

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GRAFEN/POLİSTİREN KOMPOZİT KAYGAN YÜZEYLERİN ÜRETİMİ VE  
AKILLI MALZEME PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ EMRE

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ NEVİN ATALAY GENGEÇ

BİLECİK, 2024

10628878

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GRAFEN/POLİSTİREN KOMPOZİT KAYGAN YÜZEYLERİN ÜRETİMİ VE  
AKILLI MALZEME PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ EMRE

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ NEVİN ATALAY GENGEÇ

BİLECİK, 2024

10628878

## BEYAN

“Grafen Katkılanmış Polimerik Kaygan Yüzeylerin Sentezi Ve Akıllı Malzeme Davranışlarının Belirlenmesi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
<b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b>	<input type="checkbox"/>
<b>Destek alındı ise;</b>			
<b>Destekleyen kurum; TÜBİTAK-ARDEB</b>			
<b>Desteğin Türü</b>		<b>Proje Numarası</b>	
<b>1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)</b>		120M992	
<b>2- TÜBİTAK 1001 Projesi. (x)</b>			
<b>Diğer;.....</b> .....			
<b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>			
<b>ETİK KURUL karar</b>		...../.....	
<b>tarih/sayı:</b>		.....	

**Deniz EMRE**

.././20..

**İmza**

## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında ilk andan itibaren bana yol gösteren, destek ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı çok değerli hocam Sayın Nevin ATALAY GENGEÇ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Lisans eğitimimde de olduğu gibi her zaman bilgi ve tecrübeleriyle yardımlarını gördüğüm Sayın Prof. Dr.Çağlayan AÇIKGÖZ ve Doç. Dr. Alev AKPINAR BORAZAN'a çok teşekkür ederim. Proje kapsamında evim dediğim 3 laboratuvarım için en başta herşeyi bırakıp geldiğim yolda, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi için Doç. Dr. R. Zerrin YARBAY'a, Gebze Teknik Üniversitesi için bana hiç bilmediğim bir alanda sabırla desteklerini sunan Prof. Dr. Numan AKDOĞAN ve Şafak GÖK'e, İzmit Meslek Yüksekokulu için Doç Dr. Erhan GENGEÇ'e, Arş. Gör. Ece SAYIN'a sundukları tüm imkanlar ve destekleri için ayrıca teşekkür ederim. Bu 3 evimde de ihtiyacım olan her anda gerekli psikolojik ve fizyolojik olarak yanımda olan başta Aydan TATMAN, Billur AKALPOĞLU, Zelihanur KURT ve Aleyna UĞUREL olmak üzere tüm dostlarıma çok teşekkür ederim.

Elini ve umudunu kalbimde hissettiğim sabrımın bittiği yerde umudumu başlatan ilk öğretmenime, tökezlediğimde "HADİ" diyen o sese, annem Hanife EMRE'ye, her yolun sonunda döndüğüm ve ilk günkü gibi beni sabırla bekleyip destekleyen herşeyim babam Ramazan Emre'ye, iki canparçam Murat ve Mustafa EMRE'ye, her zaman yanımda olmaya çalışan canım pamuk teyzem Beyaz TURAN'a, her zorlukta mutlulukta yanımda olan Recep PEKDAŞ'a destek ve inançlarını bir gün bile benden esirgemedikleri, her türlü maddi manevi destekleri sağladıkları için teşekkürlerimi borç bilirim.

Bu tez, 2 yıl boyunca proje bursiyeri olarak yer aldığım "Dış Uyarılara Duyarlı Grafen ve Grafen Bazlı Kaygan Sıvı Emdirilmiş Gözenekli Yüzeylerin (SLIPS) Üretimi ve Akıllı Malzeme Performanslarının Belirlenmesi" isimli 120M992 Numaralı TÜBİTAK-1001 projesi kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK-ARDEB'e sağladıkları kaynaklardan dolayı çok teşekkür ederim.

**Deniz EMRE**

**2024**

## ÖZET

### GRAFEN/POLİSTİREN KOMPOZİT KAYGAN YÜZEYLERİN ÜRETİMİ VE AKILLI MALZEME PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ

Grafen, %98 optik geçirgenlik, yüksek termal iletkenlik ve yüksek Young modülü gibi üstün birçok özelliklerinden dolayı sensörler, enerji dönüşümü, depolama cihazları, güneş pilleri ve güçlendirilmiş kompozitler vb. birçok farklı uygulama alanlarına sahiptir. Bu çalışmada farklı hidrofobluk ve pürüzlülük derecesinde Grafen/Polistiren kaygan yüzeylerin üretimi, performanslarının belirlenmesi ve dış uyaranlar karşısında akıllı tepki geliştirme kabiliyetlerinin test edilmesi amaçlanmıştır. Kompozit yüzeyler daldırarak kaplama yöntemiyle hazırlanmış ve kompozit yüzeylere yağ emdirilerek kaygan yüzeyler (SLIP) elde edilmiştir. Kaygan kompozit yüzeylerin kayma performansı ve kendini yenileme potansiyelleri incelenmiştir. İletken olan grafen kompozit yüzeylerde dış uyaran olarak elektrik (düşük voltajlarda) uygulanması ile sıvı damlanın dış uyarana karşı tepkisi analiz edilmiştir. Damla hareketinin belli bir yol boyunca akıllı kontrolünün sağlanması amacıyla, litografi yöntemiyle kanal ve silindirik mikro desen içeren substratlar üretilmiş ve bu substratlar PS/grafen dispersiyonları ile kaplanarak desenlenmiş kompozit yüzeyler üretilmiştir. Ayrıca farklı iletkenliklerde düz, pürüzlü ve desenli grafen bazlı yüzeyler hazırlanarak iletkenlik, pürüzlülük ve hidrofobluk derecesindeki değişimin kaygan yüzey performansı ve akıllı tepki davranışına etkisi incelenmiştir. Kaygan yüzey (SLIP) performansı ve akıllı tepki davranışının daha detaylı anlaşılabilmesi için farklı yağlayıcı türleri, yağlayıcı kalınlığı, sıvı damla hacmi ve dış uyaran olarak kullanılan elektrik potansiyeli gibi parametreler araştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde amaca uygun olarak üretilen grafen bazlı PS kaygan yüzeyler üzerinde, sıvı damlanın hedeflenen mesafe, yön ve sürede kontrollü olarak hareket ettirilebildiği, kendini yenilediği, deforme edildiğinde dahi kaygan özelliğini kaybetmediği ve stabilitesini koruduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak kaygan yüzey üzerindeki damla hareketinin akıllı kontrolünün doğadaki örneklerinde olduğu gibi yüzey topografyasındaki değişim ve yüzeyin iletkenlik değerindeki değişim ile sağlanabileceği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İndirgenmiş Grafen Oksit (GrO), Polistiren (PS), Kompozit Yüzey, Kaygan Yüzey, Akıllı Tepki.

## ABSTRACT

### PRODUCTION OF GRAPHENE/POLYSTYRENE COMPOSITE SLIPPERY SURFACES AND DETERMINATION OF SMART MATERIALS PERFORMANCE

Graphene has many different application areas such as sensors, energy conversion, storage devices, solar cells, and reinforced composites, etc. due to its many superior properties such as 98% optical transmittance, high thermal conductivity, and high Young's modulus. In this study, it was aimed to produce Graphene/Polystyrene slippery surfaces with different degrees of hydrophobicity and roughness, determine their performance, and test their ability to develop intelligent responses to external stimuli. Composite surfaces were prepared by dip coating method and slippery surfaces (SLIP) were obtained by infusing the composite surfaces with oil. The sliding performance and self-renewal potential of slippery composite surfaces were examined. By applying electricity (at low voltages) as an external stimulus to conductive graphene composite surfaces, the response of the liquid drop to external stimuli was analyzed. In order to provide intelligent control of the droplet movement along a certain path, substrates containing channel and cylindrical micropatterns were produced by lithography method, and patterned composite surfaces were produced by coating these substrates with PS/graphene dispersions. In addition, smooth, rough, and patterned graphene-based surfaces with different conductivities were prepared and the effects of changes in conductivity, roughness, and hydrophobicity on slippery surface performance and smart response behavior were examined. In order to understand slippery surface (SLIP) performance and smart response behavior in more detail, parameters such as different lubricant types, lubricant thickness, liquid drop volume, and electrical potential used as external stimuli were investigated. As a result of the studies carried out, it was determined that on purpose-produced graphene-based PS slippery surfaces, the liquid drop can be moved in a controlled manner in the targeted distance, direction, and time, renews itself, does not lose its slippery feature even when deformed and maintains its stability. As a result, it has been determined that intelligent control of the drop movement on the slippery surface can be achieved by the change in the surface topography and the change in the conductivity value of the surface, as in examples in nature.

**Keywords:** Reduced Graphene Oxide (GrO), Polystyrene (PS), Composite Surface, Slippery Surface, Smart Response.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ .....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	xi
2. POLİMER KOMPOZİTLER.....	4
2.1 Polistiren .....	4
2.2. PS Matrisli Kompozitler.....	5
3. GRAFEN ve GRAFEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....	7
4. KATI YÜZEY ÜZERİNDE SIVI DAMLANIN ISLATMA DAVRANIŞI.....	10
4.1. Süperhidrofobik Yüzeyle .....	12
5. KAYGAN YÜZEYLER.....	15
5.1. Kayma Açısı ve Kayma Hızı .....	19
5.2. Kaygan Yüzey Uygulamaları.....	20
5.3. Akıllı Kaygan Yüzeyle .....	21
6. MATERYAL VE YÖNTEM .....	28
6.1. Altık olarak kullanılan materyallerin hazırlanması, temizlenmesi, aktivasyonu ve modifikasyonu.....	28
6.1.1 Cam altıkların Temizleme, Aktivasyon ve Modifikasyon İşlemleri .....	28
6.1.2 Mikrodesenli PDMS Altıkların Üretimi, Aktivasyonu ve Modifikasyonu İşlemleri.....	29
6.2. Grafitten Kimyasal Yöntemle Grafit Oksit Sentezi.....	35
6.3. GrO ve GO Katkılanmış PS Dispersiyonlarının Hazırlanması.....	36
6.4 GrO ve GO Katkılanmış PS Yüzeylelerin Hazırlanması, İndirgenmesi ve Kaygan Yüzey Üretimi .....	39
6.5. Kaygan Yüzey Performans Çalışmaları .....	40
6.6. Karakterizasyon Çalışmaları.....	41
7. BULGULAR .....	43
7.1. Düz, Pürüzlü ve Yönlendirilmiş Mikrodesenli Substratların Hazırlanması ve Karakterizasyonu.....	43

7.1.1. Yönlendirilmiş mikrodeseanlı şablonlardan PDMS substratların üretimi ve karakterizasyonu .....	43
7.2. Kimyasal Yöntemle Grafen Oksit Sentezi, Grafen Oksit Dispersiyonlarının hazırlanması ve Karakterizasyonu.....	46
7.2.1 Kimyasal yöntemle grafit oksit sentezi ve karakterizasyonu .....	47
7.2.2. Kararlı GO Dispersiyonlarının Hazırlanması ve Karakterizasyonu .....	47
7.3. Grafite Oksit Katkılı PS Kompozit Kaygan Yüzeylerin Üretimi, Karakterizasyonu ve Kaygan Yüzey Performansının Belirlenmesi.....	49
7.3.1. PS+GrO@THF Kompozit Yüzeylerin Üretimi ve Karakterizasyonu....	50
7.3.1.1. PS+GrO@THF Kaygan Kompozit Yüzeylerin Üretimi ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi .....	53
7.3.2. PS+GrO@THF+EtOH Kompozit Yüzeylerin Üretimi ve Karakterizasyonu .....	57
7.3.2.1 PS+GrO@THF+EtOH Kaygan Kompozit Yüzeylerin Üretimi ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi .....	58
7.4. Su Ortamında Dispers Edilmiş GO Dispersiyonlarının Katkılandığı PS Kompozit Kaygan Yüzeylerin Üretimi, Karakterizasyonu ve Kaygan Yüzey Performansının Belirlenmesi .....	62
7.4.1. Düz Cam substrat üzerine PS/GO <sub>w</sub> ve r-PS/GO <sub>w</sub> Kompozit Yüzeylerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu .....	62
7.4.1.1. Düz Cam substrat üzerine PS/GO <sub>w</sub> ve r-PS/GO <sub>w</sub> Kaygan Kompozit Yüzeylerin Hazırlanması ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi .....	66
7.4.2. Pürüzlü Cam substrat üzerine PS/GO <sub>w</sub> ve r-PS/GO <sub>w</sub> Kompozit ve Kaygan Yüzeylerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi .....	70
7.4.2.1. Pürüzlü Cam substrat üzerine PS/GO <sub>w</sub> ve r-PS/GO <sub>w</sub> Kaygan Kompozit Yüzeylerin Hazırlanması ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi.....	75
7.4.3. Mikrodeseanlı PDMS Substrat Üzerine PS/GO <sub>w</sub> ve r-PS/GO <sub>w</sub> Kompozit ve Kaygan Yüzeylerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi .....	79
7.4.3.1. Mikrodeseanlı PDMS Substrat Üzerine PS/GO <sub>w</sub> ve r-PS/GO <sub>w</sub> Kaygan Kompozit Yüzeylerin Hazırlanması ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi.....	82
7.5. PS Kompozit Kaygan Yüzeylerin Dış Uyarana Karşısında Akıllı Tepki Verme Potansiyellerinin Belirlenmesi .....	85
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	101
KAYNAKÇA .....	106



## TABLolar LİSTESİ

- Tablo 6.1.** AZ1505 Fotorezist ile desenlendirilmiş krom maske 1 ve 2 için tasarım boyutları. **32**
- Tablo 7.1.** Verpol-RTV-240 silikon elastomeri ile SU-8 Şablon 1 kalıptan çoğaltılan farklı tasarımlardaki PDMS substratların atmosferik plazma modifikasyonu öncesi ve sonrasında su temas açısı sonuçları ve damla profili görüntüleri ..... **45**
- Tablo 7.2.** Farklı bileşimlerdeki PS-GrO@THF süspansiyonlarının farklı daldırarak kaplama hızlarında cam+plazma modifikasyonlu cam lamellere kaplanması ile hazırlanan PS+GrO@THF kompozit yüzeylerin kaplama şartları ve temas açısı sonuçlar ..... **51**
- Tablo 7.3.** 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine farklı bileşimlerinde GrO katkılanması ile hazırlanan PS-GrO@THF süspansiyonlarının T1-R tasarımı PDMS kalıp üzerine 160 mm/dk daldırarak kaplama hızında kaplanması ile üretilen mikrodeseanlı MD-PS+GrO@THF kompozit yüzeylerine ve bu yüzeylerin KİY-1 yöntemine göre indirgenmesi ile üretilen r-MD-PS+GrO@THF kompozit yüzeylerine ait temas açısı sonuçları..... **53**
- Tablo 7.4.** 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine %1, 3, 5, 7 ve 10 GrO ilavesi ile 320 mm/dk hızda cam yüzeyler üzerine kaplanması ile üretilen GrO katkılı PS yüzeylerin kimyasal olarak indirgenmesi ile üretilen r-PS+GrO@THF kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylere ait yağlama öncesi ve sonrası temas açısı sonuçları .... **54**
- Tablo 7.5.** 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine %3ve 10 GrO ilavesi ile 320 mm/dk hızda cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin temas açısı sonuçları, farklı test sıvısı (DI-su) miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları..... **55**
- Tablo 7.6.** 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine GrO ilavesi ile 320 mm/dk hızda cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin farklı KCl test sıvısı miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları ..... **56**
- Tablo 7.7.** 50 mg/ml konsantrasyonlu PS çözeltisine farklı bileşimlerde GrO ilavesi ile hazırlanan PS-GrO@THF süspansiyonlarına bulanma noktası öncesine kadar çöktürücü solvent ilavesi ile hazırlanan PS-GrO@THF+EtOH süspansiyonlarından cam lameller üzerine 320 mm/dk kaplama hızında daldırarak kaplama yöntemi ile kaplanması ile üretilen PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerine ait temas açısı sonuçları ..... **57**
- Tablo 7.8.** PS-GrO@THF+EtOH süspansiyonlarından cam lameller üzerine 320 mm/dk kaplama hızında daldırarak kaplama yöntemi ile üretilen PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinin 350Cst viskoziteli silikon yağı emdirilerek hazırlanan kaygan yüzeylere ait temas açısı sonuçları..... **59**
- Tablo 7.9.** PS çözeltisine %3ve 10 GrO ilavesi sonrası bulanma noktası öncesinde EtOH ilavesi ile cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin farklı test sıvısı (DI-su) miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları ..... **60**
- Tablo 7.10.** PS çözeltisine %3 ve 10 GrO ilavesi sonrası bulanma noktası öncesinde EtOH ilavesi ile cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF+EtOH ve PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin farklı test sıvısı (KCl) miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları ..... **61**
- Tablo 7.11.** Farklı karışım bileşimlerinde PS-GO<sub>w</sub> süspansiyonlarından düz cam üzerine 1 kat kaplanarak üretilen PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen r-PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları..... **64**

<b>Tablo 7.12.</b> Farklı karışım oranlarında PS/GO <sub>w</sub> süspansiyonlarının Düz Cam üzerine 2 kat kaplanması ile üretilen PS-GO <sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen R-PS-GO <sub>w</sub> yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları .....	<b>66</b>
<b>Tablo 7.13.</b> 3, 5 ve 8µl <i>DI-Su</i> test sıvısı için <i>düz cam</i> üzerine <i>Si-Oil</i> emdirilerek farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartı ve GO <sub>w</sub> katkılama oranında hazırlanan PS/GO <sub>w</sub> kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları .....	<b>68</b>
<b>Tablo 7.14.</b> 3, 5 ve 8µl <i>DI-Su</i> test sıvısı için <i>düz cam</i> üzerine <i>Si-Oil</i> emdirilerek farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartı ve GO <sub>w</sub> katkılama oranında hazırlanan PS/GO <sub>w</sub> kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları .....	<b>70</b>
<b>Tablo 7.15.</b> Farklı GO <sub>w</sub> bileşimlerinde PS/GO <sub>w</sub> süspansiyonlarının pürüzlü (rodajlı) cam üzerine 1600 mm/dk kaplama hızında 1 kat kaplanması ile üretilen PS-GO <sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen r-PS-GO <sub>w</sub> kompozit yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları.....	<b>72</b>
<b>Tablo 7.16.</b> GO dispersiyonunun farklı karışım oranlarında katılanması ile üretilen PS/GO <sub>w</sub> süspansiyonlarından pürüzlü (rodajlı) cam üzerine <i>2 kat kaplanarak</i> üretilen PS-GO <sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen r-PS-GO <sub>w</sub> kompozit yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları.....	<b>74</b>
<b>Tablo 7.17.</b> 3, 5 ve 8µl <i>DI-Su</i> test sıvısı için <i>pürüzlü cam</i> üzerine <i>Si-Oil</i> emdirilerek farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartı ve GO <sub>w</sub> katkılama oranında hazırlanan PS/GO <sub>w</sub> kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları .....	<b>76</b>
<b>Tablo 7.18.</b> 3, 5 ve 8µl <i>DI-Su</i> test sıvısı için <i>pürüzlü cam</i> üzerine <i>Sıvı Parafin</i> emdirilerek farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartı ve GO <sub>w</sub> katkılama oranında hazırlanan PS/GO <sub>w</sub> kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları .....	<b>78</b>
<b>Tablo 7.19.</b> %50:50 PS/GO <sub>w</sub> süspansiyonundan farklı tasarımlardaki PDMS Şablon 1 üzerine 1600 mm/dk kaplama hızında 5 kat kaplanarak üretilen PDMS+PS-GO <sub>w</sub> yüzeyleri ve bu yüzeylerin 2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenmesi ile üretilen PDMS+r-PS-GO <sub>w</sub> yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları .....	<b>80</b>
<b>Tablo 7.20:</b> 8µl <i>DI-Su</i> test sıvısı için 5 farklı tasarıma sahip <i>mikrodesenli PDMS</i> substrat üzerine kaplanan % 50:50 bileşimde r-PS/GO <sub>w</sub> kompozit yüzeylerinin kayma performans sonuçları .....	<b>83</b>
<b>Tablo 7.21:</b> 8µl <i>DI-Su</i> test sıvısı için 5 farklı tasarıma sahip <i>mikrodesenli PDMS substrat</i> üzerine <i>Sıvı Parafin</i> emdirilerek hazırlanmış % 50:50 PS/GO <sub>w</sub> kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları .....	<b>84</b>
<b>Tablo 7.22.</b> Cam üzerine kaplı r-(PS+GO@THF-DC-4) kaygan PS/GO yüzeyinin kendini onarma performansı testi sırasında alınmış dijital fotoğraflar .....	<b>99</b>
<b>Tablo 7.23.</b> R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> ve PDMS <sub>Ş1:T5R</sub> -R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> Parafin yağlı Kaygan numunelerinin yüzeyini çizerek yüzeyin kendi kendini onarması deneyi. Kaydırılan test sıvısı 8µl saf su, yağlayıcı: Parafin(0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) .....	<b>100</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Stiren monomerinin polimerizasyonu sonucunda oluşan PS'nin kimyasal yapısı ....	5
Şekil 3.1. Grafen ve türevleri .....	7
Şekil 4.1. Katı bir yüzey üzerinde bir damla sıvının profili.....	10
Şekil 4.2. Eğik bir yüzeyde temas açısı histerezisinin şematik gösterimi.....	11
Şekil 4.3. Young, Wenzel, Cassie Baxter teorilerine göre sıvı damlanın katı yüzey üzerindeki davranışına ait temsili görünümü .....	12
Şekil 4.4. Farklı temas açlarına sahip katı yüzey üzerindeki sıvı damlanın davranışı.....	13
Şekil 5.1. Aizenberg grubu tarafından SLIP yüzey tasarımına yönelik sistematik prosedür ...	15
Şekil 5.2. Farklı pürüzlülükteki substratlar üzerinde yağlayıcı miktarı ile SLIP davranış gösterme arasındaki ilişkinin şematik gösterimi: (A–C) düz substrat, (D–F) mikro desenli substrat, (G–I) nanoyapılı substrat ve (J–L) hiyerarşik olarak yapılandırılmış substratlar üzerinde (C, F ve L) kaygan özellik göstermezken, diğer yüzeyler kaygan davranış sergilemektedir .....	17
Şekil 5.4. Doğada bulunan ve taklit edilerek yapay yüzeyleri hazırlanmış bazı canlılara ait makro ve mikro yüzey fotoğrafları.....	23
Şekil 5.5. Spesifik ıslanabilirliğe sahip elektrotermal ve şekil hafızalı grafen sünger. (A) Grafen sünger / SMP hibrid filmin elektriksel olarak (DC) tetiklenen şekil-hafıza özelliği. (B) Grafen sünger / SMP hibrid filmin ayarlanabilir ıslatılabilirliği .....	24
Şekil 5.6. (I) Programlanabilir ıslanabilirliğe sahip PIPGF'nin şematik diyagramı.....	25
Şekil 5.7. (a) Jiletle fiziksel olarak hasar görmüş bir poroz, yönlendirilmiş ve iletken polimer (PCDTPT) filminin SEM görüntüsü .....	26
Şekil 6.2. (a) Kalıp tasarım prosedür adımlarını gösteren temsili görsel ve (b) Kalıp tasarımında kullanılan boyutsal özelliklerin temsili görseli .....	30
Şekil 6.3. Heidelberg DWL 66fs Krom Maske Basım Cihazı, Heidelberg 'te basım sonrası Krom Maske'nin Cr Etcher içinde bekletilmesi, AZ100 Remover içinde +80° C maskenin fotorezistten temizlenmesi, Heidelberg DWL 66fs ile basılmış Krom Maske Çalışması.....	31
Şekil 6.4. Heidelberg DWL 66fs ile basılmış Krom Maske Çalışması Mikroskop görüntüsü, Soptop digital microscope camera CX4OM .....	31
Şekil 6.5: 5 Farklı desende kalıp tasarımı için üretilen krom maske 1 ve 2'ye ait optik mikroskop görüntüleri. Görüntülerin sağ alt köşesinde yer alan ölçek çubuğu 200 um'yi temsil eder.....	33
Şekil 6.6. .Oksijen plazma Cihazı(PTL-VM500 Vacuum Plasma Treatment System).....	34
Şekil 6.7. PDMS'in Si-Wafer üzerinden ayrılması .....	35
Şekil 6.8. (a) Grafit oksit sentezi deneysel düzenek, (b) Grafit oksit sentez reaksiyonunun sonlandırılması prosesine ait deneysel düzenek, (c) DI-su ile yıkama sonrası karışımın görünümü, (d) HCI ile yıkama sonrası karışımın görünümü, (e) Etanol ile yıkama sonrasında santrifüjlenerek elde edilen çökelek görüntüleri için deneyler sırasında çekilmiş dijital fotoğraflar.....	36
Şekil 6.9. Voltaj uygulama set-up güç kaynağı ve temas açısı ölçüm cihazı motorize tabla ...	41
Şekil 6.10. (a) Signatone 4-prop İletkenlik Cihazı ve (b) Biolin Scientific Attention Theta Lite Temas Açısı Cihazı dijital fotoğrafları .....	42
Şekil 7.1. A) Si-alttaş üzerinde “çukur” olarak (T1-R ile T5-R arasındaki görüntüler) SU-8 2015 negatif fotorezistin 2 katlı litografi işlemi ile desenlendirildiği Şablon-1'e ait farklı büyütmelelerdeki optik mikroskop görüntüleri ve B) SU-8 Şablon 1'den 5 tasarım (T1-R, T2-R,	

T3-R, T4-R ve T5-R) için Verpol RTV240 kalıp silikonu ile çoğaltılan PDMS altlıkların yüzey ve kesit mikroskop görüntüleri.....	44
<b>Şekil 7.2.</b> (a) Grafit ve (b) Grafit Oksitin (GrO) FTIR spektrumları.....	47
<b>Şekil 7.3.</b> THF ve DI-Su ortamında hazırlanmış yüksek konsantrasyonlu GO@THF ve GO@Su'e ait (a) FTIR spektrumları, (b) XRD kırınımları ve (c) XRD kırınımlarına göre Bragg eşitliğinden hesaplanan tabakalar arası mesafe.....	48
<b>Şekil 7.4.</b> 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine % 1, 3, 5, 7 ve 10 GrO ilaveli 320 mm/dk hızda daldırarak kaplama yöntemi ile hazırlanan yüzeylerin SEM görüntüleri.....	52
<b>Şekil 7.5.</b> r-PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerine ait SEM görüntüler.....	58
<b>Şekil 7.6.</b> R <sub>2/26</sub> - (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> ve PC+ R <sub>2/26</sub> - (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> Düz/Pürüzlü Cam Sem görüntüleri.....	75
<b>Şekil 7.7.</b> Düz ve pürüzlü PS/GO yüzeylerinde yağlama öncesinde 8µl su test sıvısının 90° eğiklikte kaymaması.....	79
<b>Şekil 7.8.</b> a) PDMS <sub>S1</sub> + (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> kaplaması canlı görünümü. b) PDMS <sub>S1</sub> + R <sub>2/26</sub> (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> yüzeyi fotoğraf makinesi canlı görünümü.....	79
<b>Şekil 7.9.</b> farklı tasarımlardaki PDMS şablon üzerinde kaplanmış PDMS <sub>S1</sub> + R <sub>2/26</sub> (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> yüzeylerinin kanal/çukurdaki mikrosedenleri ve tüm yüzeyi gösteren SEM görüntüleri.....	81
<b>Şekil 7.10.</b> R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> ve PC-R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> yüzeylerinin Parafin (0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) ve 50 cst SiOil ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL damlanın harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(10V) yavaşlatma-durdurulma çalışması.....	87
<b>Şekil 7.11.</b> PDMS <sub>S1</sub> :-R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> T1R tasarımından T5R tasarımına kadar yüzeylerin Parafin(0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) ile yağlanmış yere paralel konumdan 8 µL damlanın kayma hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek damlanın harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) yavaşlatılma-durdurulma çalışması.....	88
<b>Şekil 7.12.</b> Elektrik iletkenliğine dayalı olarak, pürüzlü (rodajlı) substrat üzerinde bulunan Parafin yağı (0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) emdirilmiş grafen yüzeylerde 8 µL damlanın kayma hareketi ve bu hareket esnasında damlanın durdurularak yapılan damla manipülasyonu deneyi.....	89
<b>Şekil 7.13.</b> Elektrik iletkenliğine dayalı olarak, düz cam üzerinde bulunan Parafin yağı (0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) emdirilmiş grafen yüzeylerde 8 µL damlanın kayma hareketi ve bu hareket esnasında damlanın durdurularak yapılan damla manipülasyonu deneyi.....	90
<b>Şekil 7.14.</b> Elektrik iletkenliğine dayalı olarak, pürüzlü (rodajlı) cam substrat üzerinde bulunan 50 cst SiOil yağı emdirilmiş grafen yüzeylerde damla kayma hareketi ve bu hareket esnasında 8 µL su damlasının durdurularak yapılan damla manipülasyonu deneyleri.....	91
<b>Şekil 7.15.</b> Elektrik iletkenliğine dayalı olarak, düz cam substrat üzerinde bulunan SiOil yağı emdirilmiş grafen yüzeylerde 8 µL su damlasının kayma hareketi ve bu hareket esnasında damlanın durdurularak yapılan damla manipülasyonu deneyleri.....	92
<b>Şekil 7.16. a)</b> 1 mg/ml PS ile kaplanmış yüzey ve <b>b)</b> 1 mg/ml PS ile kaplanmış mikro desenli PDMS Parafin(0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su damlasının harekete geçirilmesi ve akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) damlanın durdurulması.....	93
<b>Şekil 7.17. a)</b> PDMS <sub>S1</sub> :T1R-R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> /78.4 S/cm yüzeyi ve <b>b)</b> PDMS <sub>S1</sub> :T1R-R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> /78.4 S/cm yüzeyinin Parafin (0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar	

eğerek 8 µL su damlasının harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak (17V) damlanın hareketine devam etmesi .....	94
<b>Şekil 7.18. a)</b> PDMS <sub>Ş1:T2R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/13</sub> S/cm yüzeyi ve <b>b)</b> PDMS <sub>Ş1:T2R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/13</sub> S/cm yüzeyinin Parafın(0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su damlasının harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) damlanın hareketine devam etmesi .....	95
<b>Şekil 7.19. a)</b> PDMS <sub>Ş1:T3R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/12</sub> S/cm yüzeyi ve <b>b)</b> PDMS <sub>Ş1:T3R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/12</sub> S/cm yüzeyinin Parafın(0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su damlasının harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) damlanın hareketine devam etmesi .....	96
<b>Şekil 7.20. a)</b> PDMS <sub>Ş1:T4R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/8</sub> S/cm yüzeyi ve <b>b)</b> PDMS <sub>Ş1:T4R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/8</sub> S/cm yüzeyinin Parafın (0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL damlasının harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) damlanın hareketinin çok yavaşlar.....	97
<b>Şekil 7.21. a)</b> PDMS <sub>Ş1:T5R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/43</sub> S/cm yüzeyi ve <b>b)</b> PDMS <sub>Ş1:T5R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/43</sub> S/cm yüzeyinin Parafın(0,829-0,890 g/cm <sup>3</sup> ) ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek8 µL su damlasının harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) damlanın durdurulması.....	98
<b>Şekil 7.22.</b> r-(PS+GO@THF-DC-4) yüzeyi için led diyot yakma performans uygulaması sırasında alınan dijital fotoğraflar .....	99

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

<b>Ac</b>	:	Aseton
<b>CA</b>	:	Temas Açısı
<b>CAH</b>	:	Temas Açısı Histeresis
<b>DMSO</b>	:	Dimetil Sülfoksit
<b>EtOH</b>	:	Etanol
<b>FTIR</b>	:	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi
<b>GO</b>	:	Grafen Oksit
<b>Gr</b>	:	Grafen
<b>GrO</b>	:	Grafit Oksit
<b>HI</b>	:	Hidroiyodik Asit
<b>iPS</b>	:	İzotaktik Polistiren
<b>P3HT</b>	:	Poly(3-Hexylthiophene)
<b>PEI/PAA-N3</b>	:	Poli(etilenimin)/azid-poli(akrilik asit)
<b>PS</b>	:	Polistiren
<b>PS-GO</b>	:	Polistiren-Grafen Oksit
<b>PS-GO<sub>w</sub></b>	:	Polistiren-Su Ortamında Hazırlanmış Grafen Oksit
<b>PS-GO<sub>THF</sub></b>	:	Polistiren-THF Ortamında Hazırlanmış Grafen Oksit
<b>PDMS</b>	:	Polidimetilsiloksan
<b>r-GO</b>	:	İndirgenmiş Grafen Oksit
<b>r-GO/PS</b>	:	İndirgenmiş Grafen Oksit/Polistiren
<b>SEM</b>	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SLIPS</b>	:	Kayganlaştırıcı Sıvı Emdirilmiş Poroz Yüzey
<b>THF</b>	:	Tetrahidrofuran
<b>T<sub>g</sub></b>	:	Camsı Geçiş Sıcaklığı
<b>XRD</b>	:	X-Işını Kırınımı

## 1. GİRİŞ

Dünyada birçok malzeme kullanım ömrünün sonunda işe yaramaz hale gelir ve bu durum çevresel, teknolojik ve ekonomik olarak olumsuz çıktılara neden olur. Bu nedenle, malzemelerin sürdürülebilirliğini, kalitesini, ömrünü ve tekrar kullanılabilirliğini iyileştirmek için yeni stratejilerin geliştirilmesine olan ilgi ve çaba akademik endüstriyel ve ileri teknoloji alanları için önem taşımaktadır. Özellikle ileri teknoloji alanlarında kullanılan akıllı malzemelerin kullanım ömrünün ve performansının artırılması bu malzemelerin pahalı ve hassas olmaları nedeni ile birçok disiplin için önemli kazanımlar sağlama potansiyeline sahiptir.

Akıllı malzemeler; belli bir dış uyarana (stres, gerginlik, ısı, ışık vb. gibi) kontrollü şekilde yanıt veren ve ortama uyum sağlayan malzeme olarak tanımlanır (Jain ve ark., 2023). Birçok üstün özelliğinden dolayı nispeten yeni keşfedilmiş akıllı bir malzeme olan grafenin (G) dış uyaran karşısında akıllı tepki verme potansiyelinin araştırılmasına yönelik, grafen süngerler, grafen fiberler, grafen filmler, grafen/polimer kompozit malzemeler geliştirilmiş ve üstün performansı katlanabilir ekranlar, sensörler, kapasitörler, kanser hücrelerinin belirlenmesi, enerji depolama vb birçok alanda potansiyeli ortaya konmuştur. Ancak grafen üretimi hala pahalı bir yöntemdir ve bu nedenle grafenin daha ucuz olarak üretilebilirliğinin sağlanması ile günlük hayatımıza daha fazla girmesi olasıdır. Bu noktada az miktarda grafen kullanımı ile kompozit akıllı malzemelerin geliştirilmesi alternatif stratejilerden birisidir ve polimer malzemeler kolay işlenebilme ve ucuz olmaları nedeni ile grafen ile kompozit oluşturmak için iyi bir alternatiftir.

Akıllı malzemelerin üretiminde, doğada canlıların yaşadıkları ortama uyum sağlayabilmek için kusursuz bir şekilde gerçekleştirdiği, dış yüzeylerini değiştirme davranışından esinlenilerek, bu davranışın istenilen malzemeye aktarımı için yüzey özelliklerini taklit etme (biyo-benzetim, biyomimetik) yöntemi sıkça kullanılmaktadır. Biyomimetik olarak akıllı malzemelerin üretilebilirliğinde yüzeyin kimyasal ve topografik özelliklerinin göstergesi olan ıslatılabilirlik davranışı oldukça önemli bir parametredir (Gengec ve ark., 2016) ve ıslatılabilirlik davranışı temel olarak temas açısı ölçümleri ile belirlenir. Yüzey-sıvı arasında düşük yapışmanın olduğu yüzeyler kendini temizleyen yüzey olarak tanımlanır(Quére, 2005) ve kendini temizleyen yüzeye bir sıvı damlası bırakıldığında ve yüzey sadece birkaç derece eğildiğinde su damlası kolayca yuvarlanır veya kayar (Neinhuis & Barthlott, 1997; Quére, 2005; T. S. Wong ve ark., 2011). Örneğin doğada yer alan süperhidrofobik nilüfer yaprağı üzerindeki pislikleri bu davranışa göre temizlemektedir.

İleri teknoloji uygulamalarında akıllı malzeme olarak süper hidrofobik yüzeylerin kullanımı oldukça geniş yer tutmasına karşın, kendini temizleyen yüzeyler, yüksek sıcaklık, basınç, nem, hidrodinamik kesilme ve düşük yüzey gerilimli sıvılara maruz kalma durumunda, sıvıları iterek kaçma eğilimi gösteren sıkışmış havaya karşı direnç gösterir. Bu durum, kendini yenileme özellikleri olmadığı için sıvı itici işlevlerinin kaçınılmaz bir şekilde bozulmasıyla ve yüzeylerinin deforme olmasıyla sonuçlanır (Lafuma ve Quéré, 2003; Liu ve ark., 2009; Tuteja ve ark., 2007). Süperhidrofobik yüzeylerin dezavantajlarını ortadan kaldıran ve 2011 yılında Aizenberg ve grubu tarafından (T. S. Wong ve ark., 2011). Doğadan esinlenilerek üretilmiş kaygan sıvı emdirilmiş gözenekli yüzeylerin (Slippery liquid-infused porous surface-SLIPS), gelecek 20 yıl içinde, süperhidrofobik yüzeylerin yerini alması öngörülmektedir. Şu ana kadar SLIP özellikler gösteren, şekil hafızalı polimerler, aerogeller, Köpükler, fiberler, nanokompozitler, filmler gibi kendini iyileştiren farklı akıllı malzeme türleri üretilmiş ve sensör, mikroreaktör, ürün hasatı, enerji depolama ve mikrobiyoloji gibi alanlarda kullanılmıştır (Jain ve ark, 2023).

Tez çalışması temel olarak üç amaç doğrultusunda gerçekleştirilmiştir: i) PS polimerine düşük miktarda grafen katkılayarak iletken farklı pürüzlülük ve hidrofobluk derecesinde grafen katkılı PS yüzeylerin sentezlenmesi, ii) bu yüzeylerin farklı yağlayıcı sıvılarıyla kayganlaştırılması sonucunda kaygan grafen yüzeylerinin üretimi ve iii) kaygan yüzeylerin dış uyarıcı (elektrik) ile uyarılması sonucunda mikrolitre hacminde sıvı damlanın hızının (hızlandırma/yavaşlatma/durdurma) kontrol edilmesi ve kendini yenileme performansının belirlenmesi ile akıllı tepki verme kabiliyetlerinin tespit edilmesi. Bu amaçlar doğrultusunda tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar: i) Grafitin asit ve oksidant ortamında bir seri reaksiyonu sonrasında grafit oksit sentezi ve grafit oksitin ultrasonikasyon işlemi ile tabakalandırılması ile grafen dispersiyonlarının hazırlanması, ii) farklı bileşimlerde GrO ve GO dispersiyonlarının PS çözeltisine katılması ile hazırlanan dispersiyonlardan GrO ve GO katkılı PS yüzeylerinin (GrO-PS ve GO/PS) hazırlanması, iii) Farklı bileşimlerdeki GrO-PS ve GO/PS yüzeylerinin kimyasal olarak indirgenmesi ile grafen katkılı PS yüzeylerin (r-GrO-PS ve r-GO/PS) hazırlanması, iv) Farklı bileşimlerdeki GrO-PS, GO/PS, r-GrO-PS ve r-GO/PS yüzeylerine yağlayıcı sıvı emdirilmesi ile kaygan yüzeylerin hazırlanması, v) Kaygan yüzeylerin kayma açısı, kayma hızı, kendini yenileme ve yüzey stabilizasyonunu koruma performansının belirlenmesi ve vi) Kaygan yüzeyler üzerine damlatılan mikrolitre hacmindeki sıvı damlanın dış uyarıcı (elektrik) ile uyarılması sonucunda sıvı damlanın hızlanma/yavaşlatma/durma tepkisi (akıllı tepki) verme performanslarının belirlenmesi. Ayrıca



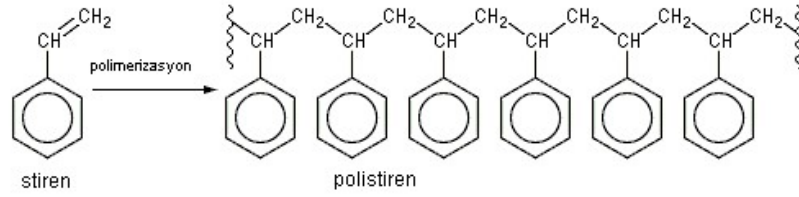
hazırlanan yüzeyler, X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR), Optik mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), İletkenlik ve temas açısı ölçümleri ile karakteri edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar r-GO/PS yüzeylerine yağlayıcı sıvı emdirilmesi sonucunda hazırlanan kaygan r-GO/PS yüzeylerinin; kendini yenilediği, yüzey stabilitesini koruduğu, led ışık yakma performansı sergilediği ve dış uyaran karşısında akıllı tepki verdiği belirlenmiştir.

## 2. POLİMER KOMPOZİTLER

Kompozit malzemeler, birbiri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesi ile daha üstün özellikler kazandığı yeni malzemedir. Kompozit malzemeler ana bileşeni oluşturan matris ve katkılanan az miktarda malzemenin bulunduğu takviye maddesinden oluşur. Genel olarak, matris; katkılanan malzemenin bir araya gelmesinde işlev görürken, katkılanan madde ise daha üstün özelliklere sahip malzeme olarak işlev görür. Polimerlerin ucuz, dayanıklı ve hafif olmaları, polimer matrisli kompozit malzemelerin düşük yoğunlukta, ekonomik, kolay şekillendirilebilir ve yüksek mekanik özelliklerde üretimine olanak sağlaması nedeni ile tercih edilmektedir. Polimer matrisli kompozitlerde, termoplastik ve termoset polimerler matris olarak kullanılabilir. Tez çalışması kapsamında polimer matris olarak termoplastik bir polimer olan polistiren ve takviye maddesi olarak da grafen kullanılmıştır. Böylece PS matrisin grafen nanoyapılarını bir araya getirmesi sağlanmıştır.

### 2.1 Polistiren

Polistiren (PS), ilk olarak Fransız kimyacı M. Berthelot tarafından 1851'de benzen ve etilenin sıcak tüplerden geçirmesi ile elde edilmiştir ve vinil polimerlerinden biridir. Şu an, stiren monomerinin katalizör eşliğinde ısıtılmasıyla sentezlenmektedir. Şekil 2.1'de stiren monomerinin polimerizasyon reaksiyonu sonrasında elde edilen PS'ne ait kimyasal yapı verilmiştir. PS'nin yapısı, polimerizasyon koşulları ve kullanılan katalizöre bağlı olarak izotaktik, sindiyotaktik ve ataktik yapıda olabilir. İzotaktik PS (iPS) üretimi diğer alternatif endüstriyel kristalleşebilen termoplastik polimerlere (polipropilen, polietilen gibi) göre proses şartlarının zor ve maliyetli olması, kırılma eğilimi ve alternatiflerine göre daha üstün özellikler sergilememesi nedenlerinden dolayı endüstride çok fazla tercih edilmez. Metelosen katalizörü eşliğinde üretilen sindiyotaktik PS kristalleşme özelliğine sahiptir ve yüksek erime noktasına (270 °C civarı) sahiptir. Normal PS olarak bilinen ataktik PS, kolay proses şartlarına sahip olması nedeni ile endüstride özellikle enjeksiyonla kalıplama proseslerinde yaygın olarak kullanılır. Ancak ataktik yapıdan kaynaklı düzensizlikten dolayı amorfudur yani kristalleşemez ve yüksek sıcaklıklarda bozunması ataktik PS'nin kullanım alanlarını sınırlayan özellikleridir. Buna karşı önemli bir mühendislik polimeri olan ataktik PS'nin kristal yapı oluşturmama, kırılma eğilimi ve bozunma dezavantajlarının giderilmesi amacıyla, endüstriyel olarak kullanılan PS-Polibütadien gibi kopolimerler tercih edilir. PS asit, alkali metal, indirgeyici-yükseltgeyici asitlere karşı dirençli, yapısında bulunan fenil grupları nedeni ile sülfolama, nitrolama gibi modifikasyonlara elverişli bir polimerdir.



**Şekil 2.1.** Stiren monomerinin polimerizasyonu sonucunda oluşan PS'nin kimyasal yapısı

**Kaynak:** (Chandra et al., 2023).

Polistiren (PS), 100 oC civarında camsı geçiş sıcaklığına (T<sub>g</sub>) sahip, ortalama mekanik özelliklere sahip (gerilme direnci 50-60Mpa civarı), oda sıcaklığında renksiz katı halde bulunan ve renklendirilebilen, günlük hayatımızda en çok karşımıza çıkan ve polietilenden sonra en çok kullanılan termoplastiktir (Thaher et al., 2011). Ayrıca sahip olduğu aromatik yapı nedeni ile modifiye edilme, renklendirme gibi kimyasal işlemler içinde elverişli bir polimerdir. PS yüksek sıcaklıklarda kalıplanarak ve soğutularak istenilen şekilde ürünler elde edilir özellikte olması, paketlenme, optik plastik parça yapımı, izolasyon malzemesi olarak, elektronikte, ambalaj ürünü yapımı gibi birçok alanda kullanılır(Chandra., 2023)(Leder et al., 2006). Örneğin, plastik/köpük tek kullanımlık bardak, çatal, kaşıklar, izolasyon köpükleri PS'nin endüstriyel olarak proses edilmesi ile üretilen ticari ürünlerdir (Chandra ve ark., 2023).

## 2.2. PS Matrisli Kompozitler

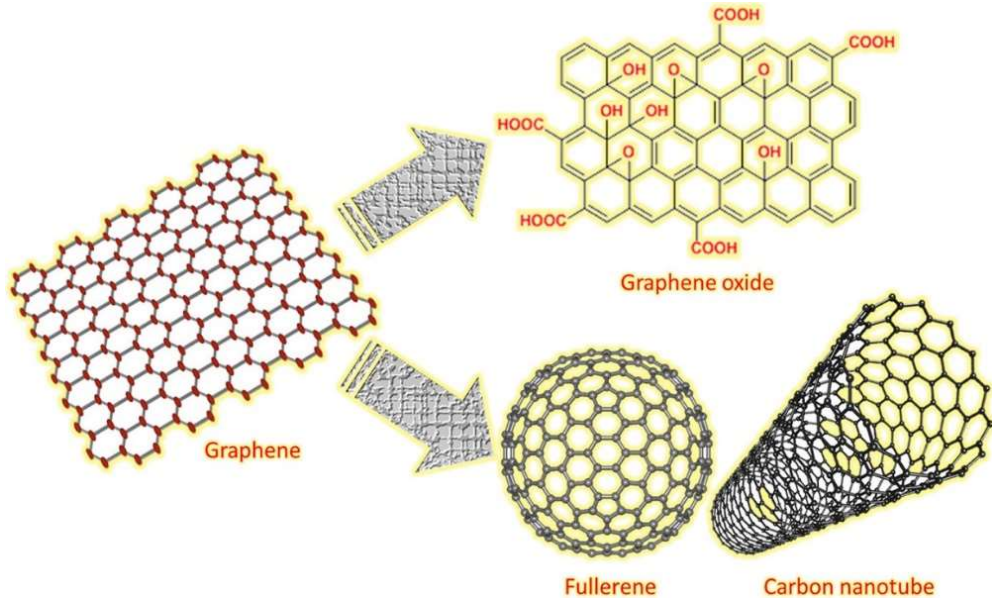
PS'nin, kırılma olmasa, orta mekanik özelliklere sahip olması, polar gruplara sahip olmaması gibi dezavantajlarının giderimi ve daha üstün fiziksel ve/veya kimyasal özelliklerde malzemeler geliştirmek amacıyla PS-kompozit malzemeler üretimi üzerine birçok akademik çalışma yer almaktadır. PS, ucuz, kolay işlenebilir, optik şeffaflık, yalıtkanlık gibi üstün özelliklerinden faydalanarak matris elemanı olarak kullanımı ve farklı katkı malzemeleri eklenerek PS kompozit malzemelerin geliştirilmesine ve endüstriyel olarak kullanımına dair birçok örnek yer almaktadır. Örneğin, cam takviyeli sindiyotaktik PS kompozitler elektronik alanda (Leder ve ark., 2006), nanokil takviyeli PS kompozitler enerji tasarrufu sağlamak amacıyla ambalaj, otomotiv parçaları, yapı ve inşaat malzemeleri olarak (Haider ve ark., 2017) üretilmiştir. Genel olarak, polimer kompozitler pratik kullanımda iki farklı şekilde hazırlanır: i) polimerin erime noktasının üzerindeki yüksek sıcaklıklarda katkı maddesinin ilavesi ve mekanik karıştırma ile katkı maddesinin polimer matris içinde homojen dağılımının sağlanması ve ii) Dispersiyon ortamı görevi gören polimer çözeltisi içine katkı maddesi ilavesi ile homojen dağılımın sağlanmasını sağlar. Dispersiyon ortamında polimer kompozitlerin özelliklerinin

kontrolünde, dispersiyonun stabilitesi, van der Waals etkileşimleri, polimerin sterik etkileşimleri gibi çeşitli kolloidal etkileşimler rol oynar (McFarlane ve ark., 2010).

