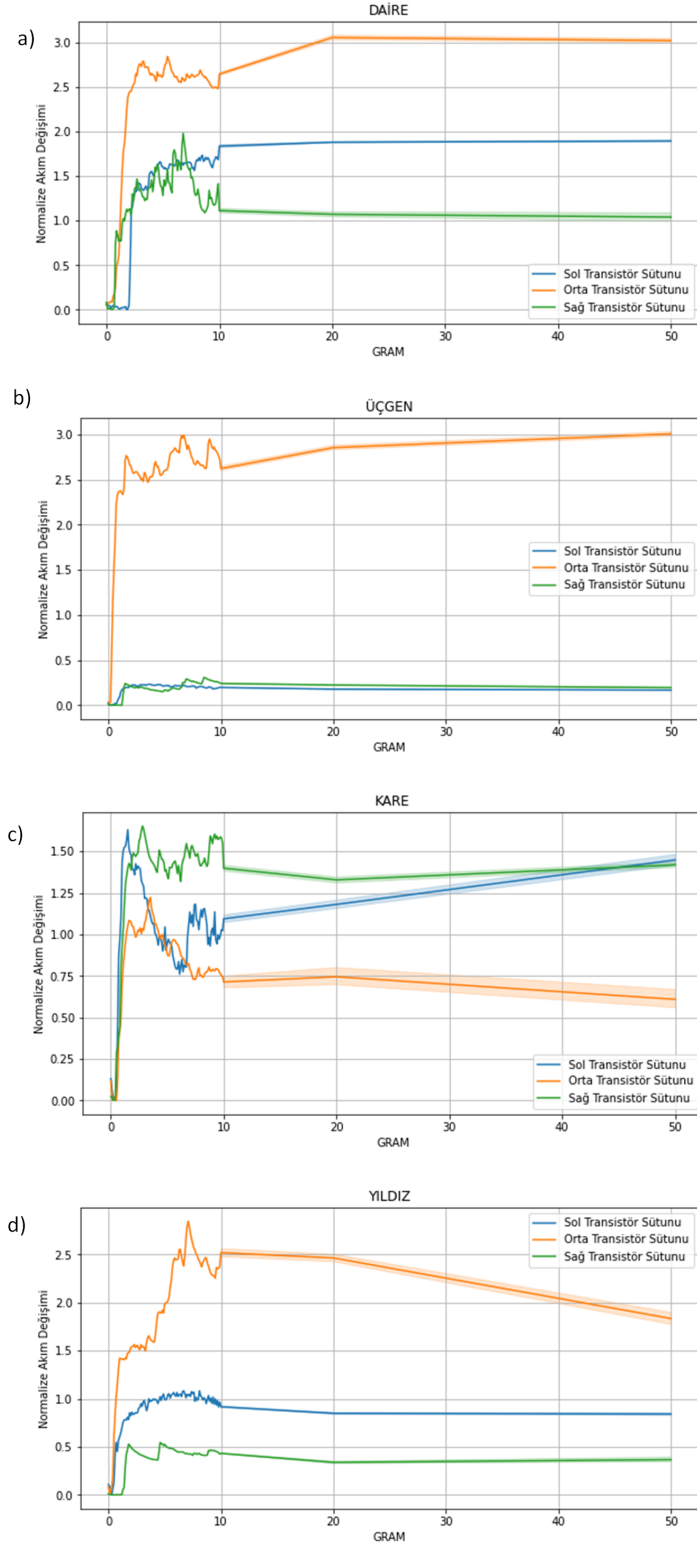
etkisine göre gerilimde değişimler meydana gelmektedir ve daha belirgin kaymalara neden olmaktadır. V_{DS} 'nin 0-3V aralığındaki polinomiyal uydurma sonuçları incelendiğinde, zayıf doyum bölgesindeki kırımlar daha belirgin gözükse de artan gerilime bağlı olarak baskın direnç özelliği ön plana çıkarak doğrusal bir çıktı oluşmaktadır. Buna ek olarak Reçine/CB karışımında sıcak-nokta probu ölçümü tekrarlandığında ısıtılan pozitif terminal sonucunda 23.8mV'luk bir pozitif yükselme gözlenmiştir ve karakterinin N-tipi olduğu bilgisi elde edilmiştir. Grafik çıktılarına bakıldığında da artan kapı gerilimi ile akaç akımının artışı gözlenmektedir. Sıcak-nokta probu ölçümünde TPU/CB'ye göre daha net yarıiletken tipi elde edilmiştir, buradan elde edilen karşılaştırmalı bilgi ile de gözlenmektedir ki uygulanan kapı gerilimi 10 – 20 μ A değişimine neden olabilmektedir. TPU/CB FET'te değişimler nanoamper seviyelerindeyken, Reçine/CB FET'te bu değişimler mikroamper seviyesinde olmaktadır. Böylelikle uygun çözünürlükte ve çalışma geriliminde bir ADC ile çıkış akımını okuyup kaydedilmek çok daha mümkün hale gelecektir. Kapı gerilimi ve akaç gerilimine bakıldığında ise uygun bir dokunsal algılama uygulaması için doğrusal bölgede kalmak uygulama açısından daha uygun olmaktadır. Böylelikle basıya göre C_{ox} değişecek doyumda

olmayan akım değerinde ise dalgalanmalar gözlenebilecektir. Öte yandan baskın olan direnç karakteri de değişimdeki bir diğer unsur olup, akım değerleri okunduğunda farklar ortaya konulabilecektir. Bu çıkarımlar ve sonuçlar ışığında $V_{DS} = 5V$ olacak şekilde TFT matris çalıştırılmıştır. V_{GS} değeri ise 0V olarak tutulmuştur. Çıkış akımları ADS1115 16bit ADC üzerinden bilgisayara kaydedilmiştir. Reçine/CB FET'in performans değerlerine bakarak, dokunsal algılama uygulamasında çok daha iyi sonuçlar vereceği düşünülerek yarıiletken katman olarak Reçine/CB tercih edilmiştir.



Şekil 5.14 (a) Oluşturulan 3x5 matris yapısı, (b) Yarıiletken katman eklenmiş transistör matris, (c) Basınç sisteminde kullanılan değişik desenlere sahip küp

Oluşturulan matris üç adet sütun ve beş adet satırdan oluşmaktadır. Bu yapı Şekil 5.14a'da verilmiştir. Gözlenmektedir ki, matrisi oluşturan üç sütun seri olarak bağlı kapılar gibi olup anakol akımı ortak besleme (V_{cc}) noktasından, dağıtık yapıdaki toprak hatlarına (GND) gitmektedir. Böylelikle şekil değişikliklerinde, her bir sütun üzerindeki etki değişmekte, buna bağlı sınıflandırma yapılabilmektedir. Her bir şekil için kaydedilen 500 adet ölçüm sonucu, 2000 satırlık bir veri oluşturmaktadır. Bu verilerin %20'si test verisi olarak, %80'i ise öğrenme verisi olarak kullanılmıştır. Yarıiletken katman serilen matris deseni Şekil 5.14b'de gösterilmektedir. Eklenilen kablolar ile veriler kayıt altına alınmıştır. Basıncın farklı desenlerde matris üzerine etkisini gözlemek adına üçgen, yıldız, daire ve kare kabartmalara sahip bir küp kullanılmıştır (Şekil 5.14c).



