



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN NİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ÇOK FAZLI MOLİBDEN OKSİTTEN  
MOLİBDEN DİSÜLFÜR İNCE FİLM  
BÜYÜTÜLMESİ

Ayşe KARATAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı

Haziran-2020  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

Ayşe KARATAŞ tarafından hazırlanan “Çok Fazlı Molibden Oksitten Molibden Disülfür İnce Film Büyütülmesi” adlı tez çalışması 05/06/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Gültekin ÇELİK

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mücahit YILMAZ

#### Üye

Prof. Dr. Oğuz DOĞAN

### İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ....../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. S. Savaş DURDURAN  
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 171351002 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ayşe KARATAŞ

Tarih: 05.06.2020

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## ÇOK FAZLI MOLİBDEN OKSİTTEN MOLİBDEN DİSÜLFÜR İNCE FİLM BÜYÜTÜLMESİ

Ayşe KARATAŞ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mücahit YILMAZ

2020, 94 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mücahit YILMAZ

Prof. Dr. Gültekin ÇELİK

Prof. Dr. Oğuz DOĞAN

Tek katmanlı molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ), ayarlanabilir yasak bant boşluğu ile gelecek nesil optoelektronik uygulamaları için umut verici, 2-boyutlu yarıiletken bir malzemedir. Bu tez çalışmasında,  $400\text{ }^\circ\text{C}$ 'de reaktif manyetik alan sıçratma yöntemi ile farklı kalınlıklarda büyütülen Mo-O ince filmlerinin sülfürizasyonu ile elde edilen büyük ölçekli  $\text{MoS}_2$  filmlerinin karakterizasyonu sunulmaktadır.  $400\text{ }^\circ\text{C}$ 'lik kritik Mo-O ince film büyütme sıcaklığında Mo-O yapısının farklı fazları gözlenmiştir. Bu ince filmlerin sülfürlenmesi ile elde edilen  $\text{MoS}_2$  filmlerde ise yüksek yasak bant boşluğunun yanı sıra yüksek şiddette fotoluminesans etki gözlenmiştir. Gelişmiş PL şiddetleri,  $\text{MoS}_2$ 'nin katlanmasına ve  $\text{MoO}_2$ - $\text{MoS}_2$  hetero-yapısında  $\text{MoO}_2$ 'den çok sayıda elektrona neden olabilecek  $\text{MoO}_2$  miktarına atfedilmiştir. UV-VIS spektroskopi analizi, biri küçük diğeri büyük iki tane yasak bant boşluğunun varlığını göstermiştir. Bu geniş bir absorblama aralığı sunmaktadır. Bu bant aralıklarından biri, birkaç katmanlı  $\text{MoS}_2$ 'lerle uyumlu iken diğeri manyetik alan sıçratma sistemi ile büyütülen Mo-O ince filminin kalınlığı ile artmaktadır. Bu, nispeten düşük dalga boylarındaki soğurmayı açıklamaktadır aynı zamanda da  $\text{MoO}_2$  yapılarının  $\text{MoS}_2$ 'lerin yasak bant boşluklarını da ayarlamak için kullanılabileceğini de göstermektedir. Manyetik alan sıçratma sistemi ve CVD yönteminin kullanılmasıyla ortaya çıkan birleşik büyüme yöntemi, yeni nesil optoelektronik ve nanoelektronik cihazların yanı sıra diğeri potansiyel uygulamalar için yüksek kaliteli ve homojen  $\text{MoS}_2$  ince filmler büyütmede etkili bir yöntem sunar.

**Anahtar Kelimeler:** Geçiş metal dikalkojenleri, iki boyutlu malzemeler, ince filmler, molibden disülfür.

**ABSTRACT**

**MS THESIS**

**MOLYBDENUM DISULFIDE THIN FILMS FABRICATION FROM MULTI-PHASE MOLYBDENUM OXIDE**

**Ayşe KARATAŞ**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN NANOSCIENCE AND NANOENGINEERING**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Mücahit YILMAZ**

**2020, 94 Pages**

**Jury**

**Assistant Professor Mücahit YILMAZ**

**Prof. Dr. Gültekin ÇELİK**

**Prof. Dr. Oğuz DOĞAN**

Molybdenum disulfide ( $\text{MoS}_2$ ) is a layered 2D semiconducting material with a tunable bandgap and a promising materials for next generation optoelectronics applications. In this study, the characterization of large-scale  $\text{MoS}_2$  films obtained by sulfurization of Mo-O films grown in different thicknesses with reactive magnetron sputtering method at 400 °C are reported. At a critical deposition temperature of 400 °C, different phases of Mo-O structure with high photoluminescent and bandgap were observed. Although there are no triangular domains, bandgaps and PL properties are close to few-layered  $\text{MoS}_2$ . The enhanced PL intensities attributed to the increasing amount of  $\text{MoO}_2$  that may cause  $\text{MoS}_2$ 's folding and the large number of electrons from  $\text{MoO}_2$  in the  $\text{MoO}_2$ - $\text{MoS}_2$  hetero-structure. The UV-VIS spectroscopy analysis shows that two bandgaps are presented with a low and high values which may extend a wide absorption range. One of these bandgaps is compatible with few-layer  $\text{MoS}_2$ 's and the other increases by the thickness of the Mo-O film grown by magnetron sputtering. This explains the absorption at low wavelengths, but also shows that the  $\text{MoO}_2$  structure can be used to adjust the band gaps of  $\text{MoS}_2$ 's. The combined growth technique of magnetron sputtering and CVD is provided a high quality and homogeneous  $\text{MoS}_2$  thin films for next-generation optoelectronics and nanoelectronic devices, as well as for other potential applications.

**Keywords:** Molybdenum disulfide, thin films, transition-metal dichalcogenides, two-dimensional materials.

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince yardımlarını, deneyim ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mücahit YILMAZ'a

Tecrübelerini ve yardımlarını bizden esirgemeyen başta Prof. Dr. Oğuz DOĞAN olmak üzere tüm hocalarıma;

Tez çalışmasına desteklerinden dolayı çalışma arkadaşlarım Varol Gürkan ACAR, Remzi DAĞ, Arife EFE GÖRMEZ, Adem AKDAĞ, Merve GÖKÇE, Ayşegül SEZGİN, Mustafa BÜYÜKHARMAN ve diğer tüm çalışma arkadaşlarıma ve her zaman yanımda olan sevgili dostlarım; Ayşe Nur ORDUKAYA, Ali KARAKAYA, Aliye AKKOYUN, Havva YALDIZ, Havva KIRGIZ ve Gamze ÜNSAL'a sonsuz teşekkürler.

Üretim ve ölçüm sürecinde laboratuvar olanakları için Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 171351002 no'lu proje ile desteklenmiştir. Bu birime desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Son olarak bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarımı esirgemeyen aileme, tezin hazırlanması sırasında gösterdikleri sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı özellikle teşekkürü bir borç bilirim.

Ayşe KARATAŞ  
KONYA-2020

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>9</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Molibden Disülfürün (MoS <sub>2</sub> ) Kristal Yapısı .....	3
1.2. Molibden Disülfürün (MoS <sub>2</sub> ) Elektronik Yapısı .....	6
1.3. Molibden Disülfürün (MoS <sub>2</sub> ) Optik Özellikleri.....	8
1.4. MoS <sub>2</sub> 'nin Isısal Özellikleri .....	9
1.5. MoS <sub>2</sub> 'nin Mekanik Özellikleri.....	10
1.6. MoS <sub>2</sub> Sentez/Büyütme Yöntemleri.....	11
1.6.1. Mekanik olarak pul pul ayırma (Micromechanical Exfoliation) .....	11
1.6.2. Sıvı içinde pul pul ayırma (Liquid Exfoliation).....	11
1.6.3. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi .....	12
1.6.4. Hidrotermal Sentez .....	13
1.6.5. Daldırılmalı kaplama Yöntemi.....	14
1.6.6. Diğer MoS <sub>2</sub> büyütme yöntemleri .....	15
1.7. MoS <sub>2</sub> Karakterizasyonu .....	15
1.7.1. MoS <sub>2</sub> Raman spektroskopisi .....	15
1.7.2. MoS <sub>2</sub> 'nin atomik kuvvet mikroskopisi ile yüzey topografisi .....	16
1.7.3. MoS <sub>2</sub> fotoluminesans spektroskopisi.....	17
1.7.4. MoS <sub>2</sub> UV-Vis spektroskopisi.....	18
1.8. 2-boyutlu Malzemelerin Geleceği .....	19
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>21</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>28</b>
3.1. İnce Film Büyütme Yöntemleri .....	28
3.2. MoS <sub>2</sub> İnce Filmlerin Büyütülmesi .....	31
3.2.1. Alttaş temizliği.....	31
3.2.2. Mo-O ince filmlerin oluşturulması .....	31
3.2.3. Mo-O ince filmlerin sülfürizasyonu .....	33
3.3. MoS <sub>2</sub> İnce Filmlerin Analizleri.....	35
3.3.1. Yapısal Analizler .....	35
3.3.2. Optik Analizler .....	37