PS matrikse karbon bazlı (grafen gibi) katkı malzemeleri ilavesi ile hazırlanan PS kompozitlerde genel amaç, yalıtkan özellik taşıyan PS'nin iletken katkıları ilavesi ile iletken özellik kazandırılmasına yöneliktir. Bu amaç doğrultusunda, PS-karbon siyahı kompozitler, PS-GO kompozitler, PS-grafen kompozitler hazırlanmıştır (Kausar, 2020; Park ve ark., 2014; Zaragoza-Contreras ve ark., 2011)Örneğin karbon siyahı katkılanan PS kompozitlerde elektriksel olarak iletken PS kompozitler üretilmiş ve iletkenlikte perkolasyonun yani karbon siyahının oluşturduğu ağ yapısının elektriksel iletkenlikte kritik olduğu belirlenmiştir (Park ve ark., 2014)Grafen katkılanarak hazırlanan PS kompozitte elektriksel iletkenliği 19 S/cm olarak rapor edilmiş ve yalıtkan olan PS iletken hale dönüştürülmüştür (Park ve ark., 2014). Grafenin üstün özellikleri (elektriksel iletkenlik, termal iletkenlik ve optik özellikler), polimer/grafen kompozitlerini elektronik devreler, sensörler, piller ve akım koruyucular gibi uygulamalar için önemli bir alternatif olmasına neden olur (Kausar, 2018). Bu nedenle Grafen oksit/polimer kompozitlerinin üretimi son yıllarda oldukça ilgi görmüş ve GO/polimer kompozitleri birçok alanda detaylı araştırılmıştır. GO miktarının ve yüzeyindeki fonksiyonel grupların modüle edilmesinin polimer özelliklerinde önemli bir iyileşme sağlayabileceğini göstermiştir(Fu ve ark., 2023). Polimer/grafen nanokompoziti, çözelti/eriyecek işleme ve yerinde polimerizasyon tekniklerini içeren çeşitli teknikler kullanılarak hazırlanmıştır (Kausar, 2018).

### 3. GRAFEN ve GRAFEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Grafen tek atom inceliğinde olduğundan dolayı iki boyutlu kabul edilen, kovalent bağ ile bağlı karbon atomlarının altılı bal peteği örgüsünde kusursuzca dizilmesiyle oluşturduğu üstün özelliklere sahip bir nanomateryal olarak tanımlanmaktadır (Bedeloğlu ve Taş,2016). Şekil 3.1’de grafen ve türevlerinin kimyasal yapısı yer almaktadır. Grafenin geniş yüzey alanı ( $2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) yüksek elektron mobilitesi ( $200000 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ ) yüksek ısıl iletkenliği ( $5000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) ve yüksek Young modülü ( $\sim 1100 \text{ GPa}$ ) nedeni ile üstün özellikler sergiler. Grafenin sahip olduğu üstün özellikler nedeniyle birçok uygulama alanı bulmaktadır. Bu alanların başlıcaları; transparan elektrotlar, alan etkili transistörler, sensörler, temiz enerji cihazları, nanokompozitler ve organik fotovoltaik cihazlar olarak sayılabilir (Bedeloğlu ve Taş,2016).



Şekil 3.1. Grafen ve türevleri

**Kaynak:** (Bedeloğlu ve Taş,2016)

1930 da Landau ve Peierls grafenin, iki boyutlu kristalin yapısı gösterdiğini termodinamik yasalara bağlayarak açıklamışlardır. 1947 de P.R Wallace tarafından grafitin band yapısı hesaplanmıştır. Linus Pauling 1957 yılında grafenin elektronik yapısı ve özelliklerine yayınladığı makalelerle ışık tutmuştur. 1980’e kadar karbonun sadece 3 temel formu olduğu sanılıyordu. (elmas, grafit, amorf karbon) İleri Malzemeler Araştırma Grubu 2004 yılında, deneysel olarak sentezlenen grafenin yüksek kalitede 2 boyutlu kristallerden meydana geldiği ispatlanmıştır. 2005 yılında Novoselov ve ekibi grafeni tek tabaka halinde sentezlemeyi başarmış ve beklenenden çok daha değişik elektronik ve fiziksel özelliklere sahip olduğunu ispatlamışlardır (Bedeloğlu ve Taş,2016).

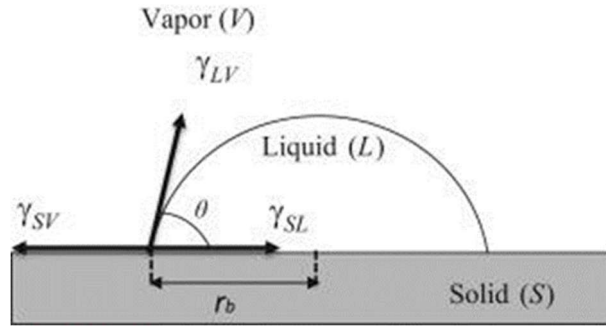
Grafen birçok farklı üretim yöntemiyle elde edilebilmektedir. Bu yöntemler mikromekaniksel olarak grafitin tabakalarının ayrılması (eksfoliasyon), kimyasal buhar biriktirme yöntemi, grafen oksitin indirgenmesi ve epitaksiyel büyütme olarak sıralanabilir (Bedeloğlu ve Taş,2016) (Vs ve ark., 2023). Ancak bu grafen üretim yöntemleri pahalı, düşük miktarda üretilebilme ve tabaka sayısı kontrolü gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle birçok araştırmacı tarafından büyük ölçeklerde ve düşük maliyet ile üretilebilir olması gibi avantajlara sahip olan kimyasal yöntem ile grafen üretimi sıkça tercih edilmektedir. Kimyasal yöntem ile grafen üretimi, grafitin asit ve oksidant ortamında oksidasyonu sonucunda elde edilen grafit oksitin tabakalandırma (eksfoliasyon) işlemi sonrasında grafen oksit (GO) eldesi ve elde edilen grafen oksitin kimyasal, termal yada kimyasa+termal olarak grafene indirgenmesi (redüksiyon) adımlarında gerçekleştirilir (Bai ve ark., 2011). Kimyasal yöntem ile üretilen grafenin özellikleri asit, oksidant ve indirgen türlere göre değişmektedir ve grafit oksitin en bilinen sentez yöntemi, grafitin konsantre sülfürik asit içinde potasyum permanganat ve sodyum nitrat ile oksidasyonu aşamalarını içeren Hummers yöntemidir (Hummers ve Offeman, 1958). Hummers yöntemi ile sentezlenen grafit oksitin tam oksitlenmediği belirlenmesi üzerine, grafit oksit sentezi prosedürünün modifiye edilmesi için ön oksitleme adımı, oksidant miktarı ve oksidasyon süresi gibi parametreler değiştirilerek çeşitli araştırmacılar tarafından modifiye Hummers metodları geliştirilmiştir (Hirata ve ark, 2004; Kovtyukhova ve ark., 1999; H. Wang ve ark, 2009; Xu ve Gao, 2011). Marcano ve arkadaşları ise Hummers metodunu değiştirerek “Torr” metodu olarak da adlandırılan yüksek verimli ve yüksek oksidasyon dereceli grafit oksit sentezi gerçekleştirmişlerdir (Marcano ve ark., 2010b). Grafit oksitten tabakalandırma işlemi ile GO eldesinde, yüksek konsantrasyonlu ve yüksek kararlılıkta GO dispersiyonlarının elde edilmesinde tabakalanma süresi, santrifüj hızı ve süresi ve grafit oksitin oksidasyon derecesi kilit parametrelerdir. Genel olarak yüksek konsantrasyonlu GO dispersiyonları grafit oksitin polar solventler (Ör: su) içerisinde ultrases ortamında tabakalandırılması sonucunda elde edilir. GO, yapısında bulunan hidroksil ve karboksil gruplarından dolayı hidrofilik özellik gösterir ve bu nedenle su ve birçok polar solvent içerisinde ultrasonik ortamda tabakalandırma ile stabilizasyonu sonucunda haftalarca çökme olmadan kalabilir (Eda ve ark., 2008; Paredes ve ark, 2008).

GO yapısında bulunan oksijen grupları nedeniyle yalıtkan özellik gösterir ve oksijen gruplarının kimyasal, termal yada kimyasal+termal olarak indirgenmesiyle iletken özellik gösteren grafene (GR)/indirgenmiş grafen oksite (RGO) dönüşür (Dreyer ve rak, 2010). GO'in indirgenmesinde ucuz ve endüstriyel olarak uygulanabilirliğinin yüksek olmasından dolayı

kimyasal indirgenme yöntemi daha fazla tercih edilmektedir. Grafen oksitin kimyasal olarak grafene indirgenmesinde, hydrazine monohydrate (Li ve ark., 2008), sodium borohydrit (Stankovich ve ark, 2006), hydroquinone (G. Wang ve ark, 2008) ve hidroiyodik asit gibi kuvvetli alkali çözeltiler (Xu ve Gao, 2011) kimyasal indirgeyiciler olarak kullanılmaktadır. Kimyasal olarak indirgenmeye göre termal indirgenme daha pahalı ve polimerler gibi yüksek sıcaklıklarda yanan malzemelerle yapılacak kompozitlerde kullanım kısıtı olan bir yöntemdir. Bu nedenle tez kapsamında kimyasal indirgenme yöntemi kullanılmıştır.

#### 4. KATI YÜZEY ÜZERİNDE SIVI DAMLANIN ISLATMA DAVRANIŞI

Katı bir yüzey üzerine damlatılan sıvı damlanın ıslatma davranışının belirlenmesi yüzey özelliklerinin tespiti açısından oldukça önemli bir parametredir ve pratik olarak temas açısı ölçümleri belirlenir. Islatma genel olarak temas halindeki sıvı ve katı arasındaki moleküller arası etkileşimlerin gözlemlenebilir ve ölçülebilir belirtilerinin incelenmesini ifade etmektedir ve malzemelerin katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç fazıyla ilgilidir. Katı ve sıvı arasındaki moleküller arası etkileşimlerin dengesinin bir sonucu olarak belli bir temas açısına ( $\theta$ ) sahip katı/sıvı/gaz (ya da karışmayan başka bir sıvı) ara hattında bir sıvı damlası oluşturmaktadır. Sıvı moleküller arasındaki kohezyon kuvvetleri, katı ve sıvı moleküller arasındaki yapışma kuvvetlerinden daha güçlü olduğunda, sıvı toplanmakta ve yüzey ile temastan kaçınma eğilimi göstermektedir. Eğer katı/sıvı yapışması, sıvı moleküller içindeki kohezyondan çok daha güçlü ise, damla profili oluşmamakta ve sıvı yüzeye yayılmaktadır. Temas açısı, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi sıvı-gaz arayüzünün katı-sıvı arayüzü ile bir araya geldiği üçlü noktadaki (üç fazlı temas noktası) damla profilinin tanjantı ve ıslanabilirliğin ters bir ölçüsünü sağlamaktadır.  $90^\circ$ 'den küçük bir temas açısı, yüzeyin sıvı ile daha fazla ıslandığını ve hidrofilik özellik gösterdiğinin ve  $\theta > 90^\circ$  olduğunda yüzeyin sıvı tarafından daha az ıslandığı ve hidrofobik özellik sergilediği söylenebilir (Erbil, 2014). Düşük temas açısı değerlerinde suyun yayılma ve yüzeye yapışma eğilimi görülürken, yüksek temas açısı değerlerinde yüzeyin suyu itme eğilimi görülmektedir (Huhtamäki ve ark., 2018).



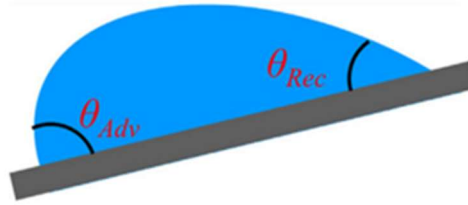
Şekil 4.1. Katı bir yüzey üzerinde bir damla sıvının profili

**Kaynak:** (Huhtamäki ve ark., 2018)

Temas açısı yüzey özelliklerini değerlendirmenin hızlı ve pratik bir yoludur. Bu nedenle, yüzey enerjisinin ve katı bir yüzeyin sıvı bir madde tarafından ıslatılmasının nicel olarak belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle temas açısı ölçümleri, Young- Laplace denkleminden türetilen bir düşme profiline yerleştirilmiş yatay bir yüzey üzerinde sabit damlalarla yapılmaktadır (Korsgard ve Rafael, 2017).



Young denkleminde ideal katının dinamik denge halinde ıslanması, diğer bir ifade ile katının kimyasal olarak homojen, sert ve düz yüzeye sahip olduğunu ve kimyasal etkileşimle katının adsorpsiyon / ıslatıcı sıvı kullanımını yoluyla bozulmadığı varsayılmaktadır. Ayrıca katılar üzerindeki birçok araştırmada Young açısı ( $\theta_e$ ) yerine temas açısı histerezi (CAH= $\Delta\theta$ ) yani ilerleyen temas açısı ( $\theta_a$ ) ile gerileyen temas açısı ( $\theta_r$ ) arasındaki fark belirlenmesi yüzey özelliklerinin değerlendirilmesinde daha sıklıkla tercih edilir. Çünkü temas açısı histerezi; yüzey pürüzlülüğü, kimyasal heterojenlik ve moleküler yönelme etkilerinin tamamını kapsayan bir değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır (Kamusewitz ve ark., 1999). Statik ve kinetik olmak üzere iki tip CAH vardır. Statik CAH sıvı damlanın bir yüzey üzerinde büyütülmesi ( $\theta_a$ ) ve bu damladan sıvının çekilmesi ile ( $\theta_r$ ) belirlenen ilerleme ve gerileme temas açıları arasındaki farka göre belirlenir. Dinamik CAH belirlemede ise belli bir eğiklikteki katı yüzey üzerine damlatılan sıvı damlanın ön (ilerleme) ve arka (gerileme) temas açıları arasındaki farka göre CAH belirlenir (Şekil 4.2) (Barati ve ark., 2020).

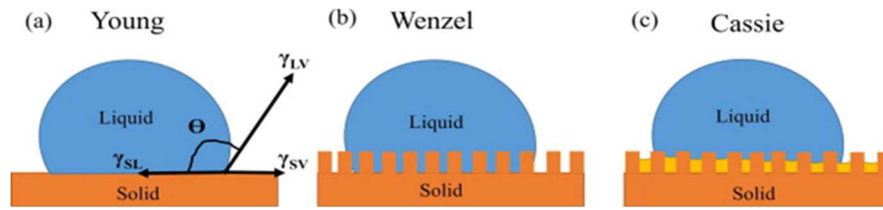


**Şekil 4.2.** Eğik bir yüzeyde temas açısı histerezinin şematik gösterimi

**Kaynak:** (Barati ve ark., 2020)

Pürüzlülük bir yüzeyin hidrofilik ya da hidrofobik özelliklerini arttırmanın önemli bir yoludur ve temas açısının pürüzlülükle olan ilişkileri ilk olarak Wenzel ve Cassie-Baxter tarafından ortaya konmuştur. Young-Laplace denklemi pürüzsüz (düz, homojen) yüzeyler için tanımlanmışken, Wenzel pürüzlü yüzeydeki temas açısının pürüzsüz yüzeydekinden farklı olduğunu bulmuştur. Cassie-Baxter, homojen katı-sıvı ara yüzeyinden farklı olarak pürüzlü yüzeydeki çukurların içine hapsedilmiş hava (ya da gaz) ceplerinin kompozit katı-sıvı-hava ara yüzeyi oluşturduğunu göstermiştir (Kartal, 2009). Şekil 4.3'de Young, Wenzel ve Cassie-Baxter teorilerine göre sıvı damlanın katı yüzey üzerindeki temsili görünümü yer almaktadır. Wenzel denkleminde sıvının yüzey pürüzlülüğündeki oluklara geçtiği varsayılmaktadır (Şekil 4.3.b). Dolayısıyla Wenzel denklemi homojen ıslanma rejimi ile ilgilidir Wenzel denklemi aynı zamanda hidrofilik malzemelerden süperhidrofobik özellikler ve hatta oleofilik malzemelerden süperoleofobik özellikler elde etme olasılığını da açıklayamaz.

Wenzel denklemi, pürüzlülüğün, yüzeyin doğasına bağlı olarak ıslanabilirliği ve ıslanmayı önleyebilirliği değiştirdiğini temsil etmektedir. Dolayısıyla düz yüzeyin temas açısı  $90^\circ$ 'den büyük olduğunda yüzey pürüzlülüğü temas açısını artırır,  $\theta$  açısı  $90^\circ$ 'den küçükse yüzey pürüzlülüğündeki artış temas açısını azaltır. Wenzel modeli yalnızca homojen ara yüzey alanları için pratik ve uygulanabilir olup, homojen olmayan yüzeylere uygulanamaz. Bu bağlamda, Cassie ve Baxter 1944'te heterojen yüzeyler için başka bir model sağladılar. Cassie ve Baxter modelinde sıvının katıyla yalnızca pürüzlülük uçlarında temas halinde olduğu ve sıvının altında hava ceplerinin sıkıştığı varsayılmaktadır. Bu durumda havanın hapsediği yüzeyin bir kısmının sıvı tarafından ıslanmadığı düşünülebilir (Barati ve ark., 2020).



**Şekil 4.3.** Young, Wenzel, Cassie Baxter teorilerine göre sıvı damlanın katı yüzey üzerindeki davranışına ait temsili görünümü

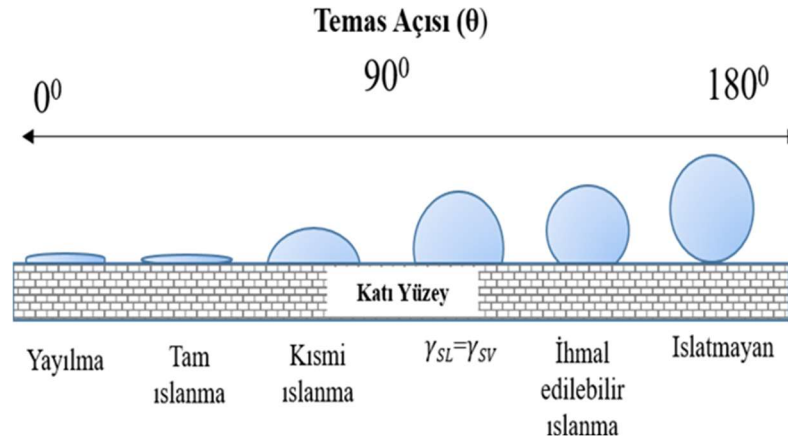
**Kaynak:** (Barati ve ark., 2020)

#### 4.1. Süperhidrofobik Yüzeyler

Nilüfer çiçeği bitkisi Asya kültüründe yaygın olarak saflığın ve temizliğin sembolü olarak bilinmektedir. Bu düşüncenin temeli nilüfer bitkisi yapraklarının kendi kendini temizleme özelliğine dayanmaktadır. Prof. Dr. W. Barthlott yüksek derecede suyu itme karakteristiği ve kendi kendini temizlemenin nilüfer çiçeği bitkisi ile etkili biçimde gösterilmesine dayanarak, bu etkileri Nilüfer (Lotus) Etkisi olarak tanımlamıştır. Nilüfer etkisinin bulunuşu teknolojiye büyük bir katkı sağlamıştır. Bu etkinin yapay yüzeylere taşınması ile birçok teknik uygulamalar elde edilmiştir. Nilüfer etkisi gösteren bir yüzey süperhidrofobik ve  $150^\circ$  den daha büyük temas açısını ifade etmektedir. Süperhidrofobitesine dayanarak, yüzey hafifçe açıldığında su yüzeyden kayar ve yolu üzerindeki kirlilikleri yüzey üzerinden temizlenmektedir. Lotus bitkisinin yapraklarının vaksle kaplanmış pürüzlü yüzeyi epidermal hücreler içermektedir. Vaks kristalleri su itici bir tabaka sağlamakta ve Wenzel ve Cassie Baxter modellerine göre yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır. Bu kristallerin ıslatma özelliği yönünden oldukça zayıf olduğundan yüzey üzerindeki su damlası yüzeyle arasındaki etkileşimi en aza indirmek istemektedir. Böylece yüzeyde küresel bir damla oluşmaktadır. Yaprak yüzeyi üzerindeki kirlilikler yaprağın hücresel yapısından daha büyük

olduğu için yüzey çıkıntıları üzerindeki partiküller yüzeyden uzaklaştırılabilmektedir. Sonuç olarak temas alanı ve ara yüzeydeki etkileşim minimize edilmiş olmaktadır. Bir su damlası kirlilik üzerinde dönerek hareket ettiğinde, kirlilik hidrofobik özellikte olsa dahi absorpsiyon sayesinde enerji kazanmaktadır. Kirliliği lotus yaprağından uzaklaştırmak için harcanan enerji, su damlasının kirliliği absorbe etmesi ile kazandığı enerjiden daha az olduğunda kirlilik bitki yüzeyinden uzaklaştırılmıştır. Bunun nedeni, genellikle küçük temas alanını işaret etmektedir (Özdemir, 2016).

Kendi kendini temizleme, birçok süperhidrofobik yüzeyin, kirleticilere daha güçlü yapışmaya sahip geleneksel yüzeylerin aksine, yüzey üzerinde akan su damlaları ile kirlilik parçacıklarını yıkama yeteneğidir. Su; temas açısı (CA)  $\theta > 90^\circ$  olan başlangıçta hafif hidrofobik bir katı yüzey, pürüzlendirmeden sonra çok hidrofobik hale gelmektedir ve  $180^\circ$ 'ye yaklaşan bir CA'ya sahip olabilmektedir. Kabul edilen tanıma göre bir pürüzlülük kaynaklı süperhidrofobik yüzey  $\theta > 150^\circ$  değerine sahiptir. Mikrodesenleme teknolojisinin olgunlaştığı 1990'lardan bu yana süperhidrofobiklik üzerine artan sayıda yayın ortaya çıkmıştır ve istenen özelliklere sahip süperhidrofobik yüzeyler oluşturmak mümkün hale gelmiştir. Katı yüzeyde  $0$  ve  $180^\circ$  arasındaki temas açısına bağlı olarak sıvı damlasının süperhidrofobik davranışı Şekil 4.4 de şematik olarak verilmiştir (Oboho ve Gumus, 2007).



**Şekil 4.4.** Farklı temas açılarında sahip katı yüzey üzerindeki sıvı damlalarının davranışı

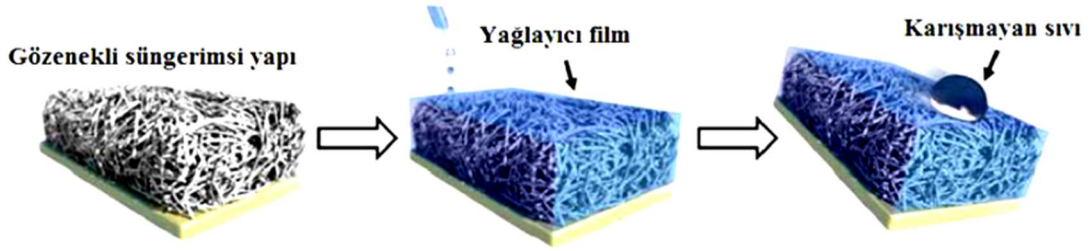
**Kaynak:** (Oboho ve Gumus, 2007)

Bir su damlacığının yüzeye yapışmasının yapışkandan kaygana kadar olan farkı, dinamik temas açısı analizleriyle, yani ilerleyen ve gerileyen temas açıları arasındaki fark olan temas açısı histeresisinin ölçülmesiyle kanıtlanır.  $10^\circ$ 'den düşük bir temas açısı histerезisi ile yüzey kaygan olarak belirtilirken,  $10^\circ$ 'den büyük ölçüde daha yüksek bir temas açısı histerезisi ile yüzey yapışkan olarak belirtilir (Espy ve ark., 2023).

Süperhidrofobik yüzeylerin hazırlanması yöntemleri iki adımla temsil edilebilir: i) yüzeyin pürüzlendirilmesi ve ii) düşük yüzey enerjili malzemelerle kimyasal modifikasyon. Katı yüzeyin pürüzlendirilmesi amacıyla mikrodeseanlı yüzeyler ileri teknolojik malzemelerin üretimi için sıklıkla tercih edilmektedir. Mikrodeseanlı yüzeylerin üretiminde yüzey pürüzlülüğünün kontrollü şekilde yapılabilmesi için litografi yöntemi, aşındırma yöntemi, mikromekanik işleme yöntemi, lazerli mikro imalat yöntemi gibi birçok yöntem kullanılmaktadır (Ateş ve ark., 2021). Mikrodeseanlı yüzeylerin üretimi her ne kadar pahalı teknolojik yatırımlar ve ileri deyimleri gerekli kılssa da doğadan esinlenilmiş biyomimetik yüzeylerin geliştirilmesi ve anlaşılması bakımından oldukça önemlidir ve birçok çalışma yapılmaktadır. Mikrodeseanlı yüzeylerin üretiminde kullanılan başlıca üretim yöntemi Litografi yöntemidir. Litografi yöntemi ile mikrodeseanlı yüzeylerin üretimi, bir maske üzerindeki geometrik desenin fotorezist adı verilen ışığa duyarlı bir polimer malzeme ile kaplanmış silikon tipi yarı iletken bir alttaş üzerine iletilmesi işleminden oluşmaktadır. Uygulamada çalışmalarında farklı litografi yöntemleri bulunmakta ve mikrokanal imalatında yaygın olanı fotolitografi yöntemi kullanılmaktadır. Fotolitografi ile alttaş üzerine aktarılan geometrik desen eklemeli veya çıkarmalı mikro imalat işlemine tutularak istenen ölçü ve biçimde mevcut ürün elde edilmektedir (Ateş ve ark., 2021). Elektron ışını litografisi (EBL), nano-baskı litografisi (NIL) gibi yarı iletken endüstrisinde geleneksel olarak geliştirilen birçok nanofabrikasyon tekniği, makromoleküller üzerindeki nanoyapıları diğer aşındırma yöntemleriyle birlikte substrat cihazlarına aktarmak için uygun bir yol göstermektedir. Bunun yanında fotorezisti döndürerek kaplama, yüzeyde litografi, nanoyapıları aktarmak için aşındırma, kaldırma ve yüzey temizleme gibi işlemlerden oluşmaktadır. Pürüzlülük kontrolünün sağlandığı mikrodeseanlı yüzeyler üzerine hidrofobik özellikle malzemelerin kaplanması ile süperhidrofobik yüzeylerin sentezlenmesi, hidrofilik özellikle malzemenin kaplanması ile de süperhidrofilik yüzeylerin sentezlenmesi mümkün olmaktadır. Ancak günümüzde hala süperhidrofobik yüzeylerin, zayıf mekanik özellikleri olması nedeni ile hasar aldığıında süperhidrofobik özelliklerini kaybetmesi endüstriyel ve pratik kullanımlarını kısıtlanmaktadır.

## 5. KAYGAN YÜZEYLER

Düşük sürtünme katsayısı (COF) veya yüksek akışkanlık ile karakterize edilen kaygan yüzeyler, yüzey pürüzlülüğünü ve sürtünme direncini azaltır, iyi aşınma önleyici ve kirlenme önleyici özellikler sergilemektedir ve bu özellikleri ile süperhidrofobik yüzeylerin mekanik dayanımının düşük olması dezavantajını ortadan kaldırmak için iyi bir alternatiftir. Kaygan yüzeylerin ibrik bitkileri (bitki dokuları), çoprabalığı derisi (*Misgurnus anguillicaudatus*, bir hayvan dokusu), *Nepenthes* cinsinin sürahi bitkileri gibi doğada birçok örneği yer almaktadır (He ve ark., 2023). *Nepenthes* sürahi bitkisinden ilham alarak, Aizenberg ve ark. sıvı-sıvı arayüzünün oluşumu nedeniyle oldukça küçük temas açısı histerezisine sahip, yağlayıcı sıvı emdirilmiş gözenekli kaygan yüzeyleri (SLIP'ler) ilk olarak geliştirmişlerdir ve sonrasında birçok araştırmacı kaygan yüzeylerin çeşitli temel ve uygulamalı yönlerini araştırmıştır. Aizenberg ve ark. oluşturduğu SLIP yüzeylerin tasarımına yönelik sistematik prosedür Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



**Şekil 5.1.** Aizenberg grubu tarafından SLIP yüzey tasarımına yönelik sistematik prosedür

**Kaynak:** (T. Wong ve ark., 2011)

Aizenberg ve ark SLIP yüzeylerin, doğadan esinlenilerek üretilmiş muadilleri (Barthlott ve ark., 1997; Gao ve Jiang, 2014; Hansen ve Autumn, 2014) ve son teknoloji ürünü süperhidrofobik yüzeylere göre (Hansen ve Autumn, 2014; Tuteja ve ark, 2008; Tuteja ve Choi, 2008) aşağıdaki üstün performansları gösterdiğini belirtmişlerdir:

i) Kendini temizleme ve kaygan özellikte olma: SLIP yüzeyler, su, hidrokarbonlar, yağ ve kan gibi çeşitli basit ve karmaşık sıvıları püskürterek itmektedir. Bu özellik doğadan esinlenilmiş süperhidrofobik yüzeyler içinde sağlanır.

ii) Yüzey stabilitesini korumak: SLIP yüzeyler, düşük temas açısı histerezisini ( $<2.5^\circ$ ) korumaktadırlar. Bu özellik doğadan esinlenilmiş süperhidrofobik yüzeyler için geçerli olmayıp, SLIP yüzeylere özgüdür.

iii) Kendini yenileme: SLIP yüzeyler, fiziksel hasardan sonra 0.1-1 sn içinde kaygan özelliğini hızlı bir şekilde kazanmaktadır. Fakat doğadan esinlenilmiş süperhidrofobik yüzeyler için bu durum geçersizdir.

iv) Buz tutmaya karşı koruyucu: SLIP özellikli ve doğadan esinlenilmiş süperhidrofobik yüzeler buzlanmayı önleyici etki göstermektedir. Fakat SLIP yüzeylerde buz oluşumundan sonra düşük kuvvet uygulamalarında buz yüzeyden uzaklaşırken, süperhidrofobik yüzeylerde buz oluşumundan sonra yüzeyden buzun uzaklaştırılması için yüksek kuvvetlerin uygulanması gerekmektedir.

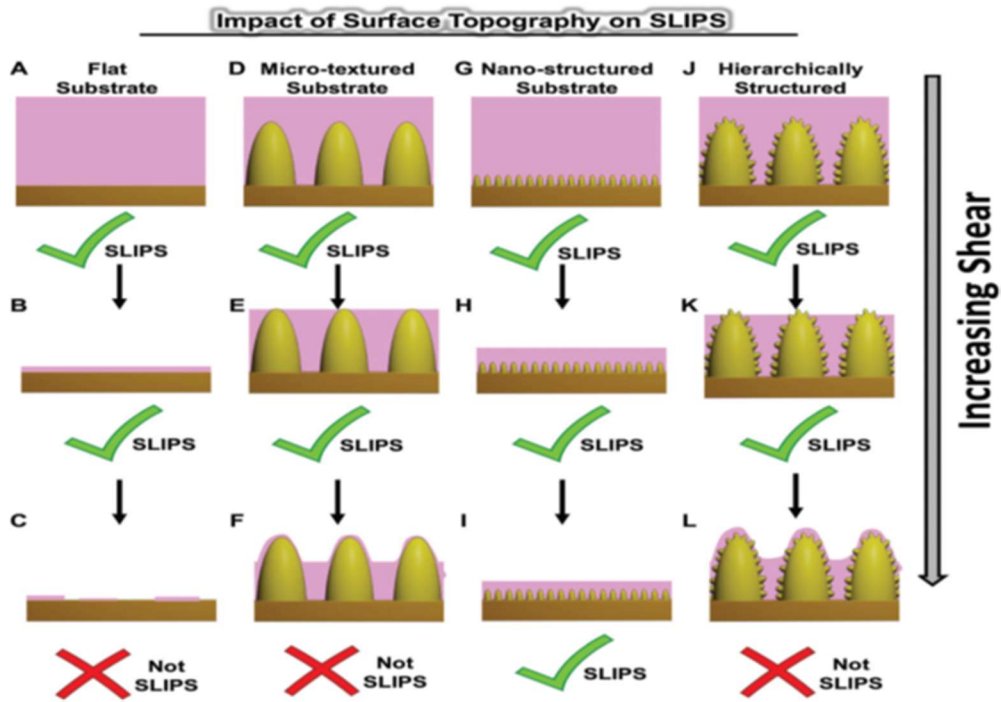
v) Dış etkilere karşı deforme olmayan: SLIP yüzeyler, yüksek basınçta çalışma (yaklaşık 680 atm'a kadar) olanağı sağlamaktadır. Ancak bu özellik doğadan esinlenilmiş süperhidrofobik yüzeyler için geçersizdir.

SLIP yüzeyler için kullanılan yağlayıcı sıvı, farklı özellikteki karmaşık sıvılar için bir itici yüzey olarak kullanılmakta ve SLIP yüzeyler, özel yöntemlerle (ör: fotolitografi, dondurarak kurutma gibi) yapılandırılmış ya da daha ucuz yöntemlerle hazırlanmış düzensiz pürüzlülüğün mikro yapılarını kullanarak süperhidrofobik yüzeylere benzer şekilde dizayn edilirler. Bu sebeple SLIP yüzeylerin hazırlanmasında kayganlaştırıcının yüzey enerjisi ve katının yüzey pürüzlülüğü gibi yüzey özellikleri dikkat çekmektedir. Yüzey özelliklerini; yüzey topografyası ve kimyasal dağılımına bağlı olarak değişen CA, CAH, yük altında hava-sıvı ara yüzünün (plastron) kararlılığı ve sürtünmeyi azaltma gibi özellikler etkilemektedir. Araştırmalar incelendiğinde (Samaha ve Gad-el-Hak, 2014), SLIP yüzeylerin, itilen sıvının kaymasını önemli ölçüde düşük CAH sahip yüzeylerde elde edildiği belirlenmektedir.

Aizenberg ve grubunun geliştirdiği ilk SLIP yüzeyler; emdirilen sıvının kısa sürede buharlaşması, gözenekli yapılardan sızması(Cui ve ark., 2019) ve kullanılan emdirme sıvısının oldukça pahalı olması (25 mL si 224 €) gibi dezavantajlara sahiptir. Bu sebeple bu dezavantajları ortadan kaldırmak üzerine yağlayıcı miktarı ve türünün optimizasyonu için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.2.'de farklı pürüzlülükteki substratlar üzerinde yağlayıcı miktarı değişimi ile SLIP yüzeylerin kendini yenileme davranış performansları arasındaki ilişkiye dair temsili bir gösterim yer almaktadır.

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi düz, mikrodeseanlı, nanoyapılı ve hiyerarşik topografyalı yüzeylerden yağlayıcı miktarı fazla olduğunda yani yağlayıcı pürüzlülüğü tamamen kapatırsa (Şekil 5.2.a, d,g ve j) yada pürüzlülük sınırına kadar gelirse (Şekil 5.2.b,e,h ve k) orta kuvvetlere kadar uygulanan kesme kuvveti sonrasında SLIP davranış korunurken, yüksek kesme

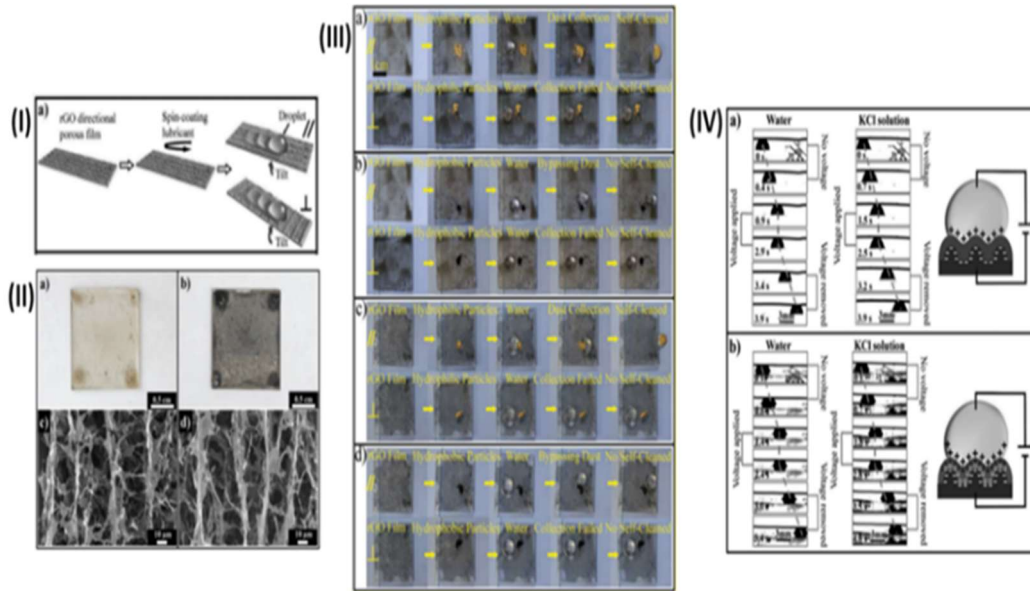
kuvvetinin uygulanması durumunda sadece nano pürüzlülüğe sahip yüzey (Şekil 5.2.1) SLIP davranışını korumaktadır. Yüksek kesme kuvvetinde topografyaya bağlı olarak yüzeylerin SLIP davranışını kaybetme durumunun sebepleri şöyledir: i) düz yüzeyler için kapiller kuvvetlerin olmamasından dolayı yağlayıcı incelmekte ve SLIP yüzey özelliği kaybolmaktadır (Şekil 5.2.c), ii) mikro ve hiyerarşik (mikro+nano) pürüzlülüğe sahip yüzeyler için yağlayıcı yüzeydeki mikro/mikro+nano çıkıntıları kaplayarak üzerlerinde film oluştursa da, yüzeydeki büyük boyutlu mikro çıkıntılardan dolayı etkinliğini kaybetmekte ve SLIP yüzey özelliği kaybolmaktadır (Şekil 5.2.f ve l) (Shome ve ark., 2022). SLIP yüzey özellikleri arasında en önemli etki yüzeylerin kendini yenileme-onarma performansındır ve literatürden elde edilen çıktılar doğrultusunda SLIP yüzey performansını korumak için yağlayıcı miktarı ve yüzey topografyasındaki değişim oldukça önemlidir.



**Şekil 5.2.** Farklı pürüzlülükteki substratlar üzerinde yağlayıcı miktarı ile SLIP davranış gösterme arasındaki ilişkinin şematik gösterimi: (A–C) düz substrat, (D–F) mikro desenli substrat, (G–I) nanoyapılı substrat ve (J–L) hiyerarşik olarak yapılandırılmış substratlar üzerinde (C, F ve L) kaygan özellik göstermezken, diğer yüzeyler kaygan davranış sergilemektedir

**Kaynak:** (Shome ve ark., 2022)

Che ve ark (Che ve ark, 2017) dondurarak kurutma yöntemini kullanarak iletken, yönlendirilmiş ve pürüzlü indirgenmiş grafen oksit (rGO) yüzeyler üretmiş (Şekil 5.3 (I)) ve bu yüzeylerin üzerine iletken ve yalıtkan sıvılar emdirerek elektrik duyarlı akıllı anizotropik rGO SLIP yüzeyler hazırlamışlardır (5.3 (II)). Hazırladıkları akıllı anizotropik rGO SLIP yüzeylerin kendini temizleme özelliklerinin tespiti için hidrofilik kum, silikon tozu ve CaCO<sub>3</sub> partiküllerini kullanmışlardır (Şekil 5.3 (III)). SLIP rGO yüzeyindeki fiber ağ yapısına paralel yönlü bir su damlasının kayma hareketi ile bu partikülleri kolaylıkla temizlendiği ve yüzeyin kendini temizleme özelliğinin olduğunu belirlemişlerdir (Şekil 5.3 (III) a ve Şekil 5.3 (III) c). Ancak, hidrofobik grafen ve karbon nanotüp partiküllerinin, SLIP grafen yüzeyindeki fiber ağ yapısına paralel ve dikey yönde bir su damlası ile temizlenemediği (sıvı-toz zayıf etkileşime sahip olduğu için uyumlu değil) belirlemişlerdir (Şekil 5.3 (III) b ve Şekil 5.3 (III) d). Che ve arkadaşlarının ürettiği rGO SLIP yüzeylerine dış uyaran olarak elektrik kullandıklarında su ve KCl sıvı damlaları için damla sabitleme voltajını sırasıyla 10 V ve 2 V olarak belirlemişlerdir. Çalışmalarında hazırladıkları anizotropik rGO SLIP yüzeyler üzerinde iletken sıvı emdirilmesinin hareket eden damlanın sabitlenmesi için gerekli voltajı düşürme etkisi yarattığı belirlenmiştir (5.3 (IV)). Ayrıca rGO SLIP yüzeylerin anizotropik kendi kendini temizleme özelliğine sahip olduğu ve SLIPS'in kendi kendini temizleme özelliklerinin sadece kir ve damlaların özellikleriyle değil, aynı zamanda damla viskozitesi ve yağlama sıvılarının polaritesi ile de ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 5.3. Yönlendirilmiş poroz rGO filmde SLIP yüzey hazırlama şeması

**Kaynak:** (Che ve ark., 2017)



Şekil 5.3 'de (I) Yönlendirilmiş poroz rGO filminde SLIP yüzey hazırlama şeması. (II)Yönlendirilmiş poroz GO ve rGO filmlerin optik fotoğrafları ve SEM görüntüleri: a) GO filmi ve b) rGO filmi; c) GO filminin yönlendirilmiş gözenekli ağ yapısı; d) rGO filmi indirgeme sonrasında yönlendirilmiş gözenekli ağ yapısını korur. (III) Silikon yağı ile doldurulmuş yönlü rGO gözenekli filmlerin bir su damlası ile anizotropik kendi kendini temizleme etkisi sergilediğini gösteren zaman dizisi görüntüleri. a) Hidrofilik silika partiküller, fiber yönüne (//) paralel olarak yüzey  $10^\circ$  eğildiğinde su ile kendi kendine temizlenebilir. Ancak silika partiküller, filmin fiber yönüne dikey yönde ( $\perp$ ) su ile temizlenememektedir; b) hidrofobik karbon nanotüpler su ile fiber yönüne (//) paralel veya fiber yönüne ( $\perp$ ) dik olarak yüzey  $10^\circ$  eğildiğinde kendi kendini temizlenememektedir. c) Hidrofilik silika parçacıkları, su fiber yönüne (//) paralel olarak yüzey  $6^\circ$  eğildiğinde kendi kendine temizlenebilir. Ancak dikey yönde ( $\perp$ ) su ile temizlenememektedir; d) hidrofobik karbon nanotüpler su ile fiber yönüne (//) paralel veya fiber yönüne ( $\perp$ ) dik olarak yüzey  $6^\circ$  eğildiğinde kendi kendine temizlenememektedir. (IV) Paralel yönde rGO SLIP yüzeyleri üzerinde damlacıkların voltaj kontrollü hareketi. a) Gözenekli film silikon yağı ile doldurulduğunda, su damlası uygulanan 9.0 V'luk bir potansiyel ile sabitlendi ve KCl çözeltisi 1.5V'luk bir uygulama potansiyeli ile sabitlendi; sağdaki şema iletken olmayan yağlayıcının voltaj tepki mekanizmasını göstermektedir. b) Gözenekli film iyonik sıvıyla doldurulduğunda, su damlası 5.0 V uygulanan potansiyel ile sabitlendi ve KCl çözeltisi 0.5 V uygulanan potansiyel ile sabitlendi; sağdaki şema iletken yağlayıcının voltaj tepki mekanizmasını göstermektedir (Che ve ark., 2017).

### 5.1. Kayma Açısı ve Kayma Hızı

Kayma açısı tespitinde kritik kayma gerilimi önem arz etmektedir. Kritik kayma gerilimi esas olarak kayma yüzeyinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır ve uygulanan yükten bağımsızdır. Bu nedenle  $\sigma_s$ , çekme yükü ile kayma düzlemi arasındaki açıya göre değişmektedir.  $\theta = 0^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  olduğunda, yani yükleme kuvvetinin yönü ve kayma düzlemi dik veya paralel olduğunda, akma dayanımı  $\sigma_s$  sonsuza doğru yönelir ve kayma bu durumda başlayamaz.  $\theta = 45^\circ$ ,  $\sigma_s = 2\tau$  K olduğunda, akma dayanımı  $\sigma_s$  en küçük, kaymanın başlatılması kolay hale gelmiş olur. Kaymanın başladığı ilk an kayma açısı olarak belirlenmiş olur (Yang ve ark., 2022).

Kayma hızı ise yüzey özelliği ve sürtünme etkisine bağlıdır. Kayma hızının artmasıyla birlikte sürtünme katsayısının ve aşınma oranının önce arttığını, sonra azaldığını ve giderek stabil hale geldiğini keşfedilmiştir. Bu keşfin farklı hız ve aşınma mekanizmalarını

kolaylaştıracağı düşünülmektedir. Zhao ve ark., daha büyük kayma hızının sürtünme katsayısını azaltabileceğini, kontak voltajı düşüşünü artıracaklarını doğrulamışlardır. Xie ve diğerler ve ark. AuAgCu fırçanın Au kaplama üzerindeki kayma tribolojik davranışını araştırmış ve artan kayma hızıyla birlikte temas voltajının yanında elektriksel gürültünün büyük ölçüde arttığını görmüşlerdir. Fakat Xiao ve ark. kayma hızının temas direnci ve elektriksel gürültü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır. Yüksek kayma hızı, yüzey titreşiminin oluşmasına ve temas yüzeyi arasında ayrılmaya sebep olmasına rağmen, yüzey kirliliğini hızlı bir şekilde ortadan kaldıracak şekilde, temas gürültüsünü düşürebilmektedir (D. Wang ve ark., 2023). Damlanın yüzeydeki kayma hızı temas açısı cihazından alınan kayma açısında ya da farklı kayma açıları için, damlanın kaymaya başladığı ilk konum ve zaman ile, damlanın cihazın kadrajından çıktığı andaki konum ve zaman belirlenerek bilgisayar destekli tasarım programına (CAD) atılarak programda iki konum arasındaki mesafe belirlenerek  $V=\Delta x/\Delta t$ 'den Denklem 5.1'e göre hız belirlenebilmektedir.

$$V = x' = \frac{1}{2h} [x(t + h) - x(t - h)] \quad (5.1)$$

## 5.2. Kaygan Yüzey Uygulamaları

Sürahi bitkisinin (Nepthens) sindirim sıvısını hapsetmek için gözenekli yapılarını kullandığı ve itici bir yüzey görevi görebildiği araştırmalar sonucunda bulunmuştur. Bu araştırmadan yola çıkarak Aizenberg arkadaşları yeni bir çalışma ortaya çıkarmışlardır: olağanüstü sıvı-katı kombinasyonlu yüzey yapılarını taklit etmek için kaygan sıvı aşılınmış gözenekli yüzey (SLIPS), aynı zamanda yağlanmış-emprenye edilmiş yüzey (LIS) olarak da adlandırılmıştır. Tasarlanan SLIPS kaplamalar, her şeyi kabul etme, yüksek basınç stabilitesi, kendi kendini iyileştirme ve optik şeffaflık gibi olağanüstü özellikler sergilemiştir. SLIPS tasarlama prosedüründe kendiliğinden petrolün yayılmasını kolaylaştırabildiği ve kılcal etki ve Van der Waals kuvveti nedeniyle petrolü tutabildiği görülmüştür. Yağın yüzeylerde tutulması, SLIPS kaplamaların neden buzlanma önleme, korozyon önleme, biyolojik kirlenme önleyici ve sürüklenme azaltma gibi özellikleri açıklamaktadır. Bununla birlikte, SLIPS üzerindeki petrolün uzun ömürlülüğü ve istikrarı, gelecekteki gelişimi açısından pratik sınırlamalar oluşturmaktadır (Yuan ve ark., 2020).