Şekil 5.15 (a) Daire, (b) Üçgen, (c) Kare, (d) Yıldız Desenleriyle Uygulanan Ağırlığın Oluşturduğu Normalize Akım Değişimleri

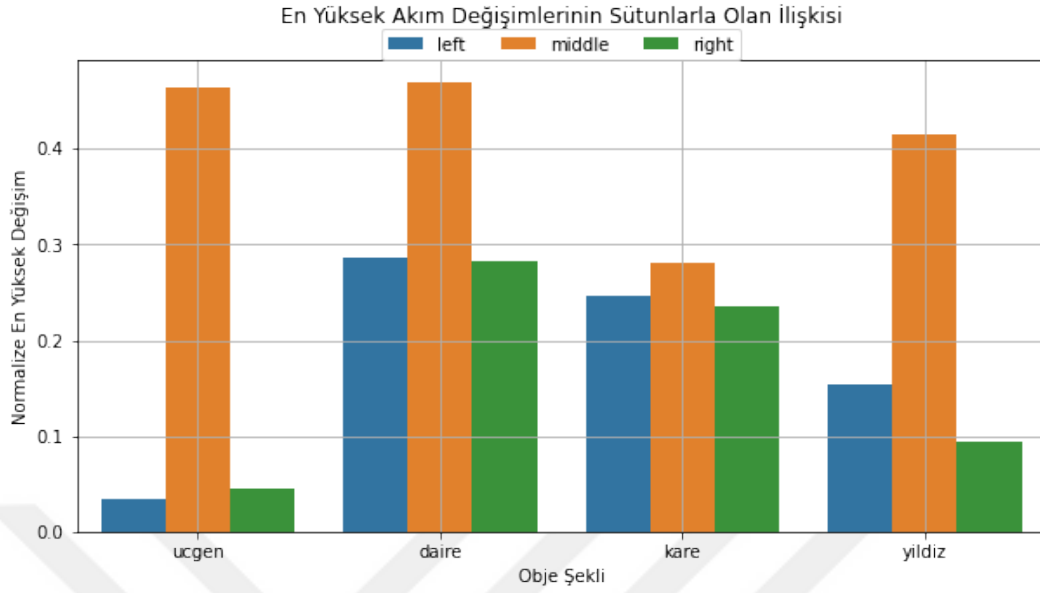
Ev-tipi bası istasyonu ile oluşturulan sensöre belli gram değerlerinde ağırlık uygulanmıştır. 0'dan başlayıp devamlı olarak 50gr olana kadar artan bası yüzeydeki desenlere bağlı olarak sensörün farklı sütun değerlerinde değişimlere neden olmuştur. 3B baskı alınmış bir küp yüzeyinde kare, daire, üçgen, yıldız desenlerine sahiptir. Bası sistemine yerleştirilen ve Z eksenindeki harekete bağlı olarak artan kuvvetin akımdaki değişimi daire için Şekil 5.15a'da, kare için Şekil 5.15b'de, üçgen için Şekil 5.15c'de ve yıldız için Şekil 5.15d'de yer almaktadır.

Akım değişimleri ilk etkiyle beraber hızlı şekilde değişim gösterirken, 20gr ağırlık etkisinin ardından doyum gözlenmiştir. Akım değeri sapma göstermezken, şekilsel olarak bükülmenin de sınırlara ulaşması bu durumu kısıtlamaktadır. Öte yandan çok ufak ağırlık etkileriyle dahi hızlı değişimin meydana gelmesi sadece kapasitif etkilerden değil kompozitin sahip olduğu rezistif özelliklerinden de değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylelikle ana kol akımında çok yüksek hassasiyette tepki gözlenebilmektedir.

Her bir değişen şekilde ise farklı karaktere sahip sütunlara ait çıktılar gözlenmektedir. Üçgen için sol ve sağ sütunda değerlerindeki değişim, ortadaki sütuna göre çok daha düşük seviyelerde meydana gelmektedir. Kare için bu durum daha homojen gözükürken; yıldızda gözlenen değişimler ise üçgene göre daha fazla olup kenardaki sütunlara temasın birden fazla noktada temasından kaynaklı olduğu görülmektedir.

Dokunsal sensörün objelerin ilk temasında verdiği tepkilerin sonuçları en yüksek değişimin meydana geldiği durum olup kayıt altına alınmıştır. Şekil 5.16'da normalize edilmiş akım değişimleri gösterilmektedir. Bu değerler incelendiğinde şekillerin yine kendilerine has ve gözle dahi ayırt edilebilecek sonuçları elde edilmiştir. Bu da sensör performansının farklı şekiller için yüksek olduğunu ve sınıflandırma uygulamalarında yoğunlukta bir sinir ağı oluşturmada sonuçlar elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Çalışma kapsamında dokunsal algılama sensörü üzerinden elde edilen sonuçlar makine öğrenmesi yaklaşımlarıyla sınıflandırılmıştır. Bu süreçte her bir kolona ait akım değerleri okuma devresiyle kaydedilmiştir. Veriler incelenip akım değerleri gözlemlenirken, dışarıdan oluşan etkiyle değişim ilişkilendirilmiştir. Grafiklerde akım değişimi ve en yüksek akım



Şekil 5.16 Dokunsal Sensörün Şekillere Bağlı Olarak Anlık Gerçekleşen En Yüksek Akım Değişimi değişimleri verilmiştir. Sensör performansını belirleyen önemli bir faktör de hızlı tepki kabiliyetine sahip olmasıdır.