<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>39</b>
4.1. Mo-O İnce Filmlerin Yapısal Analizi.....	39
4.2. MoS <sub>2</sub> İnce Filmlerin Yapısal Analizi.....	40
4.3. MoS <sub>2</sub> İnce Filmlerin Optik Analizi.....	55
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>65</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>67</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>83</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

”	: İnç (1 inç = 2.54 cm)
$\mu$	: SI birimde mikro ( $10^{-6}$ )
cm	: Santimetre ( $10^{-2}$ m)
$\mu\text{m}$	: Mikrometre ( $10^{-6}$ m)
nm	: Nanometre ( $10^{-9}$ m)
$2\theta$	: Kırınım açısı
$\kappa$	: Isıl iletkenlik
$^{\circ}$	: Derece
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrad derece
e	: Elektron
eV	: Elektron volt
K	: Kelvin
m	: SI biriminde mili ( $10^{-3}$ )
$\Omega$	: Direnç birimi
I	: Işık şiddeti
$\lambda$	: Dalga boyu
hv	: Foton enerjisi
$\alpha$	: Soğurma katsayısı
t	: İnce film kalınlığı
T	: Geçen ışığın geçirgenlik yüzdesi
w	: X-Işını ile ince film arasındaki açı
W	: Watt

### Kısaltmalar

AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
$\text{Al}_2\text{O}_3$	: Alümina
ALD	: Atomik tabaka biriktirme
Ar	: Argon
Au	: Altın
Co	: Kobalt
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
DC	: Doğru akım
DFT	: Yoğunluk fonksiyonel teorisi
DI	: Deiyonize
$E_g$	: Yasak bant aralığı
FESEM	: Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
FET	: Alan etkili transistör
GIXRD	: Küçük açı X-ışınları kırınımı
$\text{H}_2$	: Hidrojen gazı
$\text{H}_2\text{S}$	: Hidrojen sülfür
Hf	: Hafniyum
IPA	: İzopropil alkol
Ir	: İridyum
k.b.	: Keyfi birim
kX	: $10^3$ kat büyütme

LED	: Işıık yayan diyot
MD	: Moleküler dinamik
Mo	: Molibden
MoO <sub>2</sub>	: Molibden dioksit
MoO <sub>3</sub>	: Molibden trioksit
MoS <sub>2</sub>	: Molibden disülfür
MoSe <sub>2</sub>	: Molibden diselenid
Nb	: Niyobyum
Ni	: Nikel
Pd	: Paladyum
PL	: Fotolüminesans
PLD	: Atımlı lazer biriktirme
Pt	: Platin
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
Ra	: Ortalama pürüzlülük değeri
Re	: Renyum
RF	: Radyo frekansı
Rh	: Rodyum
sccm	: Dakikada geçen cm <sup>3</sup>
S	: Sülfür
Se	: Selenyum
SLG	: Soda Lime Glass
Ta	: Tantal
Tc	: Teknesyum
Te	: Tellür
TE	: Termal buharlaştırma
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
Ti	: Titanyum
TMDC	: Geçiş-metal dikalkojen
UV-Vis	: Morötesi – Görünür bölge
V	: Vanadyum
W	: Tungsten
WO <sub>3</sub>	: Tungsten trioksit
WS <sub>2</sub>	: Tungsten disülfür
WSe <sub>2</sub>	: Tungsten diselenid
XPS	: X-Işıınları fotoelektron spektroskopisi
Zr	: Zirkonyum

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, teknolojik gelişmeler çok hızlı değişmektedir. Elektronik, veri işleme ve depolama, sinyal algılama, yüksek hızlı iletişim, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve depolanması gibi alanlarda her gün yeni çalışmalar ortaya konmaktadır. Bu gelişim ve değişim ile bunların meydana getirdiği etki yaşadığımız dönemde daha hızlı ve küresel bir hal almıştır. Malzeme bilimi bu gelişmelerin meydana getirdiği değişikliklerin arkasındaki itici güçtür. 20. yüzyılın ortalarından itibaren silisyum ile başlayan yarıiletken dönemde malzeme bilimi de hızla çeşitlenmiştir. Bu çeşitlenmeler içinde geçiş-metal dikalkojenleri de araştırılan başlıklar arasında yer almıştır. Geçiş-metal dikalkojenleri eskiden beri bilinen bir malzeme grubu olup, 3-boyutlu geçiş-metal dikalkojenlerinin yapısı ve özellikleri hakkında kapsamlı çalışma (Wilson ve Yoffe, 1969) bulunmaktadır. Geçiş-metal dikalkojenleri veya kısa hali ile TMDC'ler,  $MX_2$  formülüne sahip bir malzeme sınıfıdır; burada M, periyodik tabloda B bloğunda yer alan elementlerden IV. gruptaki Ti, Zr ve Hf, V. gruptaki V, Nb ve Ta, VI. gruptaki Mo ve W, VII. gruptaki Tc ve Re, VIII. Guptaki Co, Rh, Ir, Ni, Pd ve Pt olmak üzere 16 elementi temsil etmektedir. X ise bir kalkojendir ve VIA grubundaki S, Se ve Te elementlerini temsil etmektedir. TMDC'lerin periyodik tablodaki dağılımına ilişkin görsel Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Şekil 1.1'de kısmen renklendirilmiş olan Co, Rh, Ir ve Ni elementlerinin kalkojen atomları ile meydana getirdiği bileşikler tabakalı yapıya sahip olmayıp 3-boyutlu pyrite (genellikle kristal yüzlerinde ince çıkıntılara sahip kübik yapı) yapıdadır (Kolobov ve Tominaga, n.d.).

**ELEMENTLERİN PERİYODİK TABLOSU**

1 H Hydrogen 1.01																	2 He Helium 4.00
3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01											5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18
11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31											13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95
19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 51.99	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.63	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.97	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 84.80
37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98.91	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.85	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.20	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine 209	86 Rn Radon 222.02
87 Fr Francium 223.02	88 Ra Radium 226.03	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium 261	105 Db Dubnium 262	106 Sg Seaborgium 266	107 Bh Bohrium 264	108 Hs Hassium 269	109 Mt Meitnerium 278	110 Ds Darmstadtium 281	111 Rg Roentgenium 280	112 Cn Copernicium 285	113 Nh Nihonium 286	114 Fl Flerovium 289	115 Mc Moscovium 289	116 Lv Livermorium 293	117 Ts Tennessine 294	118 Og Oganesson 294
57 La Lanthanum 138.91	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.91	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium 144.91	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.96	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.93	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93	70 Yb Ytterbium 173.06	71 Lu Lutetium 174.97			
89 Ac Actinium 227.03	90 Th Thorium 232.04	91 Pa Protactinium 231.04	92 U Uranium 238.03	93 Np Neptunium 237.05	94 Pu Plutonium 244.06	95 Am Americium 243.06	96 Cm Curium 247.07	97 Bk Berkelium 247.07	98 Cf Californium 251.08	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.10	101 Md Mendelevium 258.10	102 No Nobelium 259.10	103 Lr Lawrencium [262]			

**Şekil 1.1.** Geçiş-metal dikalkojenlerinin periyodik tablodaki dağılımı. Periyodik tabloda M ile tanımlanan ve pembe renk ile kısmen ve tam renklendirilmiş elementler TMDC'lere ait geçiş-metallerini gösterirken X ile gösterilen grupta yer alan sarı renk ile renklendirilmiş elementler kalkojenleri göstermektedir.

2007 yılında sentezlenen ve malzeme bilimi dünyasına farklı bir boyut getiren grafen (Geim ve Novoselov, 2007) 2-boyutlu yapısı ve sunduğu eşsiz özellikleri ile K.S. Novoselov ve A.K. Geim'e 2010 yılında Nobel Ödülü kazandırmıştır. Tek katmanlı grafenin elektronik bant yapısındaki K noktalarında gözlemlenen lineer dispersiyon, anormal oda sıcaklığı kuantum Hall etkisi gibi alışılmadık dışındaki fenomenler yeni bir Fermi-Dirac fiziği kategorisi oluşturmuştur. Grafen, harika bir elektronik ve termal iletken ve yüksek hızlı elektronik ve optik cihazlar, enerji üretimi ve depolaması, hibrid malzemeler, kimyasal sensörler ve hatta DNA dizileme gibi pek çok alanda kullanımı için yoğun araştırmalar devam etmektedir.