SLIPS yüzeylerde farklı bir çalışmada da kendi kendine organize olan biyofilmler üzerindedir. Biyofilmler çeşitli altyapı sistemlerini kirletebilmektedir. Bakterilerin yüzeylere yapışmasını önlemek, bakterilerle kirlenmiş yüzeylerin temizlenmesi veya dezenfeksiyonundan daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışmada, 24 saatlik bir bakteriyel yapışma testi, "kaygan

yüzeylerin" polidimetilsiloksan ve süperhidrofobik yüzeylere kıyasla bakteriyel kontaminasyona karşı direncin arttığını göstermiştir. Ancak bakteri tutunmasını tamamen engelleyememiş, sadece yüzeyin bakteriler tarafından kirlenmesini geciktirilmiştir. Bu nedenle minimum bakteri yapışmasıyla bakterileri öldürme stratejisi geliştirilmiştir. Basit bir daldırma işlemiyle bakteri yok edici ve kaygan özelliklere sahip kristal menekşe emdirilmiş kaygan (CVIS) bir yüzey üretilmiştir. CVIS yüzeyi, su ve kan kirliliğine karşı son derece itici olan, çok pürüzsüz ve yağlanmış bir yüzeye sahiptir. Escherichia coli ve Staphylococcus aureus'a karşı yapılan bakteri öldürücü testler, CVIS yüzeyinin karanlıkta bakteri öldürücü aktivite sergilediğini ve aynı zamanda beyaz ışıkta önemli ölçüde artmış bakteri öldürücü aktivite (bakteri sayısında >3 log azalma) gösterdiğini göstermiştir (Hwang ve ar., 2021).

Kaygan sıvı ile aşılınmış gözenekli yüzey (SLIPS) tekniğine dayanan desenli kaygan yüzeyler, biyolojik kirlilik, sıvı işleme, biyomolekül toplama ve damlacık mikrodizilerinde geniş teknolojik uygulamalara sahiptir. Desenli yüzey yapılarının dinamik olarak kontrol edilebilen, foto çapraz bağlanabilir bir polielektrolit poli (etilenimin)/azid-poli (akrilik asit) (PEI/PAA-N3) filmi ile sağlandığı mikro yapı ve düz bölgeler içeren PEI/PAA-N<sub>3</sub> filminin, mikro yapı bölgelerinde çok daha yüksek yağlayıcı tutma kapasitesi nedeniyle, yağlayıcının yüzeye akması ve bir kesme eğirme işleminin uygulanması yoluyla desenli bir SLIPS'in kolayca oluşturulabileceği gösterilmiştir (Üçüncüoğlu ve Yildirim Erbil, 2023).

### **5.3. Akıllı Kaygan Yüzeyler**

Akıllı malzemeler, tıpkı canlı organizmalar gibi sıcaklık, nem, basınç, ortamın asitlik derecesi (PH), elektriksel ve manyetik değişiklikler veya etkiler gibi dış uyaranlara duyarlı olarak önceden belirlenmiş bir cevap oluşturabilen malzemelerdir (Çakmak ve Kaya, 2017; Callister ve Rethwisch, 2020). Akıllı malzemelerin verdikleri cevap, şekil değişikliği, sertlik/yumuşaklık değişikliği, frekans değişikliği, renk değişikliği şeklinde olabilir ve bu cevap kontrollü şekilde elektrik kuvveti veya magnetik alan etkisi altında tekrarlanabilir ve geri dönüşümlü olarak değiştirilebilir (Axel Ritter, 2006). İleri malzemeler olarak da sınıflandırılan akıllı malzemeler, gelişen teknoloji üzerine önemli etkileri olan en yeni malzeme grubudur (Callister ve Rethwisch, 2020). Son 20 yılda geliştirilen akıllı malzemeler sayesinde, havacılık, uzay, tıp, biyoteknoloji, ilaç salınımı, mimari gibi birçok alanda önemli gelişmeler yaşanmıştır.

Örneğin mimari alanda kullanılan akıllı malzemeye iyi bir örnek, akıllı malzemelerle Japonya'nın Osaka kentindeki 145 metre yüksekliğindeki Dowa Kasai Phoenix Kulesinin deprem ve rüzgârın neden olduğu titreşimlere duyarlı olarak, harekete bağlı mekanik

özelliklerini ayarlayabilme özelliği sayesinde, sarsıntıları hapsederek insanların sarsıntıları hissetmemesini sağlama özelliği sergilemesidir. Gürültü azaltma sistemleri ile helikopter ve uçaklarda da akıllı malzemelerden yararlanılmaktadır ve yeni nesil uçakların, görev ve ihtiyaçlarına göre kendilerini optimize edebilmeleri için şekil hafızalı polimerler, karbon fiberler ve piezoelektrik malzemeler akıllı davranış sergilemesi rağmen, değişken sertlik özellikleri sergileyen elemanlardan kaynaklı olarak geliştirilmesi gereken akıllı malzemelere olan ihtiyaç hala vardır (Sharma ve Srinivas, 2020). Biyomedikal alanda ise, göz çevresindeki uyarılara yanıt vermelerini sağlayan belirli özelliklere ve işlevlere sahip olan akıllı malzemeler geliştirilmiştir.

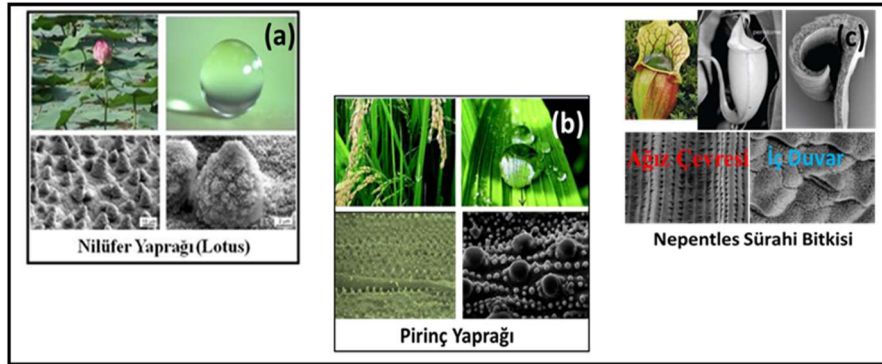
Bu akıllı malzemeler farklı parametrelere göre (sıcaklık, ışık, pH, elektrik veya manyetik alan) kimyasal ya da göz içerisinde olan biyolojik ipuçları ile algılama ve sinyal verme özelliğine sahiptir. Bu tür duyarlı özelliklerden faydalanarak, oküler uygulama alanlarındaki akıllı malzemeler, ilaç iletimini, ilaç penetrasyonunu, ilaç tutma süresini, göz içerisindeki algılamayı kolaylaştırmakta, tedavi ve hasta konforunu amaçlamaktadır (X. Wang ve ark., 2023). Polimer, inorganik, lipit bazlı parçacıklar, hidrojeller gibi çeşitli malzemeler kullanılarak oküler hastalıklara yönelik çeşitli akıllı dağıtım sistemleri geliştirilmiştir. Sağlık alanında ise akıllı polimerler olarak kontrollü ilaç salınımı uygulamaları için kolaylık sağlamaktadır.

Akıllı malzemeler, geleneksel malzemelere göre üstün özellikleri ve farklı alanlarda kullanılabilmesi nedeniyle önemi gün geçtikçe artmaktadır (Yildirim ve Candan, 2023). Ancak akıllı malzemelerin uzun vadede kullanımında dayanıklılığı önemli bir faktördür ve bu faktör üretim metodu ile direkt ilişkilidir. Akıllı malzemelerin üretiminde, doğada canlıların yaşadıkları ortama uyum sağlayabilmek için kusursuz bir şekilde gerçekleştirdiği dış yüzeylerini değiştirme davranışından esinlenilerek, bu davranışın istenilen malzemeye aktarımı için yüzey özelliklerini taklit etme (biyo-benzetim, biyomimetik) yöntemi sıkça kullanılmaktadır.

Örneğin, Nilüfer (Lotus) yapraklarının kendi kendini temizleme özelliği (Şekil 5.4a), pirinç yapraklarının anizotropik ıslanma özelliği (Şekil 5.4b) ve Nepentles sürahi bitki yüzeyinin su itme özelliği (Şekil 5.4c) gibi yüzey özelliklerinin taklit edilmesi ile akıllı malzemeler ve yeni nanoteknolojik ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Barthlott ve Neinhuis, 1997). Biyomimetik olarak akıllı malzemelerin üretilebilirliğinde ıslatılabilirlik kilit bir parametredir. Yüzey-sıvı arasında düşük yapışmanın olduğu yüzeyler kendini temizleyen yüzey olarak tanımlanır (Pilat ve ark., 2012) ve kendini temizleyen yüzeye bir sıvı damlası

birakıldığında ve yüzey sadece birkaç derece eğildiğinde su damlası kolayca yuvarlanır veya kayar (NEINHUIS, 1997; Quéré, 2005; T. S. Wong ve ark., 2011). Örneğin doğada yer alan süperhidrofobik nilüfer yaprağı üzerindeki pislikleri bu davranışa göre temizlemektedir. Bununla birlikte, kendini temizleyen yüzeyler, yüksek sıcaklık, basınç, nem, hidrodinamik kesilme ve düşük yüzey gerilimli sıvılara maruz kalma durumunda, sıvıları iterek kaçma eğilimi gösteren sıkışmış havaya karşı direnç gösterir. Bu durum, kendini yenileme özellikleri olmadığı için sıvı itici işlevlerinin kaçınılmaz bir şekilde bozulmasıyla ve yüzeylerinin deforme olmasıyla sonuçlanır (Lafuma ve Quéré, 2003; Liu ve ark., 2009; Tuteja ve ark., 2007).

Süperhidrofobik yüzeylerin kendini yenileme özelliğinin olmaması ve deformasyona ya da basınca karşı yeterli dayanıklılıkta olmaması nedeniyle bu sıcak konunun çözümü üzerine birçok araştırma yapılmıştır. 2011 yılında süperhidrofobik yüzeylerin dezavantajlarını ortadan kaldıran ve Aizenberg ve grubu tarafından doğadan esinlenilerek üretilmiş kaygan sıvı emdirilmiş gözenekli yüzeylerin (SLIPS), gelecek 20 yıl içinde, süperhidrofobik yüzeylerin yerini alması öngörülmektedir.



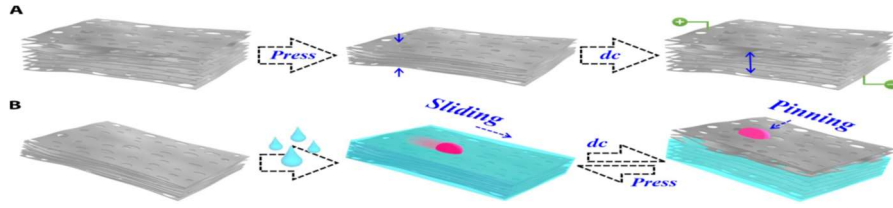
**Şekil 5.4.** Doğada bulunan ve taklit edilerek yapay yüzeyleri hazırlanmış bazı canlılara ait makro ve mikro yüzey fotoğrafları

**Kaynak:** (Barthlott ve Neinhuis, 1997)

Akıllı malzemelerin kullanım ömrünün uzatılmasında SLIP özellik sergilemesi, SLIP yüzeylerin kendini onarma/yenileme kabiliyetlerinden dolayı oldukça önemlidir. SLIP yüzeylerin hazırlanması, kendini yenileme kabiliyetlerinin belirlenmesi ve akıllı tepki vermelerine yönelik, SLIP yüzeyler üzerinde damlanın yönlendirilmesinde sıcaklık, elektriksel uyarım ve magnetizma gibi dış uyaran kullanılmıştır.

Wang ve arkadaşları (J. Wang ve ark., 2017b) dondurarak kurutma yöntemi kullanılarak, elektro termal olarak kontrol edilen yüzey ıslanabilirliğine sahip doğadan esinlenilmiş şekil hafızalı grafen hibrit filmi hazırlamışlardır (Şekil 5.5). Şekil hafızalı grafen

yüzeyinin sıvı hasat cihazları, mikroakışkan kanallar, tıbbi aletler ve sıvı dağıtım robotik sistemleri gibi çok sayıda ek uygulama yapmak üzere genişletilebileceğini önermişlerdir. Şekil hafızalı polimerler (SMP'ler), ısı ve ışık gibi harici uyarılara yanıt olarak programlanmış şekil değişikliklerine uğrayabilen ve orijinal şekillerine geri dönebilen bir akıllı malzeme sınıfıdır. Bu nedenle, elektrotermal grafen süngerleri ve termal olarak uyarılan SMP'lerin bir yağlayıcı ile infüze edilmiş kaygan sıvı ile kombinasyonu, spesifik ıslanabilirliğe sahip üstün performanslı malzeme geliştirilmesini sağlamıştır.

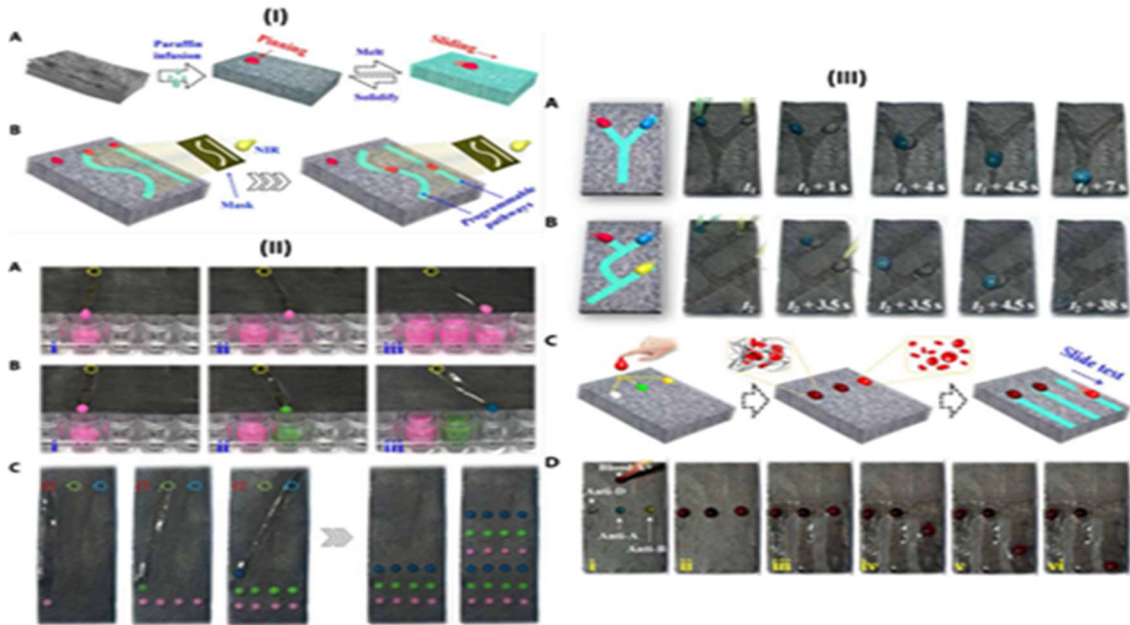


**Şekil 5.5.** Spesifik ıslanabilirliğe sahip elektrotermal ve şekil hafızalı grafen sünger. (A) Grafen sünger / SMP hibrid filmin elektriksel olarak (DC) tetiklenen şekil-hafıza özelliği. (B) Grafen sünger / SMP hibrid filmin ayarlanabilir ıslatılabilirliği

**Kaynak:** (J. Wang ve ark., 2017b)

Wang ve ark. (J. Wang, Gao, ve ark 2018b) dondurarak kurutma yöntemini kullanarak programlanabilir ıslanabilirliğe sahip yeni bir parafin-infüze gözenekli grafen filmi (PIPGF) hazırlamışlardır. Bu çalışmada parafin emdirilmiş gözenekli grafen süngerine kızıl ötesi (NIR) ışık uygulandığında parafinin fototermal etki ile katı ve sıvı forma geri dönüşümlü olarak geçişi sağlanmıştır (Şekil 5.6.(I)A). Bu işlemde, parafin eriyene kadar ısıtıldığında damlacıklar grafen filmi boyunca aşağı kayabilir, ancak parafin soğutulursa katılaştır ve film yüzeyine tutturulmuş olur. Böylece, maddenin sıvı-katı faz durumu ve PIPGF'nin yüzey ıslanabilirliği, NIR ışığı kullanılarak yüksek stabilite ve hızlı geri dönüşüm ile uzaktan kontrol edilebilmiştir (J. Wang ve ark., 2017b). Ayrıca aynı işlem NIR maskeleri ile kayma damlacıkları için özel akış yolları oluşturan desenlerde parafin eriyerek kaymıştır (Şekil 5.6 (I) B.). Maskeler farklı şekilde değiştirilebildiğinden, PIPGF kontrol edilebilen damlacık yönelimi ve reaksiyonu için programlanabilir ıslanabilirlik yolları sağlayabilmiştir. Bu programlanabilir ıslanabilirlik yollarının sadece mikropalakalar ve damlacık mikrodizilim teknolojisindeki sıvı işlemeyi basitleştirmekle kalmayıp aynı zamanda pratik kan grubu teşhisi gibi farklı amaçlar için farklı mikroakışkan mikro-reaktörler olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir. Sonuçlar, PIPGF'nin yüzeyde kalıntı olmadan çeşitli örnek sıvıları itebileceğini ve bunları örnek pipetleme işlemi büyük ölçüde basitleştiren tasarlanmış yollar boyunca mikropalakalar üzerinde istenen kuyulara yönlendirebileceğini göstermiştir (Şekil 5.6 (II) A ve B). Ayrıca NIR kontrollü programlanabilir

ıslanabilirlik yollarının bir başka tipik uygulaması, PIPGF'nin yüzeyinde gösterildiği gibi bir damlacık mikrodizisinin üretilmesidir (Şekil 5.6 (II) C). Tasarlanan yollarla, damlacıklar çapraz kontaminasyon olmadan istenen bölgelere doğru şekilde dağıtılabilmektedir. Bu nedenle, gen ekspresyon analizi, yüksek verimli tarama ve benzerleri için faydalı olabilecek farklı damlacık numuneleri bazında çeşitli damlacık mikrodizileri üretilbileceği önerilmiştir. Basit ıslatılabilirlik yollarının yanı sıra, Y desenli ve YY kompozit kanalları gibi karmaşık damla kılavuzlama yollarına sahip PIPGF, Şekil 5.6 (III)'da gösterildiği gibi programlanabilmektedir. Bu desenli kanallar, kimyasal reaksiyonlar için farklı tipteki damlacıkların kontrol edilebilir birleştirilmesi için farklı mikro-reaktörler oluşturabilir. Sonuçların gösterdiği gibi, açık mavi bir damlacık ve renksiz bir damlacık, yüzeyden aşağı kaydırıldığında ve birbirleriyle karıştırıldıktan sonra kompozit mavi bulanık bir damlacık haline gelmiştir (Şekil 5.6 (III) A). Bunun nedeni, berrak mavi bakır asetat damlacıklarının renksiz niasin damlacıklarıyla birleşmesi halinde, damlacıkta mavi bulanık bakır metal-organik bir çerçevenin (MOF) oluşmasıdır. Bununla birlikte, üretilen bakır MOF, sülfürik asit tarafından bozunabilir; bu nedenle mavi bulanık damlacık, asit damlacık ile karşılaştıktan sonra tekrar renksiz bir damlacık haline gelmiştir (Şekil 5.6 (III) B). Bu işlem, PIPGF'nin, mikroakışkan sistemler ve çip üzerinde laboratuvar ayarları gibi damlacık manipülasyonları ve reaksiyonları için arzu edilen geniş bir uygulama yelpazesi için oldukça umut verici olabileceğini göstermiştir.

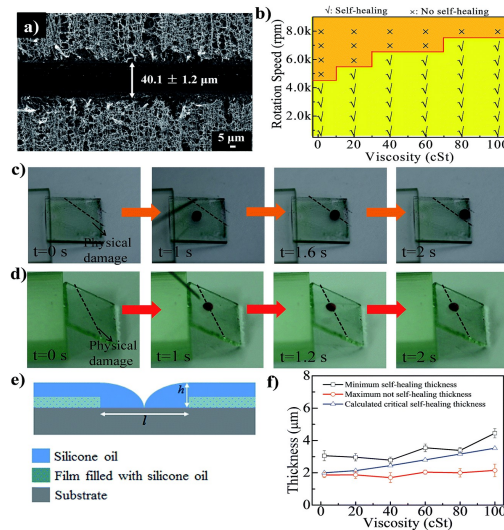


Şekil 5.6. (I) Programlanabilir ıslanabilirliğe sahip PIPGF'nin şematik diyagramı

**Kaynak:** (J. Wang, Gao, ve ark., 2018b)

Şekil 5.6'da (I) Programlanabilir ıslanabilirliğe sahip PIPGF'nin şematik diyagramı verilmiştir. Programlanabilir ıslanabilirliğe sahip PIPGF'nin şematik diyagramı. (A) Kızıl ötesi (NIR) ışığı kullanılarak uzaktan kontrol edilen PIPGF'nin ayarlanabilir ıslatılabilirliği. (B) PIPGF'nin yüzeyindeki programlanabilir ıslanabilirlik yolları, kontrol edilebilir damlacık yönlendirilmesi için NIR maskelerinin entegrasyonu ile oluşturulmuştur. (II) Damlacıkların pipetlenmesi için PIPGF uygulamasının ilerlemesi. (A ve B) Damlacıkları mikropalakalara pipetleme. Aynı numuneler (A) 'daki farklı oyuklara pipetlendi ve farklı numuneler (B) 'deki farklı oyuklara pipetlendi. (C) PIPGF yüzeylerinde mikrodiziler oluşturmak için damlacıkları pipetleme. (III) Mikroakışkanlar olarak programlanabilir ıslanabilirlik yollarına sahip PIPGF. (A ve B) (A) Y desenli ve (B) YY kompozit kanallara sahip karmaşık damlacık kılavuzlama yollarının yönlendirdiği PIPGF yüzeyi üzerindeki damlacık hareketliliğinin dinamik kontrolü. (C ve D) Bileşik kan damlacıklarının düşüp kaymadığını basitçe izleyerek kan örneğini (A rh+) gruplamak için PIPGF mikro-reaktörünün şematik diyagramı (C) ve ilerlemesi (D). Antikorlar, (C) ve (D) 'de soldan sağa doğru anti-D, anti-A ve anti-B'dir (J. Wang, Gao, , ve ark., 2018b).

Wang ve ark. (Z. Wang, Heng, ve ark., 2018) yağlayıcı viskozitesinin ve kalınlığının anizotropik SLIP yüzey üzerindeki elektro-tepki davranışı ve kendi kendini iyileştirme performansı üzerindeki etkisini incelemiştir (Şekil 5.7). Onlar kritik kendi kendini iyileştirme kalınlığının, silikon yağı viskozitesinin artması ile artış eğilimi gösterdiğini ve daha düşük viskozitede yağlayıcı sıvı kullanımının damlacık hareketinin elektrik kontrolünün duyarlı voltajını azalttığını belirlemiştir.



**Şekil 5.7. (a)** Jiletle fiziksel olarak hasar görmüş bir poroz, yönlendirilmiş ve iletken polimer (PCDTPT) filminin SEM görüntüsü

**Kaynak:**(Z. Wang, Heng, ve ark., 2018)



Şekil 5.7’de Jiletle fiziksel olarak hasar görmüş bir poroz, yönlendirilmiş ve iletken polimer (PCDTPT) filminin SEM görüntüsü verilmiştir. Hasarlı alanın genişliği  $40.1 \pm 1.2$   $\mu\text{m}$ 'dir. **(b)** PCDTPT kaygan yüzeyinin, farklı viskoziteli silikon yağının spin kaplama hızına karşı kendi kendini iyileştirme performans grafiği spin kaplama hızı arttıkça kendi kendini iyileştirme performansı azalacaktır. **(c)** Spin kaplama hızı 2000 rpm ve yüzey  $7^\circ$  eğildiğinde fiziksel hasardan sonra PCDTPT kaygan yüzeylerinin kendi kendini iyileştirdiğini gösteren zaman aralıklı görüntüler. **(d)** Kaygan yüzeyler spin kaplama hızı 5000 rpm olduğunda ve yüzey  $60^\circ$  eğimde sabitlendiğinde damlacık hasarlı bölgeye sabitlenir ve kendi kendini iyileştirme yeteneklerini kaybeder. Burada kullanılan silikon yağının viskozitesi 2 cSt'dir. **(e)** Kendi kendini iyileştirme için kritik durumun şematik gösterimi.  $h$ , silikon yağı kaplamasının kritik kalınlığıdır ve  $l$ , çizik genişliğidir. **(f)** Deneysel ve hesaplanan kritik kendi kendini iyileştirme kalınlıkları verilmiştir (Z. Wang, Heng, ve ark., 2018).

Akıllı malzemelerin SLIP özellik kazandırılması ile belli bir uyarana karşısında akıllı tepki gösteren birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bu çalışmalarda genel olarak damla hareketinin dış uyarana ile uyarılmasında parafinin erimesi ile yüzeyin kayganlaştırılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında kaygan yüzeyler yağlayıcı sıvı kullanımı (silikon yağı ve sıvı parafin), dış uyarana elektrik ve damla yönlendirilmesi litografi yöntemi ile üretilmiş substratlar üzerinde hazırlanan PS/grafen yüzeyler ile sağlanmıştır.

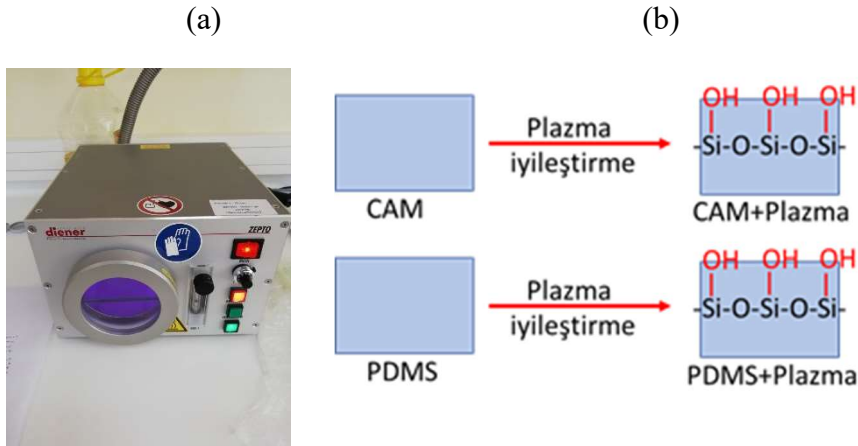
## 6. MATERYAL VE YÖNTEM

### 6.1. Altlık olarak kullanılan materyallerin hazırlanması, temizlenmesi, aktivasyonu ve modifikasyonu

Tez çalışması kapsamında standart cam, pürüzlü cam ve litografi yöntemiyle üretilmiş mikrodeseanlı Şablondan çoğaltılan mikrodeseanlı polidimetilsiloksan (PDMS) altlıklar kullanılmıştır. Altlık malzeme üzerine kaplama çözeltisinin iyi yapışmasını sağlamak için altlıklar temizleme, aktivasyon ve/veya modifikasyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Kullanılan her bir altlık malzeme için gerçekleştirilen prosedürler alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

#### 6.1.1 Cam altlıkların Temizleme, Aktivasyon ve Modifikasyon İşlemleri

Cam altlıkların (düz ve pürüzlü cam altlıklar) temizlenmesi işleminde kromik asit çözeltisi kullanılmıştır ve kromik asit ile temizleme prosedürü aşağıda verilmiştir. Temizlenmiş olan cam altlıkların aktivasyon ve modifikasyon işlemleri ise atmosferik plazma cihazı (ZEPTO/Plasma-Surface (Şekil 6.1a) içerisinde gerçekleştirilmiştir. Cam altlıklar doğası gereği silisyum içerir. Atmosferik plazma işlemi cam yüzeyine hidroksil (-OH) gruplarının çıkmasına neden olarak (Şekil 6.1b) orta hidrofoblukta yer alan cam yüzeylerinin süperhidrofil özellik kazanması sağlanarak kaplama çözeltisinin cam altlık üzerine daha iyi tutunması hedeflenmiştir.



**Şekil 6.1.** (a) Altlıkların aktivasyon ve modifikasyonunda kullanılan atmosferik plazma cihazının dijital fotoğrafı ve (b) plazma işlemi sonrası cam ve PDMS yüzeylerinde değişen kimyasal grupların temsili görünümü

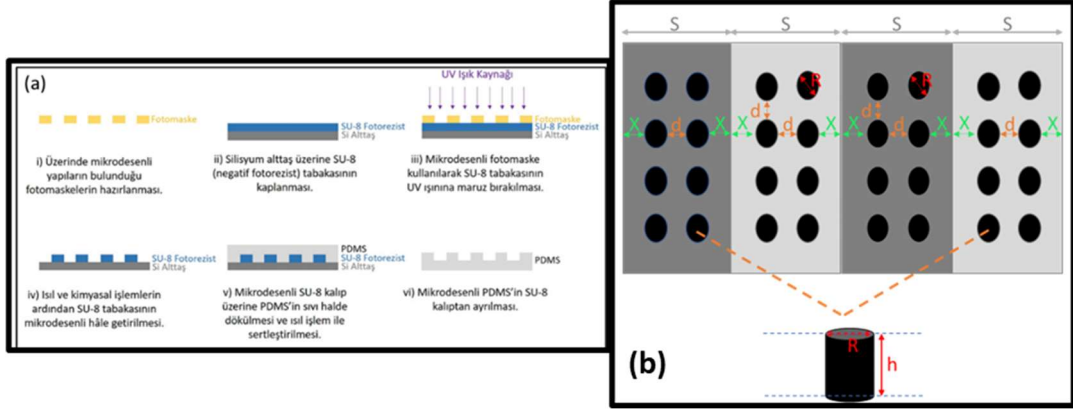
Kromik Asit Çözeltisi ile temizlik prosedürü: 100 g Sodyum dikromat (Merck/Türkiye) 100 mL saf su ile çözüldükten sonra, sülfürik asit (Merck/Türkiye) ile 1L ye tamamlanarak kromik asit çözeltisi hazırlanır. Cam lameller (Isolab/Türkiye -76-26 mm) borcam içerisine

dizilir ve üzeri kapanacak şekilde kromik asit çözeltisi döküldükten ve cam altlıkların tam olarak kromik asit çözeltisi içerisine battığından emin olunduktan sonra, borcamın üzeri stretch film ile kapatılarak, karanlık ortamda en az 4 saat bekletilir. Böylece cam altlıklar üzerinde yağ/toz gibi kirliliklerin kromik asit çözeltisine geçmesi sağlanır. Bekletme işlemi sonrasında önce borcam içerisindeki kromik asit uzaklaştırılır ve ardından borcam içerisindeki cam altlıklar bol su ile tekrar tekrar yıkanarak cam yüzeyinde film halinde yer alan kromik Asitin tamamen uzaklaşması sağlanır. Son olarak, Cam altlıkların her biri tek tek DI-su ile yıkanarak etüvde 80°C de kurutulur.

Atmosferik Plazma işlemi ile cam altlıkların aktivasyon ve modifikasyon prosedürü: Temizlenmiş olan cam altlıklar 0.4 hava/gaz oranında, 50 W plazma gücünde ve 1 dak atmosferik plazmaya tabi tutularak -OH gruplarının yüzeye yönelmesi sağlanarak yüzey modifikasyon işlemi ve bu sayede de kaplama çözeltisi ile bağlantı kuracak kimyasal grupların oluşumu ile cam altlıkların bağlanma için daha elverişli olması sağlanarak aktivasyon işlemi sağlanmıştır. Ayrıca cam altlıklar üzerinde temizlik prosedürü sonrasında kalan kirlilikler varsa atmosferik plazma işlemi bu kirliliklerinde uzaklaşmasını sağlayarak cam altlıklar üzerinde ilave bir temizleme işlemi gerçekleştirilmesine sebep olmuştur.

### **6.1.2 Mikrodesenli PDMS Altlıkların Üretimi, Aktivasyonu ve Modifikasyonu İşlemleri**

Mikrodesenli PDMS altlıklar, i) Krom maskelerin üretimi, ii) Litografi yöntemi ile SU-8 fotorezist ile desenlendirilmiş şablon üretimi ve iii) PDMS altlıkların üretimi aşamalarında üretilmiştir. Üretilen 5 farklı tasarıma sahip mikrodesenli PDMS altlıkların aktivasyon ve modifikasyon işlemi için atmosferik plazma işlemi (0.4 hava/gaz oranında, 50 W plazma gücünde ve 10 dak bekletme süresinde) gerçekleştirilmiştir. PDMS altlıkların tasarımına dair genel üretim işlemlerinin aşamaları (Şekil 6.2.a) ve PDMS altlık üretiminde kullanılan boyutsal özelliklerin tanımlanmasına ait temsili görseller Şekil 6.2.b'de verilmiştir. Krom maskelerin maske boyutları, Şekil 6.2.b'de yer aldığı şekilde tanımlanmış ve Krom maske boyutsal değişkenleri şunlardır: S: Kanal genişliği, X: Desen ile kanal kenarı arasındaki mesafe, d: Desenler arası mesafe, R: Desen çapı ve h: Çukur/tepe pıların/sütunların yüksekliği.

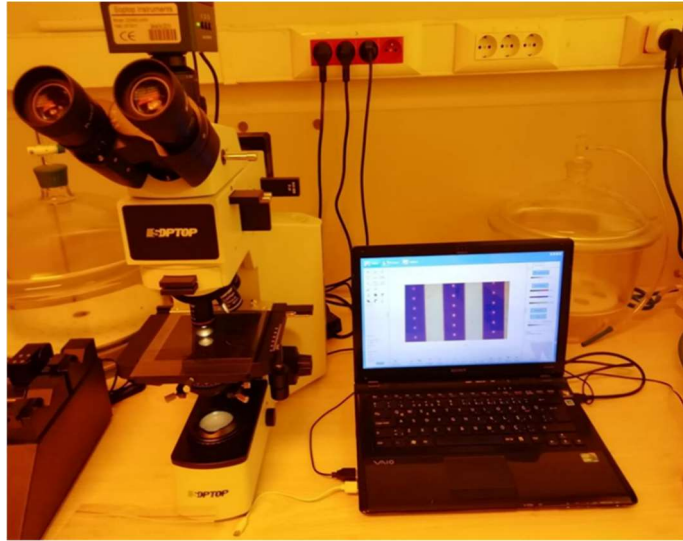


Şekil 6.2. (a) Kalıp tasarım prosedür adımlarını gösteren temsili görsel ve (b) Kalıp tasarımında kullanılan boyutsal özelliklerin temsili görseli

**Krom maskelerin üretimi:** CleWin 5 programı kullanılarak 2 farklı krom maske (foto maske) deseni tasarlanmış ve Heidelberg Instruments maske yazdırma sisteminde (DWL 66fs, Almanya) krom maskeler yazdırılarak maskeler hazırlanmıştır. SODA LIME krom maske  $80^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 1 saat “AZ100 Remover (MicroChemicals/Germany)” içerisinde temizlenmiş, su ile yaklaşık 30 sn durulanmış ve azot ( $\text{N}_2$ ) gazı ile kurutulmuştur. Ardından döndürerek kaplama yöntemi ile maske üzerine AZ1505 MicroChemicals/Germany) fotorezist kaplanmıştır ve  $103^{\circ}\text{C}$ 'de ısıtıcı üzerinde 30 dk bekletilmiş ve oda sıcaklığına gelene kadar soğumaya bırakılmıştır. Fotorezist kaplı krom maske Heidelberg Instruments (DWL 66fs) maske yazıcıya yerleştirilmiş, CleWin 5 programında çizilen maske tasarımları tanıtılmış ve 50 mW lazer gücünde maske yazımı gerçekleştirilmiştir. Yazılan maske sırasıyla Developer 726(Micro Resist Technology/Germany), saf su ve Cr Etcher içinde bekletilmiştir. Basılan krom maskenin fotorezistten temizlenmesi için sırasıyla AZ100 Remover ve su içerisinde bekletme işlemleri gerçekleştirilmiş ve ardından azot gazı ile kurutulmuştur. Kalıp üretiminde hedeflenen tasarıma ulaşılması için 2 katlı litografi uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle 5 desenin bir arada olduğu krom maskeden hedeflenen tasarıma ulaşmak için 2 farklı maske (Maske 1 ve Maske 2) üretilmiştir. 5 farklı desen için Maske 1 ve 2'ye ait boyutsal özellikler Tablo 6.1'de verilmiştir. Ayrıca her bir tasarım için üretilen krom maske 1 ve 2'ye ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.3'te verilmiştir.



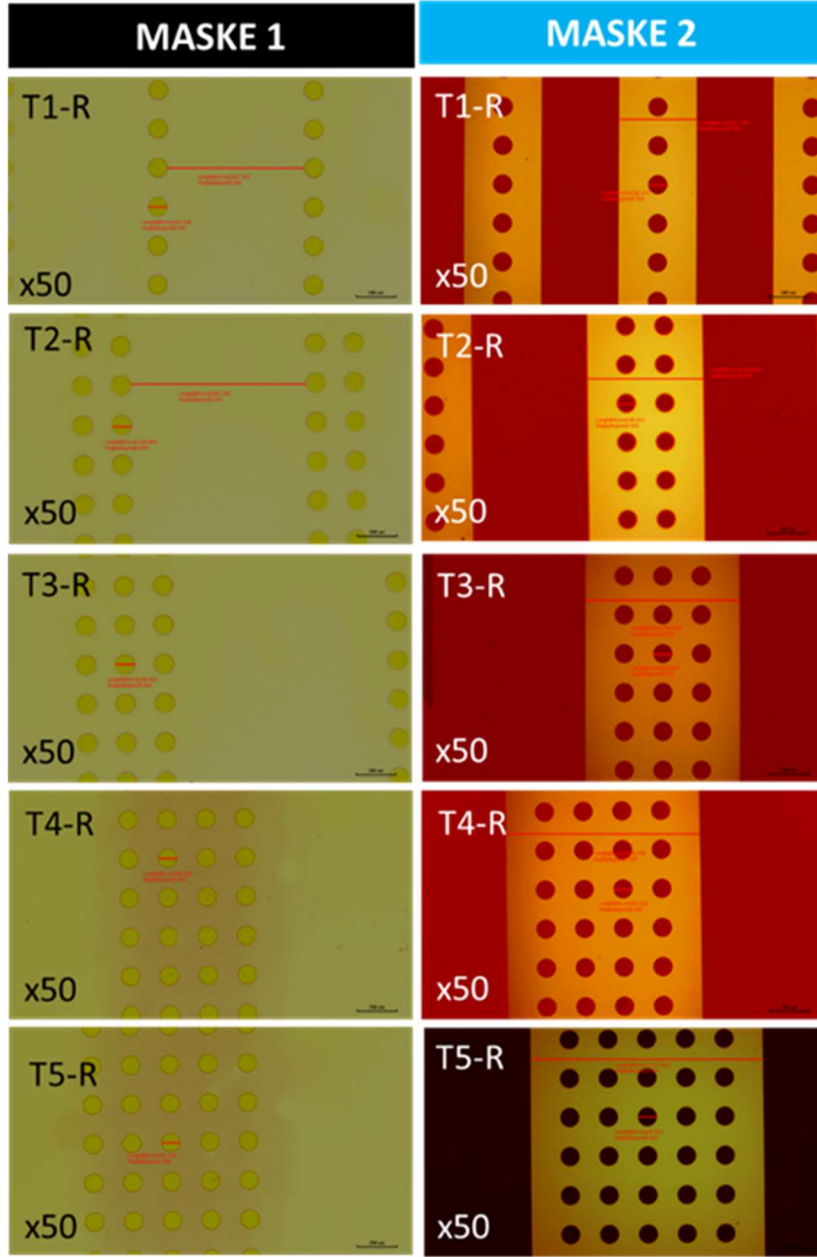
**Şekil 6.3.** Heidelberg DWL 66fs Krom Maske Basım Cihazı, Heidelberg 'te basım sonrası Krom Maske'nin Cr Etcher içinde bekletilmesi, AZ100 Remover içinde +80° C maskenin fotorezistten temizlenmesi, Heidelberg DWL 66fs ile basılmış Krom Maske Çalışması



**Şekil 6.4.** Heidelberg DWL 66fs ile basılmış Krom Maske Çalışması Mikroskop görüntüsü, Soptop digital microscope camera CX40M

**Tablo 6.1.** AZ1505 Fotorezist ile desenlendirilmiş krom maske 1 ve 2 için tasarım boyutları

MASKE 1	T1-R	T2-R	T3-R	T4-R	T5-R
R ( $\mu\text{m}$ )	100	100	100	100	100
S ( $\mu\text{m}$ )	400	600	800	1000	1200
X ( $\mu\text{m}$ )	150	150	150	150	150
d ( $\mu\text{m}$ )	100	100	100	100	100
Kanal boyunca desen dizilim sayısı	1	2	3	4	5
MASKE 2	T1-R	T2-R	T3-R	T4-R	T5-R
R ( $\mu\text{m}$ )	100	100	100	100	100
S ( $\mu\text{m}$ )	400	600	800	1000	1200
X ( $\mu\text{m}$ )	150	150	150	150	150
d ( $\mu\text{m}$ )	100	100	100	100	100
Kanal boyunca desen dizilim sayısı	1	2	3	4	5



**Şekil 6.5.** 5 Farklı desende kalıp tasarımı için üretilen krom maske 1 ve 2'ye ait optik mikroskop görüntüleri. Görüntülerin sağ alt köşesinde yer alan ölçek çubuğu 200  $\mu\text{m}$ 'yi temsil eder

**Litografi yöntemi ile SU-8 fotorezist ile desenlendirilmiş şablon üretimi:** Şablon üretimi için SU-8-2015 (KAYAKLI/USA) fotorezist kullanılmıştır. Şablonların üretimine başlamadan önce silisyum alttaş temizliği gerçekleştirilmiştir. 4" boyutundaki silisyum-wafer alttaş petri kabının içerisinde sırasıyla aseton ve IPA (İzopropil Alkol) kullanılarak 3'er dakika ultrasonik banyoda (Ultragold Sonic Cleaner) temizlenmiş ve azot gazı ile kurutulmuştur. Kurutulmuş silisyum alttaş 95°C'de üstü kapatılarak ısıtıcı üzerinde 5 dk tavllanmış, soğutulmuş ve 2 dk. oksijen plazmada (PTL-VM500 Vacuum Plasma Treatment System 450\*400\*255mm)

bekletilmek suretiyle temiz alttaş elde edilmiştir. Şablon üretimi 2 katlı litografi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir ve aşağıda tek katlı ve 2 katlı litografi işlemlerinin prosedürleri sırasıyla verilmiştir:

Tek katlı litografi işlemi: Temizlenmiş Si-wafer alttaş döndürerek kaplama yöntemi ile 500 rpm 'de 5 sn. ve ardından 2000 rpm 'de 30 sn. SU-8-2015 fotorezist ile kaplanmıştır. Fotorezist kaplanmış Si-wafer alttaş önce 65°C'de 1 dk. daha sonra 95°C'de 3 dk. üzeri kapatılarak ısıtıcı üzerinde tavllanmış ve soğutulmuştur. Fotorezist kaplanmış Si-wafer üzerine krom maske hizalaması gerçekleştirilmiş ve ardından %10 güçte 3 sn. UV ışınına maruz bırakılmıştır. UV ışınına maruz kalma sonrasında krom maskedeki desenin Si-wafer üzerine basılması sağlanmış ve ilk olarak 65°C'de 1 dk. daha sonra 95°C'de 3dk. ısıtıcı üzerinde üstü kapatılarak tavlama işlemi gerçekleştirilmiş ve soğutulmuştur. Soğuyan Si-wafer önce 7 dk ve developer ile daha sonra IPA ve aseton ile birkaç kez yıkanmıştır. Azot gazı ile kurutulmuş ve 95°C'de 3 dk. üstü kapatılarak tavllanmış ve soğutulmuştur. Tavlama sonrası ısıtıcı üzerinden alınarak soğuması için bekletilmiştir. Böylece tek katlı litografi işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuçta tek katlı Litografi işlemi ile kanal şeklinde ve ayrıca kanal içlerinin silindirik desenler şeklinde SU-8 ile desenlendirildiği 5 farklı tasarıma sahip şablonlar üretilmiştir.



**Şekil 6.6. Oksijen plazma Cihazı(PTL-VM500 Vacuum Plasma Treatment System)**

İki katlı litografi işlemi: Tek katlı litografi işleminde üretilen SU-8 ile desenlendirildiği 5 farklı tasarıma sahip şablon SU-8-2015 fotorezist kullanılarak iki katlı litografi işlemi gerçekleştirilmiştir. Silisyum alttaş üzerine SU-8 fotorezistin tek katlı litografi işlemi ile desenlendirilmesi ile elde edilen yüzey hidrofobiktir ve üzerine tekrar homojen olarak fotorezistin kaplanabilmesi için ikinci kat litografi işlemine geçmeden önce 2 dk. oksijen plazmaya maruz bırakılmıştır. Bu aşamadan sonra 2. kat hizalama işleminin tam olarak gerçekleştirilebilmesi için 1. kattaki hizalama işaretçileri kırmızı renkli fotorezist AZ 1505 ile boyanmış ve gerekli hizalama işlemleri yapılarak ve 1. kat litografi yönteminde kullanılan yöntem aynen tekrar edilerek mikro desenler Si-alttaş üzerinde oluşturulmuştur. Böylece 5



farklı tasarıma sahip Mikrodesenli yönlendirilmiş kanallara sahip Şablon iki katlı litografi yöntemi ile üretilmiştir.

**PDMS altlıkların üretimi:** Si-alttaş üzerinde 5 farklı tasarımda yönlendirilmiş ve mikrodesenler içeren Şablon'dan PDMS altlıkların (substratların) çoğaltılması işleminde Verpol RTV 240 silikon elastomer kullanılmıştır. Şablon üzerindeki desenlerin PDMS altlığa tam olarak nüfus etmesi için, RTV-240A elastomeri VRM silikon yağı(VRM/Türkiye) ile 4:1 oranında seyreltilmiş ve homojen karışım elde etmek için en az 1 gece çalkalayıcıda karıştırılmıştır. Homojenleştirilen viskozitesi düşürülmüş RTV-240A elastomeri ile RTV-240B çapraz bağlayıcısı 1:1 oranında karıştırılmış ve ardından kabarcıkların giderilmesi için vakum etüvünde kabarcıklar gidene kadar yaklaşık 45-60 dak beletilmiştir. Elastomer ve çapraz bağlayıcı karışımı şablon üzerine dökülerek 80 derecede 1 saat kürlenmeye bırakılmış ve ardından kürlenmiş PDMS kalıptan ayrılmıştır.