Model	Makine Öğrenmesi Yöntemleri		
	Karar Ağacı	1-En Yakın Komşu	Rastgele Orman
Doğruluk	0.975	0.955	0.97
Kesinlik	0.98	0.96	0.99
Duyarlılık	0.98	0.96	0.97
F1 Skoru	0.98	0.96	0.98

Çizelge 5.4 Modellerin Performans Sonuçları

Tüm makine öğrenme algoritmalarının sonuçları Çizelge 5.4’te verilmiştir. Her bir sonuç kendi özelinde değerlendirildiğinde görülmektedir ki, yüksek başarıda sonuçlara erişilmiştir. Sensörün şekillere göre bariz fark içeren akım değerleri oluşturması sayesinde ML algoritmalarının da sonuçları üst seviyelere ulaşmıştır. Bu kadar net farklar ile karar ağacı gibi aşırı uyuma açık olan algoritmaları kullanmak, modelin ezber yapmasını bu durumda hatalı kararlar vermesine neden olabilir. Öte yandan KNN’nin derecesine bağlı olarak performans değişebilmektedir. Rastgele orman algoritmasında duyarlılık değeri kesinlik değerine göre daha düşük çıkmıştır. Böyle bir çalışmada gözle bile sınıflandırma

yapabilecekken, duyarlılık değerinin daha düşük çıkıp, yüksek kesinlik elde etmenin amacına uygun bir kullanım olduğu düşünülmektedir. Çünkü açık farklardan oluşan bir sınıflandırma uygulamasında, sonuçları ayırt edecek husus değişime olan duyarlılıktan öte, hassasiyetteki artışla sağlanabilmektedir. Çok yakın sonuçlar ortaya koymalarına rağmen, rastgele orman aşırı uyuma karşı olan bağışıklığı ve kesinliği sayesinde tercih sebebi olabilmektedir.

6. KARAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

CB nanoparçacık katkılı kompozit kullanılarak elde edilen esnek FET algılama uygulamasında kullanılmıştır. Alttan kapılı alttan kontaklı yapıda, yukarıdan aşağıya üretim basamakları kullanılmıştır. Pyralux sprej kaplama ile hazırlanıp, lazer aşındırma ile desenlendirilmiştir. Ardından solüsyon içerisinde bakır aşındırılıp FET dizinleri oluşturulmuştur. Üretilen lazer parametreleri optimize edilerek, hız 22mm/s , güç yoğunluğu %15 ve çizgi aralıkları 0.04mm olarak belirlenmiştir. Sonucunda ise $129\mu\text{m}$ genişliğinde kanal oluşumu gözlemlenmiştir. Kapı materyali olarak karbon tabanlı örnekler tercih edildiğinde 2 kat daha yüksek elektrik alan oluşturma kabiliyeti kazanılırken, polimer tabanlı çözümler ile sürdürülebilir bir konsept oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu hedefte dene-yanıl yaklaşımının üstesinden gelmek adına, yol bulma algoritmaları CB kompozit benzetimi için kullanılmıştır. Sızıntı eşiğinin başlangıcının tespiti, teorik tutarlılığı incelenmiştir. Kütlece %5.6 olarak ifade edilen bu değer katılacak CB miktarına dair bilgi vermiştir. En iyi en önce algoritması bu başlangıç anının tespiti için kullanışlı olurken, genişliğine arama yöntemi ile oluşan çoklu iletim hatları gözlemlenmektedir. Bunun yanında sentetik polimerler ile reçine farkı ortaya konularak doğa dostu tasarımlar üretilmiştir. Doğal olarak elde edilip biyo-bozunur olmasından kaynaklı elektronik atık miktarının azalacağı ve sürdürülebilir bir teknoloji gelişiminin yaşanacağı düşünülmektedir. Reçine/CB kapı dielektriği karışımının yarıiletken karakteri, TPU/CB kapı dielektriğine göre 4.5 kat daha yüksek çıkmakta, N-tipi bir davranış göstermektedir. Aynı miktarda karıştırılmış katkı materyali ile kararlı bir yarıiletken katman elde edilmektedir. Ayrıca algılama uygulamasında eşit gerilimde TPU/CB kompozit doyum akım değerleri incelendiğinde

17.5 μA civarındayken, Reçine/CB kompozit için bu değer 500 μA olarak kaydedilmiştir. Ayrıca kapı gerilimine verilen tepkiler incelendiğinde Artan gerilim ile daha büyük farklılıklar oluşumu Reçine/CB için gerçekleşmektedir. Dokunsal algılama uygulamalarında daha hassas sonuçlar elde etmek için Reçine/CB karışımının uygunluğu tespit edilmiştir. Lazer aşındırma yöntemleriyle elde edilen sensör matrisin yarıiletken katmanını Reçine/CB olarak tercih edilmiştir. Üçgen, yıldız, kare ve daire şekillerinin üç kolonlu sensör üzerine temasıyla algılama doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. 16-Bit ADC üzerinden yapılan okuma çıktıları ile gerilim üzerinden akım değişimi kaydedilmiştir. Sonuçlarda verilerin sınıflandırılması yapılırken, %95 üzeri doğruluk değerlerine erişilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, esnekliği ve kullanım genişliğiyle birçok uygulamaya entegre edilebilecek bir esnek FET üretilmesi, ardından oluşturulan FET matris ile dokunma uygulamalarında algılama birimi olarak kullanılması hedeflenmiştir. Üretim yöntemlerinde çok düşük maliyetler ortaya konulması da diğer bir çalışma amacı olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda yarıiletken (aktif) katman olarak farklı kompozitler kullanılmıştır. Elektrotlar için grafen ve bakır olmak üzere varyasyonlar denenmiştir. Desenlendirme, maske üretimi gibi basamaklar olmadan gerçekleştirilmiştir. Ancak elde edilen FET'lerin performansları incelendiğinde, net bir katkılama basamağı olmamasından ve uzun kanal etkisinden kaynaklı olarak direnç özelliklerinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Kapı gerilimlerini artırdığımız durumda çok düşük seviyelerde kaymalar meydana gelirken, belli bir gerilim değerinin üstünde tamamen doğrusal bir tepki vermektedir. Bu nedenle çalışma aralığının da zayıf doyum bölgesiyle sınırlandığı düşünülmektedir. Hedeflenen alan etkisi gözlenmiştir, iyileştirmesi için kanal oluşumuna dair çalışmalar sürdürülebilir. Grafen, bakır elektrot performansları açıkça gözlenmiş ve LIG, elektrotta alan etkisinin çok daha net olduğu kayıtlara geçmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında, PCC yarıiletken karakterini sadece katkı malzemesi etkilerken, eklenecek ekstra oksit metaller dielektrik özellikleri değiştirebilir. Sonuçta elde edilen akım değişimleri, etki ilişkisi incelendiğinde şekil sınıflandırılması kolaylıkla yapılmıştır. Dokunsal uygulama için bu tasarımın kullanılabilirliği doğrulanmış, ML algoritmalarından Rastgele Orman, bu çalışma kapsamında en uygun yöntem olarak belirlenmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda nanoparçacıkların dağılımlarının istenilen şekilde olabilmesi adına hizalama veya yönelimlendirme uygulanabilir. Bu sayede oluşacak iletim hatları rastgele olmaktan öteye geçerek daha spesifik, fiber yapılar elde edilebilir. Yükselen çalışma konseptlerinden olan kuantum aygıtlar için organik, kolay üretilebilir katmanlar oluşturulabilir. Diğer taraftan farklı kompozit karışımları ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir, daha yüksek hassasiyette sonuçlara ulaşılabilir. Aljinat, jelatin tercihi bu noktada ön plana çıkarken, sinaptik birimler oluşturulurken ferritin gibi proteinler kullanılabilir. Üretilen FET birimlerinin kanal genişliğini düşürebilmek adına maliyetlerde artırmaya gidilerek fotolitografi yöntemleriyle desenler oluşturulabilir, bu durumda büyük ölçekte birim alana çok sayıda eleman yerleştirilebilir. Elde edilen tasarımın her bir alt birimi (yarıiletken, elektrot, dielektrik) için farklı seçenekler düşünülerek yapılan çalışmayla karşılaştırmalı sonuçlar ortaya konulabilir. Bu nedenle tez dahilinde elde edilen veriler ve çıktıların birçok çalışmaya esin kaynağı olabilecek niteliktedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ibrahim Bozyel and Dincer Gokcen. Determining electrical percolation threshold of randomly distributed conductor materials in polymer composites via pathfinding algorithms. *Composites Science and Technology*, page 109404, **2022**.
- [2] Leonardo de Souza Vieira, Erick Gabriel Ribeiro dos Anjos, Gleice Ellen Almeida Verginio, Isabela Cesar Oyama, Natália Ferreira Braga, Thaís Ferreira da Silva, Larissa Stieven Montagna, and Fabio Roberto Passador. A review concerning the main factors that interfere in the electrical percolation threshold content of polymeric antistatic packaging with carbon fillers as antistatic agent. *Nano Select*, 3(2):248–260, **2022**.
- [3] Osama Khayal. Advancements in polymer composite structures, **2019**.
- [4] Mesfin Kassa. *Fabrication and Mechanical Property Characterization of Sisal fiber Reinforced Epoxy Resin Composite Material for Automotive body Application*. Master's thesis, Addis Ababa University, Addis Ababa Institute of Technology, School of Graduate Studies, **2015**. doi:10.13140/RG.2.2.16765.82407.
- [5] Wikimedia Commons. Allotropes of carbon. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Allotropes_of_Carbon.png#filelinks, **(Erişim Tarihi:21 Şubat 2022)**.
- [6] Changyong Liu, Ninggui Huang, Feng Xu, Junda Tong, Zhangwei Chen, Xuchun Gui, Yuelong Fu, and Changshi Lao. 3d printing technologies for flexible tactile sensors toward wearable electronics and electronic skin. *Polymers*, 10(6):629, **2018**.