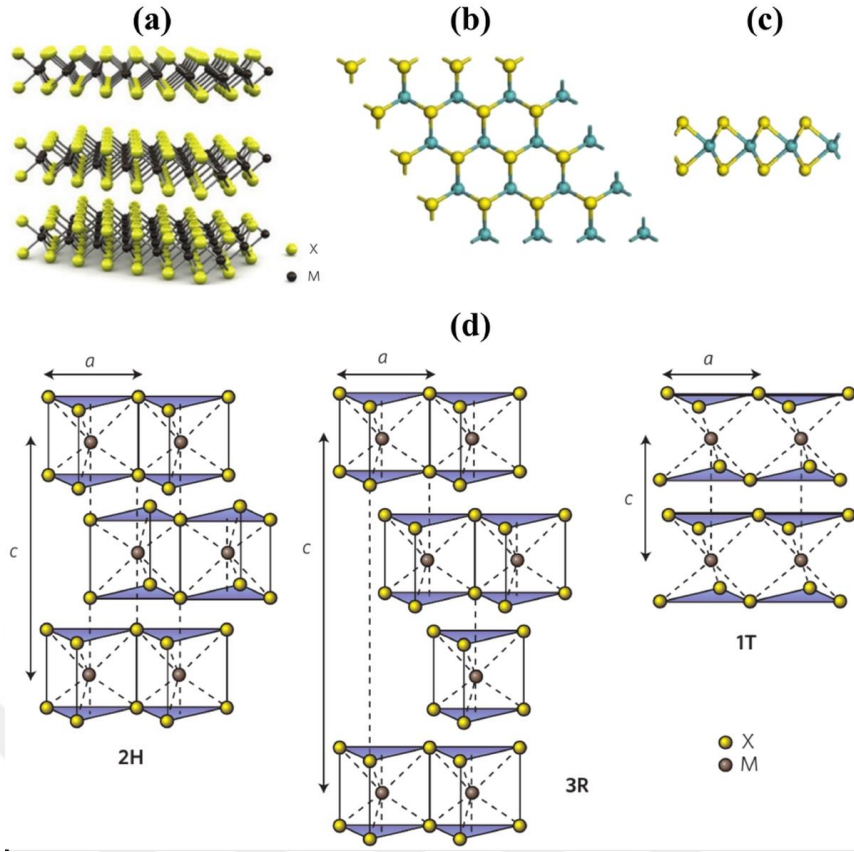
2-boyutlu TMDC'ler hakkındaki ilk raporlardan birinin 1980'lerin ortalarında (Joensen vd., 1986) yayınlandığını, birkaç katman kalınlığındaki MoS<sub>2</sub> tek kristalinin grafenin sentezlenmesinden önce rapor edildiğini belirtmek ilginçtir (Frindt, 1966) ancak bu yayınlar büyük ölçüde fark edilmeden kalmıştır. Grafen her ne kadar olağanüstü bir malzeme gibi görünse de yasak bant aralığının sıfır olması, özellikle elektronik uygulamalarda grafeni sınırlandırmıştır. Bu durum TMDC'ler gibi eski malzemeleri tekrar gün yüzüne çıkartmış ve onları araştırmaların odağına yerleştirmiştir.

TMDC üyelerinin yapıları birbirlerine benzer olmasına rağmen, TMDC'ler yalıtkanlardan yarıiletkenlere ve metallere kadar geniş bir özellik yelpazesini kapsar. Bu farklı elektriksel özelliklerin nedeni olarak, temelde bağlanmamış d bantlarının varlığı ve elektronlarla doldurulma derecesi gösterilmektedir.

Grafenin getirdiği başarı ile 2-boyutlu malzeme dünyasında kullanılmaya başlanan diğer malzemeler ultra-ince aygıtların üretilmesini mümkün kılmaya başlamış ve hem malzeme hem fizik dünyasına farklı bir soluk getirmiştir. Katmanlarına kolayca ayrılabilen, oldukça ilginç elektriksel ve optik özellikler sunan 2-boyutlu TMDC'ler katıhal fiziği ve teknolojinin en yoğun incelenen alanlarından biri haline geldi. TMDC malzemeler arasında, yarıiletken TMDC'ler en çok ilginin yoğunlaştığı malzeme grubu olmuştur. Çünkü katman sayısını değiştirerek bant mühendisliği olanakları onları cihaz uygulamaları için heyecan verici adaylar haline getirmiştir. Yarıiletken TMDC malzeme grubunun lokomotif bileşikleri ise  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$  ve  $\text{WSe}_2$  olarak bilinmektedir. Yine bu dörtlü grup içinde literatürde en çok çalışmanın yapıldığı bileşik molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) olarak karşımıza çıkmaktadır.

### **1.1. Molibden Disülfürün ( $\text{MoS}_2$ ) Kristal Yapısı**

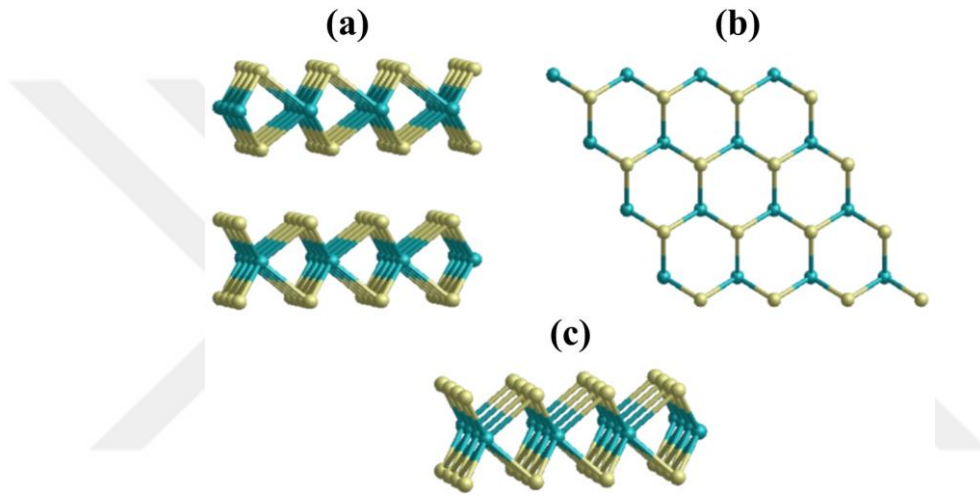
Geçiş-metal dikalkojenlerinin genel formülü  $\text{MX}_2$  olup M bir metal atomunu X ise bir kalkojen atomunu temsil etmektedir. Bu yapılar X-M-X formunda tabakalı bir yapıda bulunurlar. İki hegzagonal düzlemdeki kalkojen atomları metal atomlarının bir düzlemi tarafından ayrılmıştır. Bu durum Şekil 1.2'de gösterilmektedir. Komşu tabakalar bulk kristal içinde farklı şekillerde zayıf van der Waals etkileşimi ile bir arada bulunurlar. TMDC'lerin genel simetrisi hegzagonal veya rombohedral olup, metal atomu oktahedral veya üçgen prizma koordinasyonuna sahiptir (Sangwan ve Hersam, 2018; Zeng vd., 2018).



**Şekil 1.2.** (a) Geçiş-metal dikalkojenlerinin 3-boyutlu şematik gösterimi ve yapının (b) üstten ve (c) yandan görünüşü. (d) Yapısal politiplerin şemaları: 2H (altıgen simetri, tekrar birimi başına iki katman ve trigonal prizmatik koordinasyon), 3R (rhombohedral simetri, tekrar birimi başına üç katman, trigonal prizmatik koordinasyon) ve 1T (tetragonal simetri, tekrar başına bir katman) birim, oktahedral koordinasyon) (Q. H. Wang vd., 2012).

Doğal oluşmuş  $\text{MoS}_2$ , her ikisi de trigonal prizmatik koordinasyona sahip olan  $2\text{H-MoS}_2$  ve  $3\text{R-MoS}_2$  olmak üzere iki politip içerir.  $2\text{H-MoS}_2$ , birim hücre başına, Şekil 1.3 (a) ve (b)'de gösterildiği gibi AB tipi istiflemesi olan hegzagonal (H) simetride üst üste gelen iki katmana sahiptir.  $3\text{R-MoS}_2$  ise rhombohedral (R) simetrisinde birim hücre başına üç katmana sahiptir (Wilson ve Yoffe, 1969).  $2\text{H-MoS}_2$  yapısı doğada daha çok bulunur ve kararlı bir yapıdır.  $3\text{R-MoS}_2$  yapısı ısı olarak  $2\text{H-MoS}_2$ 'ye dönüşebilmektedir (Enyashin vd., 2011).  $\text{MoS}_2$  dâhil tüm tabakalı malzemelerde, katman içi bağlar katmanlar arası bağlarla karşılaştırıldığında çok daha güçlüdür.  $2\text{H-MoS}_2$ 'nin bulk kristali, inversiyon simetrisine sahip olmayan van der Waals bağlı S–Mo–S birimlerinden oluşur.  $2\text{H-MoS}_2$ 'nin bulk kristali hegzagonal yapıda olup, uzay grubu  $P63/mmc$  ve uzay grup numarası 194'tir (Wilson ve Yoffe, 1969). Her kararlı S–Mo–S birimine, Şekil 3.1 (c)'de gösterildiği gibi, tek katmanlı, 1H- $\text{MoS}_2$  denir. Tek tabaka veya tek katmanlı  $\text{MoS}_2$  iki altıgen kalkojen atomu