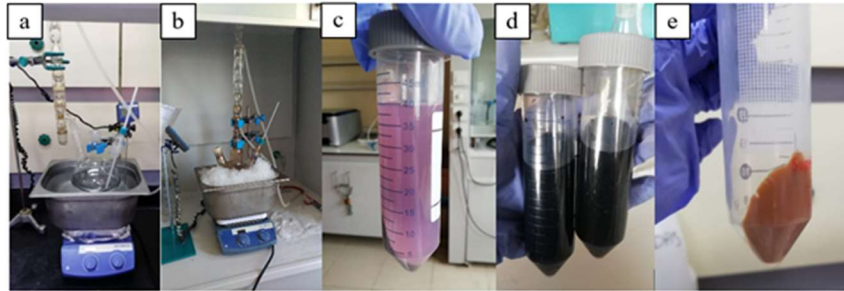


Şekil 6.7. PDMS'in Si-Wafer üzerinden ayrılması

## 6.2. Grafitten Kimyasal Yöntemle Grafit Oksit Sentezi

Kimyasal yöntemle grafit oksit (GrO) sentezi literatürde yer alan Tour (Marcano ve ark., 2010a) metodunun modifiye edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Sülfürik asit ( $H_2SO_4$ )/ fosforik asit(Merck/Türkiye)/ (Kimyasal yöntemle grafit oksit (GrO) sentezi literatürde yer alan Tour (Marcano ve ark., 2010a) metodunun modifiye edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Sülfürik asit ( $H_2SO_4$ )(Merck/Türkiye) /fosforik asit ( $H_3PO_4$ ) (720mL/80mL) (Merck/Türkiye) karışımına 6 g grafit toz eklenip 10 dk karıştırılmış ve ardından 700 devir/dakika karıştırma hızında karıştırılarak asit karışımına yavaş yavaş sıcaklık  $50^{\circ}C$ 'yi aşmayacak şekilde 36 g  $KMnO_4$  (Merck/Türkiye) eklenmiştir. Reaksiyon sıcaklığı  $50^{\circ}C$  olacak şekilde karışım 12 saat boyunca karıştırılmıştır. 12 sa reaksiyon süresi sonunda karışımın rengi kahverengi-gri olmuştur ve ısıtıcı kapatılarak karışımın sıcaklığının oda sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Oda

sıcaklığına ulaşan karışım buz banyosuna alınmış ve sıcaklığın 0 °C'ye düşmesi sağlanmıştır. Sıcaklık 0 °C'ye geldiğinde karışımın sıcaklığı 20 °C'yi geçmeyecek şekilde damla damla 8 ml %30'luk H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilave edilmiştir. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi sonrasında köpük oluştuğu ancak renk değişiminin olmadığı gözlemlenmiş ve karıştırma işlemi devam ettirilerek 1 saat beklenerek reaksiyonun sonlandırıldığından emin olunmuştur. Daha sonra karışımdaki safsızlıkların uzaklaştırılması için 4 farklı adımda 9000 devir/dakika santrifüj hızında 15 dk süreyle santrifüjleme işlemleri yapılmıştır. Santrifüjleme işlemleri sırasıyla, reaksiyon sonrası karışımın direkt santrifüjlenmesi, DI-su eklenerek tekrar yıkanarak santrifüjleme (2 kez), %30'luk HCl ile yıkanarak santrifüjleme (2 kez) ve Etanol ilave edilerek santrifüjleme sırasına göre gerçekleştirilmiştir. Her bir santrifüjleme işleminde supernant atılmış ve çökelek tekrar tekrar yıkanmıştır. Santrifüjleme işlemleri sonrasında elde edilen çökelek (grafit oksit), asit ve tuzun uzaklaştırılması için pH=4.5-5 civarına gelene kadar yaklaşık 2 ay süre ile membran içerisinde diyaliz edilmiştir. Diyaliz işlemi sonrasında çökelek etüvde 40 °C da kurutulmuş ve kuruyan katı miktarı tartılarak reaksiyon verimi yaklaşık %38 olarak hesaplanmıştır. Grafit oksit sentezine dair deneysel düzenek, reaksiyonun sonlandırma adımı ve santrifüjleme sonrasında elde edilen çökeleklerin görünümü Şekil 6.8'de verilmiştir.



**Şekil 6.8.** (a) Grafit oksit sentezi deneysel düzenek, (b) Grafit oksit sentez reaksiyonunun sonlandırılması prosesine ait deneysel düzenek, (c) DI-su ile yıkama sonrası karışımın görünümü, (d) HCl ile yıkama sonrası karışımın görünümü, (e) Etanol ile yıkama sonrasında santrifüjlenerek elde edilen çökelek görünümleri için deneyler sırasında çekilmiş dijital fotoğraflar

### 6.3. GrO ve GO Katkılanmış PS Dispersiyonlarının Hazırlanması

GrO ve GO katkılanmış PS dispersiyonlarının hazırlanması prosedürlerine dair detaylar her bir dispersiyon için ayrı ayrı verilmiştir. GO dispersiyonlarının hazırlanmasında DI-su ve THF solventleri ve PS çözeltisinin hazırlanmasında ise THF (su ile %60 oranında dispers olabilen) çözücüsü kullanılmıştır.

GO@Su-1 dispersiyonu: 1g GrO üzerine 100 mL su ilavesi ile hazırlanan süspansiyon (10 mg/mL konsantrasyon) homojen dağılım gözlemlenene kadar (5 gün) bekletilmiştir. Sonra karıştırıcıda 2 sa karıştırılmıştır. Hemen akabinde süspansiyon 35 kHz ultrases altında sonikasyona tabi tutulmuş ve bir gece beklemeye bırakılmıştır. Ertesi gün jelleşme belirtileri sıvıda yoğunlaşma olarak kendini göstermiştir ve aynı 3 sa daha 35 kHz sonikasyona tabi tutulmuştur. Ultrasonikasyon sırasında jelleşme belirtilerinde artış gözlendikçe dispersiyon banyodan alınıp çalkalanarak yeniden akışkanlık kazandırılmıştır. 3 sa sonunda dispersiyon iki gün bekletilmiştir. Bekleme süresince jelleşmede eğiliminde artış gözlenmiştir. İki gün bekleme sonrasındaki üçüncü gün jel oluşumu görülmüş halde iken, 2sa daha aynı prosedürle ultrasonikasyon uygulanmıştır. Tekrar beklemeye bırakılan dispersiyonda, iki gün sonra şiddetli şekilde jelleşmenin yaşandığı görülmüştür. 3000rpm 30 dak santrifüj sonrası falkon tüpte çökelti olmadığı görülmüştür. Katı madde analizi sonucunda kararlı GO dispersiyonun konsantrasyonu 10 mg/mL olarak belirlenmiştir. Stok çözeltinin daha düşük konsantrasyonlu çalışmalarda kullanılması durumunda su ile seyreltme ve 15 dak sonikasyona tabi tutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

GO@Su-2 dispersiyonu: GO@Su-1 dispersiyonunun hazırlanması sırasında sonikasyon işlemi sırasında sıcaklık 35°C geçmeyecek şekilde sonikasyon yapılmıştır. Bu dispersiyonun hazırlanması ise GO@Su-1 dispersiyonunun hazırlama prosedüründe sadece sonikasyon işlemi sırasında banyonun sıcaklığı 25 °C'yi geçmeyecek kontrol edilmesi ile hazırlanmıştır. Katı madde analizi sonucunda kararlı GO dispersiyonun konsantrasyonu 10 mg/mL olarak belirlenmiştir.

GO@THF-1 dispersiyonu: 1g GrO üzerine 100 mL THF ilavesi ile hazırlanan süspansiyon (10 mg/mL konsantrasyon), 35 kHz ultrases gücündeki sonikasyon banyosunda 5 sa ultrasese tabi tutularak ön tabakalandırmaya tabi tutulmuştur. Ardından süspansiyona 400 mL DI-su ilave edilip 15 dakika magnetik karıştırıcı üzerinde karıştırılmıştır (başlangıç konsantrasyonu 2 mg/mL). Süspansiyon ilave olarak 11 sa daha sonikasyona tabi tutularak toplam 16 saatlik ultrases süresi sonrasında 1500 rpm santrifüj hızında 15 dak santrifüjlenerek supernant (GO) alınmış ve yaklaşık 2 hafta boyunca kararlılığını koruyan grafen oksit dispersiyonu elde edilmiştir. Katı madde analizi sonucunda kararlı GO dispersiyonun konsantrasyonu 0.42 mg/mL olarak belirlenmiştir.

GO@THF-2 dispersiyonu: 1g GrO üzerine 100 mL THF ilavesi ile hazırlanan süspansiyon (10 mg/mL konsantrasyon) homojen dağılım gözlemlenene kadar bekletilmiştir. Süspansiyon 35 kHz ultrases gücündeki sonikasyon banyosunda 1. Gün 2 sa, 2. Gün 2sa ve 3.

Gün 2 sa olmak üzere aralıklı olarak ultrasese tabi tutulmuştur. Ardından süspansiyon 2 gün bekletilmiştir ve hergün 2 sa olarak toplamda 3 gün tekrar ultrasese tabi tutulmuştur. Dispersiyondan yapılan katı madde analizi sonucunda kararlı GO dispersiyonun konsantrasyonu 10 mg/mL olarak belirlenmiş ve GO dispersiyonunun 1 hafta kararlı olarak kaldığı belirlenmiştir.

Polistiren (PS) Stok Çözeltisi: 40 g PS pellet ( $M_w=100000$ , Sigma Aldrich) tartılarak üzerine 400 mL THF(Merck/Türkiye) ilave edilmiştir. Hazırlanan çözelti yağ banyosu içerisinde, karıştırıcıda 65°C'de yaklaşık 24 saat boyunca geri soğutucu bağlanarak karıştırılmaya bırakılmıştır. Hazırlanan PS çözeltisinin konsantrasyonu 100mg/mL dir. Farklı konsantrasyonlarda PS çözeltilerinin hazırlanması işlemi, stok çözeltiye hacimce belli oranda THF ilavesi yapılması ve ardından mekanik karıştırıcıda 2 saat karıştırılması şeklinde yapılmıştır. PS'ni çözmekte kullanılan THF %60 oranında su ile dispers olma özelliğine sahiptir.

GrO katkılı PS süspansiyonlar: 50 ya da 5 mg/ml konsantrasyonlu PS çözeltisine farklı oranlarda (wt. % 1, 3, 5, 7 ve 10) GrO toz ilavesi yapılmış ve 30 dakika ultrasese tabi tutularak PS-GrO süspansiyonlar hazırlanmıştır.

EtOH ilaveli PS-GrO süspansiyonlar: GrO katkılı PS süspansiyonlara bulanma noktasına kadar hızlı karıştırılarak Etanol (EtOH) ilave edilmesi EtOH ilaveli PS-GrO süspansiyonlar hazırlanmıştır.

GO katkılı PS süspansiyonları: PS çözeltisine GO dispersiyonu katkılanması ile hazırlanan süspansiyonlarda, kullanılan GO dispersiyonu 2 farklı çözücü (THF ve su ortamında) ortamında hazırlanmıştır. PS çözeltisinin hazırlandığı THF çözücüsü su ile % 60 oranında homojen dispers olma özelliğine sahip olduğu için hem su hem de THF ortamında hazırlanan GO dispersiyonları PS çözeltisine homojen olarak katkılanabilmiştir. GO dispersiyonu su içerisinde hazırlanmışsa  $GO_w$  şeklinde kodlanmıştır, THF içerisinde hazırlanan GO dispersiyonlarına ayrıca bir kodlama kullanılmamıştır.

PS/ $GO_w$  süspansiyonlar: Su içerisinde hazırlanmış 10 mg/mL konsantrasyonlu  $GO_w$  dispersiyonunun ( $GO@Su-1$ ) hacimce % 5, 25, 50 ve 75 oranlarında 1mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine eklenmesi sonrasında 48 saat magnetik karıştırıcıda karıştırılması ve 2 sa 35 kHz sonikasyon gücünde ultra sonikasyona tabi tutulması ile PS/ $GO_w$  süspansiyonlar hazırlanmıştır.

PS/GO süspansiyonlar: GO@THF-1 dispersiyonununun ağırlıkça % 10 bileşimde PS çözeltisine eklenmesi sonrasında 48 saat magnetik karıştırıcıda karıştırılması ve 2 sa 35 kHz sonikasyon gücünde ultra sonikasyona tabi tutulması ile PS/GO süspansiyonlar hazırlanmıştır.

#### **6.4. GrO ve GO Katkılanmış PS Yüzeylerin Hazırlanması, İndirgenmesi ve Kaygan Yüzey Üretimi**

GrO ve GO katkılanmış PS yüzeyler, cam ya da PDMS altlıklar kullanılarak PS-GrO, PS/GO ve PS/GOW süspansiyonlarının daldırarak kaplama yöntemi ile kaplanması ile hazırlanmıştır. Hazırlanan PS-GrO, PS/GO ve PS/GOW yüzeylerin indirgenmesi için aşağıda detayları verilen kimyasal indirgeme yöntemleri (KİY) kullanılmıştır. Böylece GO katkılanmış yüzeylerdeki GO'in grafene indirgenmesi sağlanmıştır.

KİY-1: Kimyasal indirgeme yöntemi (KİY) 1 de, bir beher içerisinde hidroiyodik asit (HI)+ Asetik asit (Ac) karışımı (1:2.5 v/v) eklenmiş ve desikatör içerisinde yerleştirilmiştir. Ardından indirgenecek numuneler desikatör içerisinde dik konumda yerleştirilmiş ve desikatör kapağı kapatılmıştır.

Desikatör etüv içerisinde yerleştirilerek 40 °C'de 16sa boyunca bekletilmiştir. 16sa sonunda indirgenen numuneler desikatörden alınmış, yaklaşık 2 sa vakuma maruz bırakılmış ve ardından etüvde 50 °C de 1sa bekletilmiştir.

KİY-2: Bir beher içerisinde 1/13 oranında hidroiyodik asit (HI:25µL) + Asetik asit (Ac:325µL) karışımı hazırlanmış ve 250 ml'lik şilifli balon joje içerisinde eklenmiştir. Ardından indirgenecek numune balon joje içerisinde dik konumda yerleştirilmiş ve balon jolenin kapağı kapatılmıştır. Balon joje etüv içerisinde yerleştirilerek 75 °C'de 4 sa boyunca bekletilmiştir. İndirgeme süresinin sonunda numune balon joje içerisinde alınmış çeker ocakta 2 gün bekletilmiştir. Bu yöntemle indirgenen numuneler "1/13 HI/Ac" yazılarak belirtilmiştir.

KİY-3: Bir beher içerisinde KİY-2 de kullanılan asit oranlarının 2 katı kullanılarak yani 2/26 oranında hidroiyodik asit (HI:50µL) + Asetik asit (Ac:650µL) karışımı hazırlanmış ve 250 ml'lik şilifli balon joje içerisinde eklenmiştir. Ardından indirgenecek numune balon joje içerisinde dik konumda yerleştirilmiş ve balon jolenin kapağı kapatılmıştır. Balon joje etüv içerisinde yerleştirilerek 75 °C'de 4 sa boyunca bekletilmiştir. İndirgeme süresinin sonunda numune balon joje içerisinde alınmış çeker ocakta 2 gün bekletilmiştir. Bu yöntemle indirgenen numuneler "2/26 HI/Ac" yazılarak belirtilmiştir.

İndirgenmiş ya da indirgenmemiş PS-GrO, PS/GO ve PS/GOw yüzeylerin kayganlaştırılması için yağlayıcı sıvı olarak silikon yağı ve sıvı parafin kullanılmıştır. Kaygan yüzeyler, kayganlaştırılmak istenen yüzeylerin yağlayıcı sıvı içerisine daldırılması, 1 dak bekletilmesi ve ardından yağlayıcı sıvıdan çıkarılması ile fazla yağın uzaklaştırılması (10-15 dk süre aralığında) aşamalarında hazırlanmıştır.

## 6.5. Kaygan Yüzey Performans Çalışmaları

Yüzeylerin kaygan özellik gösterip/göstermediğinin belirlenmesi amacı ile gerçekleştirilen çalışma prosedürleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

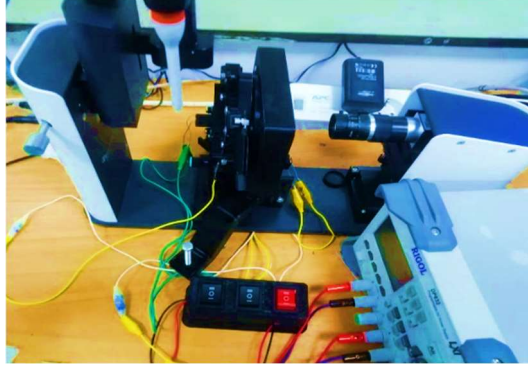
Kayma açısının belirlenmesi: yüzey yatay konumda iken 3-8mL hacimde test sıvısı (su ve/veya KCl) yüzey üzerine damlatılmış ve motorize stage ile yavaş bir şekilde yüzeye eğiklik verilmiş ve damlanın kaymaya başladığı ağıklıkta motorize stage durdurularak eğim okunmuş, okunan eğim kayma açısı olarak belirlenmiştir.

Kayma Hızının Belirlenmesi: Sıvı damlanın yüzeydeki kayma hızının belirlenmesinde belli hacimdeki sıvı damla yatay olarak duran yüzeye damlatılması ve damlanın kaymaya başladığı zamana kadar motorize olarak eğiklik verilen tablanın üzerindeki yüzeyin eğilmesi ve damlanın kaymaya başladığı zaman sonrasında iki farklı sürede damla konumlarının belirlenmesi sonucunda belirlenmiştir. Belirli iki süredeki iki farklı konumun belirlenmesi için her bir süre için kaydedilen damla fotoğrafları Adobe-Illustrator programında fotoğraflar alt alta yapıştırılarak damlanın başlangıç süresindeki ve son süredeki konum bilgileri belirlenmiş ve  $V=\Delta x/\Delta t$ 'den Denklem 5.1'e göre hız hesaplanmıştır. Hız hesaplamasının doğrulanması için farklı konum ve süreler için bu işlemler tekrarlanmıştır.

Yüzey stabilitesini koruma testleri: Sıvı damlanın aynı yüzey üzerine en az 10 kez damlatılarak kayma açısında kaydırılması ve yüzeyin tekrar tekrar kullanılabilirlik derecesinin belirlenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Yüzeylerin kendini yenileme/onarma performansı: Kayma açısında yer alan yüzey üzerine iğne yardımıyla damlanın akış yönüne dik olarak çizik atılmasının hemen sonrasında sıvı damlanın çizilen bölgeden geçip/geçmediği, damla stabilitesini koruyup/korumadığı video kamera ile yapılan görüntüler incelenerek belirlenmiştir. Ayrıca kendini yenileme/onarma süresinde video süresi baz alınarak çizik attıktan sonra damlanın çizik bölgesinden geçtiği süre tespit edilerek belirlenmiştir.

Yüzeylerin led ışık yakma performanslarının belirlenmesi: Yüzeyin iki farklı ucuna farklı kutuplarda (artı ve eksi) bağlanan iletken tellerin arasına farklı güçteki led ışık bağlanması ile yüzeyin iletimi sağlayarak led ışığı yakma performanslarının belirlenmesi. Bu durum yüzeyde elektrik akışının kesintisiz devam ettiğinin kontrolü ve iletken olup/olmadığının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 6.9.** Voltaj uygulama set-upü güç kaynağı ve temas açısı ölçüm cihazı motorize tabla

Yüzeylerin dış uyaran karşısında akıllı tepki verme performansları: Yüzeylerin dış uyaran karşısında akıllı tepki verme performanslarının incelendiği deneysel düzenek Şekil 6.9'da verilmiştir. Akıllı tepki performans denemeleri dört aşamada gerçekleştirilmiştir. i) Kayma açısında damlaya voltaj uygulayan (dış uyaran) tel damla ile temas etmediği durumdayken (dış uyaran yok) damlanın kayma davranışının belirlenmesi, ii) Kayma açısında damla ile tel temaslı ancak voltaj uygulanmadığı (dış uyaran yok) durumdaki damlanın kayma davranışı, iii) Kayma açısında damla ile tel temas eder durumdayken voltaj uygulandığı (dış uyaran var) durumda damlanın kayma davranışının belirlenmesi, iv) Kayma açısında damla ile tel temas eder durumdayken voltaj uygulanmadığı (dış uyaran yok) ve voltaj uygulandığı (dış uyaran var) durumda damla davranışının belirlenmesi.

## 6.6. Karakterizasyon Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında üretilen indirgenmiş/indirgenmemiş GrO, GO, grafen ve GrO yüzeyler ve GO/GrO katkılı PS yüzeylerin kimyasal ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi için FTIR ve XRD, iletkenlik değerlerinin belirlenmesi için 4-prop İletkenlik Cihazı (Şekil 6.10a), Temas açısı sonuçlarının belirlenmesi için Temas açısı ölçüm cihazı (Şekil 6.10b), dış uyaran var/yok durumları için sıvı damlanın akıllı tepki performansının belirlenmesi çalışmalarında temas açısı ölçüm cihazı ve kamera kullanılmıştır.

(a)



(b)



**Şekil 6.10.** (a) Signatone 4-prop İletkenlik Cihazı ve (b) Biolin Scientific Attention Theta Lite Temas Açısı Cihazı dijital fotoğrafları



## 7. BULGULAR

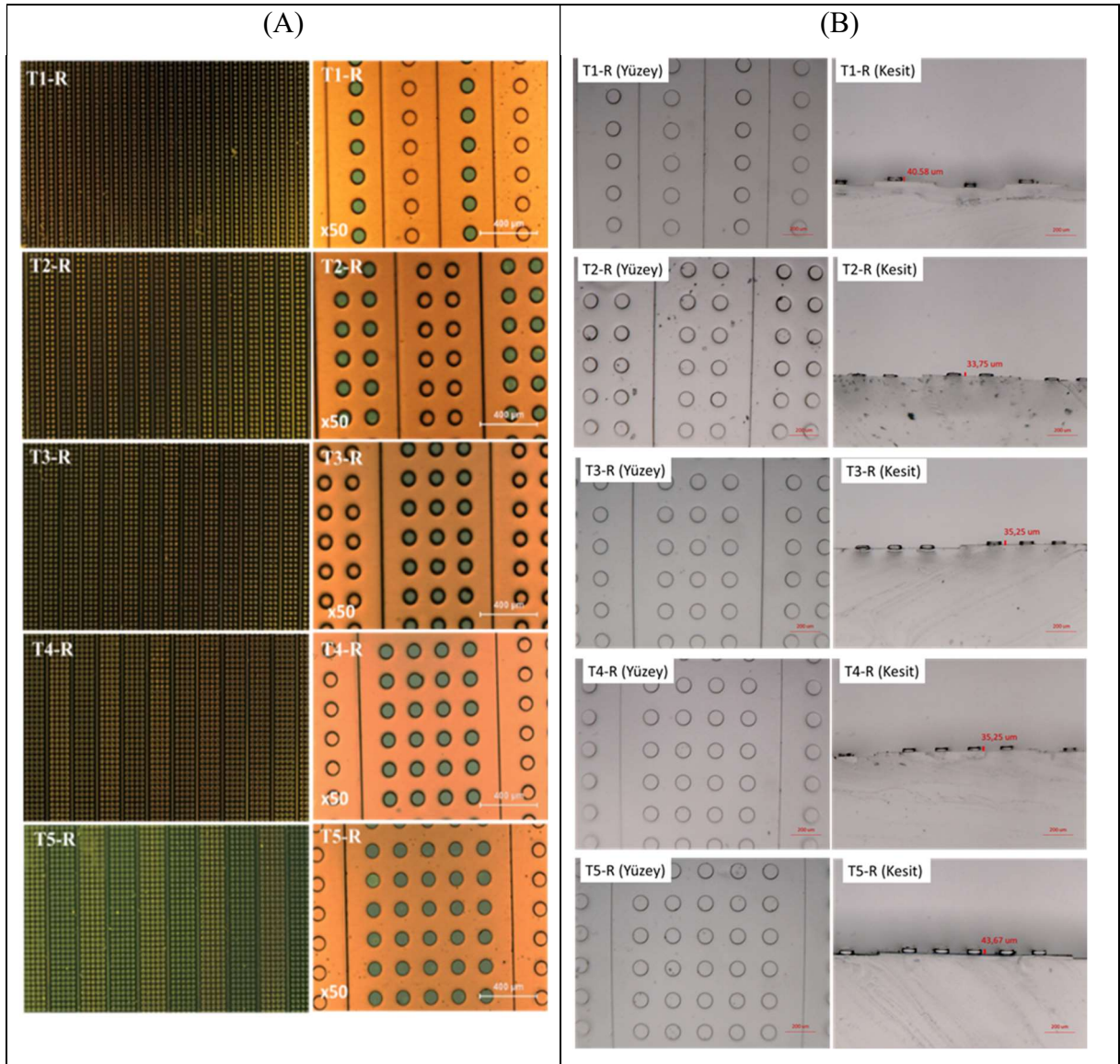
### 7.1. Düz, Pürüzlü ve Yönlendirilmiş Mikrodesenli Substratların Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Düz ve pürüzlü cam olarak standart cam ve buğulu camlar satın alındıktan sonra yöntem bölümünde verildiği şekilde temizlenmiş ve atmosferik plazma işlemi ile modifiye edilerek kullanılmıştır. Pürüzlülük ve mikrodesenli/yönlendirilmiş yapı kontrolü için şablon materyal olarak, litografi yöntemiyle üretilmiş SU-8 şablonlar kullanılarak yönlendirilmiş ve/veya mikrodesenli pürüzlülüğe sahip PDMS substratlar üretilmiştir.

#### 7.1.1. Yönlendirilmiş mikrodesenli şablonlardan PDMS substratların üretimi ve karakterizasyonu

Yönlendirilmiş mikrodesenli Şablon 1 üretimi, Krom Maske 1 ve 2 kullanılarak Si-altaş üzerine SU-8-2015 fotorezist kullanılarak 2 katlı litografi yöntemi ile 5 farklı tasarım için üretilmiş ve üretim detayları Yöntem bölümünde verilmiştir. PDMS altlıkların çoğaltılmasında kullanılan Şablon 1 için 5 farklı tasarıma ait mikro desenlerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.1 (A) da yer almaktadır. Şablon 1 de T1-R ile T5-R arasındaki tasarımlarda mikro-desenler “çukur” konumundadır ve T1-R ile T5-R arasındaki tasarımlar direkt substrat olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Şekil 7. 1 (A)’dan görüldüğü gibi Şablon 1 kalıpta farklı kanal genişliklerine farklı sayıda çukurlar içeren mikro desenler şeklinde Si-altaş üzerine üretilmiştir. Çukur çapları yaklaşık 100 µm’dir ve çukurlar arasındaki mesafe 100 µm olacak şekilde tasarlanmış ve tasarlandığı şekilde üretilmiştir.

Verpol-RTV-240 kalıp silikonundan Şablon 1 kalıp kullanılarak üretilen PDMS substratlara ait yüzey ve kesit optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.1 (B) de verilmiştir. Şekil 7.1 (B)’den görüldüğü gibi, tasarıma uygun olarak kanallı ve kanallar üzerinde farklı dizilim sayısında mikrodesen çıkıntılarının yer aldığı PDMS substratlar elde edilmiştir. Çıkıntı şeklindeki mikrodesenlerin yükseklikleri farklı tasarımlar için 33-44µm arasında değişmektedir ve mikrodesen çap ve mikrodesenler arasındaki mesafeler ise yaklaşık 100 µm olarak tasarıma uygun olarak elde edilmiştir.









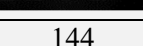





**Şekil 7.1. A)** Si-alttaş üzerinde “çukur” olarak (T1-R ile T5-R arasındaki görüntüler) SU-8 2015 negatif fotorezistin 2 katlı litografi işlemi ile desenlendirildiği Şablon-1’e ait farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri ve **B)** SU-8 Şablon 1’den 5 tasarım (T1-R, T2-R, T3-R, T4-R ve T5-R) için Verpol RTV240 kalıp silikonu ile çoğaltılan PDMS altlıkların yüzey ve kesit mikroskop görüntüleri

Verpol-RTV-240 kalıp silikonundan üretilen PDMS substratlar; grafen oksit (GO) ve grafen (GR) filmlerinin sıkı tutunmasını ve homojen film dağılımı sağlamak amacıyla plazma işlemi ile modifiye edilerek kullanılmıştır ve optimum atmosferik plazma süresi 10 dk olarak belirlenmiştir. Tablo 7.1 de Verpol-RTV-240 kalıp silikonu ile SU-8 Şablon 1 kalıptan çoğaltılan farklı tasarımlardaki PDMS substratların plazma modifikasyonu öncesi ve sonrasında su temas açısı sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.1’den görüldüğü gibi mikrodeseanlı ve kanallı olarak üretilen PDMS altlıkların temas açısı 125-144° arasında değişmektedir. Düz PDMS yüzeyi 100° temas açısına sahiptir ve mikrodeseanlı olarak PDMS yüzeyinin pürüzlendirilmesi ile temas

açısı değerleri artmıştır. Plazma işlemi sonrasında ise temas açıları 13-23° arasında değişmekte ve süperhidrofilik davranış göstermektedir. Bu sonuçlar Verpol-RTV-240 silikon elastomerinden çoğaltılan PDMS substratlar üzerinde GO'nin daha sıkı tutunması beklentisini karşılamak için uygun olduğu kanaatinin oluşmasına neden olmuştur.

**Tablo 7.1.** Verpol-RTV-240 silikon elastomeri ile SU-8 Şablon 1 kalıptan çoğaltılan farklı tasarımlardaki PDMS substratların atmosferik plazma modifikasyonu öncesi ve sonrasında su temas açısı sonuçları ve damla profili görüntüleri

Tasarım Adı	Plazma Öncesi Temas Açısı (°) ve Damla Profili	Plazma sonrasında Temas Açısı (°) ve Damla Profili
Düz PDMS	100 	13 
T1-R	125 	13 
T2-R	141 	24 
T3-R	143 	20 
T4-R	140 	20 
T5-R	144 	23 

Cam yüzeyleri SiO<sub>2</sub> bileşimine bağlı olarak farklı hidrofilik dereceleri sergiler (20-70°). Cam yüzeyleri üzerindeki değişen hidrofiliklik derecesi GO'nin cam üzerine bağlanma davranışını etkiler. Bu değişken durumu standardize edebilmek için cam yüzeyler farklı temizlik çözeltilerinde yıkanarak ve/veya atmosferik plazma işlemine tabi tutularak GO'nin en iyi tutunduğu temizlik/modifikasyon yönteminin tespitine yönelik; deterjan çözeltisi, pirana çözeltisi ve kromik asit çözeltisi ile temizlik/modifikasyon işlemleri gerçekleştirilmiş ve ayrıca bu temizlik/modifikasyon işlemlerine tabi tutulan cam yüzeyler plazma işlemine tabi tutularak da sistematik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Pirana çözeltisi ile cam yüzeylerin temizlik/modifikasyonunda 30 dakika bekleme süresinin optimum koşul olduğu belirlenmiş ve

modifikasyon öncesinde hidrofily olan ( $\theta_e=70^\circ$ ) cam yüzeyi, modifikasyon sonrasında süperhidrofil ( $\theta_e=18^\circ$ ) davranış sergilemiştir. Optimum olarak belirlenen cam yüzeyinin 30 dakika pirana çözeltisinde bekletilmesi temizlenen/modifiye edilen cam yüzeylerin farklı sürelerde (10, 40 ve 60 sn) atmosferik plazma işlemine tabi tutulması sonrasında, pirana+plazma modifikasyonu için optimum koşul, 30 dak pirana çözeltisinde bekletilerek yıkama ve ardından pirana çözeltisinden arınan cam yüzeyin 10 sn plazma işlemine maruz bırakılması olarak belirlenmiştir. Ayrıca deterjanla temizlenen camların plazma modifikasyonu ile plazma işlemi sonrasında ne kadar süre yüzey aktivasyonunu koruduğuna yönelik gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda 60 sn plazma işlemi sonrasında 120 dk boyunca cam yüzeylerin temas açısı değerinin  $20^\circ$  den düşük olduğu belirlenmiştir.

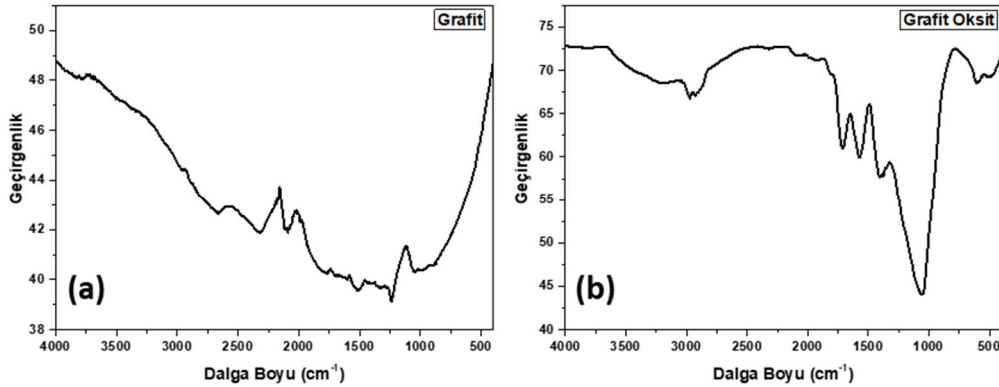
Her ne kadar  $\theta_e=70^\circ$  olan cam yüzeyi için pirana+plazma modifikasyonu ile süperhidrofilik özellikte cam substratlar üretilmiş ve optimum temizlik/modifikasyon yöntemi olarak belirlenmiş olsada, aynı marka camın tekrar temini sonrasında cam yüzeylerin temas açısının çok düşük olduğu ( $\theta_e=20^\circ$ ) belirlenmiş ve bu yüzeyler üzerinde aynı modifikasyon gerçekleştirildiğinde GO'ın yüzeye homojen olarak tutunmadığı ve süperhidrofilik olan bu cam yüzeylerinden pirana çözeltisinin arındırılmasını zor olduğu belirlenmiştir. Bunun üzerine cam yüzeyleri pirana çözeltisi yerine, kromik asit çözeltisi kullanılarak temizlik ve ardından 10 sn plazma modifikasyonunun gerçekleştirilmesi ile GO'ın yüzeye düşük temas açılı camlar üzerinde de homojen ve iyi şekilde tutunduğu belirlenmiştir. Cam yüzeylerin temizlik ve modifikasyonlarında değişiklik yapılsa da sonuçta belirlenen optimum koşuldaki temas açıları yönelik gerçekleştirilen çalışmalar sonrasında optimum koşulda  $20^\circ$  den düşük temas açısı değerleri elde edilmiştir. Pürüzlü cam (PC) yüzeyler için cam yüzeyler için geçerli temizlik/modifikasyon yöntemi optimum koşul olarak kullanılmış ve sonuçta  $20^\circ$  den düşük temas açısı değerleri elde edilmiştir.

## **7.2. Kimyasal Yöntemle Grafen Oksit Sentezi, Grafen Oksit Dispersiyonlarının hazırlanması ve Karakterizasyonu**

Bu bölümde grafitten kimyasal yöntemle grafit oksit sentezi ve sentezlenen grafit oksitin farklı dispersiyon ortamlarında tabakalandırılması ile kararlı GO dispersiyonlarının hazırlanması ve karakterizasyon çalışmalarına ait bulgular alt başlıklar halinde sunulmuştur.

### 7.2.1 Kimyasal yöntemle grafit oksit sentezi ve karakterizasyonu

Kimyasal yöntemle grafit oksit sentezi literatürde yer alan Tour metodunun (Marcano ve ark., 2010a) modifiye edilmesiyle yöntem bölümünde detaylı olarak anlatıldığı şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.2’de grafit ve grafit oksite ait FTIR spektrumu verilmiştir. Literatüre (Bera ve ark., 2017) göre grafitin FTIR spektrumunda şiddetli bir pik gözlenmemesi kimyasal olarak inertliğini göstermektedir. Grafit’e ait FTIR spektrumunda (Şekil 7.2a) 2300  $\text{cm}^{-1}$ ’de  $\text{CO}_2$ ’yi işaret eden pik, grafitin gözenekliliği ve higroskopik yapısından kaynaklanır. 1750  $\text{cm}^{-1}$ ’deki C=O titreşimi karbonil veya karboksil gruplarını, 1500  $\text{cm}^{-1}$ ’deki pik C=C bağını, 1250 ve 1050  $\text{cm}^{-1}$  C-O titreşimini işaret eden karbonil grupları varlığını gösterir. Grafit oksitin FTIR spektrumunda (Şekil 7.2b) ise 3428  $\text{cm}^{-1}$ ’de oldukça yoğun bir bant, yapı içinde OH ve/veya COOH fonksiyonel gruplarının varlığını gösteren O-H germe titreşiminden kaynaklanmaktadır. 2855  $\text{cm}^{-1}$  ve 2920  $\text{cm}^{-1}$ ’deki çok zayıf bantlar, sırasıyla C-H bağının simetrik ve antisimetrik gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca karbonil CO gerilme titreşimi (1700  $\text{cm}^{-1}$ ), oksitlenmemiş grafit alanın C-C germe titreşimi (1600  $\text{cm}^{-1}$ ), O-H deformasyonu (1400  $\text{cm}^{-1}$ ) ve alkoksi grubunun C-O germe titreşimi (1050  $\text{cm}^{-1}$ ) gözlenmektedir. Bu nedenle, GrO’e ait FTIR spektrumu GrO yapısı içinde hidroksil, epoksi, karboksil, karbonil gibi çeşitli oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığını ve dolayısıyla sentezin başarılı bir şekilde yapıldığını doğrulamaktadır (Bera ve ark., 2017).

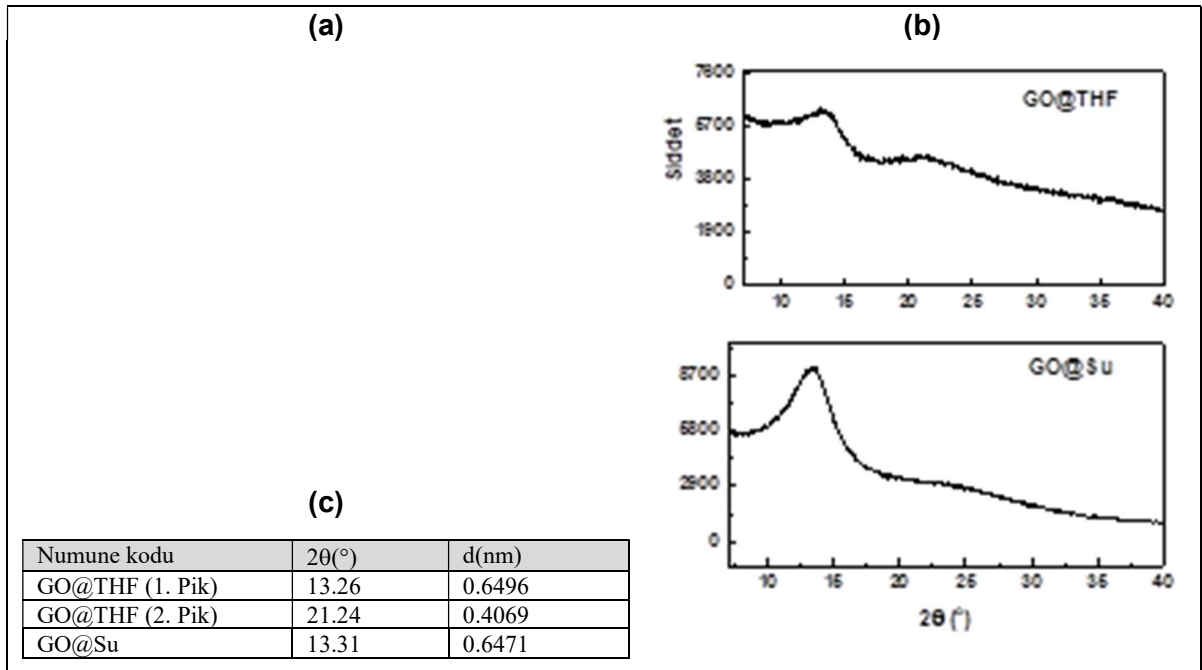


Şekil 7.2. (a) Grafit ve (b) Grafit Oksitin (GrO) FTIR spektrumları

### 7.2.2. Kararlı GO Dispersiyonlarının Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Su ve THF solventleri kullanılarak hazırlanan kararlı GO stok dispersiyonları na ait FTIR spektrumları Şekil 7.3 (a)’da ve XRD kırınimleri Şekil 7.3 (b)’de yer almaktadır. FTIR spektrumunda -OH, -COOH, C=O, CO, C-OH, C-O-C gibi oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığı, grafitin oksitlendiğini yani grafit oksitin tabakalanarak grafen oksite dönüştüğünü

gösterir (Gengeç, 2021). FTIR spektrumlarında, 3000-3700  $\text{cm}^{-1}$  aralığında ve yaklaşık 1600  $\text{cm}^{-1}$ 'deki -OH grubuna ait pikler grafen oksit üzerine adsorplanmış sudan kaynaklanmaktadır (Shahriary Leila ve Athawale Anjali A., 2014). 2950  $\text{cm}^{-1}$  ve 2850  $\text{cm}^{-1}$ 'deki absorpsiyon pikleri,  $\text{CH}_2$ 'nin simetrik ve asimetrik gerilme titreşimlerini temsil ederken, 1650  $\text{cm}^{-1}$  ve 750  $\text{cm}^{-1}$ 'de gözlenen iki pik, grafen oksitin kenarlarında bulunan karboksilik asit ve karbonil gruplarının C=C ve C=O gerilme titreşimini işaret eder. 1550-1370  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki bölgede C-O-C titreşim gerilmelerinin varlığı epoksi gruplarından ve 1040-1060  $\text{cm}^{-1}$  bölgesinde yer alan C-O titreşimi karbonil grupları varlığından kaynaklanmaktadır. Tüm çözücüler için 1000  $\text{cm}^{-1}$ 'den sonraki pikler aromatik C-H deformasyonuna aittir. 650  $\text{cm}^{-1}$ 'den sonraki pikler C-H eğilme titreşimlerinden kaynaklıdır (Bera ve ark., 2017; Shahriary Leila ve Athawale Anjali A., 2014; Surekha ve ark., 2020). GO@THF dispersiyonu için 2930  $\text{cm}^{-1}$  ve 2850  $\text{cm}^{-1}$ 'deki absorpsiyon pikleri,  $\text{CH}_2$ 'nin simetrik ve asimetrik gerilme titreşimlerini göstermektedir. GO@Suait spektrumda 3000  $\text{cm}^{-1}$ 'de görülen C-H gerilimi GO@THF'ye ait olan pike göre daha da şiddetliyen, yaklaşık 1100  $\text{cm}^{-1}$ 'de elde edilen C-O pik şiddetinde ise GO@THF'ye ait olan pike göre azalma gözlenmiştir. Bu nedenle su ortamında hazırlanan GO dispersiyonları için oksijen içeren fonksiyonel grupların THF ortamında hazırlanan GO'e göre azaldığı yani daha iyi tabakalandığı söylenebilir.



**Şekil 7.3.** THF ve DI-Su ortamında hazırlanmış yüksek konsantrasyonlu GO@THF ve GO@Su'e ait (a) FTIR spektrumları, (b) XRD kırınımları ve (c) XRD kırınımlarına göre

Bragg eşitliğinden hesaplanan tabakalar arası mesafe

Şekil 7.3 (b)'de GO@THF ve GO@Su dispersiyonlarına ait XRD kırınımında, THF ortamında hazırlanan GO dispersiyonunda hem grafen oksit ( $2\theta = 13.26^\circ$ ) hem de grafene özgü ( $2\theta = 21.24^\circ$ ) pikler vardır ve bu nedenle kısmen indirgenme olduğu söylenebilir. Bu durumu daha iyi aydınlatılmak için katmanlar arasındaki mesafe (d) Bragg denklemine (Denklem 7.1) göre hesaplanmış ve Şekil 7.3 (c)'de elde edilen sonuçlar verilmiştir. XRD ölçümlerine göre Bragg denkleminde  $n = 1$  ve  $\lambda = 1.5$  kullanılmıştır.

Su ortamında hazırlanan GO dispersiyonu GO'ye özgü pik için tabakalar arası mesafe 0.6471 nm iken, GO@THF için tabakalar arası mesafe artmış (0.6496 nm) ve GO@THF için grafenden kaynaklandığını önerdiğimiz 2.pik için tabakalar arası mesafe (0.4069 nm) azalmıştır. Tabakalar arası mesafenin azalması grafen oksitin oksijen içeren gruplarının azalması dolayısıyla tabakalanma derecesinin artmasına neden olur (Atalay Gengeç, 2021) GO@THF için XRD kırınımında grafene özgü  $2\theta = 25^\circ$  civarındaki pik su ortamında hazırlanan grafen oksit için (GO@Su) XRD kırınımında yer almazken hem su hem de THF ortamında hazırlanan dispersiyonlarda grafen oksite ait  $2\theta = 10-14^\circ$  civarında pikler yer almaktadır.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (7.1)$$

### **7.3. Grafit Oksit Katkılı PS Kompozit Kaygan Yüzeylerin Üretimi, Karakterizasyonu ve Kaygan Yüzey Performansının Belirlenmesi**

Grafit oksit katkılı PS (PS+GrO) kompozit yüzeylerin üretimi çalışmalarında 2 farklı sistematik çalışma gerçekleştirilmiştir:

- i) PS çözeltisine farklı bileşimlerde GrO katkılanarak PS-GrO@THF süspansiyonları hazırlanmış ve bu süspansiyonlar düz cam ve mikrodesezli PDMS substratlar üzerine daldırarak kaplama yöntemi ile kaplanarak PS+GrO@THF kompozit yüzeyler hazırlanmıştır.
- ii) PS çözeltisine farklı bileşimlerde GrO katkılanarak hazırlanmış PS-GrO@THF süspansiyonlarına çöktürücü solvent ilave edilerek PS-GrO@THF+EtOH süspansiyonları ile daldırarak kaplama yöntemi ile cam substratlar üzerinde PS+GrO@THF+EtOH yüzeyler ve bu yüzeylerin indirgenmesi ile üretilen r-PS+GrO@THF+EtOH yüzeyler hazırlanmıştır.

Üretilen çöktürücü solvent ilaveli ve ilavesiz olarak hazırlanan GrO katkılı PS kompozit yüzeyler yağlayıcı sıvı emdirilerek kaygan yüzeyler üretilmiştir. Kaygan yüzey performanslarının belirlenmesinde yüzey üzerine belli hacimdeki test sıvısı damlatılmış ve

ardından sıvı damlanın ilk kaydığı andaki eğiklik derecesi kayma açısı olarak tespit edilmiş ve kayma hızları belirlenmiştir. Ayrıca sıvı damlanın farklı eğiklik açılarında kayma hızları farklı test sıvısı hacim/türleri için belirlenmiştir.

### **7.3.1. PS+GrO@THF Kompozit Yüzeylerin Üretimi ve Karakterizasyonu**

50 ya da 5 mg/ml konsantrasyonlu PS çözeltisine belli oranda (wt. %1, 3, 5, 7 ve 10) GrO toz ilavesi ile hazırlanan PS-GrO@THF süspansiyonları farklı kaplama şartlarında daldırarak kaplama yöntemi ile plazma modifikasyonuna tabi tutulmuş cam yüzeyler üzerine kaplanmış ve PS+GrO@THF kompozit yüzeyler hazırlanmıştır. Hazırlanan PS+GrO@THF kompozit yüzeylerine ait kaplama şartları ve temas açısı sonuçları Tablo 7.2’de verilmiştir.

Hidrofobik malzemelerde pürüzlülük artışı temas açısı değerinin artmasına neden olur. Ancak hidrofob ve hidrofil malzeme karıştırıldığında yüzeye çıkan malzemenin hidrofobluk derecesine bağlı olarak temas açısı artabilir de azalabilir de. PS hidrofob, GrO hidrofil özellik gösterir ve PS herhangi bir modifikasyon yapılmadığı takdirde pürüzsüzdür. PS’e GrO katkılı olduğunda yüzeye çıkan PS ise PS’nin hidrofob doğasından dolayı pürüzlülük artışına bağlı olarak temas açısı değerinin artması beklenir. Eğer yüzeye çıkan grup GrO ise pürüzlülük artışı ile temas açısının azalması beklenir. Bu çalışmanın amacı yüzeye GrO’in çıktığı yüzeylerin seçilmesidir. Bu ön bilgiler ışığında Tablo 7.2 incelendiğinde 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisi ile yapılan çalışmalar için, %1, 3 GrO ilavesi için GrO’in yüzeye çıktığı kaplama hızı 160 mm/dk iken, %5 ve 10 GrO ilavesi için 400 mm/dk ve % 7 GrO ilavesi için 480 mm/dk olarak belirlenmiştir. Ayrıca 5 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine %10 GrO ilavesi ile gerçekleştirilen çalışma setinde, temas açısı sonuçlarına göre kaplama hızının artması ile GrO in yüzeye çıkma eğiliminin arttığı görülmektedir.