- [7] Boğaç Kılıçarslan, İbrahim Bozyel, Dinçer Gökçen, and Cem Bayram. Sustainable macromolecular materials in flexible electronics. *Macromolecular Materials and Engineering*, page 2100978, **2022**.
- [8] Chenming Hu. *Modern semiconductor devices for integrated circuits*, volume 2. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, **2010**.
- [9] Mengyun Chen, Lijia Yan, Yang Zhao, Imran Murtaza, Hong Meng, and Wei Huang. Anthracene-based semiconductors for organic field-effect transistors. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(28):7416–7444, **2018**.
- [10] Yeter Sekertekin, İbrahim Bozyel, and Dincer Gokcen. A flexible and low-cost tactile sensor produced by screen printing of carbon black/pva composite on cellulose paper. *Sensors*, 20(10):2908, **2020**.
- [11] İbrahim Bozyel, Yasemen Ince Keser, and Dincer Gokcen. Triple mode and multi-purpose flexible sensor fabrication based on carbon black and thermoplastic polyurethane composite with propolis. *Sensors and Actuators A: Physical*, 332:113056, **2021**.
- [12] George M Whitesides. Soft robotics. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(16):4258–4273, **2018**.
- [13] Anindya Nag, Subhas Chandra Mukhopadhyay, and Jürgen Kosel. Wearable flexible sensors: A review. *IEEE Sensors Journal*, 17(13):3949–3960, **2017**.
- [14] Solen Kumbay Yildiz, Rahim Mutlu, and Gursel Alici. Fabrication and characterisation of highly stretchable elastomeric strain sensors for prosthetic hand applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 247:514–521, **2016**.
- [15] Ankit Malik and Balasubramanian Kandasubramanian. Flexible polymeric substrates for electronic applications. *Polymer Reviews*, 58(4):630–667, **2018**.
- [16] Feng-Ru Fan, Zhong-Qun Tian, and Zhong Lin Wang. Flexible triboelectric generator. *Nano energy*, 1(2):328–334, **2012**.

- [17] Paul Adrien Maurice Dirac. The quantum theory of the electron. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 117(778):610–624, **1928**.
- [18] Jean-Luc Bredas. Mind the gap! *Materials Horizons*, 1(1):17–19, **2014**.
- [19] Dmitrii F Perepichka and Martin R Bryce. Molecules with exceptionally small homo–lumo gaps. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(34):5370–5373, **2005**.
- [20] Lin Li, Jiahong Zheng, Jing Chen, Zebang Luo, Yi Su, Wei Tang, Xing Gao, Yingtian Li, Chongjing Cao, Qiuhua Liu, et al. Flexible pressure sensors for biomedical applications: from ex vivo to in vivo. *Advanced Materials Interfaces*, 7(17):2000743, **2020**.
- [21] Mengying Xie, Kyohei Hisano, Mingzhu Zhu, Takuya Toyoshi, Min Pan, Shima Okada, Osamu Tsutsumi, Sadao Kawamura, and Chris Bowen. Flexible multifunctional sensors for wearable and robotic applications. *Advanced Materials Technologies*, 4(3):1800626, **2019**.
- [22] Noaman Naseer, Dincer Gokcen, and Birsan Saka. Analysis and design of stopband fss unit cell on textile substrates. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 3(1):15–18, **2020**.
- [23] Jae Yeon Yi and Gyeong Man Choi. Percolation behavior of conductor-insulator composites with varying aspect ratio of conductive fiber. *Journal of electroceramics*, 3(4):361–369, **1999**.
- [24] Fangming Du, John E Fischer, and Karen I Winey. Effect of nanotube alignment on percolation conductivity in carbon nanotube/polymer composites. *Physical Review B*, 72(12):121404, **2005**.
- [25] S Pfeifer, S-H Park, and PR Bandaru. Analysis of electrical percolation thresholds in carbon nanotube networks using the weibull probability distribution. *Journal of applied physics*, 108(2):024305, **2010**.