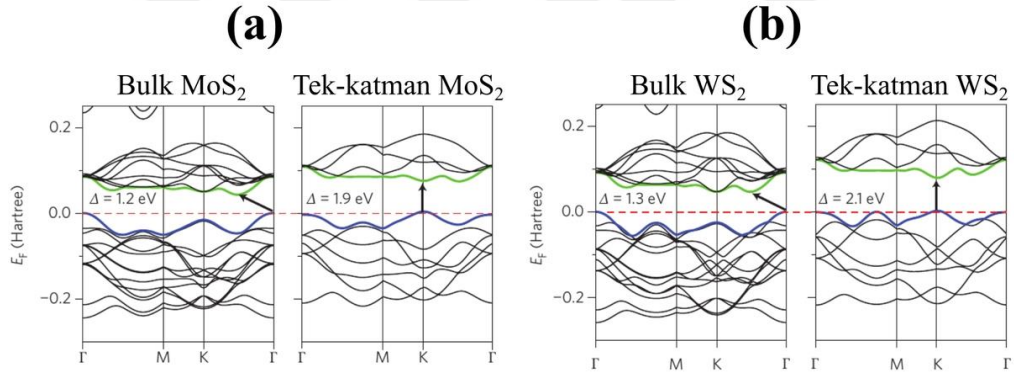
düzleminden ve bir ara sandviç altıgen metal atomu düzleminden oluşur. Katmanlar arasındaki zayıf etkileşimler ve katmanlar içindeki güçlü etkileşimler nedeniyle, tabakalar halinde ayrılma daha kolay gerçekleşir ve 1H-MoS<sub>2</sub>'nin ultra ince kristallerinin oluşumu mümkün hale gelir. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM), 2-boyutlu malzemelerin morfolojisini ve kristal yapısını incelemek için en doğrudan yöntemlerden birisidir. Tek ve çok katmanlı MoS<sub>2</sub> yapılarının kırınım desenleri arasındaki fark, boyutun azalması sonucu ortaya çıkan 6-kat simetrisinin kaybolmasıdır. Bu, tek tabaka nano-yapıların TEM ile tanımlanabileceğini göstermektedir (Brivio vd., 2011).



**Şekil 1.3.** (a) Bulk MoS<sub>2</sub>'nin (van der Walls bağlı MoS<sub>2</sub> birimleri) yan profilden görünümü, (b) hem bulk MoS<sub>2</sub> hem de tek katmanlı MoS<sub>2</sub>'nin üst profilden görünümü, (c) tek katmanlı MoS<sub>2</sub>'nin yan profilden görünümü (A. Kumar ve Ahluwalia, 2012).

## 1.2. Molibden Disülfürün (MoS<sub>2</sub>) Elektronik Yapısı

Birçok TMDC'nin, birinci prensipler (başka bir öneri veya varsayımdan çıkarılmayan temel bir öneri veya varsayım – first principles) ile sıkı-bağlanma yaklaşımları (Ataca vd., 2012; Ding vd., 2011; Kobayashi ve Yamauchi, 1995; Leitao Liu vd., 2011) ve çeşitli spektroskopik araçlar (Mak vd., 2010; Splendiani vd., 2010) kullanılarak analiz edildiğinde genel özellikleri birbirine benzer olan bant yapılarına sahip oldukları tespit edilmiştir. X bir kalkojen atomu olmak üzere, genel olarak, MoX<sub>2</sub> ve WX<sub>2</sub> bileşikler yarıiletkenken, NbX<sub>2</sub> ve TaX<sub>2</sub> metaliktir (Ataca vd., 2012; Ding vd., 2011; Kobayashi ve Yamauchi, 1995; Leitao Liu vd., 2011). Birinci prensiplerden hesaplanan bulk ve tek katmanlı MoS<sub>2</sub> ve WS<sub>2</sub>'nin bant yapıları, Şekil 1.4, (a) ve (b)'de gösterilmektedir.  $\Gamma$ -noktasında, yasak bant aralığı geçişi, bulk malzeme için dolaylıdır, ancak tek katmanlı yapı için kademeli olarak dolaylı geçişten doğrudan geçişe kaymaktadır (Balendhran vd., 2012; K.-K. Liu vd., 2012). K-noktasındaki doğrudan eksitonik geçişler, katman sayısına bağlı olmaksızın nispeten değişmeden kalır (Splendiani vd., 2010).



**Şekil 1.4.** (a) Tek-katman ve bulk MoS<sub>2</sub> ile (b) tek-katman ve bulk WS<sub>2</sub> için DFT ile hesaplanan elektronik bant yapıları. Yatay kesikli çizgiler Fermi seviyesini göstermektedir. Oklar temel yasak bant boşluğunu göstermektedir (direkt veya dolaylı). Valans bandının üst kıyısı mavi, iletkenlik bandının alt kıyısı yeşil renk ile temsil edilmektedir (Kuc vd., 2011).

Katman sayısına bağlı olarak bant yapısındaki değişikliğin nedeni, kuantum sınırlılık etkisi ve bunun sonucu olarak kükürt (S) atomlarının p<sub>z</sub>-orbitalleri ile Mo atomlarındaki d orbitalleri arasındaki hibritleşmedeki değişikliktir (T. Li ve Galli, 2007; Mak vd., 2010; Splendiani vd., 2010). Elektronik dağılımlar ayrıca atomik yapıya da bağlıdır. MoS<sub>2</sub> için yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) hesaplamaları, K-noktasındaki iletim bandı durumlarının esas olarak S–Mo–S katmanının ortasında bulunan ve nispeten katmanlar arası eşleşmelerden etkilenmeyen Mo atomlarındaki lokalize d

orbitallerden kaynaklandığını göstermektedir. Bununla birlikte,  $\Gamma$ -noktası yakınındaki durumlar, S atomlarındaki  $p_z$ -antibağ orbitalleri ile Mo atomlarındaki  $d$  orbitallerinin kombinasyonundan kaynaklanır ve güçlü bir katmanlar arası bağlanma etkisine sahiptir (Splendiani vd., 2010). Bu nedenle, katman sayıları değiştikçe, K-noktasının yakınındaki doğrudan eksitonik durumlar nispeten değişmez, ancak  $\Gamma$ -noktasındaki geçiş yasak bant boşluğundaki geçiş ile dolaylı geçişten direkt geçişe doğru kayma gösterir. Benzer yapıda olduklarından dolayı tüm  $\text{MoX}_2$  ve  $\text{WX}_2$  bileşiklerinin bant yapılarının, azalan katman sayısına bağlı olarak dolaylı bant geçişinden direkt bant geçişine dönmesi beklenir.  $\text{MoX}_2$  ve  $\text{WX}_2$  bileşiklerinin elektronik yasak bant boşluklarına ilişkin özellikleri Tablo 1.1’de gösterilmektedir.

**Tablo 1.1.**  $\text{MoX}_2$  ve  $\text{WX}_2$  bileşiklerinin bant yapıları.

Metal Atomu	Kalkojen Atomu (X)			Referans
	$\text{S}_2$	$\text{Se}_2$	$\text{Te}_2$	
<b>Mo</b>	1-katman: 1.8 eV Bulk: 1.2 eV	1-katman: 1.5 eV Bulk: 1.1 eV	1-katman: 1.1 eV Bulk: 1.0 eV	(Kam ve Parkinson, 1982; Leitao Liu vd., 2011; Mak vd., 2010)
<b>W</b>	1-katman: 2.1 eV Bulk: 1.4 eV	1-katman: 1.7 eV Bulk: 1.2 eV	1-katman: 1.1 eV	(Ding vd., 2011; Kam ve Parkinson, 1982; Kuc vd., 2011; Leitao Liu vd., 2011)

Tek-katman  $\text{MoS}_2$ 'nin elektronik ve optoelektronik aygıtlardaki uygulamaları, bant yapısı ve durumların yoğunluğu gibi elektronik özelliklerine doğrudan bağlıdır. Yapılan hesaplamalar bulk  $\text{MoS}_2$ 'nin bant yapısının dolaylı geçiş özelliği gösteren,  $\sim 1.2$  eV yasak bant boşluklu ve yarıiletken özelliğe sahip olduğunu göstermektedir (Kuc vd., 2011). Katman sayısı azaldıkça, dolaylı yasak bant boşluğu artar ve tek-katman halinde en geniş halini alarak direkt geçiş özelliği gösterir. Bu durum Şekil 1.4 (a)'da gösterilmektedir. Tek-katman  $\text{MoS}_2$ 'nin  $\sim 1.9$  eV'lik bir yasak bant boşluğuna sahip olduğu tespit edilmiştir (Mak vd., 2010).