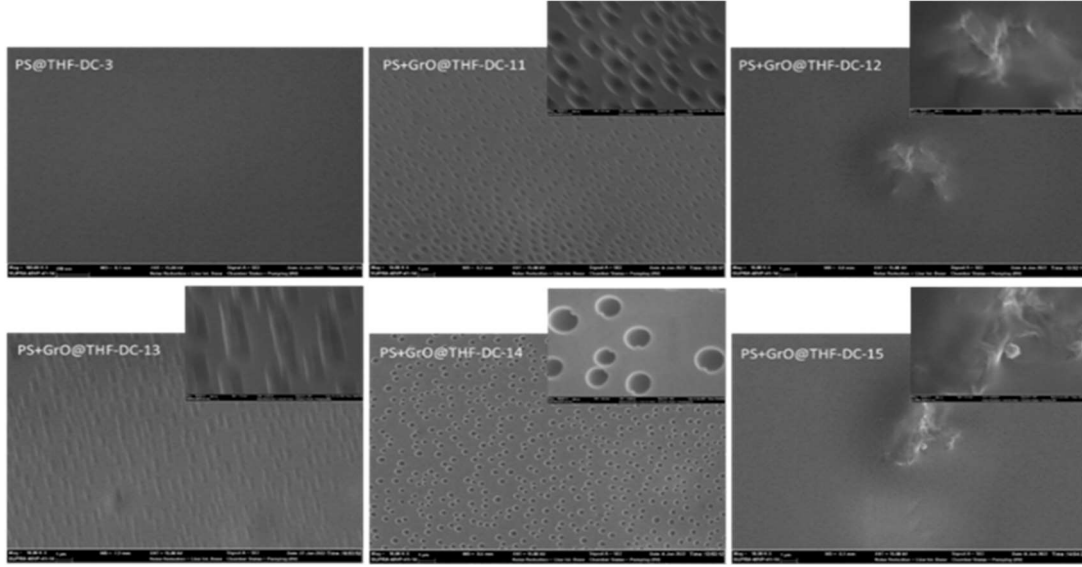


**Tablo 7.2.** Farklı bileşimlerdeki PS-GrO@THF süspansiyonlarının farklı daldırarak kaplama hızlarında cam+plazma modifikasyonlu cam lamellere kaplanması ile hazırlanan PS+GrO@THF kompozit yüzeylerin kaplama şartları ve temas açısı sonuçlar

Numune Kodu	PS Konsantrasyonu (mg/ml)	Daldırma Hızı (mm/dk)	GrO (%wt)	Temas Açısı ( $\theta_e$ )
PS@THF-DC-1	50	160	0	98
PS+GrO@THF-DC-1	50	160	1	94
PS+GrO@THF-DC-2	50	160	3	94
PS+GrO@THF-DC-3	50	160	5	97
PS+GrO@THF-DC-4	50	160	7	97
PS+GrO@THF-DC-5	50	160	10	91
PS@THF-DC-2	50	240	0	97
PS+GrO@THF-DC-6	50	240	1	95
PS+GrO@THF-DC-7	50	240	3	94
PS+GrO@THF-DC-8	50	240	5	97
PS+GrO@THF-DC-9	50	240	7	95
PS+GrO@THF-DC-10	50	240	10	88
PS@THF-DC-3	50	320	0	97
PS+GrO@THF-DC-11	50	320	1	95
PS+GrO@THF-DC-12	50	320	3	94
PS+GrO@THF-DC-13	50	320	5	101
PS+GrO@THF-DC-14	50	320	7	95
PS+GrO@THF-DC-15	50	320	10	89
PS@THF-DC-4	50	400	0	95
PS+GrO@THF-DC-16	50	400	1	97
PS+GrO@THF-DC-17	50	400	3	94
PS+GrO@THF-DC-18	50	400	5	93
PS+GrO@THF-DC-19	50	400	7	93
PS+GrO@THF-DC-20	50	400	10	87
PS@THF-DC-5	50	480	0	98
PS+GrO@THF-DC-21	50	480	1	98
PS+GrO@THF-DC-22	50	480	3	97
PS+GrO@THF-DC-23	50	480	5	96
PS+GrO@THF-DC-24	50	480	7	92
PS+GrO@THF-DC-25	50	480	10	89
PS+GrO@THF-DC-26	5	160	10	94
PS+GrO@THF-DC-27	5	240	10	91
PS+GrO@THF-DC-28	5	320	10	91
PS+GrO@THF-DC-29	5	400	10	91
PS+GrO@THF-DC-30	5	480	10	90

Şekil 7.4'te 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine %1, 3, 5, 7 ve 10 GrO ilavesi ile 320 mm/dk hızda kaplanan yüzeylerin SEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 7.5'ten görüldüğü gibi en düşük temas açısı elde edilen PS+GrO@THF-DC-12 ve PS+GrO@THF-DC-15


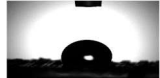




yüzeylerinde GrO yüzeye çıkmışken, diğer yüzeylerde PS yüzeyinin altında çıkıntı yaparak hapsolmuş ve oldukça düzenli yapılanma sergilemiştir.



**Şekil 7.4.** 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine % 1, 3, 5, 7 ve 10 GrO ilaveli 320 mm/dk hızda daldırarak kaplama yöntemi ile hazırlanan yüzeylerin SEM görüntüleri

50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine farklı bileşimlerde GrO ilavesi ile hazırlanan PS-GrO@THF süspansiyonlarının T1-R tasarımına ait pirana+plazma modifikasyonu yapılmış mikrodeseanlı PDMS substrat üzerine 160 mm/dk hızda daldırarak kaplama yöntemi ile kaplanması sonucunda üretilen mikrodeseanlı MD-PS+GrO@THF kompozit yüzeylere ve bu yüzeylerin KİY-1 yöntemine göre indirgenmesi ile üretilen r-MD-PS+GrO@THF kompozit yüzeylerine ait temas açısı sonuçları Tablo 7.3'te verilmiştir. Kodlamadaki MD mikrodeseanlı PDMS substratın kullanıldığını temsil etmektedir. Tablo 7.3'ten görüldüğü gibi, % 1, 3 ve 5 bileşiminde GrO ilaveli yüzeylerin hidrofobluğu yüksek iken, %7 ve 10 bileşimlerde süperhidrofob yüzeyler elde edilmiştir. Bu sonuçlar 160 mm/dk hızı için % 1, 3 ve 5 GrO ilavesi ile hazırlanmış yüzeylerde GrO'in yüzeye çıktığı, %7 ve 10 bileşimlerde ise PS yüzeyinin altında kalmasından kaynaklanabilir. İndirgenmiş kompozit yüzeyler (107-125 derece arasında hidrofobik davranış) indirgenmemiş yüzeylere göre MD-PS dışında temas açısı değerleri düşmüştür.

**Tablo 7.3.** 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine farklı bileşimlerinde GrO katkılanması ile hazırlanan PS-GrO@THF süspansiyonlarının T1-R tasarımı PDMS kalıp üzerine 160 mm/dk daldırarak kaplama hızında kaplanması ile üretilen mikrodeseanlı MD-PS+GrO@THF kompozit yüzeylerine ve bu yüzeylerin KİY-1 yöntemine göre indirgenmesi ile üretilen r-MD-PS+GrO@THF kompozit yüzeylerine ait temas açısı sonuçları

Numune Adı	GrO(%wt)	% EtOH (v/v)	Temas Açısı
MD-PS@THF-DC-6	0	1.48	113.1 
MD-PS+GrO@THF-DC-31	1	0.5	124.5 
MD-PS+GrO@THF-DC-32	3	2	123.1 
MD-PS+GrO@THF-DC-33	5	0.5	125.5 
MD-PS+GrO@THF-DC-34	7	1.25	154.5 
MD-PS+GrO@THF-DC-35	10	3	155.2 
r-MD-PS@THF-DC-6	0	1.48	121.6
r-MD-PS+GrO@THF-DC-31	1	0.5	125.2
r-MD-PS+GrO@THF-DC-32	3	2	109.8
r-MD-PS+GrO@THF-DC-33	5	0.5	123
r-MD-PS+GrO@THF-DC-34	7	1.25	107.4
r-MD-PS+GrO@THF-DC-35	10	3	110



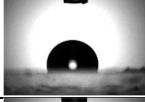
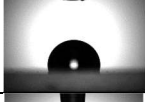
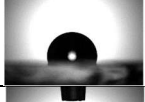
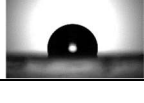
### 7.3.1.1. PS+GrO@THF Kaygan Kompozit Yüzeylerin Üretimi ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi

PS+GrO@THF kompozit yüzeylerin yağlayıcı sıvı olarak 350 Cst viskoziteli silikon yağı kullanılması ile GrO katkılı PS kompozit kaygan yüzeyler üretilmiştir. Üretilen GrO katkılı PS yüzeyler yalıtkan özellik göstermektedir. PS+GrO kompozit kaygan yüzeylerin hazırlanmasında kullanılan yağ emdirme prosedürü aşağıda belirtildiği şekilde

gerçekleştirilmiştir. Slikon yağı içine 480 mm/dk kaplama hızında PS+GrO kompozit yüzey daldırarak kaplanma yöntemi daldırılmış, Si-Oil içinde 1 dakika bekletilip çıkarılmış ve ardından fazla silikon yağını gidermek için dik konumda 1-2 sa arasında bekletilmiştir. Yağ emdirilen PS+GrO kompozit yüzeyler test edilene kadar yatay konuda desikatörde bekletilmiştir.

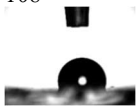
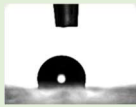
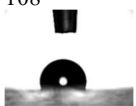
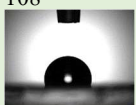
Tablo 7.4'te düz cam yüzey üzerine hazırlanmış PS+GrO kompozit yüzeylerin KİY-1 yöntemine göre kimyasal olarak indirgenmesi ile üretilen r-PS+GrO kompozit yüzeylerin Si-Oil emdirilmesi ile hazırlanan r-PS+GrO@THF kaygan yüzeylerinin, test sıvısı olarak su kullanımı ile belirlenen yağlama öncesi ve sonrası temas açısı sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.4'den görüldüğü gibi, yağlama sonrası yüm kompozit yüzeylerde temas açısı artmış ve hidrofob özellik gösteren 104-108 derece arasında temas açıları elde edilmiştir. Yani yüzeye yağ emdirme işlemi yüzeylerin hidrofob özelliğini artırmıştır.

**Tablo 7.4.** 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine %1, 3, 5, 7 ve 10 GrO ilavesi ile 320 mm/dk hızda cam yüzeyler üzerine kaplanması ile üretilen GrO katkılı PS yüzeylerin kimyasal olarak indirgenmesi ile üretilen r-PS+GrO@THF kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylere ait yağlama öncesi ve sonrası temas açısı sonuçları

Numune kodu	Yağlama Öncesi Temas Açısı (°)	Yağlama Sonrası Temas Açısı (°)	Yağlama Sonrası Damla Profili
r-PS@THF-DC-3	95	107,6	
r-PS+GrO@THF-DC-11 (% 1 GrO)	96.1	104,3	
r-PS+GrO@THF-DC-12 (% 3 GrO)	96	108,6	
r-PS+GrO@THF-DC-13 (% 5 GrO)	95.5	106,9	
r-PS+GrO@THF-DC-14 (% 7 GrO)	98.4	108,4	
r-PS+GrO@THF-DC-15 (% 10 GrO)	98	107,6	

Tablo 7.5’de PS çözeltisine %3 ve 10 GrO ilavesi ile cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin temas açısı sonuçları, farklı test sıvısı (DI-su) miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.5’de (=) sembolü yüzey yatay konumdayken yani eğiklik yokken ölçülen sonuçları, (/) sembolü yüzeye eğiklik verildiğini, aynı miktarda test sıvısı için belirlenen en küçük kayma açısı (SA) sıvı damlanın ilk kaydığı kayma açısı değerini ve daha büyük olanlar ise farklı eğimlerde belirlenen kayma açısı sonuçlarını göstermektedir. Tablo 7.5’den görüldüğü gibi, kaygan PS yüzeye göre GrO katkılanmış PS yüzeylerde kayma açısı düşmüş ve kayma hızı artmıştır. Ayrıca beklendiği gibi kayma açısının artması ile kayma hızı artmıştır. %10 GrO katkılanmış PS kompozit yüzey ve bu yüzeyin indirgenmesi üretilen yüzeyde ise indirgenme işlemi kayma açısının artmasına ve aynı kayma açısında kayma hızının azalmasına neden olmuştur. Bu sonuçlar GrO katkılama ve indirgeme işleminin yüzeydeki pürüzlülüğü artırması ile ilişkili olabilir.

**Tablo 7.5.** 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine %3ve 10 GrO ilavesi ile 320 mm/dk hızda cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin temas açısı sonuçları, farklı test sıvısı (DI-su) miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları

Numune Kodu Test Sıvısı DI-su	Yağlama Öncesi $\theta(^{\circ})$ (=)	Yağlama Sonrası $q(^{\circ})$ (=)	$\theta_{adv}$ ( $^{\circ}$ ) (/)	$\theta_{rec}$ ( $^{\circ}$ ) (/)	CAH	Damla Hacmi ( $\mu\text{L}$ )	SA ( $^{\circ}$ ) (/)	$V_{ort}$ (mm/s)
PS@THF-DC-3	97	108 	109	94	15	4 4 4	50 70 90	0.0149 0.0188 0.0363
PS+GrO@THF-DC-12 (% 3 GrO)	94	110 	112	98	14	3 3 3 3 4 4 4 4	45 60 75 90 45 60 75 90	0.0126 0.0136 0.0199 0.0303 0.0173 0.0234 0.0263 0.0534
PS+GrO@THF-DC-15 (% 10 GrO)	89	108 	110	99	11	4 4 4 4	45 60 75 90	0.0136 0.0265 0.0710 0.0803
r-PS+GrO@THF-DC-15 (% 10 GrO)	98	108 	110	94	16	4 4	60 90	0.0144 0.0229

Tablo 7.6’da PS çözeltisine %3 ve 10 GrO ilavesi ile cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF kompozit yüzeylerinin ve ayrıca bu yüzeylerin kimyasal olarak indirgenmesi ile üretilen r-PS+GrO@THF kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin temas açısı sonuçları, KCl test sıvısının farklı miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.6’dan görüldüğü gibi, kaygan PS yüzeye göre GrO katkılanmış PS yüzeylerde kayma açısı değişmemiş ancak kayma hızı artmıştır. Ayrıca beklendiği gibi kayma açısının artması ile kayma hızı artmıştır. %3 ve 10 GrO katkılanmış PS kompozit yüzey ve bu yüzeyin indirgenmesi üretilen yüzeyde ise indirgenme işlemi kayma açısının artmasına ve aynı kayma açısında kayma hızının azalmasına neden olmuştur. Bu sonuçlar GrO katkılama ve indirgeme işleminin yüzeydeki pürüzlülüğün artırması ile ilişkili olarak damlanın yavaş hareket ettirilmesi hedeflenen uygulamalar için potansiyel oluşturabilir.

**Tablo 7.6.** 50 mg/mL konsantrasyonlu PS çözeltisine GrO ilavesi ile 320 mm/dk hızda cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin farklı KCl test sıvısı miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları

Numune Kodu Test Sıvısı KCl	Damla Hacmi ( $\mu$ L)	SA ( $^{\circ}$ ) (//)	V <sub>ort</sub> (mm/s)
PS@THF-DC-3	3	45	0.0015
	3	60	0.0190
	3	75	0.0197
	3	90	0.0217
PS+GrO@THF-DC-12 (% 3 GrO)	3	45	0.0089
	3	60	0.0104
	3	75	0.0154
	3	90	0.0196
	4	40	0.0158
	4	60	0.0200
	4	80	0.0260
	4	90	0.1175
PS+GrO@THF-DC-15 (% 10 GrO)	4	45	0.0158
	4	60	0.1770
	4	75	0.2196
	4	90	0.4548
r-PS+GrO@THF-DC-12 (% 3 GrO)	4	80	0.0015
r-PS+GrO@THF-DC-15 (% 10 GrO)	4	90	0.0084

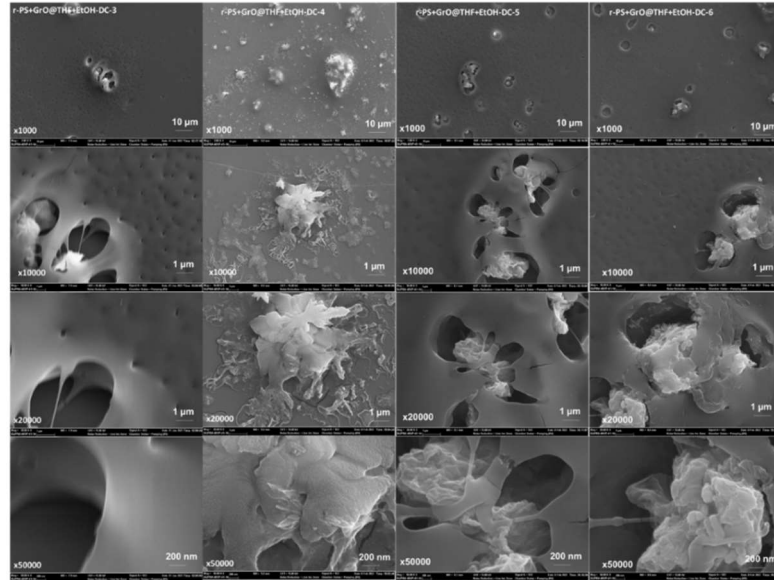
### 7.3.2. PS+GrO@THF+EtOH Kompozit Yüzeylerin Üretimi ve Karakterizasyonu

PS çözeltisine ağırlıkça %1-10 arasında GrO toz ilave edilmesi hazırlanan PS-GrO@THF süspansiyonlarına bulanma noktası öncesine kadar çöktürücü solvent (Etanol,EtOH) ilavesi ile hazırlanan PS-GrO@THF+EtOH süspansiyonlarından cam lameller üzerine 320 mm/dk kaplama hızında daldırarak kaplama yöntemi ile kaplanması ile üretilen PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerine ait çöktürücü solvent miktarı ve temas açısı sonuçları Tablo 7.7'de yer almaktadır. Tablo 7.7'den görüldüğü gibi PS'ne bulanma noktası öncesine kadar EtOH ilave edilmesi ile hazırlanan yüzeyin temas açısı 100.2 ve hidrofob özelliktedir. PS-GrO@THF süspansiyonlara bulanma noktası öncesine kadar EtOH ilavesi ile hazırlanan PS-GrO@THF+EtOH süspansiyonlarından üretilen farklı GrO bileşimlerdeki tüm PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinde GrO ilavesi ile pürüzlülük artışına rağmen (Şekil 7.5) temas açılarındaki düşme GrO'in yüzeye çıkma eğilimi ve OH, COOH gibi fonksiyonel gruplarından dolayı hidrofob özellik göstermesinden kaynaklanır. PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinin indirgenmesi ile ise tüm indirgenmiş yüzeylerde ortalama  $96 \pm 1^\circ$  temas açısı değeri elde edilmiştir.

**Tablo 7.7.** 50 mg/ml konsantrasyonlu PS çözeltisine farklı bileşimlerde GrO ilavesi ile hazırlanan PS-GrO@THF süspansiyonlarına bulanma noktası öncesine kadar çöktürücü solvent ilavesi ile hazırlanan PS-GrO@THF+EtOH süspansiyonlarından cam lameller üzerine 320 mm/dk kaplama hızında daldırarak kaplama yöntemi ile kaplanması ile üretilen PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerine ait temas açısı sonuçları

Numune Kodu	GrO(%w)	%EtOH(v/v)	TemasAçısı(°)
PS@THF+EtOH-DC-1	0	1.48	100.2
PS+GrO@THF+EtOH-DC-2	1	0.50	95.8
PS+GrO @THF+EtOH-DC-3	3	2.00	90.5
PS+GrO @THF+EtOH-DC-4	5	0.50	93.9
PS+GrO @THF+EtOH-DC-5	7	1.25	90.0
PS+GrO @THF+EtOH-DC-6	10	3.00	95.5
r-(PS@THF+EtOH-DC-1)	0	1.48	96.7
r-(PS+GrO@THF+ EtOHDC2)	1	0.50	95.7
r-(PS+GrO@THF+EtOH-DC3)	3	2.00	95.1
r-(PS+GrO@THF+EtOH-DC4)	5	0.50	96.6
r-(PS+GrO@THF+EtOH-DC5)	7	1.25	95.6
r-(PS+GrO@THF+EtOH-DC6)	10	3.00	99.0

Şekil 7.5 de 50 mg/ml konsantrasyonlu PS çözeltisine farklı bileşimlerde GrO ilavesi ile hazırlanan PS-GrO@THF süspansiyonlarına bulanma noktası öncesine kadar çöktürücü solvent ilavesi ile hazırlanan PS-GrO@THF+EtOH süspansiyonlarından cam lameller üzerine 320 mm/dk kaplama hızında daldırarak kaplama yöntemi ile kaplanması ile üretilen PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinin indirgenmesi ile üretilen r-PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerine ait SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 7.5'ten görüldüğü gibi % 5 GrO ilavesi dışındaki tüm yüzeylerde GrO'in lokal olarak PS içerisine gömülü şekilde yüzeye çıktığı, % 5 bileşiminde ise aglomere parçacıklar halinde yüzeyde yer aldığı görülmektedir. İndirgeme işlemi sonrasında üretilen tüm r-PS+GrO@THF+EtOH yüzeyler için iletkenlik ölçülememiştir ki bu sonuçlar yüzey her ne kadar tabakalı yapıya sahip grafen benzeri yapılar içerse de bunların yüzeyde birbirleri ile bağlantısı olmamasından kaynaklanmış olabileceğini SEM görüntüleri ve temas açısı sonuçları desteklemektedir.




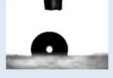




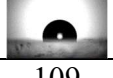


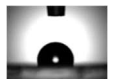


**Şekil 7.5.** r-PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerine ait SEM görüntüler

### 7.3.2.1 PS+GrO@THF+EtOH Kaygan Kompozit Yüzeylerin Üretimi ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi

50 mg/ml PS çözeltisine GrO katkılanmış süspansiyonlara farklı bileşimlerde EtOH ilavesi ile 320 mm/dk hızda cam substrat üzerine bulanma noktası öncesinde üretilen PS/GrO yüzeylerinin ve bu yüzeylerin indirgenmesi ile üretilen r-PS/1GrO yüzeylerine 350 Cst viskoziteli silikon yağı emdirilmesi hazırlanan kaygan yüzeylere ait temas açısı sonuçları Tablo 7.8'de verilmiştir. Tablo 7.8'den görüldüğü gibi, üretilen tüm yüzeylerde yağlama sonrası temas açısı artmıştır.



**Tablo 7.8.** PS-GrO@THF+EtOH süspansiyonlarından cam lameller üzerine 320 mm/dk kaplama hızında daldırarak kaplama yöntemi ile üretilen PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinin 350Cst viskoziteli silikon yağı emdirilerek hazırlanan kaygan yüzeylere ait temas açısı sonuçları

Numune Kodu	GrO (%wt)	Yağ emdirme öncesi	Yağ emdirme sonrası
		$\theta_e$ (°)	$\theta_e$ (°)
PS@THF+EtOH-DC-1	0	100.2	106 
PS+GrO@THF+EtOH-DC-2	1	95.8	109 
PS+GrO @THF+EtOH-DC-3	3	90.5	111 
PS+GrO @THF+EtOH-DC-4	5	93.9	109 
PS+GrO @THF+EtOH-DC-5	7	90.0	110,2 
PS+GrO @THF+EtOH-DC-6	10	95.5	108.3 
r-(PS@THF+EtOH-DC-1)	0	96.7	108 
r-(PS+GrO@THF+ EtOH-DC-2)	1	95.7	104.3 
r-(PS+GrO@THF+EtOH-DC-3)	3	95.1	109 
r-(PS+GrO@THF+EtOH-DC-4)	5	96.6	107 
r-(PS+GrO@THF+EtOH-DC-5)	7	95.6	108.4 
r-(PS+GrO@THF+EtOH-DC-6)	10	99.0	108 

Tablo 7.9 da PS çözeltisine %3 ve %10 GrO ilavesi sonrası bulanma noktası öncesinde EtOH ilavesi ile cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin farklı test sıvısı (DI-su) miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.9'dan görüldüğü gibi, kaygan PS yüzeye göre GrO katkılanmış PS yüzeylerde kayma açısı değişmemiş ve kayma hızı ise % 3 GrO katkılanmada en düşükken, %10 GrO katkılanmış yüzeyde en yüksektir. Yani GrO katkılama oranının artması ile muhtemelen pürüzlülükteki artışa bağlı olarak kayma hızı artmıştır. Ayrıca beklendiği gibi kayma açısının artması ile kayma hızı artmıştır. Bu sonuçlar GrO katkılama işleminin EtOH ilavesi ile hazırlanan yüzeylerde düşük katkılama oranlarında GrO'nun yüzeye çıkma eğilimi azaltması ile ilişkili olabilir.

**Tablo 7.9.** PS çözeltisine %3ve 10 GrO ilavesi sonrası bulanma noktası öncesinde EtOH ilavesi ile cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin farklı test sıvısı (DI-su) miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları

Numune Kodu Test Sıvısı DI-su	Damla Hacmi ( $\mu$ L)	SA ( $^{\circ}$ ) (//)	V <sub>ort</sub> (mm/s)
PS@THF+EtOH-DC-1	4	45	0.0166
	4	65	0.0224
	4	90	0.0543
PS+GrO@THF+EtOH-DC-3 (% 3 GrO)	3	60	0.0104
	3	75	0.0121
	3	90	0.0137
	4	45	0.1090
	4	60	0.1960
	4	75	0.0260
	4	90	0.0316
PS+GrO@THF+EtOH-DC-6 (% 10 GrO)	3	45	0.0135
	3	60	0.0253
	3	90	0.0254
	4	45	0.0208
	4	60	0.0922
	4	75	0.1128
	4	90	0.1397

Tablo 7.10'da PS çözeltisine %3 ve % 10 GrO ilavesi sonrası bulanma noktası öncesinde EtOH ilavesi ile cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF+EtOH ve r-PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin farklı test sıvısı (KCl) miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.10'dan görüldüğü gibi, kaygan PS yüzeye göre GrO katkılanmış PS yüzeylerde kayma açısı GrO katkılama miktarındaki artışla kısmen azalmış, kayma hızı ise 3  $\mu$ L KCl test sıvısı için artarken, 4  $\mu$ L KCl test sıvısı için azalmıştır. Bu durum 3 $\mu$ L KCl damla

hacminde yüzey özelliklerinin baskın olduğunu yüzey pürüzlülüğündeki artışa bağlı olarak kayma hızının arttığı söylenebilir. 4 µL KCl test sıvısı ile gerçekleştirilen kayma hızı belirleme denemelerinde tespit edilen ters kayma hızı trendinin nedeni, daha düşük kayma açısında test sıvısının kayması ve daha büyük damla hacminden kaynaklanan yerçekimine bağlı kuvvetin artmasından kaynaklanabilir. Ayrıca tüm yüzeylerde beklendiği gibi kayma açısının kademeli olarak artması ile kayma hızı artmıştır. Aynı GrO bileşimde katkılanmış indirgenmiş r-PS+GrO@THF+EtOH-DC-3(% 3 GrO) ve r-PS+GrO@THF+EtOH-DC-6 (% 10 GrO) yüzeylerde ise kayma açısı artmış kayma hızı azalmıştır. Yani yüzeydeki sürtünme artmıştır.

**Tablo 7.10.** PS çözeltisine %3 ve 10 GrO ilavesi sonrası bulanma noktası öncesinde EtOH ilavesi ile cam yüzeyler üzerinde üretilen PS+GrO@THF+EtOH ve PS+GrO@THF+EtOH kompozit yüzeylerinin Si-Oil ile yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin farklı test sıvısı (KCl) miktarları için kayma açısı ve kayma hızı sonuçları

Numune Kodu Test Sıvısı KCl	Damla Hacmi (µL)	SA (°) (//)	V <sub>ort</sub> (mm/s)
PS@THF+EtOH-DC-1	4	45	0.0147
	4	60	0.0155
	4	75	0.0186
	4	90	0.0625
PS+GrO@THF+EtOH-DC-3 (% 3 GrO)	3	60	0.0237
	3	75	0.0291
	3	90	0.0337
	4	45	0.0262
	4	60	0.0442
	4	75	0.0498
	4	90	0.0726
PS+GrO@THF+EtOH-DC-6 (% 10 GrO)	3	45	0.0335
	3	60	0.0507
	3	75	0.0902
	3	90	0.0973
	4	40	0.0237
	4	60	0.0421
	4	80	0.0870
	4	90	0.1819
r-PS+GrO@THF+EtOH-DC-3 (% 3 GrO)	4	75	0.0265
	4	90	0.0295
r-PS+GrO@THF+EtOH-DC-6 (% 10 GrO)	4	60	0.0112
	4	90	0.0402

## **7.4. Su Ortamında Dispers Edilmiş GO Dispersiyonlarının Katkılandığı PS Kompozit Kaygan Yüzeylerin Üretimi, Karakterizasyonu ve Kaygan Yüzey Performansının Belirlenmesi**

Grafen bazlı polimer film üretiminde polimer olarak PS kullanılmış ve PS çözeltisi THF ortamında hazırlanmıştır. Kullanılan THF suda % 60 oranında dispers olma özelliği sahiptir ve bu özellik su ortamında daha fazla tabakalanan GO dispersiyonlarının PS çözeltisine faz göstermeden katkılanmasına olanak sağlar. Şöyle ki; PS, THF içerisinde çözünür ancak su içerisinde çözünmez ve su PS için nonsolventtir yani PS'ni çöktürür. Ancak PS çözeltisinin su ile homojen karışım veren THF içerisinde hazırlanması, PS çözeltisine belli bir orana kadar su içerisinde dispers olmuş GO katkılanmayı mümkün kılar. Bu durum su içerisinde daha yüksek tabakalanma derecesine sahip GO'in PS'ne katkılanmasına ve dolayısıyla indirgenme sonrasında iletkenlik elde edilmesine neden olabilir. Bu nedenle, düz, pürüzlü ve mikrodeseanlı substratlar üzerinde PS/GO<sub>w</sub> yüzeyler hazırlanarak ve daha sonra bu yüzeyler indirgenerek grafen katkılı PS kompozit yüzeyler hazırlanmıştır.


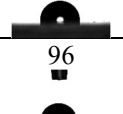
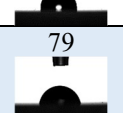

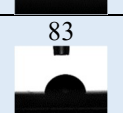
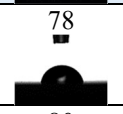

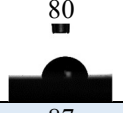
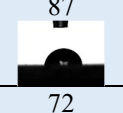
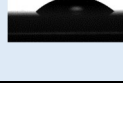
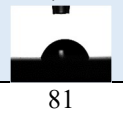
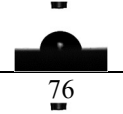

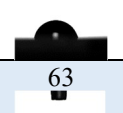
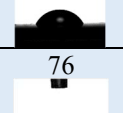
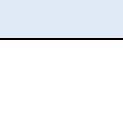
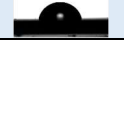
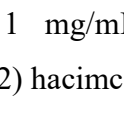
### **7.4.1. Düz Cam substrat üzerine PS/GO<sub>w</sub> ve r-PS/GO<sub>w</sub> Kompozit Yüzeylerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu**

Su içerisinde hazırlanmış 10 mg/mL konsantrasyonlu GO'in (GO@Su-2) % 5, 25, 50 ve 75 oranlarında su ile dispers olan THF içerisinde 1mg/mL konsantrasyonda hazırlanmış PS çözeltisine (PS@THF) katkılanması ve ardından düz cam üzerine 1600 mm/dk kaplama hızında kaplanması ve 1/13 ve/veya 2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenmesi ile PS-GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyler üretilmiştir. Süspansiyonlar farklı bileşimler sağlanacak hacim oranlarında GO@Su-2 ve PS@THF çözeltilerinin karıştırılması ve 48 saat magnetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra 2 sa 35 kHz sonikasyon gücünde ultra sonikasyona tabi tutulması ile hazırlanmıştır. Hazırlanan farklı bileşimlerdeki PS/GO<sub>w</sub> süspansiyonları 1 kat ve 2 kat olarak farklı kaplama sayılarında 1600 mm/dk kaplama hızında düz cam, pürüzlü (rodajlı) cam ve yönlendirilmiş pürüzlülüğe sahip PDMS şablon üzerine kaplanarak PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri üretilmiştir. Üretilen farklı bileşimli PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri 1/13 ve 2/26 HI/Ac indirgeme ortamında indirgenerek R-PS/GO<sub>w</sub> yüzeyler üretilmiştir.

Tablo 7.11'te su ile dispers olabilen THF içerisinde hazırlanmış 1 mg/mL konsantrasyonlu PS ve 10 mg/mL konsantrasyonda GO dispersiyonunun (GO@Su-2) hacimce % 5, 25, 50 ve 75 oranında karıştırılması ile üretilen PS/GO<sub>w</sub> süspansiyonunun düz cam üzerine

1600 mm/dk kaplama hızında kaplanması ile üretilen PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen R-(PS/GO<sub>w</sub>) yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.11'ten görüldüğü PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerinde GO bileşimi % 50'ye kadar katkılıandığında bileşimin artışı ile iletkenlik değerleri artmış ve % 50'nin üzerinde GO katkılıandığında iletkenlik değerleri düşmüştür. En yüksek iletkenlik %50 GO katkılama ile üretilen ve 2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenen R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>1Kat</sub> yüzeyinde elde edilmiştir. R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>1Kat</sub> yüzeyinin iletkenlik değeri 33.59 S/cm iken R<sub>2/26</sub>-(GO<sub>w</sub>)<sub>1Kat</sub> grafen yüzeyinin iletkenliği 369.80 S/cm'dir. PS yalıtkan bir malzemedir ve PS'ne %50 GO katkılanması ile aynı koşulda hazırlanmış grafen yüzeyine oranla yaklaşık 10 kat daha düşük iletkenlikte yüzey elde edilmiştir ve PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri arasında en fazla PS yüzeyine GO'in çıktığı yüzey %50 GO katkılanan 2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenen kompozit grafen yüzeyi olmuştur. PS yüzeyi hidrofob ( $\theta=99^\circ$ ) ve GO yüzeyi hidrofil ( $\theta=52^\circ$ ) özellik gösterir. PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ise hidrofil özellik göstermekle birlikte farklı bileşimlerin hepsinde GO'in temas açısı değerinden daha düşük temas açısı değerleri elde edilmiştir. Bu durum PS yüzeyine hidrofil GO'in yüzeye çıktığına işaret eder. PS/GO<sub>w</sub> yüzeylerinin indirgenmesi sonrasında tüm bileşimler için temas açısı artmış ve 1/13 HI/Ac indirgeme şartı için  $83\pm 5^\circ$  ve 2/26 HI/Ac indirgeme koşulu için ise  $80\pm 3^\circ$  arasında temas açısına sahiptir. PS yüzeyi indirgeme sonrasında  $95^\circ$  civarında, GO yüzeyi ise 1/13 HI/Ac indirgeme şartında  $63^\circ$  ve 2/26 HI/Ac indirgeme şartında ise  $76^\circ$  temas açısına sahiptir. GO'in 2/26 indirgeme koşulunda indirgenmesi üretilen grafen en yüksek iletkenlik vermektedir. Benzer durum PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri içinde geçerlidir. Sonuç olarak 2/26 HI/Ac indirgeme şartında 1/13 indirgeme şartında indirgenen PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerine göre temas açısındaki artış GO'in oksijen içeren gruplarındaki kayıpla ilişkilidir ve yüzeydeki oksijen içeren grupların daha fazla azaldığı söylenebilir.
















**Tablo 7.11.** Farklı karışım bileşimlerinde PS-GO<sub>w</sub> süspansiyonlarından düz cam üzerine 1 kat kaplanarak üretilen PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen r-PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları

İndirgeme Öncesi		İndirgeme Sonrası			
Numune Kodu	CA (°) ve Damla Profili	Numune Kodu	Kaplama Kalınlığı (µm)	İletkenlik (S/cm)	CA (°) ve Damla Profili
(PS) <sub>1Kat</sub>	99 	R <sub>1/13</sub> -(PS) <sub>1Kat</sub>	0.00006	N.A	95 
		R <sub>2/26</sub> -(PS) <sub>1Kat</sub>	0.00006	N.A	96 
(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	42 	R <sub>1/13</sub> -(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.00582	4.18	79 
		R <sub>2/26</sub> -(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.00349	5.44	83 
(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	42 	R <sub>1/13</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.01505	11.76	78 
		R <sub>2/26</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.01142	12.79	80 
(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	40 	R <sub>1/13</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.02515	15.90	87 
		R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.02024	33.59	72 
(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	44 	R <sub>1/13</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.02460	8.47	81 
		R <sub>2/26</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.02220	9.52	76 
(GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	52 	R <sub>1/13</sub> -(GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.03280	261.58	63 
		R <sub>2/26</sub> -(GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.03330	369.80	76 

Tablo 7.12’de su ile dispers olabilen THF içerisinde hazırlanmış 1 mg/mL konsantrasyonlu PS ve 10 mg/mL konsantrasyonda GO dispersiyonunun (GO@Su-2) hacimce % 5, 25, 50 ve 75 oranında karıştırılması ile üretilen PS/GO<sub>w</sub> süspansiyonları ile *düz cam*

üzerine 1600 mm/dk kaplama hızında 2 kat kaplanması ile üretilen PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen R-(PS/GO<sub>w</sub>)<sub>2kat</sub> grafen katkılı kompozit yüzeylere ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.12'den görüldüğü gibi PS/GO<sub>w</sub> karışımlarında 1/13 HI/Ac indirgeme ortamında indirgenen grafen-PS kompozit yüzeylerinde GO bileşimi % 50'de en düşük iletkenlik ve en yüksek temas açısı elde edilmişken, aynı bileşimde 2/26 HI/Ac indirgenme oranında en yüksek iletkenlik ve temas açısı değeri elde edilmiştir. Bu durum bu yüzeyin kalınlığının diğer yüzeylere göre daha fazla olması ve 1/13 HI/Ac indirgenme şartında yüzeye etkin olan indirgeyici miktarının yetersiz gelmesinden kaynaklanabilir. 2/26 HI/Ac indirgenme şartında tüm bileşimler için 1/13 HI/Ac indirgenme şartına göre daha yüksek iletkenlik ve temas açısı değerleri elde edilmiştir. PS yalıtkan bir malzemedir ve PS'ne %50 GO katkılanması ile hazırlanan kompozit yüzeyi, grafen yüzeyine oranla 2/26HI/Ac indirgenme şartında yaklaşık 10 kat daha düşük iletkenlikte yüzey elde edilmiştir ve PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri arasında en fazla PS yüzeyine GO'in çıktığı yüzey %50 GO katkılanan 2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenen kompozit grafen yüzeyi olduğu söylenebilir. PS yüzeyi hidrofob ( $\theta=99^\circ$ ) ve GO yüzeyi hidrofil ( $\theta=59^\circ$ ) özellik gösterir. PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri ise hidrofil özellik göstermekle birlikte farklı bileşimlerin hepsinde GO'in temas açısı değerinden daha düşük temas açısı değerleri elde edilmiştir. Bu durum PS yüzeyine hidrofil GO'in yüzeye çıktığına işaret eder. PS/GO<sub>w</sub> yüzeylerinin indirgenmesi sonrasında tüm bileşimler için temas açısı artmış ve 1/13 HI/Ac indirgeme şartı için  $81\pm 3^\circ$  ve 2/26 HI/Ac indirgeme koşulu için ise  $81\pm 5^\circ$  arasında temas açısına sahiptir. İndirgeme sonrasında GO yüzeyi ise 1/13 HI/Ac indirgeme şartında  $75^\circ$  ve 2/26 HI/Ac indirgeme şartında ise  $76^\circ$  temas açısına sahiptir. GO'in 2/26 indirgeme koşulunda indirgenmesi üretilen grafen en yüksek iletkenlik vermektedir. Benzer durum PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri içinde geçerlidir. Sonuç olarak 2/26 HI/Ac indirgeme şartında 1/13 indirgeme şartında indirgenen PS/GO<sub>w</sub> yüzeylerine göre temas açısındaki artış GO'in oksijen içeren gruplarındaki kayıpla ilişkilidir ve yüzeydeki oksijen içeren grupların daha fazla azaldığı söylenebilir.

**Tablo 7.12.** Farklı karışım oranlarında PS/GO<sub>w</sub> süspansiyonlarının Düz Cam üzerine 2 kat kaplanması ile üretilen PS-GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen R-PS-GO<sub>w</sub> yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları

İndirgeme Öncesi		İndirgeme Sonrası			
Numune Kodu	CA (o) ve Damla Profili	Numune Kodu	Kaplama Kalınlığı (µm)	İletkenlik (S/cm)	CA (o) ve Damla Profili
(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	51 	R <sub>1/13</sub> -(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.03141	5.00	81 
		R <sub>2/26</sub> -(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.02443	5.89	77 
(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	45 	R <sub>1/13</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.06696	16.53	80 
		R <sub>2/26</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.05606	16.89	78 
(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	56 	R <sub>1/13</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.14446	4.06	84 
		R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.13710	21.22	86 
(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	35 	R <sub>1/13</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.10056	16.90	79 
		R <sub>2/26</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.09860	16.83	83 
(GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	59 	R <sub>1/13</sub> -(GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.0422	130.25	75 
		R <sub>2/26</sub> -(GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.0433	231.41	76 

#### 7.4.1.1. Düz Cam substrat üzerine PS/GO<sub>w</sub> ve r-PS/GO<sub>w</sub> Kaygan Kompozit Yüzeylerin Hazırlanması ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi

PS/GO<sub>w</sub> ve r-PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerin yağlayıcı sıvı olarak silikon yağı ve sıvı parafin kullanılması ile PS-GO<sub>w</sub> kompozit kaygan yüzeyler üretilmiş ve bu yüzeylerin kayma açısı ve kayma hızları temas açısı ölçümleri ve hızlı kamera görüntülerinin İmage j programında işlenmesi ile belirlenmiştir. Tablo 7.13 de 3, 5 ve 8µl *DI-Su* test sıvısı için *düz cam* üzerine farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartları ve GO<sub>w</sub> katkılama oranında hazırlanan PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerine 500 CSt viskoziteli *Si-Oil* emdirilerek üretilen kaygan kompozit



yüzeylerin kayma performans sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.13'ten görüldüğü gibi PS ve PS'ne % hacimce 5, 25, 50 ve 75 karışım oranında 10 mg/mL konsantrasyonlu GOw dispersiyonun ilavesi ile hazırlanan PS/GOw kompozit yüzeylerinin 2/26 HI/Ac asit oranında indirgenmesi sonucunda üretilen R<sub>2/26</sub>-PS/GOw kompozit yüzeylerin denge temas açıları PS yüzeyi dışında R<sub>2/26</sub>-PS/GOw kompozit kaygan yüzeyleri için azalmıştır.

Kayma açısının en düşük bulunduğu katkılama oranı % 50 GOw olarak belirlenmiştir (Tablo 7.13) ve bu sonuç % 50 karışım oranında en yüksek kayma hızı elde edilme beklentisini doğursa da kayma hızı ve CAH değerleri bu sonuçla örtüşmemektedir. Kayma hızının en yüksek olduğu ve CAH değerinin en düşük olduğu kaygan yüzey % 5 GOw katkılanarak hazırlanmış R<sub>2/26</sub>-(%95PS+%5GOw)<sub>2Kat</sub> kaygan yüzeyidir. Dolayısıyla bu sonuç dış uyaran ile damla hareketinin kontrolünde en iyi SLIP özelliğinin bu bileşimde elde edilebileceği öngörüsünün geliştirilmesine neden olabilir. Dış uyaran ile kontrolde yüzeyin iletkenlik değerinin de önemli bir parametre olması nedeni ile dış uyaran karşısında akıllı tepki performans denemelerinde hem % 5 hemde % 50 GOw katkılanmış yüzeylerin seçilmesi uygun olur.

Kayma açıları 8µl *DI-Su* test sıvısı için belirlenmiştir ve test sıvısı hacminin azalması ile damla ağırlık kuvvet bileşimindeki azalmadan kaynaklı doğal beklentiyi kayma hızlarındaki azalma doğrulamıştır. 2/26 HI/Ac asit oranında indirgenmiş farklı bileşimlerdeki PS/GOw kompozit kaygan yüzeylerinde CAH değeri 0.5-6° arasında elde edilmiştir ki bu sonuçlar literatürde yer alan SLIP yüzeylerin maksimum 5° CAH değerine sahip olması bilgisi ile örtüşmektedir. En yüksek kayma hızı 8µl test sıvısı miktarında elde edilirken test sıvısı hacminin azalması kayma hızında azalmaya neden olmuştur.

2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenmiş % 50-50 PS-GO<sub>(w)</sub> kompozit yüzeyler diğer katkılama oranları arasında en yüksek iletkenlik değerine sahiptir (Tablo 7.13) ve bu yüzden dış uyaran ile manipülasyon için en elverişli katkılama oranı olduğu söylenebilir. % 50-50 PS-GO<sub>(w)</sub> kompozit yüzeyler için, her ne kadar kaplama kalınlığının artması (1 ve 2 kat) ile sınır kayma açısı en düşük olarak gerçekleşirken, fiziksel vektörlerin zemin/temas yüzeyi lehine artmış olması nedeniyle 1/13 ve 2/26 şartında tek kat kaplamalara kıyasla kayma hızı azalma eğilimi göstermiştir. Sonuç olarak; bu yüzeyler için damlanın bir yerden başka bir yere hareket ettirilmesi için hedeflenen süreye göre hız sonuçlarına göre seçim yapılarak sıvı damla hedeflenen yolu belli sürede alması sağlanabilir.