- [26] Mohsen Razavy. *Quantum theory of tunneling*. World Scientific, **2013**.
- [27] Guochang Li, George Chen, and Shengtao Li. Charge transport model in nanodielectric composites based on quantum tunneling mechanism and dual-level traps. *Applied Physics Letters*, 109(6):062901, **2016**.
- [28] Sadie I White, Rose M Mutiso, Patrick M Vora, David Jahnke, Sam Hsu, James M Kikkawa, Ju Li, John E Fischer, and Karen I Winey. Electrical percolation behavior in silver nanowire–polystyrene composites: simulation and experiment. *Advanced Functional Materials*, 20(16):2709–2716, **2010**.
- [29] Stephen W Tsai and H Thomas Hahn. *Introduction to composite materials*. Routledge, **2018**.
- [30] Lucas Barcelos Otani, Antônio Henrique Alves Pereira, José Daniel Diniz Melo, and Sandro Campos Amico. Elastic moduli characterization of composites using the impulse excitation. *Technical-Scientific Informative ATCP Physical Engineering: White Paper*, **2014**.
- [31] Tingting Wang, Jinqing Wang, Zhangpeng Li, Mingqiang Yue, Xiaoli Qing, Pengxia Zhang, Xiaozhu Liao, Zengjie Fan, and Shengrong Yang. Pva/sa/mxene dual-network conductive hydrogel for wearable sensor to monitor human motions. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(7):51627, **2022**.
- [32] CS Schollenberger and FD Stewart. Thermoplastic polyurethane hydrolysis stability. *Journal of Elastoplastics*, 3(1):28–56, **1971**.
- [33] Vincent SD Voet, Jarno Guit, and Katja Loos. Sustainable photopolymers in 3d printing: A review on biobased, biodegradable, and recyclable alternatives. *Macromolecular Rapid Communications*, 42(3):2000475, **2021**.
- [34] H Hillborg, M Sandelin, and Ulf W Gedde. Hydrophobic recovery of polydimethylsiloxane after exposure to partial discharges as a function of crosslink density. *Polymer*, 42(17):7349–7362, **2001**.

- [35] Aihui Yan, Bonnie W Lau, Bevan S Weissman, Indrek Külaots, Nancy YC Yang, Agnes B Kane, and Robert H Hurt. Biocompatible, hydrophilic, supramolecular carbon nanoparticles for cell delivery. *Advanced Materials*, 18(18):2373–2378, **2006**.
- [36] S Fiorito, A Serafino, F Andreola, A Togna, and G Togna. Toxicity and biocompatibility of carbon nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6(3):591–599, **2006**.
- [37] Hugh O Pierson. *Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes: processing, properties and applications*. William Andrew, **2012**.
- [38] Gao Yang, Lihua Li, Wing Bun Lee, and Man Cheung Ng. Structure of graphene and its disorders: a review. *Science and technology of advanced materials*, 19(1):613–648, **2018**.
- [39] Songlin Zhang, Ayoun Hao, Nam Nguyen, Abiodun Oluwalowo, Zhe Liu, Yourri Dessureault, Jin Gyu Park, and Richard Liang. Carbon nanotube/carbon composite fiber with improved strength and electrical conductivity via interface engineering. *Carbon*, 144:628–638, **2019**.
- [40] François Diederich and Yves Rubin. Synthetic approaches toward molecular and polymeric carbon allotropes. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 31(9):1101–1123, **1992**.
- [41] Yu Lin, Li Zhang, Ho-kwang Mao, Paul Chow, Yuming Xiao, Maria Baldini, Jinfu Shu, and Wendy L Mao. Amorphous diamond: a high-pressure superhard carbon allotrope. *Physical Review Letters*, 107(17):175504, **2011**.
- [42] John Robertson. Amorphous carbon. *Advances in physics*, 35(4):317–374, **1986**.
- [43] Olfa Kanoun, Christian Müller, Abderrahmane Benchirouf, Abdulkadir Sanli, Ayda Bouhamed, Ammar Al-Hamry, and Lei Bu. Potential of flexible

carbon nanotube films for high performance strain and pressure sensors. *Nanotechnology for Optics and Sensors, One Central (OCP)*, **2014**.

- [44] Guozhen Shen. Recent advances of flexible sensors for biomedical applications. *Progress in Natural Science: Materials International*, **2021**.
- [45] Yifan Zhao, Jiaxin Wang, Yifei Zhang, Hejian Liu, Zi'ang Chen, Yujiao Lu, Yanning Dai, Lijun Xu, and Shuo Gao. Flexible and wearable emg and psd sensors enabled locomotion mode recognition for ioht-based in-home rehabilitation. *IEEE Sensors Journal*, 21(23):26311–26319, **2021**.
- [46] Min Gong, Liqun Zhang, and Pengbo Wan. Polymer nanocomposite meshes for flexible electronic devices. *Progress in Polymer Science*, 107:101279, **2020**.
- [47] Irem Attar, Kadir Serhat Altintig, Ibrahim Bozyel, and Dincer Gokcen. Design of a highly sensitive, flexible and stretchable tactile sensor for electronic skin applications. In *2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)*, pages 1–3. IEEE, **2019**.
- [48] Eric Singh, M Meyyappan, and Hari Singh Nalwa. Flexible graphene-based wearable gas and chemical sensors. *ACS applied materials & interfaces*, 9(40):34544–34586, **2017**.
- [49] Yan Xuan, Yuyao Lu, Satoko Honda, Takayuki Arie, Seiji Akita, and Kuniharu Takei. Active-matrix-based flexible optical image sensor. *Advanced Materials Technologies*, 6(9):2100259, **2021**.
- [50] Gregor Schwartz, Benjamin C-K Tee, Jianguo Mei, Anthony L Appleton, Do Hwan Kim, Huiliang Wang, and Zhenan Bao. Flexible polymer transistors with high pressure sensitivity for application in electronic skin and health monitoring. *Nature communications*, 4(1):1–8, **2013**.
- [51] Illayathambi Kunadian, Stephen M Lipka, Christopher R Swartz, Dali Qian, and Rodney Andrews. Determination of carrier densities of boron-and

- nitrogen-doped multiwalled carbon nanotubes using mott–schottky plots. *Journal of The Electrochemical Society*, 156(6):K110, **2009**.
- [52] Gady Golan, Alex Axelevitch, B Gorenstein, and V Manevych. Hot-probe method for evaluation of impurities concentration in semiconductors. *Microelectronics journal*, 37(9):910–915, **2006**.
- [53] JK Kung and WG Spitzer. Determination of fermi-level effect on si-site distribution in gaas: Si. *Journal of Applied Physics*, 45(5):2254–2257, **1974**.
- [54] Ho-Jin Song and Tadao Nagatsuma. Present and future of terahertz communications. *IEEE transactions on terahertz science and technology*, 1(1):256–263, **2011**.
- [55] Marcelo Pilotto Cenci, Tatiana Scarazzato, Daniel Dotto Munchen, Paula Cristina Dartora, Hugo Marcelo Veit, Andrea Moura Bernardes, and Pablo R Dias. Eco-friendly electronics—a comprehensive review. *Advanced Materials Technologies*, 7(2):2001263, **2022**.
- [56] Leon Chua. Memristor-the missing circuit element. *IEEE Transactions on circuit theory*, 18(5):507–519, **1971**.
- [57] Fengben Xi, Yaokun Pang, Wenjian Li, Tianzhao Bu, Junqing Zhao, Guoxu Liu, Tong Guo, Wenbo Liu, and Chi Zhang. Tribotronic bipolar junction transistor for mechanical frequency monitoring and use as touch switch. *Microsystems & nanoengineering*, 4(1):1–8, **2018**.
- [58] Randall D Isaac. The future of cmos technology. *IBM Journal of Research and Development*, 44(3):369–378, **2000**.
- [59] Jianguo Mei, Ying Diao, Anthony L Appleton, Lei Fang, and Zhenan Bao. Integrated materials design of organic semiconductors for field-effect transistors. *Journal of the American Chemical Society*, 135(18):6724–6746, **2013**.