Bununla birlikte tek-katman  $\text{MoS}_2$ 'nin bant yapısı ve yasak bant boşluğu dış etkilere karşı çok duyarlıdır (Johari ve Shenoy, 2012; Yue vd., 2012). Grafen ile

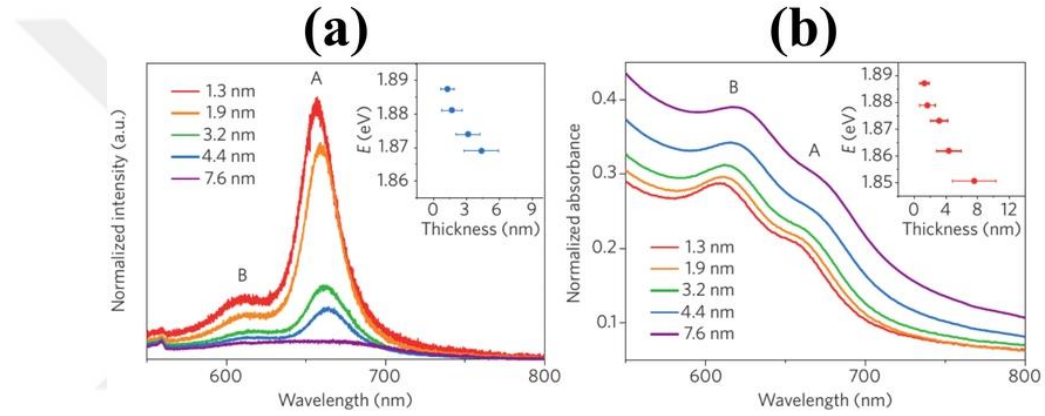
karşılaştırıldığında tek-katman MoS<sub>2</sub>'nin yasak bant boşluğunu değiştirmek için daha az zorlanma yeterlidir. Mekanik zorlanmalar, direkt yasak bant boşluğundan dolayı yasak bant boşluğuna ve yarıiletken fazdan metalik faza geçişe neden olabilmektedir (Johari ve Shenoy, 2012).

### 1.3. Molibden Disülfürün (MoS<sub>2</sub>) Optik Özellikleri

Son yıllarda, TMDC'lerin optik özellikleri üzerine büyük miktarda araştırma yapılmıştır. Bununla birlikte, araştırmanın çoğu spektral yansıtma, diferansiyel yansıtma, diferansiyel geçirgenlik, spektral absorpsiyon, absorpsiyon, fotoluminesans etki etrafında dönmektedir (Tang vd., 2017). TMDC'lerin elektronik bant yapıları optik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. MoS<sub>2</sub> için, dolaylıdan direkt bant aralığına geçişte yasak bant boşluğu enerjisindeki artış, fotoiletkenlik, absorpsiyon spektrumları ve fotoluminesans özelliğinin değişmesine yol açar (Kuc vd., 2011; Mak vd., 2010; Splendiani vd., 2010). Alttaş üzerindeki boşluklarda asılı duran MoS<sub>2</sub> pullarındaki fotoluminesans kuantum verimi bulk MoS<sub>2</sub> ile karşılaştırıldığında zaman 104 kat daha büyük olabilmektedir. Şimdiye kadar ölçülmüş geniş kapsamlı MoS<sub>2</sub> kuantum verimi, direkt geçişli bir yarıiletken için beklenen değerlerden birkaç katmanlı numuneler için yaklaşık  $10^{-5} - 10^{-6}$  ve tek katmanlı numuneler için  $4 \times 10^{-3}$  kat kadar daha düşüktür (Mak vd., 2010). Gelecekteki optoelektronik aygıtlar için farklı alttaşlar üzerine yerleştirilen MoS<sub>2</sub> yapılarının kuantum verimlerinin artırılması önem arz etmektedir.

Tek katmanlı MoS<sub>2</sub> fotoluminesans spektrumunun ana piki, Şekil 1.5 (a)'da gösterildiği gibi 1.9 eV değerindeki direkt geçiş lüminesans pikidir. Birkaç katmanlı MoS<sub>2</sub>'nin fotoluminesans spektrumunda dolaylı geçişlere ve direkt geçiş sıcak lüminesansa (Sıcak Lüminesans: Uyarıcı alan tarafından ara duruma pompalanan fazlalık taşıyıcılarının ışınımlı bozulmasından kaynaklanan lüminesanstır (Shen, 1974).) ait ilave pikler de gözlenmektedir. TMDC'lerin foto iletkenliği de bu bant yapısının özelliklerini yansıtmaktadır. Direkt ve dolaylı boşluk enerjilerine karşılık gelen foton enerjisine göre adım adım artan bir MoS<sub>2</sub> foto akımı vardır (Mak vd., 2010). Bulk MoS<sub>2</sub>'nin optik absorpsiyon spektrumu, A ve B eksitonları olarak adlandırılan eksiton bantlarına karşılık gelen iki ana pik gösterir (Şekil 1.5 (b)). Bu eksitonlar Brillouin bölgesinin K noktasında, yarılmış valans bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimum değeri arasındaki doğrudan boşluk geçişlerine atfedilmektedir (Coehoorn vd., 1987; Mak vd., 2010; Mattheiss, 1973). Hesaplamalar, A ve B eksitonlarının, Brillouin Bölgesindeki K-noktasında boşluk enerjilerinin beklenen enerjilerine karşılık geldiğini

göstermiştir; burada bant yarılması, tek tabakalı MoS<sub>2</sub>'deki spin-yörünge birleşiminden kaynaklanmaktadır (Ramasubramaniam, 2012). Ayrıca hesaplamalar, bulk MoS<sub>2</sub> ile karşılaştırıldığında dielektrik sabitindeki azalmadan ve 2-boyuttan kaynaklı kuantum sınırlılık etkisinden dolayı eksiton bağlanma enerjilerinin oldukça yüksek olduğunu da göstermektedir. Eksiton bağlanma enerjileri tek-katman MoS<sub>2</sub> için 0.897 eV iken çift-katman MoS<sub>2</sub> için 0.424 eV bulunmuştur (Cheiwchanchamnangij ve Lambrecht, 2012). İlave olarak, bu hesaplamalarda eksitonların geçiş enerjisinin eksiton bağlama enerjisi ile dengelendiği ve dolayısıyla bir eksiton oluşturmak için gereken enerjinin yasak bant boşluğundan çok daha düşük olacağı ve optik geçiş enerjilerinin, taşıma geçiş enerjisine eşdeğer olmadığını da gösterilmiştir (Q. H. Wang vd., 2012).



Şekil 1.5. MoS<sub>2</sub>'nin kalınlığa (katman sayısına) bağlı olarak (a) fotoluminesans spektrumu ve (b) absorpsiyon spektrumu (Eda vd., 2011).

#### 1.4. MoS<sub>2</sub>'nin Isısal Özellikleri

Isısal özellikler, elektronik aygıtların geliştirilmesi ve uygulanması için oldukça önemli bir konudur çünkü ısı, aygıt geliştirmeyi sınırlayıcı bir faktördür. Tek katmanlı TMDC'lerin katman kalınlığının küçük olmasından dolayı ısısal yönetim TMDC tabanlı elektroniklerde daha zor olmaktadır. Bir yandan ultra ince sınırlı bir kısımda oldukça lokalize Joule ısıtma (omik ısıtma) kolayca "sıcak noktalar" meydana getirebilmekte iken (Pop, 2010) diğer yandan yapılan deneysel (Taube vd., 2015; Yan vd., 2014) ve teorik (Cai vd., 2014; X. Wu vd., 2015) çalışmalar tek katmanlı TMDC'lerin ısı iletkenliklerinin grafeninkinden 2-3 mertebe daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu iki sınırlama, TMDC tabanlı aygıtların verimli ısısal yönetimi için önemli bir darboğaz meydana getirmektedir. Ayrıca, bir arayüzde elektron saçılımına benzeyen, fonon saçılması nano ölçekli aygıtlarda hayati öneme sahiptir (X. Liu vd., 2015). Bu nedenle,

tek katmanlı TMDC'lerde düşük ısı iletkenliği ve arayüzdeki ısıl iletkenlik, TMDC tabanlı cihazların performansını ve güvenilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir.