**Tablo 7.13.** 3, 5 ve 8 $\mu$ l *DI-Su* test sıvısı için *düz cam* üzerine *Si-Oil* emdirilerek farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartı ve  $GO_w$  katkılama oranında hazırlanan PS/ $GO_w$  kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları

Numune Kodu/ İletkenlik (S/cm) Yağ emdirme Öncesi $\theta_e$ (°)  Si-Oil Emdirilmiş Test Sıvısı: DI-SU	$\theta_e$ (°) (@4 $\mu$ L DI-su)	SA (//) (°)	DI-su ( $\mu$ L)	$\theta_{adv}$ (//) (°)	$\theta_{rec}$ (//) (°)	CAH (°)	Kayma Hızı @SA (mm/s)
PS <sub>1</sub> mg/ml NA $\theta_e = 102^\circ$		11 	8 5 3	73.3 78.5 73.2	70.5 74.7 73.0	2.8 3.8 0.2	0.31 0.12 0.10
R <sub>2/26</sub> -(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> 5.4 S/cm $\theta_e = 77^\circ$		30 	8 5 3	86.7 86.2 86.3	86.2 83.6 84.1	<b>0.5</b> 2.6 2.2	<b>0.95</b> <b>0.72</b> <b>0.41</b>
R <sub>2/26</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> 16.89 S/cm $\theta_e = 78^\circ$		27.4 	8 5 3	87.5 91.0 -	85.1 87.0 -	2.4 4.0 -	1.68 0.57 Kaymadı
R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> 21.22 $\theta_e = 86^\circ$		7 	8 5 3	86.4 85.0 84.0	81.0 81.0 82.2	0.7 4.0 1.8	0.17 0.108 0.11
R <sub>2/26</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> 16.83 $\theta_e = 83^\circ$		26.6 	8 5 3	91.1 88.0 85.0	86.6 82.0 83.6	0.6 6.0 1.4	1.83 0.64 0.34
(50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> NA $\theta_e = 56^\circ$		90 	8	-	-	-	Kaymadı
R <sub>1/13</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub> 15.90 S/cm $\theta_e = 87^\circ$		27.1 	8 5 3	88.0 88.4 96.3	81.1 86.0 81.0	6.9 2.4 15.3	0.87 0.72 0.19
R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub> 33.59 S/cm $\theta_e = 72^\circ$		23 	8 5 3	95.4 94.5 86.7	90.4 90.0 84.2	5.0 4.5 2.5	0.84 0.39 0.25
R <sub>1/13</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> 4.06 S/cm $\theta_e = 84^\circ$		20 	8 5 3	76.0 85.3 86.7	71.0 76.0 80.0	5.0 9.3 6.7	0.80 0.39 0.20

Tablo 7.14 de 3, 5 ve 8 $\mu$ l *DI-Su* test sıvısı için *düz cam* üzerine farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartları ve  $GO_w$  katkılama oranında hazırlanan PS/ $GO_w$  kompozit yüzeylerine *Sıvı Parafin* emdirilerek üretilen kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.14'ten görüldüğü gibi PS ve PS'e % hacimce 5, 25, 50 ve 75 karışım oranında 10 mg/mL konsantrasyonlu  $GO_w$  dispersiyonun ilavesi ile hazırlanan PS/ $GO_w$  kompozit yüzeylerinin 2/26 HI/Ac asit oranında indirgenmesi sonucunda üretilen R<sub>2/26</sub>-PS/ $GO_w$  kompozit yüzeylerin denge temas açıları PS ve % 50  $GO_w$  katkılanmış R<sub>2/26</sub>-PS/ $GO_w$  yüzeyi dışında sıvı parafin emdirilmiş R<sub>2/26</sub>-PS/ $GO_w$  kompozit kaygan yüzeyleri için artmıştır. Bu durum aynı yüzeylere Si-Oil emdirilerek hazırlanmış R<sub>2/26</sub>-PS/ $GO_w$  kompozit kaygan



















yüzeylerde belirlenen temas açısı eğiliminin (Tablo 7.13) tersi çıkmıştır. Bu durumun sebebi sıvı parafinin Si-Oil'e göre daha hidrofob olan doğasından ve iki yağlayıcı sıvının viskoziteleri arasındaki farklılıktan (Si-Oil sıvı parafinden yaklaşık 5 kat daha viskoz) kaynaklanabilir.

Farklı GOw bileşimlerindeki R<sub>2/26</sub>-PS/GOw kompozit kaygan yüzeylerde 8µl DI-Su test sıvısı için kayma açısının en düşük bulunduğu katkılama oranı % 50 GOw olarak belirlenmiştir. Farklı GOw katkılama oranlarında hazırlan R<sub>2/26</sub>-PS/GOw-2-kat kompozit kaygan yüzeylerde test sıvısı miktarlarına bağlı olarak kayma hızı yüksek olan katkılama oranı değişmiştir (Tablo 7.14). Test sıvısı miktarına bağlı olarak en yüksek kayma hızlarındaki değişim şöyledir: 8µl DI-Su test sıvısı için % 5 GOw katkılama oranı, 5µl DI-Su test sıvısı için % 50 GOw katkılama oranı ve 3µl DI-Su test sıvısı için % 75 GOw katkılama oranı. Yani test sıvısı miktarındaki artış ile GOw katkılama oranı ters eğilim sergilemektedir (Tablo 7.14). İndirgeme öncesinde ise 90° eğilikte dahi (50PS+%50GOw)<sub>2Kat</sub> yüzeyinde 8µL DI-su test sıvısı kaymamıştır.

Tablo 7.14 de kayma açıları 8µl *DI-Su* test sıvısı için belirlenmiştir ve test sıvısı hacminin azalması ile damla ağırlık kuvvet bileşimindeki azalmadan kaynaklı beklenti gereği kayma hızları azalmamıştır. Bu durum sıvı parafinin düşük viskozitesinden kaynaklı olarak yüzeyde daha ince yağ kalınlığı oluşturmasına bağlı olarak yüzey heterojenliğinden kaynaklanabilir. Bu durum yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal heterojenliğin bir göstergesi olan CAH değerleri ile doğrulanabilir. 2/26 HI/Ac asit oranında indirgemiş farklı bileşimlerdeki PS/GOw-2Kat kompozit kaygan yüzeylerinde 8µL DI-su test sıvısı için en düşük CAH değeri ve en yüksek kayma hızı R<sub>2/26</sub>-(%95PS+%5GOw)<sub>2Kat</sub> kaygan yüzeyinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatürde yer alan SLIP yüzeylerin maksimum 5° CAH değerine sahip olması bilgisi ile örtüşmektedir.

2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenmiş % 50-50 PS-GO<sub>(w)</sub> kompozit yüzeyler diğer katkılama oranları arasında en yüksek iletkenlik değerine sahiptir (Tablo 7.14) ve bu yüzden dış uyaran ile manipülasyon için en elverişli katkılama oranı olduğu söylenebilir. Ancak kayma hızının en yüksek olmasını sağlayan kayma performansı için 5µL test sıvısı için manipülasyonun elverişli olması beklenir.

**Tablo 7.14.** 3, 5 ve 8 $\mu$ l DI-Su test sıvısı için düz cam üzerine Si-Oil emdirilerek farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartı ve GO<sub>w</sub> katkılama oranında hazırlanan PS/GO<sub>w</sub> kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları

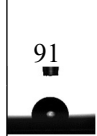


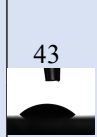


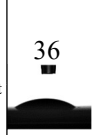


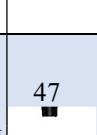


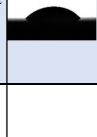


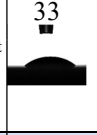


Numune Kodu/ İletkenlik (S/cm) Yağ emdirme Öncesi $\theta_e$ (°)  Parafin Emdirilmiş Test Sıvısı: DI-SU	$\theta_e$ (°) (@4 $\mu$ L DI-su)	SA (//) (°)	DI-su ( $\mu$ L)	$\theta_{adv}$ (//) (°)	$\theta_{rec}$ (//) (°)	CAH (°)	Kayma Hızı @SA (mm/s)
PS <sub>1</sub> mg/ml NA $\theta_e = 102^\circ$	94 	11.4 	8 5 3	76.5 82.3 83.0	75.2 81.2 82.0	1.3 1.1 1.0	0.23 0.074 0.028
R <sub>2/26</sub> -(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>2</sub> Kat 5.4 S/cm $\theta_e = 77^\circ$	96.2 	32.4 	8 5 3	84.7 85.8 84.9	84.4 81.3 84.4	0.3 4.5 0.5	<b>0.51</b> 0.14 0.095
R <sub>2/26</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>2</sub> Kat 16.89 S/cm $\theta_e = 78^\circ$	91.0 	26.6 	8 5 3	80.7 88.0 84.1	78.0 84.3 82.1	2.7 3.7 2.0	0.17 0.05 0.08
R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2</sub> Kat 21.22 $\theta_e = 86^\circ$	79 	11.0 	8 5 3	67.3 72.9 -	65.4 72.3 -	1.9 0.6 -	0.17 <b>0.48</b> Kaymadı
R <sub>2/26</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>2</sub> Kat 16.83 $\theta_e = 83^\circ$	99 	26.0 	8 5 3	80.1 86.1 83.5	76.5 83.4 81.3	3.6 2.7 2.2	0.25 0.106 <b>0.107</b>
(50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2</sub> Kat NA $\theta_e = 56^\circ$	76.6 	90 	8	-	-	-	Kaymadı
R <sub>1/13</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1</sub> Kat 15.90 S/cm $\theta_e = 87^\circ$	83.8 	25.0 	8 5 3	73.1 67.4 67.0	72.0 65.1 62.2	1.1 2.3 4.8	<b>0.27</b> <b>0.13</b> 0.32
R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1</sub> Kat 33.59 S/cm $\theta_e = 72^\circ$	100.0 	16.0 	8 5 3	88.0 87.4 -	84.0 86.0 -	4.0 1.4 -	0.15 0.07 Kaymadı
R <sub>1/13</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2</sub> Kat 4.06 S/cm $\theta_e = 84^\circ$	98.7 	19.8 	8 5 3	84.0 90.1 79.0	78.2 88.0 76.5	5.8 2.1 2.5	0.16 0.13 0.16

#### 7.4.2. Pürüzlü Cam substrat üzerine PS/GO<sub>w</sub> ve r-PS/GO<sub>w</sub> Kompozit ve Kaygan Yüzeylerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi

Su ile dispers olabilen THF içerisinde hazırlanmış 1 mg/mL konsantrasyonlu PS ve DI-Su içerisinde 10 mg/mL konsantrasyonda hazırlanmış GO dispersiyonunun (GO@Su-7a) hacimce % 5, 25, 50 ve 75 oranında karıştırılması ile üretilen PS/GO<sub>w</sub> süspansiyonlarının pürüzlü (rodajlı) cam (PC) üzerine 1600 mm/dk kaplama hızında kaplanması ile üretilen

PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen R-(PS/GO<sub>w</sub>) kompozit yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları Tablo 7.15'te yer almaktadır. Tablo 7.15'ten görüldüğü gibi PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerinde 1/13 HI/Ac indirgeme ortamında indirgenen grafen-PS kompozit yüzeylerinde GO bileşimi % 50'de en yüksek iletkenlik ve en düşük temas açısı elde edilmiştir. 2/26 HI/Ac indirgenme şartı için de en yüksek iletkenlik GO bileşimi %50'de elde edilmesine karşın temas açısı %75 GO katkılanan kompozit yüzey hariç diğer bileşimlerden temas açısı yüksektir. Bu durum film kalınlığı ile ilişkilidir. Film kalınlığının artması ile temas açısı artmaktadır. 2/26 HI/Ac indirgenme şartında %50 GO katkılı PS/GO<sub>w</sub> yüzey dışında, tüm bileşimler için 1/13 HI/Ac indirgenme şartına göre daha yüksek iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Pürüzlü cam üzerinde GO yüzeyinin 1/13 HI/Ac indirgeme şartında indirgenmesi ile 2/26HI/Ac indirgenme şartına göre daha yüksek iletkenlik elde edilmiştir. Bu durum düz cam sonuçları ile ters eğilim göstermektedir. PS yalıtkan bir malzemedir ve PS'ne %50 GO katkılanması ile hazırlanan R-(PS/GO<sub>w</sub>) kompozit yüzeyi, grafen yüzeyine oranla 2/26 ve 1/13 HI/Ac indirgenme şartında yaklaşık 20 kat daha düşük iletkenlikte yüzey elde edilmiştir ve PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri arasında en fazla PS yüzeyine GO'in çıktığı yüzey %50 GO katkılanan 1/13 HI/Ac indirgeme şartında indirgenen r-PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyi olduğu söylenebilir. PS yüzeyi hidrofob ( $\theta=91^\circ$ ) ve GO yüzeyi hidrofil ( $\theta=51^\circ$ ) özellik gösterir. PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri ise hidrofil özellik göstermekle birlikte farklı bileşimlerin hepsinde GO'in temas açısı değerinden daha düşük temas açısı değerleri elde edilmiştir. Bu durum PS yüzeyine hidrofil GO'in yüzeye çıktığına işaret eder. PS/GO<sub>w</sub> yüzeylerinin indirgenmesi sonrasında tüm bileşimler için temas açısı artmış ve 1/13 HI/Ac indirgeme şartı için  $79\pm4^\circ$  ve 2/26 HI/Ac indirgeme koşulu için ise  $86\pm6^\circ$  arasında temas açısına sahiptir. İndirgeme sonrasında GO yüzeyi ise 1/13 HI/Ac indirgeme şartında  $76^\circ$  ve 2/26 HI/Ac indirgeme şartında ise  $77^\circ$  temas açısına sahiptir. GO'in 1/13 indirgeme koşulunda indirgenmesi üretilen grafen en yüksek iletkenlik vermektedir. Benzer durum PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri içinde geçerlidir. Sonuç olarak 1/13 HI/Ac indirgeme şartında 2/26 indirgeme şartında indirgenen PS/GO<sub>w</sub> yüzeylerine göre temas açısındaki azalma GO'in oksijen içeren gruplarındaki kayıpla ilişkilidir ve yüzeydeki oksijen içeren grupların daha fazla azalır.

**Tablo 7.15.** Farklı GO<sub>w</sub> bileşimlerinde PS/GO<sub>w</sub> süspansiyonlarının pürüzlü (rodajlı) cam üzerine 1600 mm/dk kaplama hızında 1 kat kaplanması ile üretilen PS-GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen r-PS-GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları

İndirgeme Öncesi		İndirgeme Sonrası			
Numune Kodu	CA (°) ve Damla Profili	Numune Kodu	Kaplama Kalınlığı (mm)	İletkenlik (S/cm)	CA (°) ve Damla Profili
PC+(PS) <sub>1Kat</sub>	91 	PC+ R <sub>1/13</sub> -(PS) <sub>1Kat</sub>	0.00006	N.A	93 
		PC+ R <sub>2/26</sub> -(PS) <sub>1Kat</sub>	0.00006	N.A	91 
PC+(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	43 	PC+ R <sub>1/13</sub> -(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.01745	0.63	83 
		PC+ R <sub>2/26</sub> -(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.01047	1.05	80 
PC+(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	36 	PC+ R <sub>1/13</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.04516	3.62	82 
		PC+ R <sub>2/26</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.03426	7.12	83 
PC+(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	47 	PC+ R <sub>1/13</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.07545	9.68	75 
		PC+ R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.06073	7.25	85 
PC+(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	33 	PC+ R <sub>1/13</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.07379	2.68	83 
		PC+ R <sub>2/26</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.06661	3.29	92 
PC+(GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	51 	PC+ R <sub>1/13</sub> -(GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.03	218.15	76 
		PC+ R <sub>2/26</sub> -(GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub>	0.025	157.00	77 
















Tablo 7.16'da su ile dispers olabilen THF içerisinde hazırlanmış 1 mg/mL konsantrasyonlu PS ve 10 mg/mL konsantrasyonda GO dispersiyonunun (GO@Su-2) hacimce % 5, 25, 50 ve 75 oranında karıştırılması ile üretilen PS/GO<sub>w</sub> süspansiyonlarının pürüzlü (rodajlı) cam üzerine 1600 mm/dk kaplama hızında 2 kat kaplanması ile üretilen PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen R-(PS/GO<sub>w</sub>) kompozit

yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.16'dan görüldüğü gibi PS/GO<sub>w</sub> karışımlarında 1/13 HI/Ac indirgeme ortamında indirgenen R-(PS/GO<sub>w</sub>) yüzeylerinde GO bileşimi % 50'de en düşük iletkenlik ve en yüksek temas açısı elde edilmişken, aynı bileşimde 2/26 HI/Ac indirgenme oranında en yüksek iletkenlik ve en düşük temas açısı değeri elde edilmiştir. Bu durum bu yüzeyin kalınlığının diğer yüzeylere göre daha fazla olması ve 1/13 HI/Ac indirgenme şartında yüzeye etkin olan indirgeyici miktarının yetersiz gelmesinden kaynaklanabilir. %75 GO katkılama dışında, 2/26 HI/Ac indirgenme şartında tüm bileşimler için 1/13 HI/Ac indirgenme şartına göre daha yüksek iletkenlik ve temas açısı değerleri elde edilmiştir.

PS yalıtkan bir malzemedir ve PS'ne %50 GO katkılanması ile hazırlanan kompozit yüzeyi, grafen yüzeyine oranla 2/26HI/Ac indirgenme şartında yaklaşık 10 kat daha düşük iletkenlikte yüzey elde edilmiştir (Tablo 7.16) ve PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri arasında en fazla PS yüzeyine GO'in çıktığı yüzey %50 GO katkılanan 2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenen kompozit grafen yüzeyi olduğu söylenebilir. GO yüzeyi hidrofil ( $\theta=58^\circ$ ) özellik gösterir ve ayrıca tüm PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri hidrofil özellik göstermekle birlikte, farklı bileşimlerin hepsinde GO'in temas açısı değerinden daha düşük temas açısı değerleri elde edilmiştir. Bu durum PS yüzeyine hidrofil GO'in yüzeye çıktığına işaret eder. PS/GO<sub>w</sub> yüzeylerinin indirgenmesi sonrasında tüm bileşimler için temas açısı artmış ve 1/13 HI/Ac indirgeme şartı için  $88\pm 6^\circ$  ve 2/26 HI/Ac indirgeme koşulu için ise  $81\pm 5^\circ$  arasında temas açısına sahiptir. İndirgeme sonrasında GO yüzeyi ise 1/13 HI/Ac indirgeme şartında  $76^\circ$  ve 2/26 HI/Ac indirgeme şartında ise  $77^\circ$  temas açısına sahiptir. GO'in 2/26 indirgeme koşulunda indirgenmesi ile üretilen grafen en yüksek iletkenlik değeri vermektedir. Benzer durum %75 GO katkılama dışındaki tüm PS/GO<sub>w</sub> yüzeyleri içinde geçerlidir.

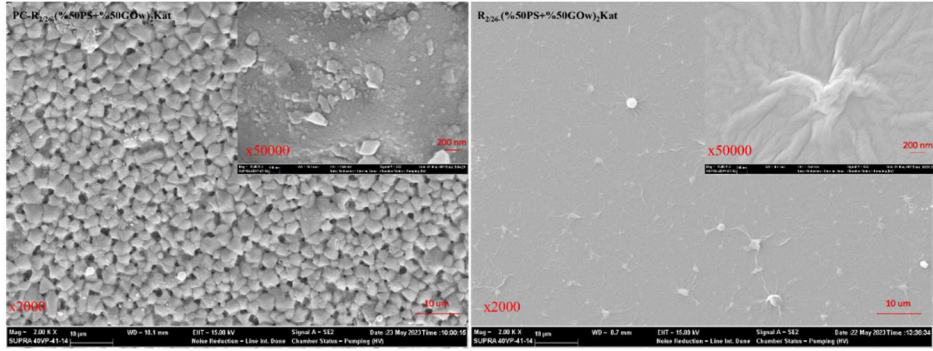
Tablo 7.15 ve Tablo 7.16'dan görüldüğü gibi, PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyi hidrofil özellik gösterirken ( $\theta < 90^\circ$ ), HI+Ac ortamında indirgeme sonrasında oksijen içeren hidrofil grupların (-OH, -COOH vs) yoğunluklarındaki azalmaya ve aynı zamanda grafenin doğasına uygun olarak hidrofob özellik gösteren ( $\theta \geq 90^\circ$ ) grafen katkılı PS kompozit yüzeyler üretilmiştir.

**Tablo 7.16.** GO dispersiyonunun farklı karışım oranlarında katkılanması ile üretilen PS/GO<sub>w</sub> süspansiyonlarından pürüzlü (rodajlı) cam üzerine 2 kat kaplanarak üretilen PS-GO<sub>w</sub> kompozit yüzeyleri ve bu yüzeylerin indirgenmesi sonrasında üretilen r-PS-GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları

İndirgeme Öncesi		İndirgeme Sonrası			
Numune Kodu	CA (°) ve Damla Profili	Numune Kodu	Kaplama Kalınlığı (mm)	İletkenlik (S/cm)	CA (°) ve Damla Profili
PC+(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	55 	PC+ R <sub>1/13</sub> - (%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.03141	3.06	92 
		PC+ R <sub>2/26</sub> - (%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.02442	3.60	86 
PC+(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	39 	PC+R <sub>1/13</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.06696	6.62	91 
		PC+ R <sub>2/26</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.05606	7.72	86 
PC+(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	50 	PC+ R <sub>1/13</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.14446	1.13	94 
		PC+ R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.13710	11.52	76 
PC+(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	38 	PC+R <sub>1/13</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.10056	8.71	82 
		PC+ R <sub>2/26</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.09860	5.88	87 
PC+(GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	58 	PC+ R <sub>1/13</sub> -(GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.05	169.06	76 
		PC+ R <sub>2/26</sub> -(GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub>	0.05	114.3	77 

Şekil 7.6 da yer alan SEM görüntüleri incelendiğinde, düz ve pürüzlü cam substrat üzerinde 2 kat kaplama ile hazırlanan PS/GO<sub>w</sub> yüzeylerinin 2/26 HI/Ac oranında indirgenmesi ile üretilen R-PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerinde grafene özgü tabakalanmış yapı görülmektedir.





**Şekil 7.6.**  $R_{2/26}-(\%50PS+\%50GO_w)_{2Kat}$  ve  $PC+R_{2/26}-(\%50PS+\%50GO_w)_{2Kat}$  Düz/Pürüzlü Cam Sem görüntüleri

#### 7.4.2.1. Pürüzlü Cam substrat üzerine PS/ $GO_w$ ve r-PS/ $GO_w$ Kaygan Kompozit Yüzeylerin Hazırlanması ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi

PS/ $GO_w$  ve r-PS/ $GO_w$  kompozit yüzeylerin yağlayıcı sıvı olarak silikon yağı ve sıvı parafin kullanılması ile PS- $GO_w$  kompozit kaygan yüzeyler pürüzlü cam substratlar üzerinde üretilmiş ve bu yüzeylerin kayma açısı ve kayma hızları temas açısı ölçümleri ve hızlı kamera görüntülerinin Image j programında işlenmesi ile belirlenmiştir. Tablo 7.17 de 3, 5 ve 8 $\mu$ l DI-Su test sıvısı için pürüzlü cam üzerine farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartları ve  $GO_w$  katkılama oranında hazırlanan PS/ $GO_w$  kompozit yüzeylerine 500 CSt viskoziteli Si-Oil emdirilerek üretilen kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.17'den görüldüğü gibi PS ve PS'ne % hacimce 5, 25, 50 ve 75 karışım oranında 10 mg/mL konsantrasyonlu  $GO_w$  dispersiyonun ilavesi ile pürüzlü cam substratlar üzerine hazırlanan PS/ $GO_w$  kompozit yüzeylerinin 2/26 HI/Ac asit oranında indirgenmesi sonucunda üretilen  $R_{2/26}$ -PS/ $GO_w$  kompozit yüzeylerin denge temas açıları PS ve % 5  $GO_w$  katkılanmış yüzeyler dışında  $R_{2/26}$ -PS/ $GO_w$  kompozit kaygan yüzeyleri için artmıştır.

Kayma açısının en düşük bulunduğu katkılama oranı % 50  $GO_w$  olarak belirlenmiştir (Tablo 7.13) ve bu sonuç % 50 karışım oranında en yüksek kayma hızı elde edilme beklentisini karşılamamaktadır. Bu bileşende en düşük kayma hızı ve CAH değeri belirlenmiştir. Her ne kadar PC- $R_{2/26}-(\%50PS+\%50GO_w)_{2Kat}$  yüzeyi için CAH değerinin düşük olmasından kaynaklı olarak yağ kalınlığının optimum seviyede tutulduğu belirlenmiş olsada, en düşük kayma açısının nedeni en yüksek iletkenliğe sahip bu yüzeyde indirgenmiş  $GO_w$ 'nun en fazla yüzeye çıkma eğilimi olabilir. Bunun sonucunda da kaygan yüzeyin test sıvısını tutma (pinning) etkisinden kaynaklanabilir. Çünkü PS yüzeyi düz ve hidrofob doğaya sahipken indirgenmiş  $GO_w$

yüzeyi hidrofobluk sınırına yakın hidrofilyk özellik gösterir, ki bu durum suyu daha fazla çekme eğilimini artırır. Ayrıca kayma hızının en yüksek olduğu kaygan yüzey % 75 GO<sub>w</sub> katkılanarak hazırlanmış PC-R2/26-(%25PS+%75GO<sub>w</sub>)2Kat kaygan yüzeydir ve bu yüzeyin CAH değeri en yüksektir. Dış uyaran ile damla hareketinin kontrolünde yüzeyin iletkenlik değerinin de önemli bir parametre olması nedeni ile dış uyaran karşısında akıllı tepki performans denemelerinde hem % 75 hemde % 50 GO<sub>w</sub> katkılanmış yüzeylerin seçilmesi uygun olur. Kayma açıları 8µl DI-Su test sıvısı için belirlenmiştir ve test sıvısı hacminin azalması ile damla ağırlık kuvvet bileşimindeki azalmadan kaynaklı doğal beklentiyi kayma hızlarındaki azalma doğrulamıştır.

















**Tablo 7.17.** 3, 5 ve 8µl DI-Su test sıvısı için pürüzlü cam üzerine Si-Oil emdirilerek farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartı ve GO<sub>w</sub> katkılama oranında hazırlanan PS/GO<sub>w</sub> kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları

Numune Kodu/ İletkenlik (S/cm) Yağ emdirme Öncesi θ <sub>e</sub> (°)  Si-Oil Emdirilmiş Test Sıvısı: DI-SU	θ <sub>e</sub> (°) (@4µ L DI- su)	SA (//) (°)	DI-su (µL)	θ <sub>adv</sub> (//) (°)	θ <sub>rec</sub> (//) (°)	CAH (°)	Kayma Hızı @SA (mm/s)
PC-PS <sub>1 mg/ml</sub> NA θ <sub>e</sub> =102.5°	77 	11 	8 5 3	86.0 87.0 94.4	83.5 85.3 90	2.5 1.7 4.4	0.28 0.11 0.14
PC-R2/26-(%95PS+%5GO <sub>w</sub> )2Kat 3.8 S/cm θ <sub>e</sub> =86°	88 	30 	8 5 3	96.0 88.6 92.2	88.4 85.0 89.0	7.6 3.6 3.2	1.77 0.61 0.35
PC-R2/26-(%75PS+%25GO <sub>w</sub> )2Kat 7.72 S/cm θ <sub>e</sub> =86°	98.9 	27.4 	8 5 3	93.3 99.0 -	90.1 94.2 -	3.2 4.8 -	1.77 0.77 Kaymadı
PC-R2/26-(%50PS+%50GO <sub>w</sub> )2Kat 11.52 θ <sub>e</sub> =76°	108 	7 	8 5 3	92.0 86.0 86.0	91.4 81.0 83.6	0.6 5.0 2.4	0.18 0.11 0.078
PC-R2/26-(%25PS+%75GO <sub>w</sub> )2Kat 5.88 θ <sub>e</sub> =87°	102 	26.6 	8 5 3	94.4 92.6 87.7	88 84.4 86.5	6.4 8.2 1.2	2.04 0.74 0.53
PC-(50PS+%50GO <sub>w</sub> )2Kat NA θ <sub>e</sub> =50°	49.3 	90 	8	-	-	-	Kaymadı
PC-R1/13-(%50PS+%50GO <sub>w</sub> )1Kat 9.68 S/cm θ <sub>e</sub> =75°	100 	27.1 	8 5 3	92.5 89.6 89.5	90 89.2 85.4	2.5 0.4 4.1	1.26 0.67 0.46
PC-R2/26-(%50PS+%50GO <sub>w</sub> )1Kat 7.25 S/cm θ <sub>e</sub> =85°	106 	23 	8 5 3	98 96.1 89.3	93 92 88.2	5 4.1 1.1	1.19 0.48 0.32
PC-R1/13-(%50PS+%50GO <sub>w</sub> )2Kat 1.13 S/cm θ <sub>e</sub> =94°	83.7 	20 	8 5 3	84.7 93.4 87.0	80 87.0 85.0	4.7 6.4 2.0	0.83 0.41 0.24

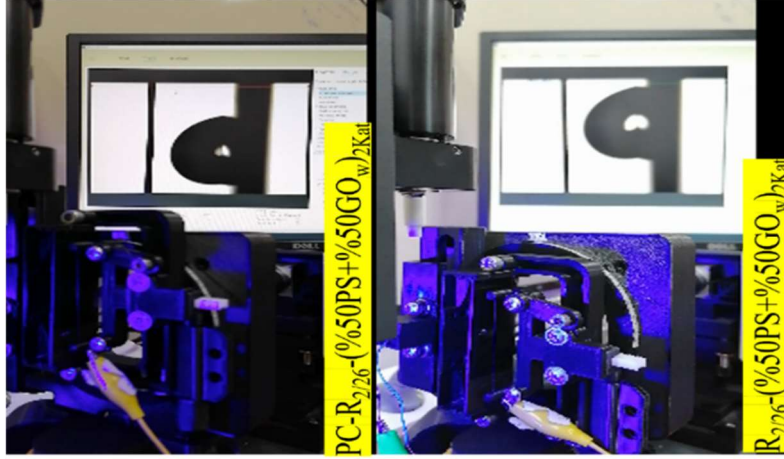
Tablo 7.18'de 3, 5 ve 8µl *DI-Su* test sıvısı için *pürüzlü cam* üzerine farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartları ve GO<sub>w</sub> katkılama oranında hazırlanan PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerine *Sıvı Parafin* emdirilerek üretilen kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.14'ten görüldüğü gibi PS ve PS'e % hacimce 5, 25, 50 ve 75 karışım oranında 10 mg/mL konsantrasyonlu GO<sub>w</sub> dispersiyonun ilavesi ile hazırlanan PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerinin 2/26 HI/Ac asit oranında indirgenmesi sonucunda üretilen R<sub>2/26</sub>-PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerin denge temas açıları PS dışında sıvı parafin emdirilmiş R<sub>2/26</sub>-PS/GO<sub>w</sub> kompozit kaygan yüzeyleri için artmıştır. Farklı GO<sub>w</sub> bileşimlerindeki R<sub>2/26</sub>-PS/GO<sub>w</sub> kompozit kaygan yüzeylerde 8µl *DI-Su* test sıvısı için kayma açısının en düşük bulunduğu katkılama oranı % 50 GO<sub>w</sub> olarak belirlenmiştir. Farklı GO<sub>w</sub> katkılama oranlarında hazırlanan R<sub>2/26</sub>-PS/GO<sub>w</sub>-2-kat kompozit kaygan yüzeylerde test sıvısı miktarlarına bağlı olarak kayma hızı yüksek olan katkılama oranı değişmiştir (Tablo 7.18). Test sıvısı miktarına bağlı olarak en yüksek kayma hızlarındaki değişim şöyledir: 8µl *DI-Su* test sıvısı için % 5 GO<sub>w</sub> katkılama oranı, 5µl *DI-Su* test sıvısı için % 50 GO<sub>w</sub> katkılama oranı ve 3µl *DI-Su* test sıvısı için sadece % 50 GO<sub>w</sub> katkılama oranı.

Tablo 7.18 de kayma açıları 8µl *DI-Su* test sıvısı için belirlenmiştir ve test sıvısı hacminin azalması ile damla ağırlık kuvvet bileşimindeki azalmadan kaynaklı beklenti gereği kayma hızları azalmamıştır. Bu durum sıvı parafinin düşük viskozitesinden kaynaklı olarak yüzeyde daha ince yağ kalınlığı oluşturmasına bağlı olarak yüzey heterojenliğinden kaynaklanabilir. 2/26 HI/Ac asit oranında indirgenmiş farklı bileşimlerdeki PS/GO<sub>w</sub>-2Kat kompozit kaygan yüzeylerinde 8µL *DI-su* test sıvısı için en düşük CAH değeri ve en düşük kayma hızı PC-R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> kaygan yüzeyinde elde edilmiştir. 2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenmiş % 50-50 PS-GO<sub>(w)</sub> kompozit yüzeyler diğer katkılama oranları arasında en yüksek iletkenlik değerine sahiptir (Tablo 7.18) ve bu yüzden dış uyaran ile manipülasyon için en elverişli katkılama oranı olduğu söylenebilir. Ancak kayma hızının en yüksek olmasını sağlayan kayma performansı için PC-R<sub>2/26</sub>-(%95PS+%5GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> kaygan yüzeyi manipülasyona daha elverişli olabilir.

**Tablo 7.18.** 3, 5 ve 8 $\mu$ l DI-Su test sıvısı için pürüzlü cam üzerine Sıvı Parafin emdirilerek farklı kaplama kat sayısı, indirgeme şartı ve GO<sub>w</sub> katkılama oranında hazırlanan PS/GO<sub>w</sub> kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları

Numune Kodu/ İletkenlik (S/cm) Yağ emdirme Öncesi $\theta_e$ (°) Sıvı Parafin Emdirilmiş Test Sıvısı: DI-SU	$\theta_e$ (°) (@4 $\mu$ L DI- su)	SA (//) (°)	DI-su ( $\mu$ L)	$\theta_{adv}$ (//) (°)	$\theta_{rec}$ (//) (°)	CAH (°)	Kayma Hızı @SA (mm/s)
PC-PS <sub>1</sub> mg/ml NA $\theta_e = 105.2^\circ$	98.4 	11.4 	8 5 3	87.3 84.4 85.3	84.5 82.6 85.2	2.8 1.8 0.1	0.11 0.073 0.066
PC-R <sub>2/26</sub> -(%95PS+%5GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> 3.8 S/cm $\theta_e = 86^\circ$	99.5 	32.4 	8 5 3	91.4 - -	90.2 - -	1.2 - -	<b>0.57</b> Kaymadı Kaymadı
PC-R <sub>2/26</sub> -(%75PS+%25GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> 7.72 S/cm $\theta_e = 86^\circ$	97.4 	26.6 	8 5 3	91.1 91.4 -	86.2 86.3 -	4.9 5.1 -	0.13 0.03 Kaymadı
PC-R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> 11.52 $\theta_e = 76^\circ$	85.2 	11 	8 5 3	72.4 86.0 84.6	72.4 80.9 78.8	0 5.1 5.8	0.11 <b>0.31</b> 0.012
PC-R <sub>2/26</sub> -(%25PS+%75GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> 5.88 $\theta_e = 87^\circ$	100.5 	26 	8 5 3	- - -	- - -	- - -	Kaymadı Kaymadı Kaymadı
PC-(50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> NA $\theta_e = 50^\circ$	77.6 	90 	8	- -	- -	- -	Kaymadı Kaymadı
PC-R <sub>1/13</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub> 9.68 S/cm $\theta_e = 75^\circ$	91.6 	25 	8 5 3	81.8 86.1 75.8	74.2 83.2 75.0	7.6 2.9 0.8	0.46 0.15 0.23
PC-R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>1Kat</sub> 7.25 S/cm $\theta_e = 85^\circ$	101.3 	16 	8 5 3	- - -	- - -	- - -	Kaymadı
PC-R <sub>1/13</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>2Kat</sub> 1.13 S/cm $\theta_e = 94^\circ$	102 	19.8 	8 5 3	86.0 - -	80.3 - -	5.7 - -	<b>0.67</b> Kaymadı Kaymadı

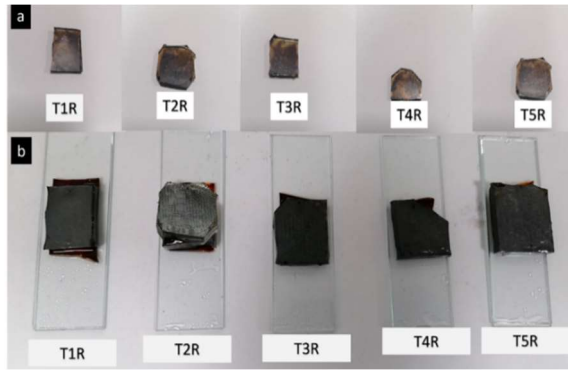
Düz ve pürüzlü substratlar üzerinde hazırlanan R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> ve PC-R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerine yağ emdirme öncesi en yüksek damla hacminde (8 $\mu$ L) test sıvısı damlatıldığında ve yüzey 90° eğiklik sıvı damlanın (DI-su) kaymadığını (Şekil 7.7) ve aynı yüzeylere yağ emdirilmesi sonrasında hazırlanan kaygan yüzeylerde ise kaydığına dair ölçüm sonuçları Tablo 7.15-7.18'de verilmiştir. Yağ emdirerek hazırlanan kaygan yüzeyler üzerinde damla hızının kontrolü ile sıvı damlanın istenilen sürede hedeflenen yolu alması sağlanabilir. Bu nedenle bu çalışma çıktıları ile mikroreaktör ve mikrohasat uygulamalarında kullanılma potansiyeli olan yeni yüzeyler geliştirilmiştir.



**Şekil 7.7.** Düz ve pürüzlü PS/GO yüzeylerinde yağlama öncesinde 8µl su test sıvısının 90° eğiklikte kaymaması

#### 7.4.3. Mikrodeseanlı PDMS Substrat Üzerine PS/GO<sub>w</sub> ve r-PS/GO<sub>w</sub> Kompozit ve Kaygan Yüzeylerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi


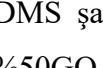





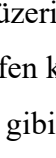

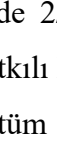
THF içerisinde hazırlanmış 1 mg/mL konsantrasyonda PS çözeltisi ve DI-su içerisinde hazırlanmış 10 mg/mL konsantrasyonlu GO<sub>w</sub> dispersiyonunun %50:50 PS/GO<sub>w</sub> karışım oranlarında karıştırılması ile üretilen PS/GO<sub>w</sub> süspansiyonlarından farklı tasarımlardaki PDMS Şablon 1 üzerine 1600 mm/dk kaplama hızında 5 kat kaplanarak üretilen PDMS+PS-GO<sub>w</sub> yüzeyleri ve bu yüzeylerin 2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenmesi ile üretilen PDMS+r-PS-GO yüzeylerine ait numune fotoğrafları Şekil 7.8'de, temas açısı ve iletkenlik sonuçları Tablo 7.19'da verilmiştir. Şekil 7.8'den görüldüğü gibi indirgeme öncesi GO'ne özgü kahverengi renkte olan kaplamalar, indirgeme sonrasında grafen için karakteristik olan parlak gri renge dönüşmüştür.



**Şekil 7.8.** a) PDMS<sub>Ş1</sub>+ (%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub> kaplaması canlı görünümü. b) PDMS<sub>Ş1</sub>+ R<sub>2/26</sub> (%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub> yüzeyi fotoğraf makinesi canlı görünümü

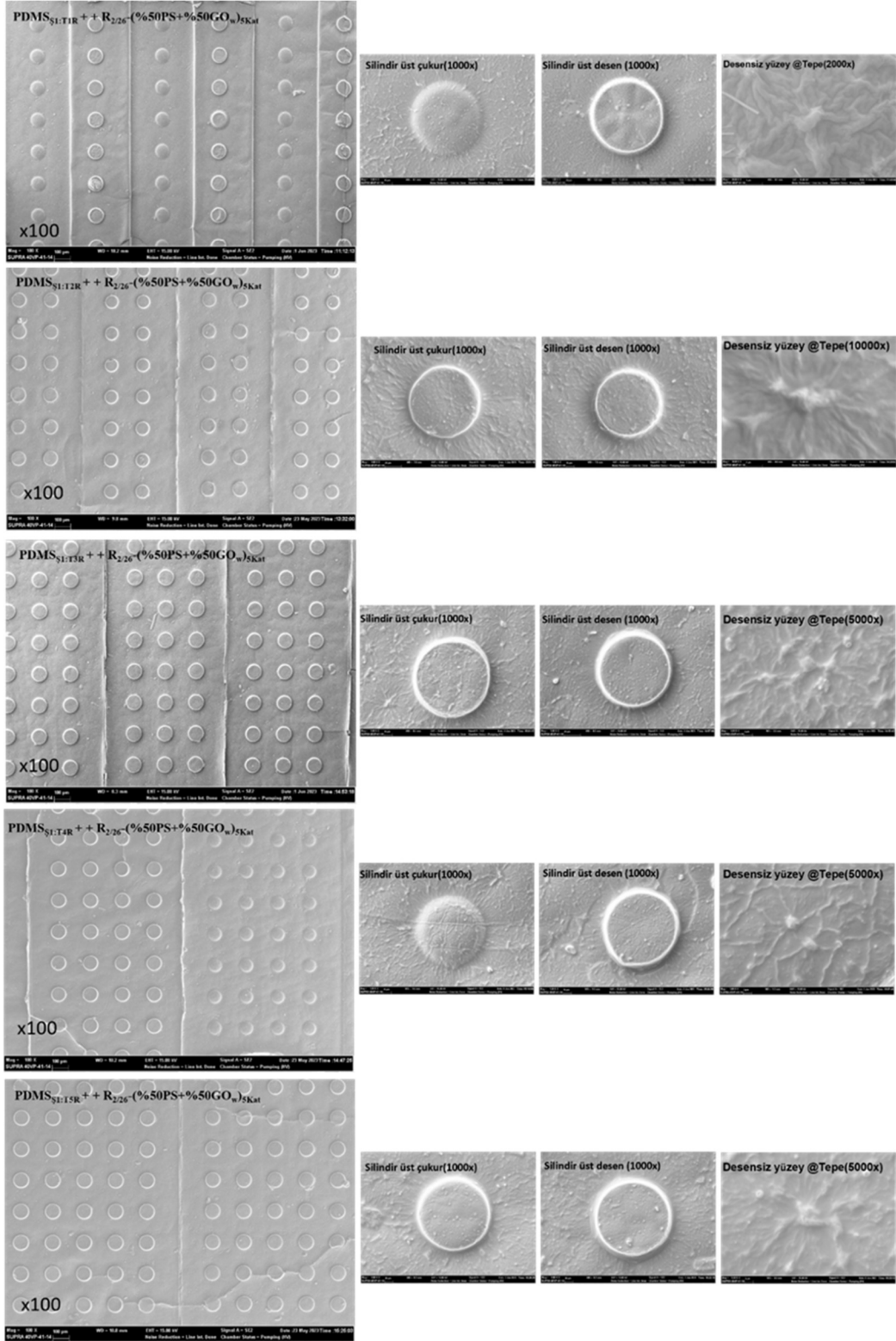
Tablo 7.19’den görüldüğü gibi 5 kat kaplı mikrodesezneli yönlendirilmiş pürüzlülüğe sahip %50:50 PDMS+PS/GOW yüzeylerinin hepsi indirgeme öncesi ve sonrasında hidrofobiktir ve indirgenme sonrasında temas açısı değerleri az da olsa artmıştır. 5 kat kaplı %50:50 PDMS+PS/GR yüzeylerinin indirgenme sonrası temas açısı hem mikrodesezneli yapı hem de muhtemelen grafenin yüzeyde tabakalanma derecesindeki artıştan kaynaklı ekstra nano pürüzlülükler oluşturarak hiyerarşik yapı oluşturmasından dolayı veya yüzeydeki oksijen içeren grupların azalması nedeniyle artmıştır.

**Tablo 7.19.** %50:50 PS/GOW süspansiyonundan farklı tasarımlardaki PDMS Şablon 1 üzerine 1600 mm/dk kaplama hızında 5 kat kaplanarak üretilen PDMS+PS-GOW yüzeyleri ve bu yüzeylerin 2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenmesi ile üretilen PDMS+r-PS-GO yüzeylerine ait temas açısı ve iletkenlik sonuçları

İndirgeme Öncesi		İndirgeme Sonrası		
Numune Kodu	CA (°) ve Damla Profili	Numune Kodu	İletkenlik (S/cm)	CA (°) ve Damla Profili
PDMS <sub>Ş1:T1R</sub> + (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub>	122 	PDMS <sub>Ş1:T1R</sub> + R <sub>2/26</sub> - (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub>	78.4	124 
PDMS <sub>Ş1:T2R</sub> + (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub>	103 	PDMS <sub>Ş1:T2R</sub> + R <sub>2/26</sub> - (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub>	13	107 
PDMS <sub>Ş1:T3R</sub> + (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub>	111 	PDMS <sub>Ş1:T3R</sub> + R <sub>2/26</sub> - (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub>	12	114 
PDMS <sub>Ş1:T4R</sub> + (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub>	112 	PDMS <sub>Ş1:T4R</sub> + R <sub>2/26</sub> - (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub>	8	116 
PDMS <sub>Ş1:T5R</sub> + (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub>	112 	PDMS <sub>Ş1:T5R</sub> + R <sub>2/26</sub> - (%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub>	43	113 

Şekil 7.9 da farklı tasarımlardaki PDMS şablonlar üzerinde 2/26 HI/Ac indirgeme şartında hazırlanmış PDMS+ R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub> grafen katkılı kompozit yüzeylerine ait SEM görüntüsü yer almaktadır. Şekil 7.9’den görüldüğü gibi, tüm tasarımlarda yüzeyde tabakalanmış grafene özgü yapı substratın deszneli/desensiz tüm yüzeyinde kesintisiz olarak vardır ve en çok tabakalanan yüzey T1-R tasarımına ait PDMS şablon üzerinde

PDMS<sub>S1:T1R</sub>+R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub> kompozit yüzeyinde yer almaktadır ve bu sonuç Tablo 7.19'daki temas açısı ve iletkenlik sonuçları ile uyumludur.



**Şekil 7.9.** farklı tasarımlardaki PDMS şablon üzerinde kaplanmış PDMS<sub>S1</sub>+ R<sub>2/26</sub> (%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub> yüzeylerinin kanal/çukurdaki mikrosedenleri ve tüm yüzeyi gösteren SEM görüntüleri













Sonuç olarak indirgenme sonrasında temas açısı trendlerinde oksijen içeren gruplar ve hiyerarşik yapıdaki pürüzlülük daha etkin olmuştur. Ayrıca T1-R ve T5-R tasarımı PDMS şablonlar üzerinde iletkenlik değeri diğer tasarımı yüzeylere göre daha yüksek çıkmıştır. T1-R kalıbı kanal ya da tepesinde 1 sıra silindirik mikrodese içerir ve en düşük yüzey alanına sahipken, T5-R kalıbı kanal ya da tepesinde 5 sıra silindirik mikrodese içerir ve en yüksek yüzey alanına sahiptir. En yüksek iletkenlik en düşük yüzey alanına sahip T1-R tasarımına sahip PDMS şablon kullanılarak 2/26 HI/Ac indirgenme şartında üretilen PDMS<sub>Ş1:T1R</sub> + R<sub>2/26-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub></sub> PS/GR kompozit yüzeyinde elde edilmiştir.

#### **7.4.3.1. Mikrodeseanlı PDMS Substrat Üzerine PS/GO<sub>w</sub> ve r-PS/GO<sub>w</sub> Kaygan Kompozit Yüzeylerin Hazırlanması ve Kaygan Yüzey Performanslarının Belirlenmesi**

THF içerisinde hazırlanmış 1 mg/mL konsantrasyonda PS çözeltisi ve DI-su içerisinde hazırlanmış 10 mg/mL konsantrasyonlu GO<sub>w</sub> dispersiyonunun %50:50 PS/GO<sub>w</sub> karışım oranlarında karıştırılması ile üretilen PS/GO<sub>w</sub> süspansiyonlarından 5 farklı tasarımlardaki PDMS Şablon 1 üzerine 1600 mm/dk kaplama hızında 5 kat kaplanarak üretilen %50:50 PDMS+PS-GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerinin 2/26 HI/Ac indirgeme şartında indirgenmesi ile üretilen PDMS+r-PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerine ait temas açısı ve kayma performansı sonuçları Tablo 7.20 de verilmiştir. Tablo 7.20'den görüldüğü gibi, en düşük kayma açısı T4R tasarımı üzerinde, en düşük CAH ve en yüksek kayma hızı T2R tasarımı üzerinde ve en yüksek iletkenlik T1R tasarımı üzerinde elde edilmiştir. Sadece Tasarımdaki farklılık kompozit yüzeyinin hem iletkenliğini hemde kayma performansını oldukça belirgin bir şekilde değiştirmiştir. Bu durumun nedeni tasarım üzerindeki sıvı ile temas eden alanların değişimi ile sıvıyı yukarıya iten hava paketçik oranının kaplama kalınlığına bağlı olarak değişmesi olabilir.