- [60] Anuradha Tomar, Ayush Mittal, and Sahil Sharma. Pv-piezo hybrid grid connected system. In *2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, pages 748–753. IEEE, **2018**.
- [61] Beau Wells, Emily Baker, Austin Farwell, Harrison Foster, Xiaohan Gao, Benjamin Gruber, Erica Jones, Dennis Vu, Sonya Xu, and Jingbo Ye. An adjustable parallel-plate capacitor instrument—test of the theoretical capacitance formula. *American Journal of Physics*, 84(9):723–726, **2016**.
- [62] Kowdle Prasad. A generic computer simulation model to characterize photolithography manufacturing area in an ic fab facility. In *Ninth IEEE/CHMT International Symposium on Electronic Manufacturing Technology, Competitive Manufacturing for the Next Decade*, pages 66–72. IEEE, **1989**.
- [63] Lichun Chen, Patrick Degenaar, and Donal DC Bradley. Polymer transfer printing: application to layer coating, pattern definition, and diode dark current blocking. *Advanced Materials*, 20(9):1679–1683, **2008**.
- [64] András Perl, David N Reinhoudt, and Jurriaan Huskens. Microcontact printing: limitations and achievements. *Advanced Materials*, 21(22):2257–2268, **2009**.
- [65] Grigorios-Panagiotis Rigas, Marcia M Payne, John E Anthony, Peter N Horton, Fernando A Castro, and Maxim Shkunov. Spray printing of organic semiconducting single crystals. *Nature communications*, 7(1):1–8, **2016**.
- [66] L Baudonnet, J-L Grossiord, and F Rodriguez. Effect of dispersion stirring speed on the particle size distribution and rheological properties of three carbomers. *Journal of dispersion science and technology*, 25(2):183–192, **2004**.
- [67] Pillaiyar Puthiaraj and Kasi Pitchumani. Palladium nanoparticles supported on triazine functionalised mesoporous covalent organic polymers as efficient catalysts for mizoroki–heck cross coupling reaction. *Green Chemistry*, 16(9):4223–4233, **2014**.

- [68] P Judeinstein. Synthesis and properties of polyoxometalates based inorganic-organic polymers. *Chemistry of materials*, 4(1):4–7, **1992**.
- [69] Deepika Yadav and Satish Kumar Awasthi. A pd np-confined novel covalent organic polymer for catalytic applications. *New Journal of Chemistry*, 44(4):1320–1325, **2020**.
- [70] Dietrich E Riemer. The theoretical fundamentals of the screen printing process. *Microelectronics International*, **1989**.
- [71] Ali Eshkeiti, Avuthu SG Reddy, Sepehr Emamian, Binu B Narakathu, Michael Joyce, Margaret Joyce, Paul D Fleming, Bradley J Bazuin, and Massood Z Atashbar. Screen printing of multilayered hybrid printed circuit boards on different substrates. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 5(3):415–421, **2015**.
- [72] Vimanyu Beedasy and Patrick J Smith. Printed electronics as prepared by inkjet printing. *Materials*, 13(3):704, **2020**.
- [73] Michael S Miller, Jessica C O’Kane, Adrian Niec, R Stephen Carmichael, and Tricia Breen Carmichael. Silver nanowire/optical adhesive coatings as transparent electrodes for flexible electronics. *ACS applied materials & interfaces*, 5(20):10165–10172, **2013**.
- [74] Ruquan Ye, Dustin K James, and James M Tour. Laser-induced graphene. *Accounts of chemical research*, 51(7):1609–1620, **2018**.
- [75] Zhengfen Wan, Nam-Trung Nguyen, Yongsheng Gao, and Qin Li. Laser induced graphene for biosensors. *Sustainable Materials and Technologies*, 25:e00205, **2020**.
- [76] Marco R Bobinger, Francisco J Romero, Alfonso Salinas-Castillo, Markus Becherer, Paolo Lugli, Diego P Morales, Noel Rodríguez, and Almudena Rivadeneyra. Flexible and robust laser-induced graphene heaters photothermally scribed on bare polyimide substrates. *Carbon*, 144:116–126, **2019**.

- [77] EF Reznikova, J Mohr, and H Hein. Deep photo-lithography characterization of su-8 resist layers. *Microsystem technologies*, 11(4):282–291, **2005**.
- [78] Kiyotaka Wasa, Isaku Kanno, and Hidetoshi Kotera. *Handbook of sputter deposition technology: fundamentals and applications for functional thin films, nano-materials and MEMS*. William Andrew, **2012**.
- [79] Aritra Dhar and TL Alford. High quality transparent tio2/ag/tio2 composite electrode films deposited on flexible substrate at room temperature by sputtering. *APL materials*, 1(1):012102, **2013**.
- [80] Xiaomei Wang, Fazhe Sun, Guangchao Yin, Yuting Wang, Bo Liu, and Mingdong Dong. Tactile-sensing based on flexible pvdf nanofibers via electrospinning: A review. *Sensors*, 18(2):330, **2018**.
- [81] Shan He, Shilun Feng, Anindya Nag, Nasrin Afsarimanesh, Tao Han, and Subhas Chandra Mukhopadhyay. Recent progress in 3d printed mold-based sensors. *Sensors*, 20(3):703, **2020**.
- [82] Jian Feng Ma. Functions of silicon in higher plants. *Silicon biomineralization*, pages 127–147, **2003**.
- [83] Evangelia Balla, Vasileios Daniilidis, Georgia Karlioti, Theocharis Kalamas, Myrika Stefanidou, Nikolaos D Bikiaris, Antonios Vlachopoulos, Ioanna Koumentakou, and Dimitrios N Bikiaris. Poly (lactic acid): A versatile biobased polymer for the future with multifunctional properties—from monomer synthesis, polymerization techniques and molecular weight increase to pla applications. *Polymers*, 13(11):1822, **2021**.
- [84] Timmy Thiounn and Rhett C Smith. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*, 58(10):1347–1364, **2020**.
- [85] Moon Jong Han and Dong Ki Yoon. Advances in soft materials for sustainable electronics. *Engineering*, 7(5):564–580, **2021**.