Son zamanlarda, tek katmanlı MoS<sub>2</sub>'nin ısıl özellikleri de kapsamlı bir şekilde çalışılmaktadır, çünkü ısıl özellikler tek katmanlı MoS<sub>2</sub>'nin termoelektrik uygulamaları için önemli parametrelerdir. Tek katmanlı MoS<sub>2</sub>'nin termoelektrik Seebeck katsayısı  $-4 \times 10^2$  ile  $-1 \times 10^5$   $\mu\text{V/K}$  arasında değişmektedir (Buscema vd., 2013). Tek tabakalı MoS<sub>2</sub>'nin ısıl iletkenliği,  $\kappa$ , Raman modunun lazer gücüne bağımlı olarak oda sıcaklığında yaklaşık  $34.5 \pm 4$   $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'dir (Yan vd., 2014). Bununla birlikte, moleküler dinamik (MD) simülasyonları kullanılarak, tek katmanlı MoS<sub>2</sub>'nin hesaplanan ısıl iletkenliği  $\kappa$ , deneysel verilerden çok daha düşük olduğu ( $1.35 \sim 6$   $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) hesaplanmıştır (Jiang vd., 2013; X. Liu, vd., 2013).

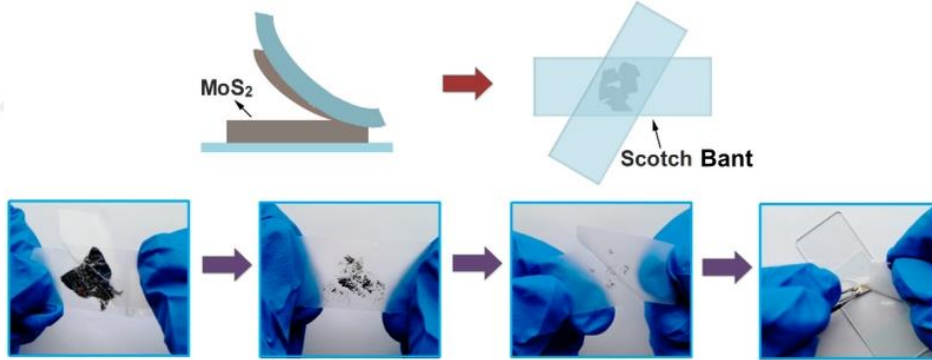
### 1.5. MoS<sub>2</sub>'nin Mekanik Özellikleri

Grafen ve MoS<sub>2</sub> benzer bir düzlem içi altıgen örgü yapısına sahip olsa da, düzlem dışı kristal örgü yapıları oldukça farklıdır. Grafen sp<sup>2</sup> bağlı karbon atomları içerirken, MoS<sub>2</sub> bir geçiş metali (Mo) atomu ve iki kalkojenid (S) atomu arasında tetragonal olarak hizalanmış bir üç-tabaka oluşturur. Bundan dolayı, grafen ve MoS<sub>2</sub>'nin elektronik ve mekanik özellikleri önemli ölçüde farklılıklar gösterir. İdeal bir grafen metalik özellik gösterirken çelikten mekanik olarak daha güçlüdür, Young modülü  $\sim 1$  TPa'dır (C. Lee vd., 2008). MoS<sub>2</sub> ise yarıiletken özellik gösterir ve aygıt uygulamalarında kullanışlıdır, ancak Young modülü  $\sim 0.25$  TPa'dır (Castellanos-Gomez vd., 2012). Tek katman MoS<sub>2</sub>'ye ait mekanik özelliklerin bilinmesi üç nedenden dolayı istenir. Birincisi, bükülebilir elektronik ve gerilebilir polimer alttaşlar gibi pratik uygulamalarda kullanabilmek içindir. İkinci olarak gerilme mühendisliği, nanomalzemelerin işlevsel ve yapısal özelliklerini düzenleyen yaygın ve önemli bir yaklaşımdır (Guinea vd., 2010; Topsakal vd., 2009). Çünkü MoS<sub>2</sub>'nin elektriksel, magnetik ve dielektrik özellikleri gerilmeye kuvvetli bir şekilde bağlıdır (Johari ve Shenoy, 2012; A. Kumar ve Ahluwalia, 2013; Scalise vd., 2012). Üçüncüsü ise tek katman MoS<sub>2</sub> ultraince kalınlığa sahip olduğundan dolayı kasıtlı veya kasıtsız gerilme ile zedelenebilmektedir. Örnek olarak MoS<sub>2</sub> seçilen alttaş ile yapısal olarak uyumsuzluk gösterdiğinde gerilmeler meydana gelecektir. Bu durum taşıyıcı mobilitesindeki değişiklik ile sonuçlanacaktır (W. S. Yun vd., 2012).

## 1.6. MoS<sub>2</sub> Sentez/Büyütme Yöntemleri

### 1.6.1. Mekanik olarak pul pul ayırma (Micromechanical Exfoliation)

Bu işlem ilk olarak 2004'te Geim ve Novoselov tarafından keşfedilmiş (Novoselov vd., 2005) ve bu yöntemle tek-katmanlı grafen elde edilmiştir (Novoselov vd., 2004). Bu yöntemde bulk malzemeye yüzeyine yapıştırılan scotch bandın mikromekanik kuvveti ile malzeme yüzeyinden tek katmanlı yapı ayrılabilir. Bu ayrılma bulk malzemeyi oluşturan pek çok katmanın aralarındaki zayıf van der Waals etkileşimleri nedeniyle mümkün olabilmektedir. Hızlı ve uygun maliyetli bir işlem olmasına rağmen, mikromekanik pul pul ayırma yöntemi, endüstriyel düzeyde tek katmanlı malzemelerin sentezi için uygun değildir, çünkü pulların çoğu 20 µm'den daha küçüktür. Tek katmana ek olarak, aynı anda birkaç katman veya çok kalın katmanlar da elde edilebilir. Öte yandan, kimyasal bir etkileşim olmamasından dolayı elde edilen tek katmanın kristalliği daha yüksek ve yapısal bütünlüğü bozulmadan uzun süre stabil kalabilmektedir (Novoselov vd., 2005). Tek-katman MoS<sub>2</sub>'nin mekanik olarak pul pul ayırma yöntemi ile elde edilmesine ilişkin görsel Şekil 1.6'da gösterilmektedir.

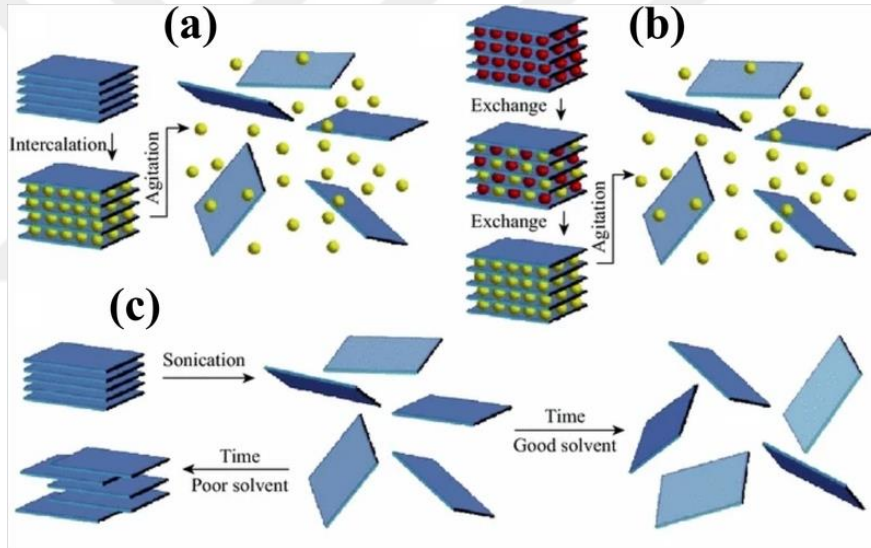


Şekil 1.6. MoS<sub>2</sub>'nin nano katmanların mekanik olarak pul pul ayırma yöntemi ile elde edilmesine ilişkin şematik diyagram ve resimler (W. Li vd., 2019).

### 1.6.2. Sıvı içinde pul pul ayırma (Liquid Exfoliation)

Düşük verimli bir yöntem olan mekanik olarak pul pul ayırma yönteminin aksine, sıvı içinde pul pul ayırma yöntemi, büyük ölçekli tek veya birkaç katman kalınlığındaki 2-boyutlu malzeme elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yöntem, oksidasyon, araya ekleme (interkalasyon), iyon değişimi ve ultrasonik parçalanma gibi dört farklı formda kategorize edilebilir (Coleman vd., 2011; Q. H. Wang vd., 2012). Grafen için sıklıkla kullanılan bu yöntem Hummer yöntemi veya değiştirilmiş Hummer yöntemi olarak bilinir (Goncalves vd., 2009). Sıvı içinde pul pul ayrılmanın oksidatif

formu, düşük indirgeme potansiyeline sahip katmanlı malzemeler için en uygun olanıdır. İnterkalasyon tekniği, TMDC'ler ve grafene aynı şekilde uygulanabilir. Bu yöntemde, katmanlar arası kuvvet iyonik veya organik moleküllerin araya girmesi ile azalır, bu da pul pul ayrılma için gerekli enerjide bir azalmaya neden olur (Xiong vd., 2015). Sıvı içinde pul pul ayrılma ile tek veya birkaç katmanlı 2-boyutlu malzeme elde etmek için başka bir teknik ultrasonik olarak parçalama işlemidir. Bu teknikte, zayıf bağlı katmanlardan oluşan ana yığın malzemesi, uygun bir çözücü içinde ultrasonik dalgalara maruz bırakılır. Yüksek enerjili ultrasonik dalgalar nedeniyle çözücü içinde kaviteasyon kabarcıkları gelişir (Nicolosi vd., 2013). Tabakaların pul pul ayrılması, kaviteasyon kabarcıklarının patlamasıyla açığa çıkan basınç nedeniyle meydana gelir. Sıvı içinde pul pul ayırma yöntemine ilişkin şematik gösterim Şekil 1.7'de gösterilmektedir.