**Tablo 7.20.** 8 $\mu$ L DI-Su test sıvısı için 5 farklı tasarıma sahip mikrodeseanlı PDMS substrat üzerine kaplanan % 50:50 bileşimde r-PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerinin kayma performans sonuçları

Numune Kodu/ İletkenlik (S/cm) Yağ emdirme Öncesi $\theta_e$ (°)  Test Sıvısı: DI-SU	$\theta_e$ (°) (@4 $\mu$ L DI-su)	SA (//) (°)	$\theta_{adv}$ (//) (°)	$\theta_{rec}$ (//) (°)	CAH (°)	Kayma Hızı @SA (mm/s)
PDMS <sub>S1:T1R</sub> + PS NA $\theta_e = 124^\circ$	120 	32.1 	93	78	15	0.097
PDMS <sub>S1:T1R</sub> + R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> 78.4 S/cm $\theta_e = 124^\circ$	124 	26.2 	91.3	86	5.3	0.050
PDMS <sub>S1:T2R</sub> + R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> 13 S/cm $\theta_e = 107^\circ$	107 	31.8 	91	88	3	0.330
PDMS <sub>S1:T3R</sub> + R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> 12 S/cm $\theta_e = 114^\circ$	114 	25 	101.4	94.3	7.1	0.162
PDMS <sub>S1:T4R</sub> + R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> 8 S/cm $\theta_e = 116^\circ$	116 	21.7 	102.2	99	3.2	0.085
PDMS <sub>S1:T5R</sub> + R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> 43 S/cm $\theta_e = 113^\circ$	113 	36.5 	83.2	74	9.2	0.158

5 farklı tasarımda mikrodeseanlı PDMS şablon üzerine hazırlanmış % 50:50 PS/GO<sub>w</sub> bileşimli PDMS+r-PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerine sıvı parafin emdirilmesi ile üretilen mikrodeseanlı kaygan kompozit yüzeylerine 8 $\mu$ L DI-su test sıvısı damlatılması ile belirlenen temas açısı ve kayma performansı sonuçları Tablo 7.21 de verilmiştir. Tablo 7.21'den görüldüğü gibi yağ emdirme sonrasında temas açısı tüm tasarım yüzeylerinde artmıştır ve en hidrofob tasarım T1R tasarımında elde edilmiştir. Bu durum T1R tasarımına sahip kaygan kompozit yüzeyin düşük CAH ve yüksek kayma hızı performansı elde edilmesi sonuçları ile de paraleldir. Ancak en düşük kayma açısı T5R tasarımına sahip PDMS substratın kullanıldığı PDMS<sub>S1:T5R</sub> + R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub> kaygan kompozit yüzeyinde elde edilmiştir ve bu tasarım için kayma hızı en düşüktür. Kayma hızının düşük çıkmasının nedeni, sıvı damla her ne kadar düşük bir eğiklikte kaymaya başlasa da mikrodeseanları oluşturan pillar sayısında artış yüzeydeki kaplamanın kalınlığının değişmesine ve dolayısıyla pillar boşluklarındaki hava paketçik oranının azalması sonucunda damlanın daha yavaş kaymasına neden olabilir. Sonuç olarak

azalan hava paketçığı oranı sıvı damlanın yüzeyle daha fazla temas eden alanının oluşmasına ve daha yavaş kaymasına neden olabilir.

**Tablo 7.21:** 8µl *DI-Su* test sıvısı için 5 farklı tasarıma sahip mikrodesenli PDMS substrat üzerine Sıvı Parafin emdirilerek hazırlanmış % 50:50 PS/ $GO_w$  kaygan kompozit yüzeylerin kayma performans sonuçları

Numune Kodu/ İletkenlik (S/cm) Yağ emdirme Sonrası $\theta_e$ (°)  Sıvı Parafin Emdirilmiş Test Sıvısı: <i>DI-SU</i>	$\theta_e$ (°) (@4µL <i>DI-su</i> )	SA (//) $\theta_e$ (°)	$\theta_{adv}$ (//) (°)	$\theta_{rec}$ (//) (°)	CAH (°)	Kayma Hızı @SA (mm/s)
PDMS <sub>S1:T1R</sub> + PS NA $\theta_e = 124^\circ$	128.1 	6.7 	90	84	6	0.021
PDMS <sub>S1:T1R</sub> + R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> 78.4 S/cm $\theta_e = 124^\circ$	131 	17 	75.1 2	74.8	0.4	0.45
PDMS <sub>S1:T2R</sub> + R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> 13 S/cm $\theta_e = 107^\circ$	128 	22.9 	93	87.3	5.7	0.14
PDMS <sub>S1:T3R</sub> + R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> 12 S/cm $\theta_e = 114^\circ$	121.3 	18.6 	92,3	80,5	11.8	0.26
PDMS <sub>S1:T4R</sub> + R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> 8 S/cm $\theta_e = 116^\circ$	120 	18.3 	100. 7	93.6	7.1	0.13
PDMS <sub>S1:T5R</sub> + R <sub>2/26</sub> -(%50PS+%50GO <sub>w</sub> ) <sub>5Kat</sub> 43 S/cm $\theta_e = 113^\circ$	124.4 	9.5 	92.7	86.1	6.6	0.09

## 7.5. PS Kompozit Kaygan Yüzeylerin Dış Uyarana Karşısında Akıllı Tepki Verme Potansiyellerinin Belirlenmesi

Cam, pürüzlü cam ve Mikrodesenli PDMS substratların yağ emdirilme sonrası kayganlık kabiliyetini muhafaza edip etmediği bu bölümde irdelenmiştir. Burada yağ emdirilerek 15 dk bekletilen substratlara bırakılan damlanın tepe noktasına teğet ve daima yüzeye paralel olacak şekilde konumunu koruyan ince bakır telden bir elektrik hattı çekilmiştir. İletken substrat r-PS-GO<sub>w</sub> artı, tel hattı eksi olacak şekilde uygun potansiyel saptandıktan sonra (10V-0.6A gibi) kayma açısında kaymakta olan damlanın durdurulma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

DeneySEL olarak 3 aşamada gerçekleştirilmiştir:

1. Elektrik iletkenliğine dayalı olarak, yağ emdirilmiş cam ve farklı desenlere sahip mikrodesenli PDMS substrat üzerine farklı iletkenlikteki r-PS/GO<sub>w</sub> kompozit yüzeylerin yere paralel konumdan kayma hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek damlanın harekete geçirilmesi.
2. Damlaya voltaj uygulanarak damlanın durdurulması.
3. Durdurulan damlaya voltaj uygulamasını keserek yüzeyi daha yüksek açığa sahip olacak şekilde tekrar kayma noktasına gelinceye kadar eğme.

**a) Pürüzlü (PC-R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub>) ve düz cam (R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub>)**

**İçin:**

- Pürüzlü (PC-R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub>) ve düz cam (R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub>) için yüzeylerinin Parafin ve SiOil-yağı emdirilmiş kaplamanın 15 dk bekletildikten sonra, kayma performans deneylerinde test sıvısı olarak 8µL saf su kullanılarak damla hareketi incelenmiştir.
- İletken r-PS-GO<sub>w</sub> cam yüzey artı, tel hattı eksi olacak şekilde 10V-0.6A DC potansiyel uygulanarak kayma açısında kaymakta olan damlanın durdurulma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- Elektriksel potansiyel uygulaması kaldırılıp eğiklik artırılarak damlanın tekrar yüzey üzerinde kayıp kaymama durumu incelenmiştir.
- R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub>, PC-R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> karışım oranlarının bulunduğu yüzeyleri için SiOil ve Parafin yağının 8 µL su test

sıvısı ile kayma açısında kaymakta olan damlanın kayma performansları değerlendirilmiştir.

Şekil 7.12 ve Şekil 7.13'te Parafin yağı ile yağlanmadan önce ve sonra, Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'te SiOil ile yağlanmadan önce ve sonra pürüzlü ve düz cam yüzeylerinin 10V-0.6A DC kullanılarak damlanın durdurulma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

**b)PDMS substrat (PDMS<sub>S:T5</sub>:-R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub>) için:**

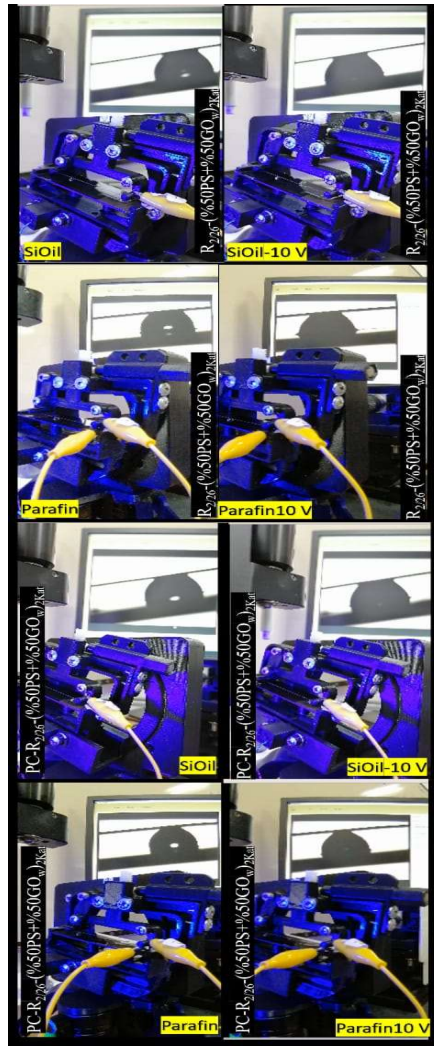
- Mikrodesenli PDMS substratlar için yapılan deneyde ise Parafin yağı emdirilmiş PDMS<sub>S:-R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub></sub> kaplama ile oluşturulmuş her bir tasarım için yüzeylerinin 15 dk bekletildikten sonra test sıvısı olarak 8µL saf su kullanılarak damla hareketi incelenmiştir.
- İletken r-PS-GO<sub>w</sub> mikrodesenli PDMS yüzey artı, tel hattı eksi olacak şekilde damlanın durdurulmasına geldiği ilk voltaj değeri belirlenir 17V-0.6A DC potansiyel uygulanarak kayma açısında kaymakta olan damlanın durdurma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- Elektriksel potansiyel uygulaması kaldırılıp eğiklik arttırılarak damlanın tekrar yüzey üzerinde kayıp kaymama durumu incelenmiştir. Mikrodesenli PDMS substratlar PDMS<sub>S:-R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub></sub> için Parafin yağı kullanılmış, 17V-0.6A DC kullanılarak damlanın durdurulma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7.16'da 1 mg/ml PS yüzeyinin Parafin yağı emdirme önce ve sonrasındaki voltaj uygulama öncesi ve sonrası deney sonuçları verilmiş akabinde sırasıyla aynı işlem Şekil 7.17'de PDMS<sub>S:T1R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub></sub> Yüzeyi, Şekil 7.18 PDMS<sub>S:T2R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub></sub> Yüzeyi, Şekil 7.19'da PDMS<sub>S:T3R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub></sub> Yüzeyi, Şekil 7.20'de PDMS<sub>S:T4R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub></sub> Yüzeyi ve Şekil 7.20'de PDMS<sub>S:T5R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub></sub> yüzeyi için 17V-0.6A DC potansiyel uygulanarak kayma açısında kaymakta olan damlanın durdurma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Elektrik iletkenliğine dayalı olarak, mikro desenli PDMS substrat üzerinde bulunan yağ R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> ve PC-R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> cam yüzeylerinin farklı yağlama türlerinde kayma performansı ve kayma açısında kaymakta olan damlanın durdurulması durumu incelendiğinde mikrodesenli PDMS substralarda (PDMS<sub>S</sub> + R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub>) olduğu gibi bir döngü sağlanamamış kayma açısında voltaj uygulanıp

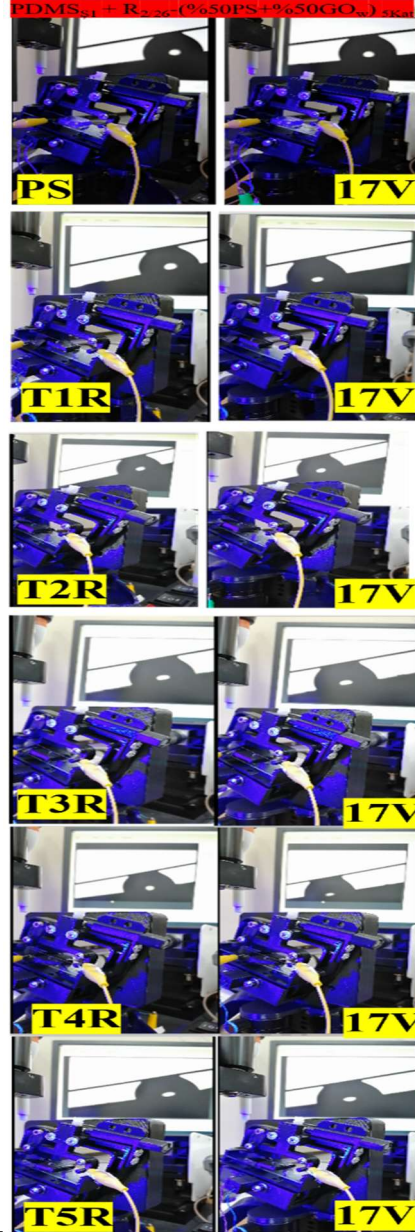
damla durdurulduktan sonra, yüzeyde voltajın kapatıldıktan sonra kayma açısı değiştirilse dahi hareket etmediği gözlemlenmiş, Parafin yüzeyde kayma açısı daha yüksek olmasına rağmen yüzeyde tuttuğu yağ kalınlığı ve damla hızı göz önünde bulundurulduğunda daha avantajlı olduğu görülmüş, kendini onarma kabiliyeti Tablo 7.23'te incelenmiştir.

Şekil 7.10'da düz cam  $R_{2/26}-(\%50PS+\%50GOw)_{2Kat}$  ve pürüzlü cam  $PC-R_{2/26}-(\%50PS+\%50GOw)_{2Kat}$  yüzeylerinin Parafin ( $0,829-0,890 \text{ g/cm}^3$ ) ve 50 cst SiOil ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek  $8 \mu\text{L}$  damlanın harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(10V) yavaşlatma-durdurulma çalışmasının temas açısı cihazından alınmış canlı görüntüleri bulunmaktadır.



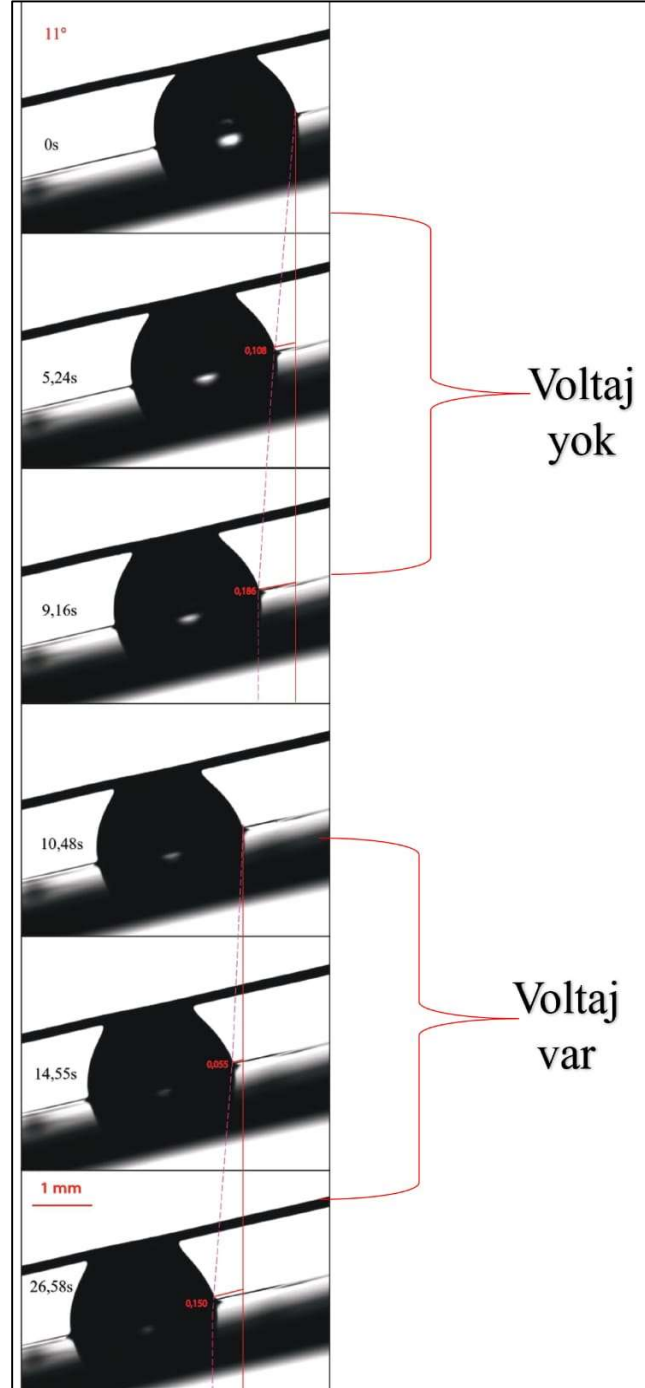
**Şekil 7.10.**  $R_{2/26}-(\%50PS+\%50GOw)_{2Kat}$  ve  $PC-R_{2/26}-(\%50PS+\%50GOw)_{2Kat}$  yüzeylerinin Parafin ( $0,829-0,890 \text{ g/cm}^3$ ) ve 50 cst SiOil ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek  $8 \mu\text{L}$  damlanın harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(10V) yavaşlatma-durdurulma çalışması

Şekil 7.11’de T1R tasarımından T5R tasarımına kadar mikrodeseanlı PDMS ( $\text{PDMS}_{\text{Ş1}}:-\text{R}_{2/26}-(\%50\text{PS}+\%50\text{GOw})_{5\text{Kat}}$ ) yüzeylerinin Parafin( $0,829-0,890 \text{ g/cm}^3$ ) ile yağlanmış yere paralel konumdan  $8 \mu\text{L}$  damlanın kayma hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek damlanın harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak( $17\text{V}$ ) yavaşlatılma-durdurulma çalışmasının temas açısı cihazından alınmış canlı görüntüleri verilmiştir.



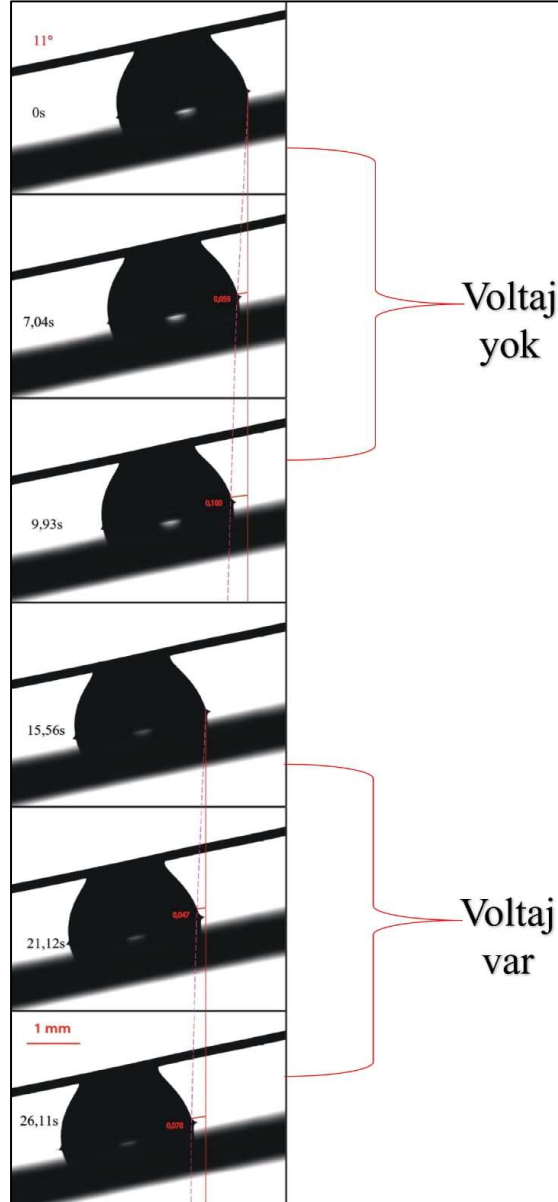
**Şekil 7.11.**  $\text{PDMS}_{\text{Ş1}}:-\text{R}_{2/26}-(\%50\text{PS}+\%50\text{GOw})_{5\text{Kat}}$  T1R tasarımından T5R tasarımına kadar yüzeylerin Parafin( $0,829-0,890 \text{ g/cm}^3$ ) ile yağlanmış yere paralel konumdan  $8 \mu\text{L}$  damlanın kayma hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek damlanın harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak( $17\text{V}$ ) yavaşlatılma-durdurulma çalışması

Şekil 7.12’de PC-R<sub>2/26</sub> (%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> 12.51 S/cm ile kaplanmış ve Parafin (0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kayma hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL damlanın harekete geçirilmesi ve akabinde damlaya voltaj uygulanarak (10V) damlanın ilerleme hareketinin yavaşlatılması incelenmiştir.



Şekil 7.12. Elektrik iletkenliğine dayalı olarak, pürüzlü (rodajlı) substrat üzerinde bulunan Parafin yağı (0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) emdirilmiş grafen yüzeylerde 8 µL damlanın kayma hareketi ve bu hareket esnasında damlanın durdurularak yapılan damla manipülasyonu deneyi

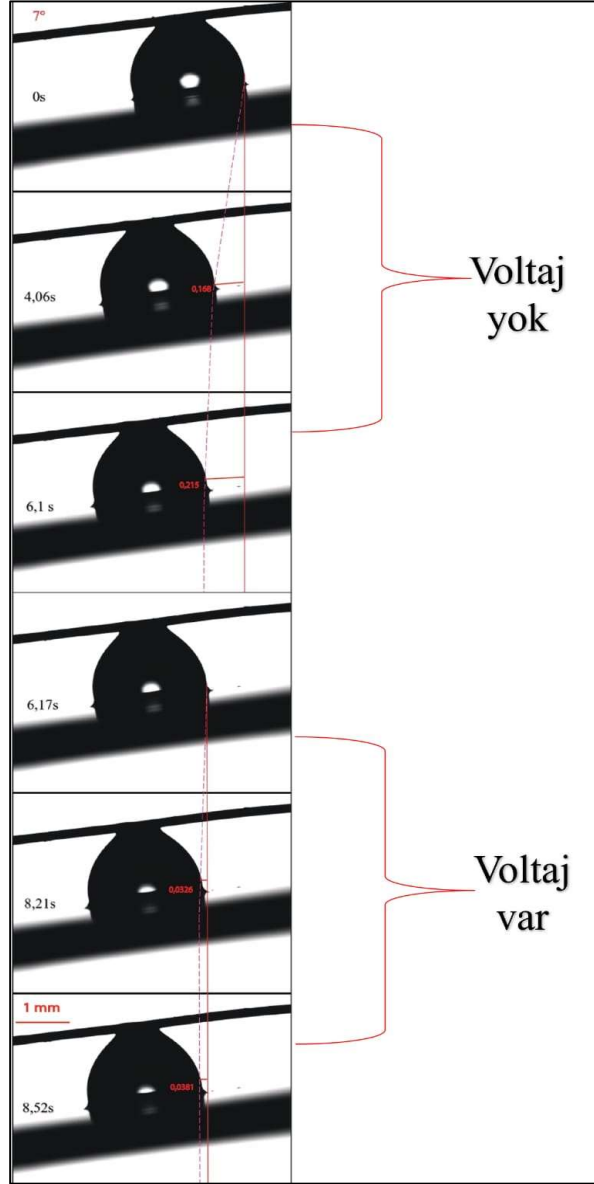
Şekil 7.13'te  $R_{2/26}$  (%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> 21.22 S/cm ile kaplanmış ve Parafin (0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan 8 µL kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek damlanın harekete geçirilmesi ve akabinde damlaya voltaj uygulanarak (10V) damlanın durmaya yaklaşması durumu incelenmiştir.



**Şekil 7.13.** Elektrik iletkenliğine dayalı olarak, düz cam üzerinde bulunan Parafin yağı (0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) emdirilmiş grafen yüzeylerde 8 µL damlanın kayma hareketi ve bu hareket esnasında damlanın durdurularak yapılan damla manipülasyonu deneyi



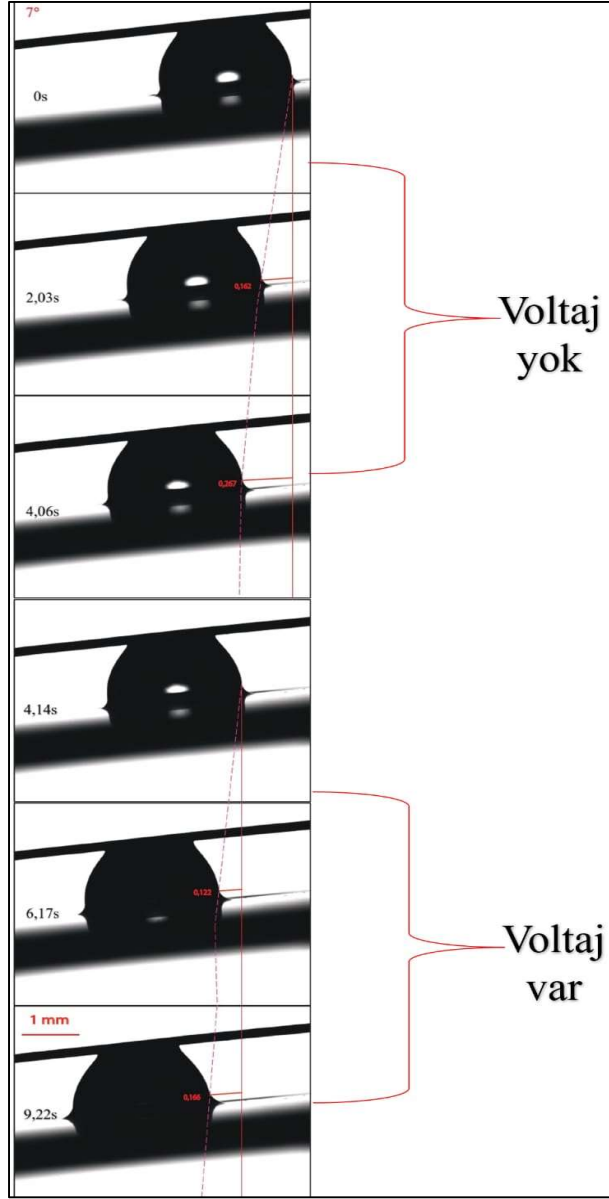
Şekil 7.14'te PC-R<sub>2/26</sub> (%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> 12.51 S/cm ile kaplanmış ve 50 Cst SiOil ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su damlasının harekete geçirilmesi ve akabinde damlaya voltaj uygulanarak (10V) damlanın neredeyse durdurulması.



**Şekil 7.14.** Elektrik iletkenliğine dayalı olarak, pürüzlü (rodajlı) cam substrat üzerinde bulunan 50 cst SiOil yağı emdirilmiş grafen yüzeylerde damla kayma hareketi ve bu hareket esnasında 8 µL su damlasının durdurularak yapılan damla manipülasyonu deneyleri

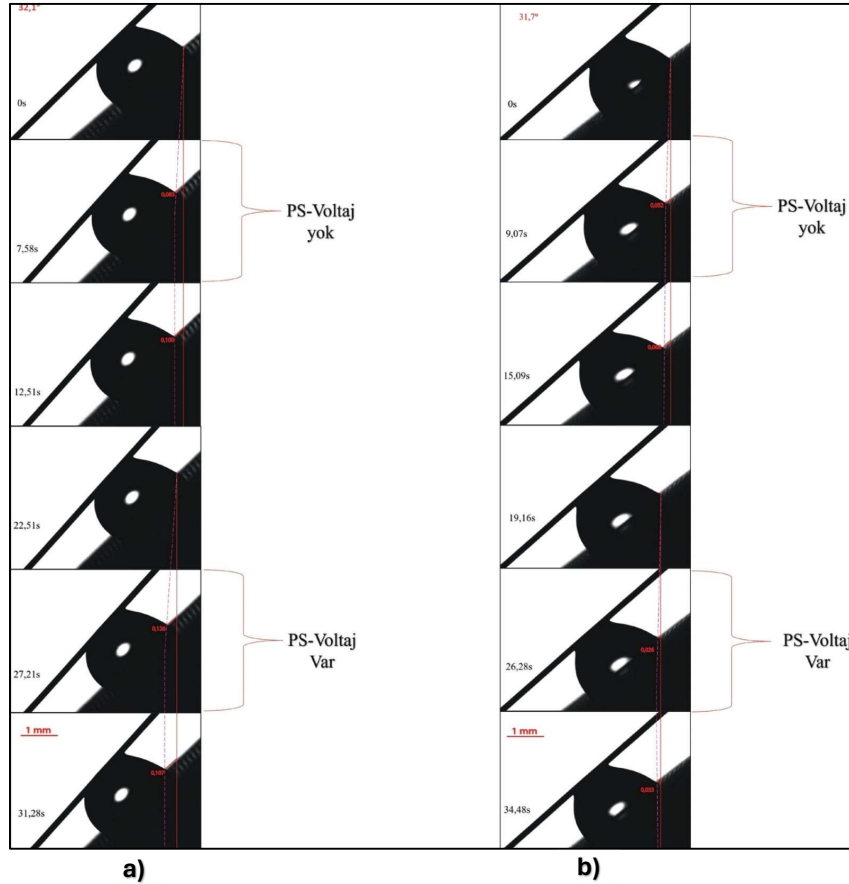
Şekil 7.15'te R<sub>2/26</sub> (%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>2Kat</sub> 21.22 S/cm ile kaplanmış ve 50 Cst SiOil ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına

kadar eğerek 8  $\mu\text{L}$  su damlasının harekete geçirilmesi ve akabinde damlaya voltaj uygulanarak (10V) damlanın şişerek durdurulması incelenmiştir.



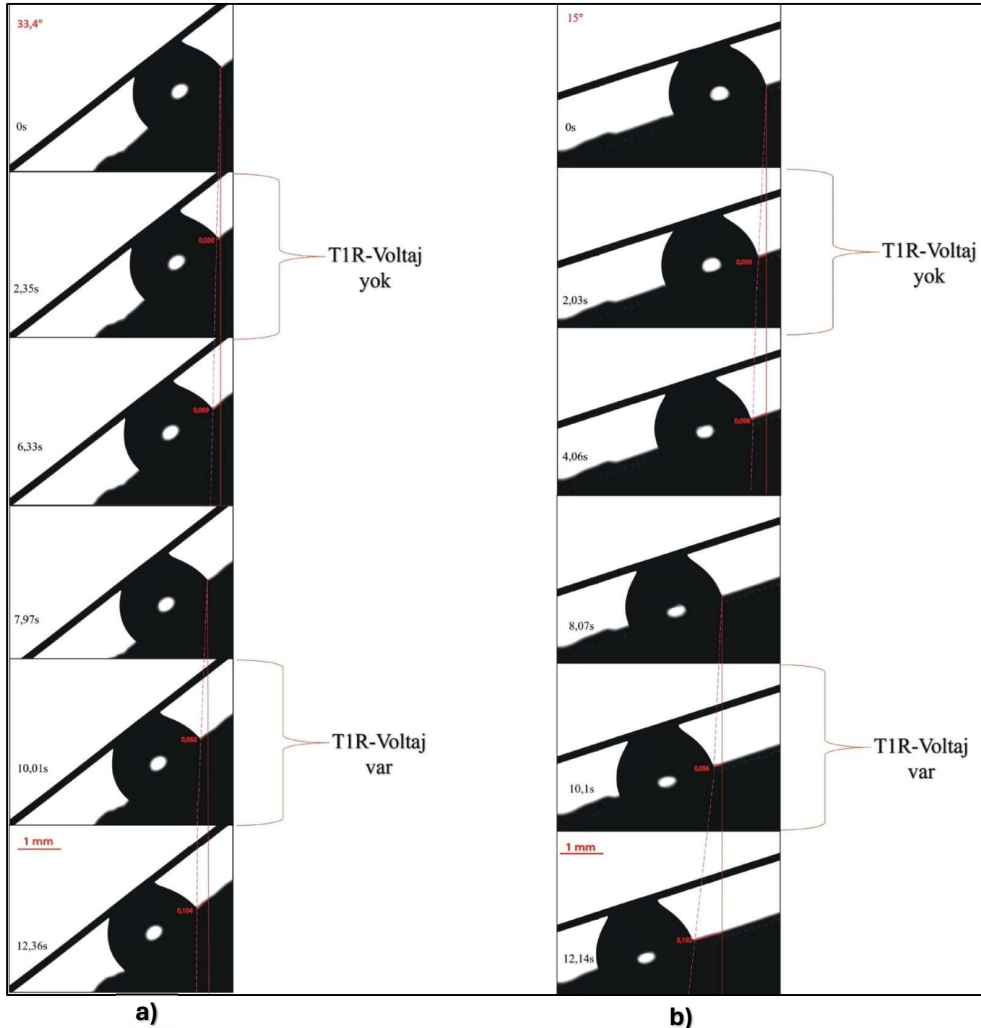
**Şekil 7.15.** Elektrik iletkenliğine dayalı olarak, düz cam substrat üzerinde bulunan SiOil yağı emdirilmiş grafen yüzeylerde 8  $\mu\text{L}$  su damlasının kayma hareketi ve bu hareket esnasında damlanın durdurularak yapılan damla manipülasyonu deneyleri

Şekil 7.16'da 1 mg/ml PS ile kaplanmış mikro desenli PDMS yüzey ve bu yüzeyin Parafin yağı ( $0,829-0,890 \text{ g/cm}^3$ ) ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek  $8 \mu\text{L}$  su damlasının harekete geçirilmesi, damlayı durdurma ve tekrar damlayı harekete geçirmek için 17V voltaj uygulanarak damlanın performansı incelenmiştir. Parafin yağı kullanılmadan voltaj uygulandığında damlanın hareketine devam ettiği, Parafin yağı kullanıldıktan sonra ise voltaj uygulaması sonrasında damlanın hareketini durdurduğu gözlemlenmiştir.



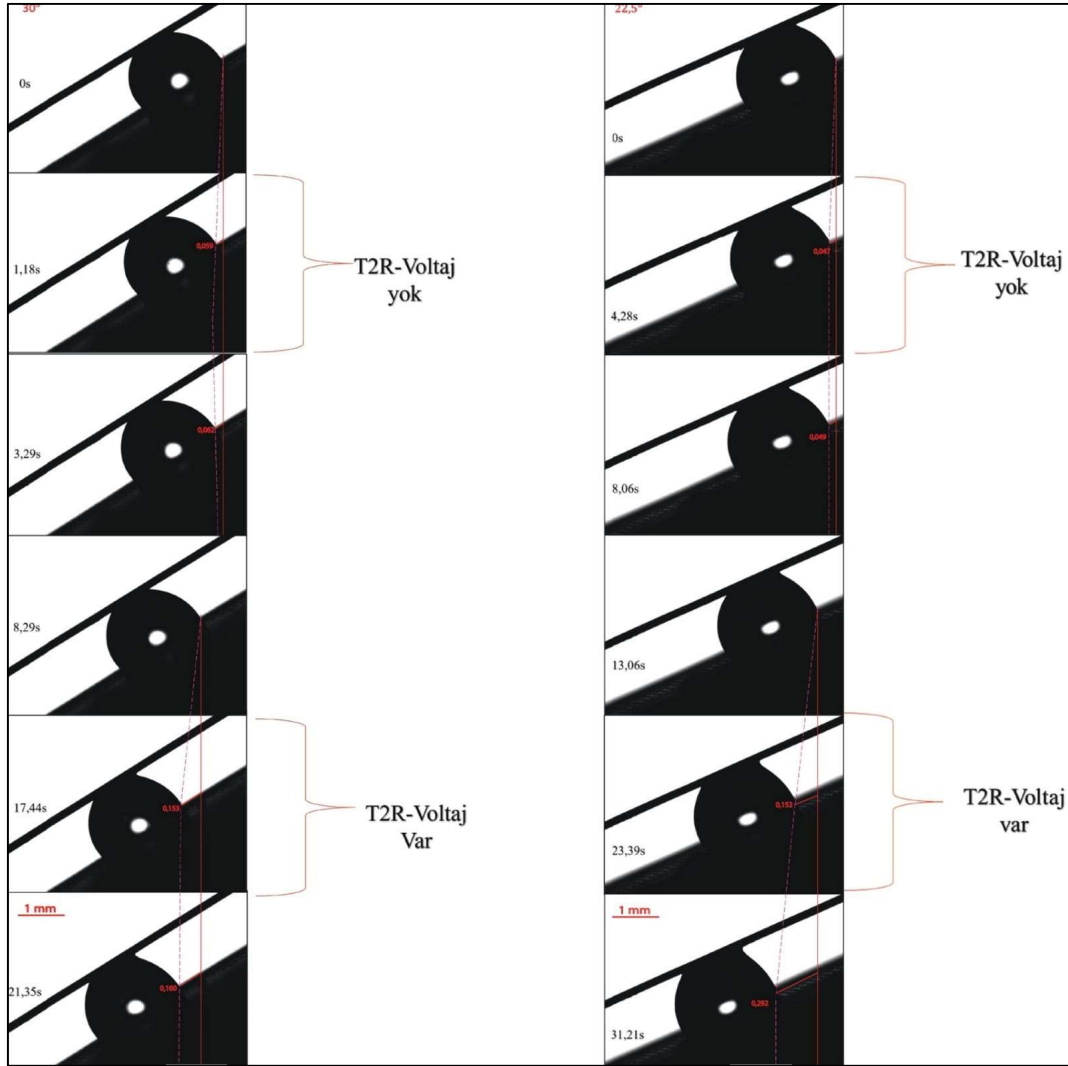
**Şekil 7.16. a)** 1 mg/ml PS ile kaplanmış yüzey ve **b)** 1 mg/ml PS ile kaplanmış mikro desenli PDMS Parafin( $0,829-0,890 \text{ g/cm}^3$ ) ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek  $8 \mu\text{L}$  su damlasının harekete geçirilmesi ve akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) damlanın durdurulması

Şekil 7.17'de PDMS<sub>Ş1:T1R-R2/26-(%50PS+%50GOw)</sub><sub>5Kat</sub>/78.4 S/cm yüzeyi ve PDMS<sub>Ş1:T1R-R2/26-(%50PS+%50GOw)</sub><sub>5Kat</sub>/78.4 S/cm yüzeylerinin Parafin yağı (0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su 17V voltaj uygulanarak damlanın performansı incelenmiştir. Parafin yağı kullanılmadan voltaj uygulandığında damlanın hareketine devam ettiği, Parafin yağı kullanıldıktan sonra da voltaj uygulaması sonrasında damlanın hareketini devam ettirdiği gözlemlenmiştir.



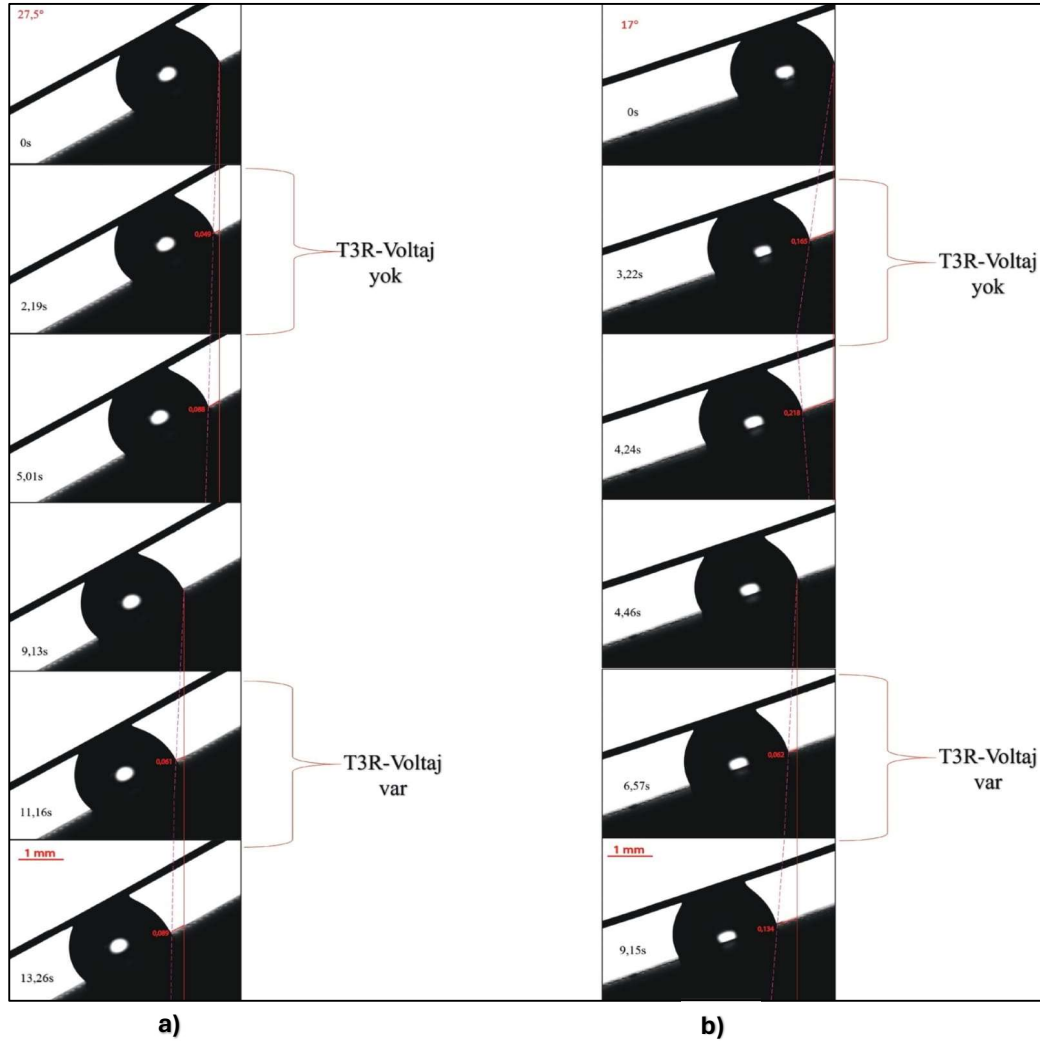
**Şekil 7.17. a)** PDMS<sub>Ş1:T1R-R2/26-(%50PS+%50GOw)</sub><sub>5Kat</sub>/78.4 S/cm yüzeyi ve **b)** PDMS<sub>Ş1:T1R-R2/26-(%50PS+%50GOw)</sub><sub>5Kat</sub>/78.4 S/cm yüzeyinin Parafin (0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su damlasının harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak (17V) damlanın hareketine devam etmesi

Şekil 7.18’de PDMSŞ1:T2R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/13 S/cm yüzeyi ve PDMSŞ1:T2R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/13S/cm yüzeylerinin Parafin yağı (0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su 17V voltaj uygulanarak damlanın performansı incelenmiştir. Parafin yağı kullanılmadan voltaj uygulandığında damlanın hareketine devam ettiği, Parafin yağı kullanıldıktan sonra da voltaj uygulaması sonrasında damlanın hareketini daha fazla mesafede devam ettirdiği gözlemlenmiştir.



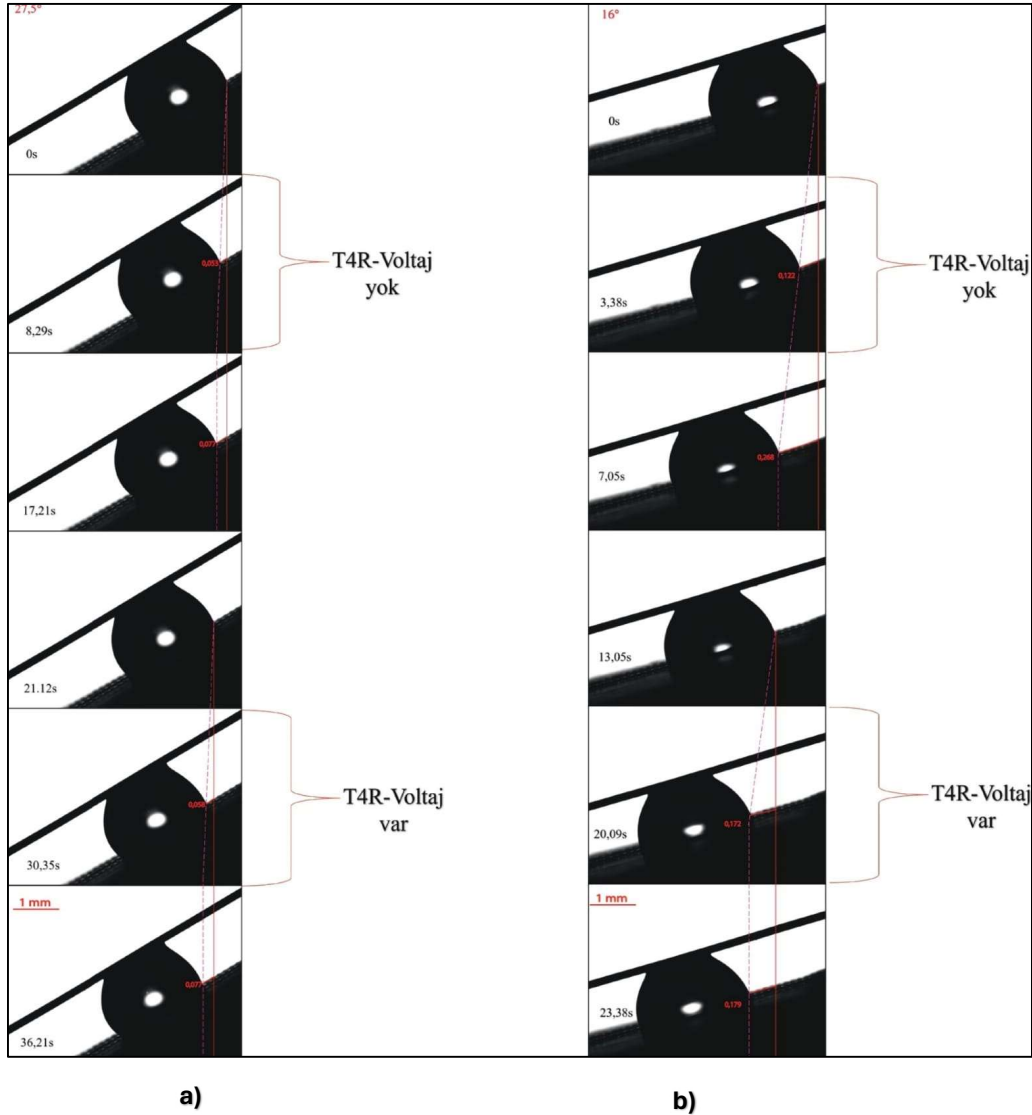
**Şekil 7.18. a)** PDMSŞ1:T2R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/13 S/cm yüzeyi ve **b)**PDMSŞ1:T2R-R2/26-(%50PS+%50GOw)5Kat/13 S/cm yüzeyinin Parafin(0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su damlasının harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) damlanın hareketine devam etmesi

Şekil 7.19’da PDMS<sub>Ş1:T3R-R2/26-(%50PS+%50GOW)</sub><sub>5Kat</sub>/12 S/cm yüzeyi ve PDMS<sub>Ş1:T3R-R2/26-(%50PS+%50GOW)</sub><sub>5Kat</sub>/12 S/cm yüzeylerinin Parafin yağı(0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su 17V voltaj uygulanarak damlanın performansı incelenmiştir. Parafin yağı kullanılmadan voltaj uygulandığında damlanın hareketine devam ettiği, Parafin yağı kullanıldıktan sonra da voltaj uygulaması sonrasında damlanın hareketini daha fazla mesafede devam ettirdiği gözlemlenmiştir.