- [86] Gordon E Moore et al. Moore's law at 40, **2006**.
- [87] Rene Y Choi, Aaron S Coyner, Jayashree Kalpathy-Cramer, Michael F Chiang, and J Peter Campbell. Introduction to machine learning, neural networks, and deep learning. *Translational Vision Science & Technology*, 9(2):14–14, **2020**.
- [88] Taiyong Li and Min Zhou. Ecg classification using wavelet packet entropy and random forests. *Entropy*, 18(8):285, **2016**.
- [89] Zauvik Rizaldi Maruf and Arif Dwi Laksito. The comparison of distance measurement for optimizing knn collaborative filtering recommender system. In *2020 3rd International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, pages 89–93. IEEE, **2020**.
- [90] Douglas M Hawkins. The problem of overfitting. *Journal of chemical information and computer sciences*, 44(1):1–12, **2004**.
- [91] Chuang Feng and Liying Jiang. Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube (cnt)–polymer nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 47:143–149, **2013**.
- [92] Fei Deng and Quan-Shui Zheng. An analytical model of effective electrical conductivity of carbon nanotube composites. *Applied Physics Letters*, 92(7):071902, **2008**.
- [93] Tomo Takeda, Yasuhide Shindo, Yu Kuronuma, and Fumio Narita. Modeling and characterization of the electrical conductivity of carbon nanotube-based polymer composites. *Polymer*, 52(17):3852–3856, **2011**.
- [94] Guotong Wang, Chengyuan Wang, Faling Zhang, and Xiaozhu Yu. Electrical percolation of nanoparticle-polymer composites. *Computational Materials Science*, 150:102–106, **2018**.
- [95] T Zhang and YB Yi. Monte carlo simulations of effective electrical conductivity in short-fiber composites. *Journal of applied physics*, 103(1):014910, **2008**.

- [96] HM Ma and X-L Gao. A three-dimensional monte carlo model for electrically conductive polymer matrix composites filled with curved fibers. *Polymer*, 49(19):4230–4238, **2008**.
- [97] Xiaomei Zeng, Xiaofeng Xu, Prathamesh M Shenai, Eugene Kovalev, Charles Baudot, Nripan Mathews, and Yang Zhao. Characteristics of the electrical percolation in carbon nanotubes/polymer nanocomposites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(44):21685–21690, **2011**.
- [98] Jason M Keith, Julia A King, and Rodwick L Barton. Electrical conductivity modeling of carbon-filled liquid-crystalline polymer composites. *Journal of applied polymer science*, 102(4):3293–3300, **2006**.
- [99] Matthew L Clingerman, Erik H Weber, Julia A King, and Kirk H Schulz. Synergistic effect of carbon fillers in electrically conductive nylon 6, 6 and polycarbonate based resins. *Polymer Composites*, 23(5):911–924, **2002**.
- [100] G Schwartz, S Cervený, and AJ Marzocca. A numerical simulation of the electrical resistivity of carbon black filled rubber. *Polymer*, 41(17):6589–6595, **2000**.
- [101] Matias Soto, Milton Esteva, Oscar Martínez-Romero, Jesús Baez, and Alex Elías-Zúñiga. Modeling percolation in polymer nanocomposites by stochastic microstructuring. *Materials*, 8(10):6697–6718, **2015**.
- [102] DI Arun, P Chakravarthy, BS Girish, KS Santhosh Kumar, and B Santhosh. Experimental and monte carlo simulation studies on percolation behaviour of a shape memory polyurethane carbon black nanocomposite. *Smart Materials and Structures*, 28(5):055010, **2019**.
- [103] Aixia Lu, Mingzhi Dai, Jia Sun, Jie Jiang, and Qing Wan. Flexible low-voltage electric-double-layer tfts self-assembled on paper substrates. *IEEE electron device letters*, 32(4):518–520, **2011**.

- [104] Joseph T Smith, Sahil S Shah, Michael Goryll, John R Stowell, and David R Allee. Flexible isfet biosensor using igzo metal oxide tfts and an ito sensing layer. *IEEE Sensors Journal*, 14(4):937–938, **2013**.
- [105] Weiwei Shi, Lizhi Hu, Yuan Liu, Sunbin Deng, Yuming Xu, Hoi-Sing Kwok, and Rongsheng Chen. Arithmetic and logic circuits based on ito-stabilized zno tft for transparent electronics. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 69(1):356–365, **2022**. doi:10.1109/TCSI.2021.3100138.
- [106] Nicola Pelagalli, Emiliano Laudadio, Pierluigi Stipa, Davide Mencarelli, and Luca Pierantoni. Efficient and versatile modeling of mono-and multi-layer mos2 field effect transistor. *Electronics*, 9(9):1385, **2020**.
- [107] Youngki Yoon, Kartik Ganapathi, and Sayeef Salahuddin. How good can monolayer mos2 transistors be? *Nano letters*, 11(9):3768–3773, **2011**.
- [108] Chris Leighton. Electrolyte-based ionic control of functional oxides. *Nature materials*, 18(1):13–18, **2019**.
- [109] H Kwarada, Y Araki, T Sakai, T Ogawa, and H Umezawa. Electrolyte-solution-gate fets using diamond surface for biocompatible ion sensors. *physica status solidi (a)*, 185(1):79–83, **2001**.
- [110] Se Hyun Kim, Kihyon Hong, Wei Xie, Keun Hyung Lee, Sipei Zhang, Timothy P Lodge, and C Daniel Frisbie. Electrolyte-gated transistors for organic and printed electronics. *Advanced Materials*, 25(13):1822–1846, **2013**.
- [111] Wiriya Thongruang, Richard J Spontak, and C Maurice Balik. Correlated electrical conductivity and mechanical property analysis of high-density polyethylene filled with graphite and carbon fiber. *Polymer*, 43(8):2279–2286, **2002**.
- [112] Olfa Kanoun, Ayda Bouhamed, Rajarajan Ramalingame, Jose Roberto Bautista-Quijano, Dhivakar Rajendran, and Ammar Al-Hamry. Review on

- conductive polymer/cnts nanocomposites based flexible and stretchable strain and pressure sensors. *Sensors*, 21(2):341, **2021**.
- [113] Wolfgang Bauhofer and Josef Z Kovacs. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites. *Composites science and technology*, 69(10):1486–1498, **2009**.
- [114] Ning Jing, Yun-Wu Huang, and Elke A Rundensteiner. Hierarchical optimization of optimal path finding for transportation applications. In *Proceedings of the Fifth international Conference on information and Knowledge Management*, pages 261–268. **1996**.
- [115] Parveen Sharma and Neha Khurana. Study of optimal path finding techniques. *International Journal of Advancements in Technology*, 4(2):124–130, **2013**.
- [116] Eckhard Freund and Helmut Hoyer. Pathfinding in multi-robot systems: Solution and applications. In *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 103–111. IEEE, **1986**.
- [117] Raymond Chiong, Jofry Hadi Sutanto, and Wendy Japutra Jap. A comparative study on informed and uninformed search for intelligent travel planning in borneo island. In *2008 International Symposium on Information Technology*, volume 3, pages 1–5. IEEE, **2008**.
- [118] Judea Pearl. *Heuristics: intelligent search strategies for computer problem solving*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., **1984**.
- [119] Robert Tarjan. Depth-first search and linear graph algorithms. *SIAM journal on computing*, 1(2):146–160, **1972**.
- [120] Baruch Awerbuch and R Gallager. A new distributed algorithm to find breadth first search trees. *IEEE Transactions on Information Theory*, 33(3):315–322, **1987**.