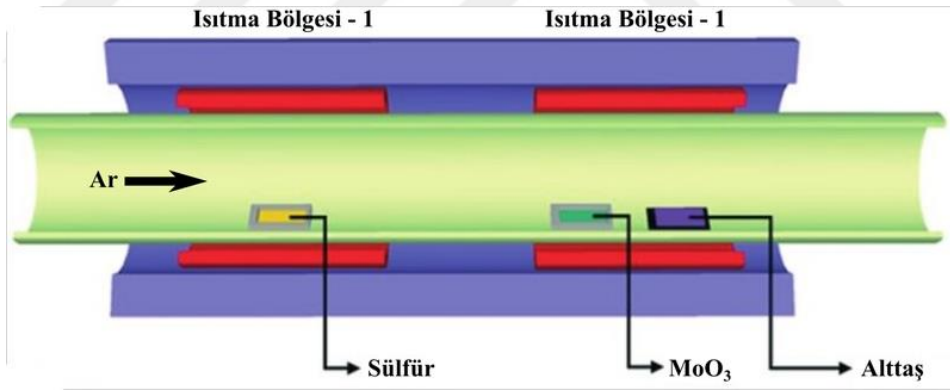


**Şekil 1.7.** Sıvı içinde pul pul dökülme yöntemleri. (a) Araya ekleme (interkalasyon), (b) iyon değişimi ve (c) ultrasonik parçalama (Nicolosi vd., 2013).

### 1.6.3. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), yöntemi optoelektronik ve elektronik cihazlar için ümit vaat eden tek tip kalınlıkta büyük bir ölçekte 2-boyutlu katmanların sentezine izin veren aşağıdan yukarıya büyütme tekniği olarak bilinir. Oksitlenmiş bir silisyum altaş üzerinde CVD ile tek katmanlı MoS<sub>2</sub> sentezlemek en bilinen yöntemdir. Genel olarak CVD yöntemi ile MoS<sub>2</sub> büyütmenin iki yolu vardır. Birincisinde ince bir metalik Mo tabakası bir fiziksel buharlaştırma sistemi ile buharlaştırılır. Daha sonra Mo

tabakası, element kükürtün erime sıcaklığının üzerine ısıtılmasıyla üretilen kükürt buharlarıyla reaksiyona girer. Bu reaksiyon  $\sim 750$  °C'de yer yer tek katmanlı MoS<sub>2</sub> oluşumuna yol açar (Zhan vd., 2012). Bu yöntem ile genellikle üç katmandan daha fazla katman sayısına sahip MoS<sub>2</sub> elde edilmektedir. İkincisinde, tek katman kalınlığında MoS<sub>2</sub> sentezi için tek adımlı aşağıdan yukarıya bir teknik kullanılır. Bu yaklaşımda, saf kükürt ve MoO<sub>3</sub> tozları bir CVD sistemine yerleştirilir. MoO<sub>3</sub> tozu 650 °C ve kükürt tozu  $\sim 150$  °C sıcaklığa çıkartılır ve eş zamanlı buharlaşmaları sağlanır. Alttaş üzerinde reaksiyona giren MoO<sub>3</sub> ile S buharları bir araya gelerek MoS<sub>2</sub> yapısını oluşturur ve bu yapı alttaşa tutunur. Diğer MoS<sub>2</sub> molekülleri de alttaş üzerindeki moleküllere tutunarak tek katmanlı MoS<sub>2</sub> yapısını meydana getirir (J. Jeon vd., 2015; N. Kumar vd., 2018; H. F. Liu, vd., 2015; López-Posadas vd., 2019; Özden vd., 2017; Özküçük vd., 2020; L. Tao vd., 2017). MoS<sub>2</sub>'nin yanı sıra, TiS<sub>2</sub> (Peters vd., 2004), VSe<sub>2</sub> (Nicolas D Boscher vd., 2007), WSe<sub>2</sub> (Nicolas D Boscher vd., 2006), WS<sub>2</sub> (Carmalt vd., 2003) ve MoSe<sub>2</sub> (N. D. Boscher vd., 2006) gibi diğer 2-boyutlu malzemeler de CVD tekniği kullanılarak büyütülmüştür. Geleneksel CVD sistemi ile tek katmanlı MoS<sub>2</sub> büyütülmesine ilişkin şematik gösterim Şekil 1.8'de gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Standart CVD yöntemi ile tek katmanlı MoS<sub>2</sub> büyütülmesine ilişkin şematik gösterim (Gnanasekar vd., 2018).

#### 1.6.4. Hidrotermal Sentez

Hidrotermal yöntem, maddenin yüksek buhar basıncı ve sıcaklıkta organik veya sulu çözeltilerden kristalleştirilmesi olarak tanımlanır. Sıradışı koşullarından dolayı, bu yöntem sadece bu zorlu (yüksek basınç ve sıcaklık) koşullara dayanabilen öncüler için uygundur. 2-boyutlu nanoyapılı malzemeler bu yaklaşımla başarıyla sentezlenmiştir. Tek katmanlı MoSe<sub>2</sub> ve MoS<sub>2</sub> nano yapıları, Se/S'nin hidrazin monohidrat çözeltisi

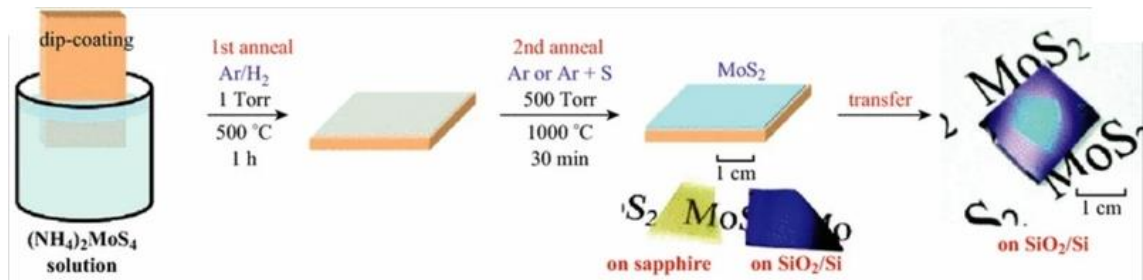
içerisinde 48 saat boyunca 150-180 °C sıcaklıkta  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (amonyum molibdat) ile kimyasal reaksiyonu yoluyla elde edilmiştir (Peng vd., 2001). Ayrıca hidrazin ve  $(\text{NH}_4)_2\text{MoS}_4$  (amonyum tetra molibdat) kullanarak, grafen oksit üzerinde  $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$  (N,N-dimetilformamid) çözeltisi içinde tek aşamalı solvotermal reaksiyon ile 3 ile 10 katmanlı  $\text{MoS}_2$  pulları üretilmiştir (Y. Li vd., 2011). Hidrotermal senteze ilişkin şematik gösterim şekil 1.9’da gösterilmektedir.



Şekil 1.9. Hidrotermal sentez ile  $\text{MoS}_2$  büyütülmesine ilişkin şematik gösterim (Tian vd., 2019).

### 1.6.5. Daldırmalı kaplama Yöntemi

Bu yöntemde  $(\text{NH}_4)_2\text{MoS}_4$  çözeltisi içine kontrollü olarak daldırılıp çıkarılan alttaş, Ar ve/veya Ar+S buharında yüksek sıcaklıkta tavlanamaktadır. Böylece alttaş yüzeyinde  $\text{MoS}_2$  büyütülebilmektedir. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre avantajı oldukça hızlı bir şekilde  $\text{MoS}_2$  sentezlenebilmesidir (K.-K. Liu vd., 2012). Daldırmalı kaplama ile  $\text{MoS}_2$  sentezine ilişkin şematik gösterim şekil 1.10’da gösterilmektedir.



Şekil 1.10. Daldırmalı kaplama yöntemi ile  $\text{MoS}_2$  büyütülmesine ilişkin şematik gösterim (K.-K. Liu vd., 2012).