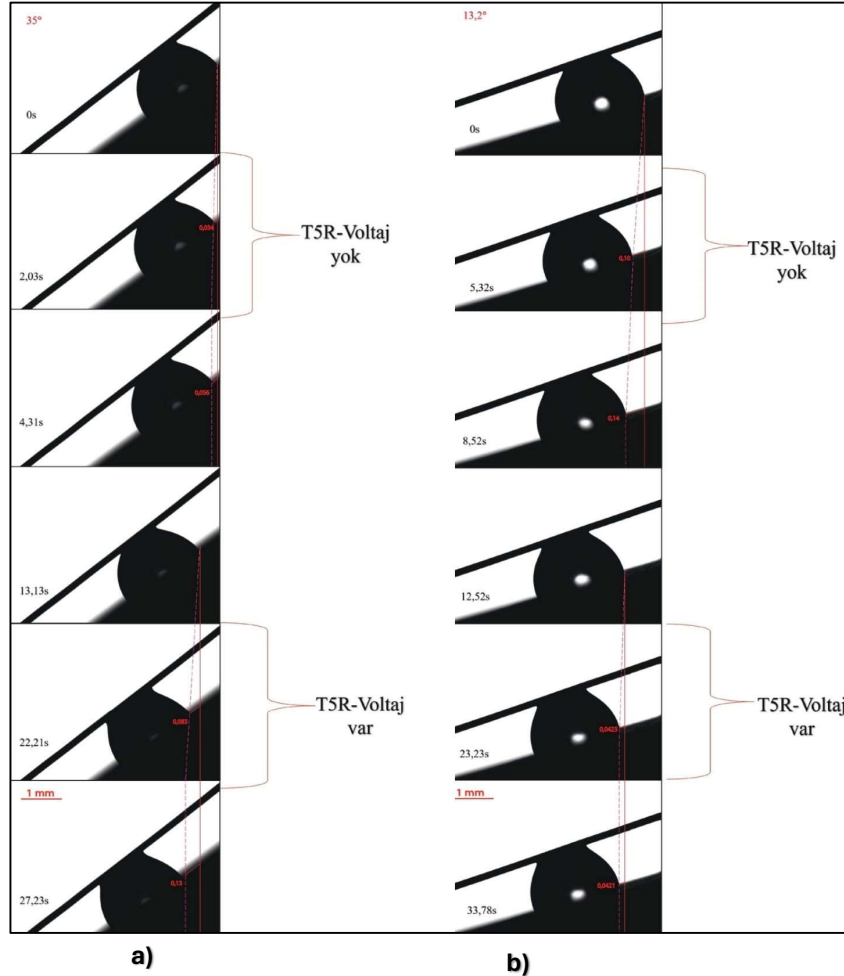
**Şekil 7.19. a)** PDMS<sub>Ş1:T3R-R2/26-(%50PS+%50GOW)</sub><sub>5Kat</sub>/12 S/cm yüzeyi ve **b)** PDMS<sub>Ş1:T3R-R2/26-(%50PS+%50GOW)</sub><sub>5Kat</sub>/12 S/cm yüzeyinin Parafin(0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su damlasının harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) damlanın hareketine devam etmesi

Şekil 7.20’de PDMS<sub>Ş1:T4R-R2/26-(%50PS+%50GOW)</sub><sub>5Kat/8</sub> S/cm yüzeyi ve b)PDMS<sub>Ş1:T4R-R2/26-(%50PS+%50GOW)</sub><sub>5Kat/8</sub> S/cm yüzeylerinin Parafin yağı(0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su 17V voltaj uygulanarak damlanın performansı incelenmiştir. Parafin yağı kullanılmadan voltaj uygulandığında damlanın hareketine devam ettiği, Parafin yağı kullanıldıktan sonra da voltaj uygulaması sonrasında damlanın hareketini daha fazla mesafede devam ettirdiği durmaya çok yaklaştığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 7.20. a)** PDMS<sub>Ş1:T4R-R2/26-(%50PS+%50GOW)</sub><sub>5Kat/8</sub> S/cm yüzeyi ve **b)** PDMS<sub>Ş1:T4R-R2/26-(%50PS+%50GOW)</sub><sub>5Kat/8</sub> S/cm yüzeyinin Parafin (0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL damlasının harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) damlanın hareketinin çok yavaşlar

Şekil 7.21’de PDMS<sub>Ş1:T5R-R2/26-(%50PS+%50GOw)</sub><sub>5Kat</sub>/43 S/cm yüzeyi ve PDMS<sub>Ş1:T5R-R2/26-(%50PS+%50GOw)</sub><sub>5Kat</sub>/43 S/cm yüzeylerinin Parafin yağı(0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yüzeylerin yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su 17V voltaj uygulanarak damlanın performansı incelenmiştir. Parafin yağı kullanılmadan voltaj uygulandığında damlanın hareketine devam ettiği, Parafin yağı kullanıldıktan sonra da voltaj uygulaması sonrasında damlanın hareketinin durduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 7.21. a)** PDMS<sub>Ş1:T5R-R2/26-(%50PS+%50GOw)</sub><sub>5Kat</sub>/43 S/cm yüzeyi ve **b)** PDMS<sub>Ş1:T5R-R2/26-(%50PS+%50GOw)</sub><sub>5Kat</sub>/43 S/cm yüzeyinin Parafin(0,829-0,890 g/cm<sup>3</sup>) ile yağlanmış yere paralel konumdan kaymaya hareketinin başladığı kayma açısına kadar eğerek 8 µL su damlasının harekete geçirilmesi akabinde damlaya voltaj uygulanarak(17V) damlanın durdurulması



Kaygan yüzeylerin Led ışığı yakma deneylerinde düşük direnç yani yüksek iletkenliği görsel olarak ifade edebilme adına yüksek voltajlı (3V) mavi led diyottan geriye doğru sırasıyla 2,6V'luk yeşil led, 2V'luk sarı led, 1,8V'luk kırmızı led başarıyla yakılabilmektedir. Şekil 7.22'de iletken olarak elde edilen PS/GO (r-(PS+GO@THF-DC-4)) yüzeyi için led diyot yakma performans uygulaması sırasında alınan dijital fotoğraflar yer almaktadır. Burada 133 S/cm iletkenliğe sahip yüzeyin 1,8 V Kırmızı ve 2 V Sarı lambayı güçlü yakmadığı 2,6 V ve 3 V uygulamalarında parlaklığının arttığı gözlemlenmiştir. 2 V ve altı iletkenlik değeri için çok güçlü olmasa da sınırdan bir parlaklık oluşturduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 7.22.** r-(PS+GO@THF-DC-4) yüzeyi için led diyot yakma performans uygulaması sırasında alınan dijital fotoğraflar

**Tablo 7.22.** Cam üzerine kaplı r-(PS+GO@THF-DC-4) kaygan PS/GO yüzeyinin kendini onarma performansı testi sırasında alınmış dijital fotoğraflar

Numune	Video Kesit Görselleri
r-(PS+GO@THF-DC-4)	

Cam üzerine kaplı r-(PS+GO@THF-DC-4) 50 cst SiOil Yağlı kaygan PS/GO yüzeylerinin kendini onarma kabiliyeti, yüzeyin mekanik yolla çizilmesi (Tablo 7.22) suretiyle incelenmiştir. Çizme sonrası yüzeyin kendini onarması için yaklaşık 30s beklenmiş ve daha sonra yüzeye 8 µL su damlası bırakılmıştır. Damlanın hasar bölgesi olan çizik üzerinden başarıyla geçtiği görülmüştür.

Tablo 7.23'te  $R_{2/26}-(\%50PS+\%50GO_w)_{2Kat}$  ve  $PDMS_{\text{Ş1:T5R}}-R_{2/26}-(\%50PS+\%50GO_w)_{5Kat}$  yüzeylerinin Parafin yağı ( $0,829-0,890 \text{ g/cm}^3$ ) ile kaygan yüzey haline getirilip 8µl saf su test sıvısı kullanılarak yüzeye belirli noktalarda verilen hasara(çiziğe) karşı kendini onardığını ve damla hareketinin sürdüğü görülmektedir.

**Tablo 7.23.**  $R_{2/26}-(\%50PS+\%50GO_w)_{2Kat}$  ve  $PDMS_{\text{Ş1:T5R}}-R_{2/26}-(\%50PS+\%50GO_w)_{5Kat}$  Parafin yağlı Kaygan numunelerinin yüzeyini çizerek yüzeyin kendi kendini onarması deneyi.

Kaydırılan test sıvısı 8µl saf su, yağlayıcı: Parafin( $0,829-0,890 \text{ g/cm}^3$ )

Numune	Video Kesit Görselleri				
$R_{2/26}-(\%50PS+\%50GO_w)_{2Kat}$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Numune</th> <th>Video Kesit Görseller</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> </td> </tr> </tbody> </table>	Numune	Video Kesit Görseller		
	Numune	Video Kesit Görseller			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Numune</th> <th>Video Kesit Görselleri</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> </td> </tr> </tbody> </table>	Numune	Video Kesit Görselleri			
Numune	Video Kesit Görselleri				

## 8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması; yalıtkan olan PS polimerine düşük miktarda iletken malzeme (grafen) katkılanması ile iletken grafen katkılı PS yüzeylerin üretimi, bu yüzeylerin farklı yağlayıcı sıvılarıyla kayganlaştırılması sonucunda kendini onaran kaygan grafen katkılı PS yüzeylerin üretimi ve kaygan grafen katkılı PS yüzeylerin dış uyaran (elektrik) ile uyarılması sonucunda mikrolitre hacminde sıvı damlanın hızının (hızlandırma/yavaşlatma/durdurma) kontrol edilmesi ile akıllı tepki verme kabiliyetlerinin tespit edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçlar doğrultusunda tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara dair belirgin sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

### **i) Grafitin asit ve oksidant ortamında bir seri reaksiyonu sonrasında grafit oksit sentezi:**

Grafen, mikromekaniksel olarak grafitin tabakalarının ayrılması (Eksfoliasyon) (Novoselov et al., 2004), kimyasal buhar biriktirme yöntemi (Reina et al., 2009) ve Epitaksiyel büyütme (Kosynkin et al., 2009) gibi birçok yöntemle üretilebilmektedir. Ancak bu yöntemlerin en büyük dezavantajı pahalı ve düşük miktarda grafen üretimine olanak sağlamalarıdır. Grafenin ucuz ve yüksek miktarda üretiminde kimyasal olarak grafen üretimi ön plana çıkmaktadır. Tez kapsamında bu nedenle grafen üretimi için kimyasal yöntemle grafen sentezi gerçekleştirilmiştir. Kimyasal yöntemle grafen sentezi, grafitten bir seri reaksiyonla sentezlenen grafit oksitin ultrasonik ortamda tabakalandırılması ile grafen oksit eldesi ve grafen oksitin kimyasal/termal olarak indirgenmesi ile grafen üretimini temel alır. Grafenin üstün özelliklerinin sağlanmasında grafit oksitin sentez yöntemi ve indirgenme prosedürü kilit öneme sahiptir. Bu nedenle grafit oksit sentezi, literatürdeki farklı üretim yöntem örnekleri (Laçin & Dönmez, 2021; Yazici et al., 2016; Yıldırım et al., 2022) incelenerek yüksek verimle ve defekt derecesi düşük grafen üretimine olanak sağlayan kimyasal yöntemle grafit oksit sentezi Tour metodunun (Marcano ve ark., 2010a) modifiye edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Modifikasyon işleminde grafit oksitin safsızlıklarından arındırılması için gerçekleştirilen saflaştırma teknikleri (diyализ, tekrar tekrar yıkayarak santrifüjleme gibi) kullanılmıştır. Sentezin gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğinin kontrolü için FTIR spektrum analizleri yapılmış ve GrO yapısı içinde hidroksil, epoksi, karboksil, karbonil gibi çeşitli oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığı (Bera et al., 2017) ve dolayısıyla sentezin başarılı bir şekilde yapıldığı doğrulanmıştır.

**ii) GrO ve GO katkılı PS kaygan kompozit yüzeylerin üretimi:** Tez kapsamında, PS çözeltilisine GrO'in toz halinde katılması ve ayrıca GO'in dispersiyon halinde katılması olmak üzere iki paralel çalışma ile hazırlanan süspansiyonlardan kompozit yüzeyler üretilmiştir. GrO toz katılmasında PS çözeltilisi içerisinde GrO'in sonikasyonla hem homojen dağılması hem de tabakalanması işlemlerinin gerçekleşip gerçekleşmeyeceğinin anlaşılması amacıyla araştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda GrO katılma sonucunda üretilen kompozit yüzeylerin kimyasal olarak HI/Ac asit karışımında indirgemesi sonrasında iletkenlik elde edilememiştir. Sadece substratın iletken olarak kullanılması durumunda iletken GrO katkılı kompozit yüzeyler üretilmiştir. Bu nedenle GrO'in PS içerisinde homojen bir süreklilik oluşturmadığı ama grafene indirgendiği sonuçları elde edilmiştir. Bu nedenle GrO katkılı PS kompozit yüzeylerde sadece kayma performansı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Düz ve pürüzlü cam yüzeyler üzerinde farklı kaplama kalınlıklarında (kaplama kat sayısı) daldırarak kaplama yöntemi üretilen PS-GrO kompozit yüzeylerin ve bu yüzeylerin Si-Oil ve paran yağlayıcı sıvılarla yağlanması sonucunda üretilen kaygan yüzeylerin kendini onardığı, düz substratta pürüzlü substrata göre daha yüksek kayma hızlarına ulaşıldığı ve GrO katılma oranına bağlı olarak yüzeye çıkan GrO bileşiminin değiştiği için kayma hızının GrO katılma miktarına göre ayarlanabileceği belirlenmiştir. Elde edilen PS-GrO kaygan yüzeylerin hidrofob doğaya sahip PS yüzeyine göre daha yüksek kayma hızına ve daha düşük kayma açısına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar PS-GrO kompozit yüzeylerinin mikrohasat ve mikroreaktör uygulamalarında kullanılabilme potansiyellerinin olduğu ve kendini yenileme özellikleri de kazandıkları için hasar olsa da tekrar tekrar kullanılarak pratik ve ekonomik açıdan pozitif katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

GO dispersiyonlarının farklı katılma oranlarında PS çözeltilisine eklenmesi ile hazırlanan PS-GOw kompozit yüzeyleri kimyasal olarak indirgendiğinde iletken r-PS-GOw kompozit yüzeylerin üretimi mümkün olmuştur. PS hidrofob özellik taşıyan çözücüler içerisinde çözünebilir, GO ise hidrofil özellik gösterdiği için en fazla su içerisinde tabakalanır ve hidrofil çözücüler genel olarak hidrofob özellikteki çözücüler ile homojen karışım oluşturamazlar. Bu nedenle PS/GO kompozit yüzeylerin üretiminde aşılması gereken 2 önemli sorun vardı. Birincisi: PS çözeltilisi ile homojen karışım verecek GO dispersiyonunun hazırlanması ve diğeri de GO dispersiyonunun iyi tabakalanma derecesine sahip olması. GO su içerisinde en iyi tabakalanma derecesine sahip olduğu için su+grafit oksitinin ultrasonikasyonu ile yüksek konsantrasyonlu GOw dispersiyonu hazırlanmıştır ve GO'in iyi tabakalandığından FTIR ve XRD analizleri ile emin olunmuştur. PS çözeltilisi ise su ile % 60 dispers olma özelliğine

sahip THF çözültisi ile hazırlanmıştır. Böylece THF içinde suyun dispers olma özelliği sayesinde GOw dispersiyonu hacimce %75 olacak şekilde PS'ne homojen olarak dağıtılabilmektedir. Farklı bileşimlerde GOw dispersiyonun PS çözültisine ilavesi sonrasında daldırarak kaplama yöntemi ile düz ve pürüzlü cam substratlara ve mikrodesenli PDMS substratlar üzerine kaplanarak PS-GOw kompozit yüzeyler üretilmiştir. Kaplama öncesi tüm substratlar çözültinin yüzeye iyi tutunmasını sağlamak amacıyla atmosferik plazma işlemine tabi tutulmuştur. Aksi takdirde homojen ve iyi tutunmuş yüzeyler elde edilemediği belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan mikrodesenli PDMS substratlar çukur ve tepe şeklinde kanallar üzerinde silindirik farklı dizilim sayısında piller olacak şekilde litografi yöntemi ile üretilen SU-8 kalıplardan çoğaltılarak hazırlandı. PS/GOw kompozit yüzeyler substratlar üzerine 1 kat ve 2 kat olmak üzere farklı kalınlıklarda ve 2 farklı indirgeme şartında (1/13 ve 2/26 HI/Ac asit buharı) indirgenerek grafen katkılı PS kompozit yüzeyler (r-PS-GOw) üretilmiştir. Farklı bileşimlerde grafen katkılanmış tüm yüzeyler tüm substratlar üzerinde iletken özellik gösterdiği 4-proplu iletkenlik ölçüm cihazı ile belirlendi. Düz camlar üzerinde r-PS-GOw yüzeylerinin en iletkenlikleri 4.06-33.59 S/cm arasında iken, pürüzlü camlar üzerinde ise 0.63-11.52 S/cm arasında katkılama oranı, kaplama kalınlığı ve indirgeme koşuluna bağlı olarak değişim göstermiştir ve tezin hedefine uygun olarak düşük grafen katkılı PS kompozit yüzeyler üretilmiştir. Ayrıca mikrodesenli PDMS substratlar üzerinde ise %50:50 hacim oranında PS/GO katkılanması ile desen farkına bağlı olarak 8-78.4 S/cm iletkenlikte grafen katkılı PS yüzeylerin üretimi mümkün olmuştur. Bu yüzeylere Si-Oil ve parafin emdirilmesi ile hazırlanan kaygan kompozit yüzeylerin iğne ile çatlak şeklinde çizilmesi sonrasında dahil 3-5 sn arasında kendini onardığı ve herhangi bir performans kaybına uğramadığı belirlenmiştir.

**iii) Grafen katkılı PS kompozit kaygan yüzeylerinin kayma performansı:** Grafen katkılı kompozit yüzeylerin Si-Oil ve/veya sıvı parafinle yağlanması sonucunda üretilen farklı pürüzlülük ve grafen katkı oranındaki grafen katkılı PS kaygan yüzeylerde, pürüzlülük ve yüzeye çıkan grafen bileşiminden kaynaklı değişen iletkenlik değerine bağlı olarak kayma açısı, temas açısı (denge, ilerleme ve gerileme temas açıları), CAH ve kayma hızının değiştiği belirlendi. En düşük kayma açısı %50 GOw katkılanmış r-PS-GO kaygan kompozit yüzeylerde elde edilmiştir. Ancak kayma açısı en düşük olan kompozit yüzey her koşulda en yüksek iletkenlik, en yüksek kayma hızı ve en düşük CAH değerine sahip olarak elde edilmemiştir. Bu farklılık 3 farklı pürüzlülükteki substrat içinde değişkenlik göstermiştir. Mikrodesenli PDMS substrat üzerindeki r-PS-GO kaygan yüzeyler dışında yağ emdirme öncesinde hiçbir kompozit yüzey üzerinde sıvı damla kaymazken, mikrodesenli kompozit yüzeylerde yağlama öncesi test

sıvısının kaydığı ve yağlama sonrasında kayma hızının arttığı belirlenmiştir. İletken olan tüm kaygan kompozit yüzeyler iğne ile derin çizik atıldıktan 3-5 sn sonra kendini onardığı belirlenmiştir. Ayrıca İletken olan tüm kaygan kompozit yüzeyler led ışığı yaktığı belirlenmiştir. Düz ve pürüzlü cam üzerinde üretilen grafen katkılı PS kaygan kompozit yüzeyler üzerinde 3, 5 ve 8 $\mu$ L test sıvısının damlatılması ve yüzeyin test sıvısının kaymasına kadar eğilmesi sonrasındaki kayma hızı sonuçlarına göre; 8  $\mu$ L test sıvı için 26.60 kayma açısında pürüzlü cam üzerinde en yüksek kayma hızı (2.04 mm/sn) elde edilmişken, en düşük kayma hızı (0.17 mm/sn) düz cam substrat üzerinde Si-Oil yağlayıcı sıvısı kullanılarak üretilen kaygan kompozit yüzeylerde olduğu belirlenmiştir. Düz ve pürüzlü cam substratlar üzerinde elde edilen bu sonuçlar düşük hacimlerdeki test sıvılarının hedeflenen sürede sıvı damlanın belli bir yolu alması için kullanılma potansiyeli olduğunu ve akıllı uygulamalar için (sensör, mikroçip gibi) potansiyel olabileceklerini göstermiştir. Mikrodeseanlı grafen katkılanmış PS kaygan yüzeyler üzerinde ise hem damla hızının hemde damlanın doğrultusunun kontrol edilebildiği belirlenmiştir.

**iv) Grafen katkılı PS kompozit Kaygan yüzeyler üzerine damlatılan mikrolitre hacmindeki sıvı damlanın dış uyaran (elektrik) ile uyarılması sonucunda sıvı damlanın hızlanma/yavaşlama/durma hareketi-akıllı tepkisi:**

Akıllı tepki verme performansları bu aşamada incelenmiştir. r-GO/PS<sub>w</sub> yüzeylerine yağlayıcı sıvı (Parafin yağı) emdirilmesi sonucunda hazırlanan kaygan r-GO<sub>w</sub>/PS yüzeylerinin; kendini yenilediği, yüzey stabilitesini koruduğu, led ışık yakma performansı sergilediği ve dış uyaran karşısında akıllı tepki verdiği belirlenmiştir. Farklı tasarımlardaki PDMS şablonlar üzerinde 2/26 HI/Ac indirgeme şartında PDMS+ R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub> grafen katkılı kompozit yüzeyler hazırlanmıştır. Bu yüzeylere ait SEM görüntüleri alınmış, tüm tasarımlarda yüzeyde tabakalanmış yapı substratın desenli/desensiz tüm yüzeyinde kesintisiz olarak görülmüş ve en çok tabakalanan yüzey T5-R tasarımına ait PDMS şablon üzerinde PDMS<sub>S1:T5R</sub>+R<sub>2/26</sub>-(%50PS+%50GO<sub>w</sub>)<sub>5Kat</sub> kompozit yüzeyinde yer almıştır. Bu sonuç temas açısı ve iletkenlik sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermiştir. GrO Katkılı PS, PS+GrO@THF+EtOH, PS-GO<sub>w</sub> kompozit kaygan yüzeylerin dış uyaran karşısında akıllı tepki verme potansiyelleri incelenmiştir. SLIP yüzey olarak dış uyaran karşısında akıllı tepki verme potansiyeli ve akabinde kendini onarma denemeleri farklı substratlar üzerinde başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma yalıtkan PS malzemeye iletken bir duyarlılık kazandırılmış ve duyarlılığının yanında su itici özelliği (hidrofobluk) korunmaya çalışılmıştır. Biyomimetik olarak akıllı

malzemelerin üretilebilirliğinde yüzeyin kimyasal ve topografik özelliklerinin göstergesi olan ıslatılabilirlik davranışı oldukça önemli bir parametre olduğu görülmüştür(Gengec ve ark., 2016) ve ıslatılabilirlik davranışı temel olarak temas açısı ölçümleri ile belirlenmiştir. Yüzey-sıvı arasında düşük yapışmanın olduğu yüzeyler kendini temizleyen yüzey olarak tanımlanmakta ve kendini temizleyen yüzeye bir sıvı damlası bırakıldığında ve yüzey sadece birkaç derece eğildiğinde su damlası kolayca yuvarlanmakta ve kaymaktadır (Neinhuis & Barthlott, 1997; Quéré, 2005; T. S. Wong ve ark., 2011). Yüzey için yağlayıcı tipi ve akma süresi stabilize edildikten sonra sıvı (su) damlasının bırakıldığında ve yüzey sadece birkaç derece eğildiğinde su damlası kolayca yuvarlanıp kaydığı görülmüştür. Bu esnada sıvı damlaya özgü hız hesaplamaları yapılmıştır. Farklı çalışma alanlarında kullanılması amacıyla yüzey tipi özelliklerinin detaylı araştırma sonucu verilmiştir. Kaygan yüzeyler üzerine damlatılan mikrolitre hacmindeki sıvı damlanın dış uyaran (elektrik) ile uyarılması sonucunda sıvı damlanın hızlanma/yavaşlama/durma tepkisi (akıllı tepki) verme performanslarının belirlenmiştir. Ayrıca hazırlanan yüzeyler, X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), **Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR)**, Optik mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), İletkenlik ve temas açısı ölçümleri ile karakteri edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar r-GO/PS yüzeylerine yağlayıcı sıvı emdirilmesi sonucunda hazırlanan kaygan r-GO/PS yüzeylerinin; kendini yenilediği, yüzey stabilitesini koruduğu, led ışık yakma performansı sergilediği ve dış uyaran karşısında akıllı tepki verdiği belirlenmiştir.

Birçok üstün özelliğinden dolayı grafen, üretiminin pahalı bir yöntem olmasından kaynaklı olarak daha ucuz olarak üretilebilirliğinin sağlanması yönünden alternatif çalışmalara başvurulmaktadır. Bu noktada az miktarda grafen kullanımını ile kompozit akıllı malzemelerin geliştirilmesi alternatif stratejilerden birsidir ve polimer malzemeler kolay işlenebilme ve ucuz olmaları nedeni ile grafen ile kompozit oluşturmak için iyi bir alternatif olarak gösterilmiştir. Çalışmanın birçok üstün özelliğinden dolayı nispeten yeni keşfedilmiş akıllı bir malzeme olan grafenin (G) dış uyaran karşısında akıllı tepki verme potansiyelinin araştırılmasına yönelik, grafen süngerler, grafen fiberler, grafen filmler, grafen/polimer kompozit malzemeler geliştirilmiş ve üstün performansı katlanabilir ekranlar, sensörler, kapasitörler, kanser hücrelerinin belirlenmesi, enerji depolama vb birçok alanda çalışma potansiyelini ortaya konmuştur. Sonraki çalışmalarda bu alanlarda aktif bir şekilde kullanılabilmesi ve teknolojik gelişmelere katkı sağlayacağı, akıllı malzeme üretim çalışmalarında öncülük edeceği düşünülmektedir.

## KAYNAKÇA

**An, R., Fan, P., Yan, N., Ji, Q., Sunkulp, G., & Wang, Y.** (2017). Nanofriction of Graphene/Ionic Liquid-Infused Block Copolymer Homoporous Membranes. *Langmuir*, 33(42), 11590–11602. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b01973>

**Atalay Gengeç N.** (2021). The Effect of Graphene Oxide Exfoliation Degree on Graphene Film Properties. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 345–355. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.900732>

**Ateş, İ., Manay, E., & Şahin, B.** (2021). *GİRİŞ Nobel ödüllü ünlü fizikçi Richard Feynman 1959 yılında yaptığı “ There is Plenty of Room at the Bottom ” adlı konuşmasında mikro / nano ölçekte imalat ve ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesiyle minyatürize edilmiş yapıların üretilip karakterize edileb.* 11(2), 1455–1467. <https://doi.org/10.21597/jist.806344>

**Axel Ritter.** (2006). *Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Design.* [https://books.google.com.tr/books/about/Smart\\_Materials\\_in\\_Architecture\\_Interior.html?id=ORXVAAAAQBAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.tr/books/about/Smart_Materials_in_Architecture_Interior.html?id=ORXVAAAAQBAJ&redir_esc=y)

**Bai, H., Li, C., & Shi, G.** (2011). Functional Composite Materials Based on Chemically Converted Graphene. *Advanced Materials*, 23(9), 1089–1115. <https://doi.org/10.1002/adma.201003753>

**Barati, G., Aliofkhaezrai, M., Khorsand, S., Sokhanvar, S., & Kaboli, A.** (2020). Science and Engineering of Superhydrophobic Surfaces : Review of Corrosion Resistance , Chemical and Mechanical Stability. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 1763–1802. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.01.013>

**Barthlott, W., & Neinhuis, C.** (1997). Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s004250050096>

**Bedeloğlu, A., & Taş, M.** (2016). Graphene And Its Production Methods. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 16(3), 544–554. <https://doi.org/10.5578/fmbd.32173>

**Bera, M., Chandravati, Gupta, P., & Maji, P. K.** (2017). Facile One-Pot Synthesis of Graphene Oxide by Sonication Assisted Mechanochemical Approach and Its Surface Chemistry. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(2), 902–912. <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.14306>



- Çakmak, Ö., & Kaya, M.** (2017). Akıllı Malzeme Şekil Hafızalı Alaşımların Termodinamiği. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 541–555. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.311306>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G.** (2020). *Materials science and engineering: an introduction*. [https://books.google.com/books/about/Callister\\_s\\_Materials\\_Science\\_and\\_Engineering.html?hl=tr&id=sE84zQEACAAJ](https://books.google.com/books/about/Callister_s_Materials_Science_and_Engineering.html?hl=tr&id=sE84zQEACAAJ)
- Chandra, P., Sharma, R., Debnath, S., Sharma, M., Stephen, B., Kumar, P., Kumar, P., & Sridhar, K.** (2023). International Journal of Biological Macromolecules Recent trends in polysaccharide-based biodegradable polymers for smart food packaging industry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(P8), 127524. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127524>
- Che, P., Heng, L., & Jiang, L.** (2017). Lubricant-Infused Anisotropic Porous Surface Design of Reduced Graphene Oxide Toward Electrically Driven Smart Control of Conductive Droplets' Motion. *Advanced Functional Materials*, 27(22), 1606199. <https://doi.org/10.1002/ADFM.201606199>
- Chen, M., Zhang, L., Duan, S., Jing, S., Jiang, H., & Li, C.** (2014). Highly stretchable conductors integrated with a conductive carbon nanotube/graphene network and 3D porous poly (dimethylsiloxane). *Advanced Functional Materials*, 24(47), 7548–7556. <https://doi.org/10.1002/adfm.201401886>
- Choi, S. J., Kwon, T. H., Im, H., Moon, D. Il, Baek, D. J., Seol, M. L., Duarte, J. P., & Choi, Y. K.** (2011). A polydimethylsiloxane (PDMS) sponge for the selective absorption of oil from water. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 3(12), 4552–4556. [https://doi.org/10.1021/AM201352W/SUPPL\\_FILE/AM201352W\\_SI\\_005.AVI](https://doi.org/10.1021/AM201352W/SUPPL_FILE/AM201352W_SI_005.AVI)
- Cui, J., Zhu, H., Tu, Z., Niu, D., Liu, G., Bei, Y., & Zhu, Q.** (2019). Effect of the texture geometry on the slippery behavior of liquid-infused nanoporous surfaces. *Journal of Materials Science*, 54(3), 2729–2739. <https://doi.org/10.1007/S10853-018-2972-2>
- Dreyer, D. R., Park, S., Bielawski, C. W., & Ruoff, R. S.** (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chem. Soc. Rev.*, 39(1), 228–240. <https://doi.org/10.1039/B917103G>
- Eda, G., Fanchini, G., & Chhowalla, M.** (2008). Large-area ultrathin films of reduced graphene oxide as a transparent and flexible electronic material. *Nature Nanotechnology*, 3(5), 270–274. <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.83>

- Espy, G., Duchet-rumeau, J., & Lhost, O.** (2023). *What if designing superhydrophobic polymer surfaces turned out to be very simple?* 41(June). <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103072>
- Fu, X., Lin, J., Liang, Z., Yao, R., Wu, W., Fang, Z., Zou, W., Wu, Z., Ning, H., & Peng, J.** (2023). Graphene oxide as a promising nanofiller for polymer composite. *Surfaces and Interfaces*, 37(October 2022), 102747. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102747>
- Gao, X., & Jiang, L.** (2014). *Water-Repellent Legs of Water Strider*. November, 6–7. <https://doi.org/10.1038/432036a>
- Gengeç, N. A.** (2021). *The Effect of Graphene Oxide Exfoliation Degree on Graphene Film Properties Grafen Oksit Tabakalanma Derecesinin Grafen Film Özelliklerine Etkisi*. 8(1), 345–355.
- Geraldi, N. R., Dodd, L. E., Xu, B. B., Wood, D., Wells, G. G., McHale, G., & Newton, M. I.** (2018). Bioinspired nanoparticle spray-coating for superhydrophobic flexible materials with oil/water separation capabilities. *Bioinspiration and Biomimetics*, 13(2). <https://doi.org/10.1088/1748-3190/AAA1C1>
- Guo, T., Che, P., Heng, L., Fan, L., & Jiang, L.** (2016). Anisotropic Slippery Surfaces: Electric-Driven Smart Control of a Drop's Slide. *Advanced Materials*, 28(32), 6999–7007. <https://doi.org/10.1002/adma.201601239>
- H. Yıldırım Erbil.** (2008). *Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces*. By H. Y. Erbil. In *ChemPhysChem* (Vol. 9, Issue 4). <https://doi.org/10.1002/cphc.200700726>
- Haider, S., Kausar, A., & Muhammad, B.** (2017). Overview on Polystyrene / Nanoclay Composite: Physical Properties and Application. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56(9), 917–931. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1233563>
- Hansen, W. R., & Autumn, K.** (2014). *Evidence for self-cleaning in gecko setae*. February 2005. <https://doi.org/10.1073/pnas.0408304102>
- He, Z., Mu, L., Wang, N., Su, J., Wang, Z., & Luo, M.** (2023). Design , fabrication , and applications of bioinspired slippery surfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 318(May), 102948. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.102948>
- Hirata, M., Gotou, T., Horiuchi, S., Fujiwara, M., & Ohba, M.** (2004). Thin-film particles of graphite oxide 1: *Carbon*, 42(14), 2929–2937. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.07.003>

- Hummers, W. S., & Offeman, R. E.** (1958). Preparation of Graphitic Oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339. [https://doi.org/10.1021/JA01539A017/ASSET/JA01539A017.FP.PNG\\_V03](https://doi.org/10.1021/JA01539A017/ASSET/JA01539A017.FP.PNG_V03)
- Hwang, G. B., Lourenco, C., Nair, S., & Carmalt, C. J.** (2021). *Crystal Violet Impregnated Slippery Surface to Prevent Bacterial Contamination of Surfaces*. January, 0–26. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c17915>
- Jain, N., Nandu Ovhal, S., Patil, V., & Nani Kartik, K.** (2023). Smart materials – A state-of-the-art-review. *Materials Today: Proceedings*, 82, 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.226>
- Kausar, A.** (2018). *Potential of Polymer / Graphene Nanocomposite in Electronics*. 6(1), 1–9.
- Kausar, A.** (2020). Technical viewpoint on polystyrene/graphene nanocomposite. <https://doi.org/10.1177/0892705720907653>, 35(10), 1757–1771. <https://doi.org/10.1177/0892705720907653>
- Kosynkin, D. V., Higginbotham, A. L., Sinitskii, A., Lomeda, J. R., Dimiev, A., Price, B. K., & Tour, J. M.** (2009). Longitudinal unzipping of carbon nanotubes to form graphene nanoribbons. *Nature* 2009 458:7240, 458(7240), 872–876.
- Kovtyukhova, N. I., Ollivier, P. J., Martin, B. R., Mallouk, T. E., Chizhik, S. A., Buzaneva, E. V., & Gorchinskiy, A. D.** (1999). Layer-by-Layer Assembly of Ultrathin Composite Films from Micron-Sized Graphite Oxide Sheets and Polycations. *Chemistry of Materials*, 11(3), 771–778. <https://doi.org/10.1021/cm981085u>
- Lafuma, A., & Quéré, D.** (2003). Superhydrophobic states. *Nature Materials* 2003 2:7, 2(7), 457–460. <https://doi.org/10.1038/nmat924>
- Leder, H., Gmbh, D. O., Schkopau, W., Polymers, D. E., & Schkopau, D.-.** (2006). *Syndiotactic Polystyrene: Process and Applications*. 25(3), 141–151. <https://doi.org/10.1002/adv>
- Li, D., Müller, M. B., Gilje, S., Kaner, R. B., & Wallace, G. G.** (2008). Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets. *Nature Nanotechnology*, 3(2), 101–105. <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.451>
- Liu, Y., Chen, X., & Xin, J. H.** (2009). Can superhydrophobic surfaces repel hot water? *Journal of Materials Chemistry*, 19(31), 5602–5611. <https://doi.org/10.1039/B822168E>

- Luo, J. T., Geraldi, N. R., Guan, J. H., McHale, G., Wells, G. G., & Fu, Y. Q.** (2017). Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces and Droplet Transportation by Surface Acoustic Waves. *Physical Review Applied*, 7(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.7.014017>
- Marcano, D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L. B., Lu, W., & Tour, J. M.** (2010a). Improved synthesis of graphene oxide. *ACS Nano*, 4(8), 4806–4814. <https://doi.org/10.1021/nn1006368>
- Marcano, D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L. B., Lu, W., & Tour, J. M.** (2010b). Improved Synthesis of Graphene Oxide. *ACS Nano*, 4(8), 4806–4814. <https://doi.org/10.1021/nn1006368>
- McFarlane, N. L., Wagner, N. J., Kaler, E. W., & Lynch, M. L.** (2010). Poly(ethylene oxide) (PEO) and poly(vinyl pyrrolidone) (PVP) induce different changes in the colloid stability of nanoparticles. *Langmuir : The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 26(17), 13823–13830. <https://doi.org/10.1021/LA101907S>
- Miranda, D. F., Urata, C., Mashed, B., Dunderdale, G. J., Yagihashi, M., & Hozumi, A.** (2014). Physically and chemically stable ionic liquid-infused textured surfaces showing excellent dynamic omniphobicity. *APL Materials*, 2(5). <https://doi.org/10.1063/1.4876636>
- Neinhuis, C.** (1997). Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces. *Annals of Botany*, 79(6), 667–677. <https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0400>
- Neinhuis, C., & Barthlott, W.** (1997). Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces. *Annals of Botany*, 79(6), 667–677. <https://doi.org/10.1006/ANBO.1997.0400>
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., & Firsov, A. A.** (2004). Electric field effect in atomically thin carbonfilms. *Science (New York, N.Y.)*, 306(5696), 666–669. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1102896>
- Ozbay, S., Yuceel, C., & Erbil, H. Y.** (2015). Improved Icephobic Properties on Surfaces with a Hydrophilic Lubricating Liquid. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7(39), 22067–22077. [https://doi.org/10.1021/ACSAMI.5B07265/SUPPL\\_FILE/AM5B07265\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/ACSAMI.5B07265/SUPPL_FILE/AM5B07265_SI_001.PDF)
- P. Kim, T. S. W., Alvarenga, J., Kreder, M. J., Adorno-Martinez, W. E., & Aizenberg, and J.** (2012). Liquid-infused nanostructured surfaces with extreme anti-ice and anti-frost performance. *ACS Nano*, 6, 6569–6577. <https://doi.org/doi:10.1021/nn302310q>

- Paredes, J. I., Villar-Rodil, S., Martínez-Alonso, A., & Tascón, J. M. D.** (2008). Graphene Oxide Dispersions in Organic Solvents. *Langmuir*, *24*(19), 10560–10564. <https://doi.org/10.1021/la801744a>
- Park, W., Hu, J., Jauregui, L. A., Ruan, X., & Chen, Y. P.** (2014). Electrical and thermal conductivities of reduced graphene oxide/polystyrene composites. *Applied Physics Letters*, *104*(11). <https://doi.org/10.1063/1.4869026/25414>
- Pilat, D. W., Papadopoulos, P., Schäffel, D., Vollmer, D., Berger, R., & Butt, H.-J.** (2012). Dynamic Measurement of the Force Required to Move a Liquid Drop on a Solid Surface. *Langmuir*, *28*(49), 16812–16820. <https://doi.org/10.1021/la3041067>
- Reina, A., Jia, X., Ho, J., Nezich, D., Son, H., Bulovic, V., Dresselhaus, M. S., & Jing, K.** (2009). Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition. *Nano Letters*, *9*(1), 30–35. <https://doi.org/10.1021/NL801827V>
- Quéré, D.** (2005). Non-sticking drops. *Reports on Progress in Physics*, *68*(11), 2495–2532. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/11/R01>
- Samaha, M. A., & Gad-el-Hak, M.** (2014). Polymeric slippery coatings: Nature and applications. In *Polymers* (Vol. 6, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/polym6051266>
- Shahriary Leila, & Athawale Anjali A.** (2014). Graphene Oxide Synthesized by using Modified Hummers Approach. *International Journal of Renewable Energy and Environmental Engineering*, *02*(01), 58–63. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2010/cc/b917705a>
- Sharma, K., & Srinivas, G.** (2020). Materials Today : Proceedings Flying smart : Smart materials used in aviation industry. *Materials Today: Proceedings*, *27*, 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.115>
- Shome, A., Das, A., Borbora, A., Dhar, M., & Manna, U.** (2022). Role of chemistry in bio-inspired liquid wettability. *Chemical Society Reviews*, *51*(13), 5452–5497. <https://doi.org/10.1039/D2CS00255H>
- Stankovich, S., Piner, R. D., Chen, X., Wu, N., Nguyen, S. T., & Ruoff, R. S.** (2006). Stable aqueous dispersions of graphitic nanoplatelets via the reduction of exfoliated graphite oxide in the presence of poly(sodium 4-styrenesulfonate). *J. Mater. Chem.*, *16*(2), 155–158. <https://doi.org/10.1039/B512799H>

- Surekha, G., Krishnaiah, K. V., Ravi, N., & Padma Suvarna, R.** (2020). FTIR, Raman and XRD analysis of graphene oxide films prepared by modified Hummers method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1495(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1495/1/012012>
- Thaher, I., Al-amer, A., P, S. T., Al-harathi, M., Adamu, S., Sougrat, R., & Ali, M.** (2011). Composites : Part B Effect of acid treated carbon nanotubes on mechanical , rheological and thermal properties of polystyrene nanocomposites. *Composites Part B*, 42(6), 1554–1561. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.013>
- Tuteja, A., & Choi, W.** (2008). *Designing Superoleophobic Surfaces*. June 2014. <https://doi.org/10.1126/science.1148326>
- Tuteja, A., Choi, W., Ma, M., Mabry, J. M., Mazzella, S. A., Rutledge, G. C., McKinley, G. H., & Cohen, R. E.** (2007). Designing superoleophobic surfaces. *Science*, 318(5856), 1618–1622. [https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1148326/SUPPL\\_FILE/TUTEJA.SOM.PDF](https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1148326/SUPPL_FILE/TUTEJA.SOM.PDF)
- Tuteja, A., Choi, W., Mabry, J. M., Mckinley, G. H., & Cohen, R. E.** (2008). *Robust omniphobic surfaces*. June 2014. <https://doi.org/10.1073/pnas.0804872105>
- Üçüncüoğlu, R., & Yildirim Erbil, H.** (2023). Water Drop Evaporation on Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces (SLIPS): Effect of Lubricant Thickness, Viscosity, Ridge Height, and Pattern Geometry. *Langmuir*, 39(18), 6514–6528. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c00471>
- Vs, N., Ramakrishnappa, T., Kempahanumakkagari, S., & Hr, P.** (2023). Applied Surface Science Advances Efficient strategies to produce Graphene and functionalized graphene materials : A review. *Applied Surface Science Advances*, 14(February), 100386. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100386>
- Wang, B. L., Heng, L., & Jiang, L.** (2018). Temperature-Responsive Anisotropic Slippery Surface for Smart Control of the Droplet Motion. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(8), 7442–7450. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b16818>
- Wang, D., Chen, X., Li, F., Chen, W., Li, H., & Yao, C.** (2023). Microelectronics Reliability Influence of normal load , electric current and sliding speed on tribological performance of electrical contact interface. *Microelectronics Reliability*, 142(January), 114929. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.114929>

**Wang, G., Yang, J., Park, J., Gou, X., Wang, B., Liu, H., & Yao, J.** (2008). Facile Synthesis and Characterization of Graphene Nanosheets. *The Journal of Physical Chemistry C*, *112*(22), 8192–8195. <https://doi.org/10.1021/jp710931h>

**Wang, H., Robinson, J. T., Li, X., & Dai, H.** (2009). Solvothermal Reduction of Chemically Exfoliated Graphene Sheets. *Journal of the American Chemical Society*, *131*(29), 9910–9911. <https://doi.org/10.1021/ja904251p>

**Wang, J., Gao, W., Zhang, H., Zou, M., Chen, Y., & Zhao, Y.** (2018a). Programmable wettability on photocontrolled graphene film. *Science Advances*, *4*(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat7392>

**Wang, J., Gao, W., Zhang, H., Zou, M., Chen, Y., & Zhao, Y.** (2018b). Programmable wettability on photocontrolled graphene film. *Science Advances*, *4*(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat7392>

**Wang, J., Sun, L., Zou, M., Gao, W., Liu, C., Shang, L., Gu, Z., & Zhao, Y.** (2017a). Bioinspired shape-memory graphene film with tunable wettability. *Science Advances*, *3*(6), 1–8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700004>

**Wang, J., Sun, L., Zou, M., Gao, W., Liu, C., Shang, L., Gu, Z., & Zhao, Y.** (2017b). Bioinspired shape-memory graphene film with tunable wettability. *Science Advances*, *3*(6). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700004>

**Wang, X., Luan, F., Yue, H., Song, C., Wang, S., Feng, J., Zhang, X., Yang, W., Li, Y., Wei, W., & Tao, Y.** (2023). Recent advances of smart materials for ocular drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *200*(March), 115006. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2023.115006>

**Wang, Z., Heng, L., & Jiang, L.** (2018). Effect of lubricant viscosity on the self-healing properties and electrically driven sliding of droplets on anisotropic slippery surfaces. *Journal of Materials Chemistry A*, *6*(8), 3414–3421. <https://doi.org/10.1039/C7TA10439A>

**Wang, Z., Liu, Y., Guo, P., Heng, L., & Jiang, L.** (2018a). Photoelectric Synergetic Responsive Slippery Surfaces Based on Tailored Anisotropic Films Generated by Interfacial Directional Freezing. *Advanced Functional Materials*, *28*(49), 1–10. <https://doi.org/10.1002/adfm.201801310>

**Wang, Z., Liu, Y., Guo, P., Heng, L., & Jiang, L.** (2018b). Photoelectric Synergetic Responsive Slippery Surfaces Based on Tailored Anisotropic Films Generated by Interfacial

Directional Freezing. *Advanced Functional Materials*, 28(49), 1801310. <https://doi.org/10.1002/ADFM.201801310>

**Wong, T., Kang, S. H., Tang, S. K. Y., Smythe, E. J., Hatton, B. D., Grinthal, A., & Aizenberg, J.** (2011). Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature*, 477(7365), 443–447. <https://doi.org/10.1038/nature10447>

**Wong, T. S., Kang, S. H., Tang, S. K. Y., Smythe, E. J., Hatton, B. D., Grinthal, A., & Aizenberg, J.** (2011). Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature 2011 477:7365*, 477(7365), 443–447.,

**Xiao, P., Du, S., Zhang, T., Qiu, N., Zhang, J., Huang, Y., Wan, C., Jordan, R., Huang, Q., Liu, Z., & Chen, T.** (2017). 3D Graphene Oxide Micropatterns Achieved by Roller-Assisted Microcontact Printing Induced Interface Integral Peel and Transfer. *Advanced Materials Interfaces*, 4(3). <https://doi.org/10.1002/admi.201600867>

**Xu, Z., & Gao, C.** (2011). Aqueous Liquid Crystals of Graphene Oxide. *ACS Nano*, 5(4), 2908–2915. <https://doi.org/10.1021/nn200069w>

**Yang, H., Liu, B., Niu, P., Fan, Z., Yuan, T., Wang, Y., Liu, Y., & Li, R.** (2022). Materials Characterization Effect of laser scanning angle on shear slip behavior along melt track of selective laser melted 316L stainless steel during tensile failure. *Materials Characterization*, 193(September), 112297. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112297>

**Yildirim, M., & Candan, Z.** (2023). Materials Today : Proceedings Smart materials : The next generation in science and engineering. *Materials Today: Proceedings*, October. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.116>

**Yildirim, M., & Candan, Z.** (2023). Materials Today : Proceedings Smart materials : The next generation in science and engineering. *Materials Today: Proceedings*, October. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.116>

**Yuan, S., Zhang, X., Lin, D., & Wang, H.** (2020). Progress in Organic Coatings A novel slippery surface with enhanced stability and corrosion resistance. *Progress in Organic Coatings*, 142(January), 105563. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105563>

**Zaragoza-Contreras, E. A., Hernández-Escobar, C. A., Navarrete-Fontes, A., & Flores-Gallardo, S. G.** (2011). Synthesis of carbon black/polystyrene conductive nanocomposite.



Pickering emulsion effect characterized by TEM. *Micron*, 42(3), 263–270.  
<https://doi.org/10.1016/J.MICRON.2010.10.005>