- [121] Rina Dechter and Judea Pearl. Generalized best-first search strategies and the optimality of a. *Journal of the ACM (JACM)*, 32(3):505–536, **1985**.
- [122] Bruce Golden. Shortest-path algorithms: A comparison. *Operations Research*, 24(6):1164–1168, **1976**.
- [123] Daniel Foead, Alifio Ghifari, Marchel Budi Kusuma, Novita Hanafiah, and Eric Gunawan. A systematic literature review of a* pathfinding. *Procedia Computer Science*, 179:507–514, **2021**.
- [124] Khammapun Khantanapoka and Krisana Chinnasarn. Pathfinding of 2d & 3d game real-time strategy with depth direction a-star algorithm for multi-layer. In *2009 Eighth international symposium on natural language processing*, pages 184–188. IEEE, **2009**.
- [125] Scott Kirkpatrick. Percolation and conduction. *Reviews of modern physics*, 45(4):574, **1973**.
- [126] Thomas A Mason, Andrew M Dattelbaum, Nathan A Mara, George C Kaschner, Oliver K Johnson, Daniel Seegmiller, and David T Fullwood. A new technique to measure tunneling barrier height in solid media. Technical report, Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), **2011**.
- [127] Zong-Wei Shang, Hsiao-Hsuan Hsu, Zhi-Wei Zheng, and Chun-Hu Cheng. Progress and challenges in p-type oxide-based thin film transistors. *Nanotechnology Reviews*, 8(1):422–443, **2019**.
- [128] Kevin J Yang and Chenming Hu. Mos capacitance measurements for high-leakage thin dielectrics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 46(7):1500–1501, **1999**.
- [129] Anshu Singh and Poornima Mittal. Organic thin film transistor and organic inverter based on cylindrical gate otft. In *2016 International Conference on Emerging Trends in Communication Technologies (ETCT)*, pages 1–5. IEEE, **2016**.

- [130] Azad Mohammed and Avin Abdullah. Scanning electron microscopy (sem): A review. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania*, pages 7–9. **2018**.
- [131] JJVS Madejová. Ftir techniques in clay mineral studies. *Vibrational spectroscopy*, 31(1):1–10, **2003**.
- [132] Derek Albert Long. Raman spectroscopy. *New York*, 1, **1977**.
- [133] MH Buraidah and AK Arof. Characterization of chitosan/pva blended electrolyte doped with nh₄i. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357(16-17):3261–3266, **2011**.
- [134] Ignacio Horcas, Rs Fernández, JM Gomez-Rodriguez, JWSX Colchero, JWSXM Gómez-Herrero, and AM Baro. Wsxn: A software for scanning probe microscopy and a tool for nanotechnology. *Review of scientific instruments*, 78(1):013705, **2007**.
- [135] Daewoong Kwon, Suraj Cheema, Nirmaan Shanker, Korok Chatterjee, Yu-Hung Liao, Ava J Tan, Chenming Hu, and Sayeef Salahuddin. Negative capacitance fet with 1.8-nm-thick zr-doped hfo₂ oxide. *IEEE Electron Device Letters*, 40(6):993–996, **2019**.
- [136] Junan Xie, Zhennan Zhu, Hong Tao, Shangxiong Zhou, Zhihao Liang, Zhihang Li, Rihui Yao, Yiping Wang, Honglong Ning, and Junbiao Peng. Research progress of high dielectric constant zirconia-based materials for gate dielectric application. *Coatings*, 10(7):698, **2020**.
- [137] Hao-Yang Mi, Max R Salick, Xin Jing, Brianna R Jacques, Wendy C Crone, Xiang-Fang Peng, and Lih-Sheng Turng. Characterization of thermoplastic polyurethane/polylactic acid (tpu/pla) tissue engineering scaffolds fabricated by microcellular injection molding. *Materials Science and Engineering: C*, 33(8):4767–4776, **2013**.

- [138] Hongjie Bi, Zechun Ren, Rui Guo, Min Xu, and Yongming Song. Fabrication of flexible wood flour/thermoplastic polyurethane elastomer composites using fused deposition molding. *Industrial crops and products*, 122:76–84, **2018**.
- [139] RW Seymour, GM Estes, and Stuart L Cooper. Infrared studies of segmented polyurethane elastomers. i. hydrogen bonding. *Macromolecules*, 3(5):579–583, **1970**.
- [140] Mengyao Dong, Qiang Li, Hu Liu, Chuntai Liu, Evan K Wujcik, Qian Shao, Tao Ding, Xianmin Mai, Changyu Shen, and Zhanhu Guo. Thermoplastic polyurethane-carbon black nanocomposite coating: Fabrication and solid particle erosion resistance. *Polymer*, 158:381–390, **2018**.
- [141] Isaac Childres, Luis A Jauregui, Wonjun Park, Helin Cao, Yong P Chen, et al. Raman spectroscopy of graphene and related materials. *New developments in photon and materials research*, 1:1–20, **2013**.
- [142] Fatima Tuz Johra, Jee-Wook Lee, and Woo-Gwang Jung. Facile and safe graphene preparation on solution based platform. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5):2883–2887, **2014**.
- [143] Chenguang Zhu, Dongmei Zhao, Kedian Wang, Xia Dong, Wenqiang Duan, Fangcheng Wang, Meng Gao, and Guan Zhang. Direct laser writing of graphene films from a polyether ether ketone precursor. *Journal of Materials Science*, 54(5):4192–4201, **2019**.
- [144] Soojin Lim, Boseok Kang, Donghoon Kwak, Wi Hyoung Lee, Jung Ah Lim, and Kilwon Cho. Inkjet-printed reduced graphene oxide/poly (vinyl alcohol) composite electrodes for flexible transparent organic field-effect transistors. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(13):7520–7525, **2012**.
- [145] Lucieli Rossi, Keli F Seidel, Wagner S Machado, and Ivo A Hümmelgen. Low voltage vertical organic field-effect transistor with polyvinyl alcohol as gate insulator. *Journal of Applied Physics*, 110(9):094508, **2011**.

- [146] Saravanan Yuvaraja, Ali Nawaz, Qian Liu, Deepak Dubal, Sandeep G Surya, Khaled N Salama, and Prashant Sonar. Organic field-effect transistor-based flexible sensors. *Chemical Society Reviews*, 49(11):3423–3460, **2020**.