### 1.6.6. Diğer MoS<sub>2</sub> büyütme yöntemleri

2-boyutlu malzemeleri sentezlerken birçok yöntem denenmiştir. Bu yöntemlerin bir kısmı 2-boyutlu TMDC büyütme için kullanılmaktadır. Bunlar arasında Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemi de oldukça sık kullanılan tekniklerdendir. Burada büyütülecek TMDC'nin, metali, metal-oksiti veya direkt kalkokenli hali farklı PVD teknikleri ile alttaş yüzeyine kaplanmakta ve uygulanan büyütmenin özelliğine göre uygun ortamda işlem sonrası tavlama (post-annealing) yapılmaktadır. 2-boyutlu malzeme için sıklıkla kullanılan PVD yöntemleri arasında manyetik alan sıçratma (magnetron sputtering) (Hussain vd., 2016; J. Tao vd., 2015; Zhong vd., 2018), atımlı lazer biriktirme (PLD) (Tumino vd., 2019), termal buharlaştırma (TE) (Sivarajan ve Padmanabhan, 2016), elektron demeti buharlaştırma (e-beam evaporation) (Dam vd., 2019) yer almaktadır.

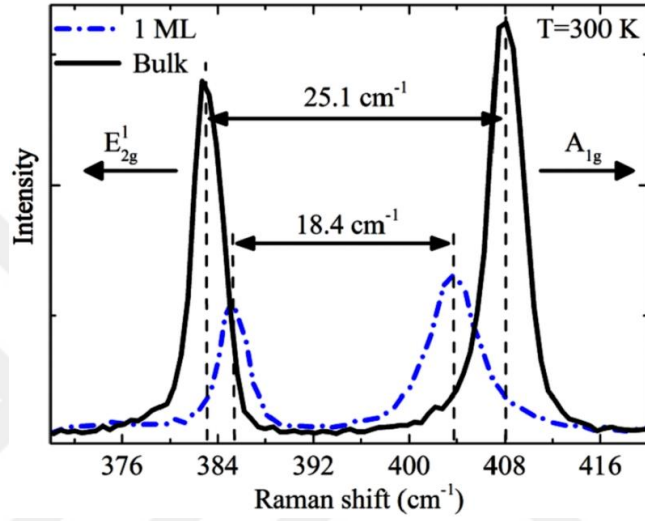
### 1.7. MoS<sub>2</sub> Karakterizasyonu

TMDC 2-boyutlu malzemelerde temelde Raman spektroskopisi yapısal analizler için en çok başvurulan analiz yöntemidir. Bununla birlikte nano boyutta topografik analiz yapabilen atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) da özellikle TMDC malzemelerin katman kalınlığını belirlemede kullanılmaktadır. Bunun yanında fotoluminesans (PL) spektroskopisi, morötesi-görünür bölge soğurma/geçirgenlik/yansıma (UV-Vis) spektroskopisi, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM), küçük açı X-ışınları kırınım difraksiyonu (GIXRD), X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) gibi pek çok teknik de analiz için kullanılmaktadır. Ancak en çok başvurulan yöntem olarak Raman Spektroskopisi, AFM analizi ve PL spektroskopisi öne çıkmaktadır.

#### 1.7.1. MoS<sub>2</sub> Raman spektroskopisi

Raman spektroskopisi MoS<sub>2</sub> tabakasının yapısı önemli bilgiler içermektedir. MoS<sub>2</sub> filmlerinin Raman spektrumları iki karakteristik pik gösterir. Mo-S atomları düzlem için yöneliminde ( $\sim 386 \text{ cm}^{-1}$ ) titreşirken S atomları düzlem yönelimine dik olarak ( $\sim 404 \text{ cm}^{-1}$ ) titreşir ve bu titreşimler sırasıyla E<sub>2g</sub><sup>1</sup> ve A<sub>g</sub><sup>1</sup> fonon titreşim modları ile ifade edilir (Shanmugam vd., 2012). E<sub>2g</sub><sup>1</sup> modunun, ara katman atomları olan molibden atomları arasındaki uzun menzilli Coulombic etkileşimi nedeniyle katman kalınlığındaki artıştan güçlü bir şekilde etkilendiği varsayılmaktadır. Ancak, A<sub>g</sub><sup>1</sup> modu katman kalınlığından önemli ölçüde etkilenmez (Chakraborty vd., 2013). MoS<sub>2</sub> yapılarında, film kalınlığına bağlı olarak Raman piklerinin pozisyonu da etkilenir. Bahsi

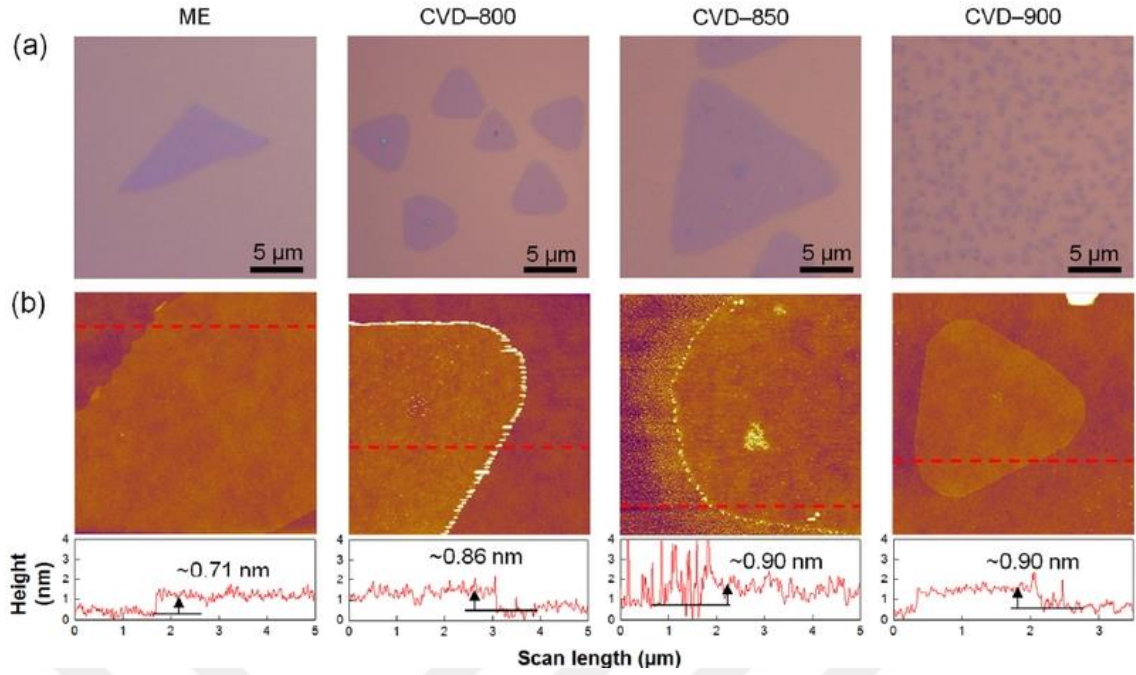
geçen iki pikin şiddeti, artan MoS<sub>2</sub> kalınlığı ile önemli ölçüde artar. Ayrıca kalınlıktaki artışla birlikte A<sub>1g</sub> modunda maviye kayma (blue-shift) ve E<sub>2g</sub><sup>1</sup> modunda kırmızıya kayma (red-shift) gözlenir. İki karakteristik pik arasındaki mesafe, tek tabakalı MoS<sub>2</sub> için ~19 cm<sup>-1</sup> olarak tespit edilmiş olup (H. Li vd., 2012; S. Sundaram vd., 2013) MoS<sub>2</sub> kalınlığının artışı ile artarak çok katmanlı MoS<sub>2</sub> için ~25-26 cm<sup>-1</sup> değerlerine çıkmaktadır (Gołasa vd., 2013). Tek katman ve bulk MoS<sub>2</sub> için Raman aktif modlar ve pozisyonları Şekil 1.11’de gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Tek katman ve bulk MoS<sub>2</sub>'nin Raman aktif modları ve pozisyonları (Gołasa vd., 2013).

### 1.7.2. MoS<sub>2</sub>'nin atomik kuvvet mikroskopisi ile yüzey topografisi

Atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) bir yüzeye ait topografinin mikro ve nano ölçeklerinde 3-boyutlu görüntüsünü alabilen bir cihazdır. Tip olarak ifade edilen ve atomik boyutlara sivriltilmiş, uç yardımıyla, yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağlar. Görüntüleme, tipin ile yüzey arasındaki atomik boyutlarda meydana gelen etkileşimler ile alınmaktadır. 2-boyutlu malzemelerde ise malzeme kalınlığının ölçülmesi ve buradan katman sayısının hesaplanması amacıyla birlikte meydana gelen yapıların şekillerini de belirlemek için kullanılır. Ayrıca yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi, tanecik boyutlarının tespit edilmesi gibi farklı işlevler de gerçekleştirilmektedir. Şekil 1.12’de MoS<sub>2</sub>'ye ait optik mikroskop ve AFM görüntüleri verilmiştir ve AFM ile tek katmanlı MoS<sub>2</sub>'nin kalınlık ölçümü gösterilmektedir.

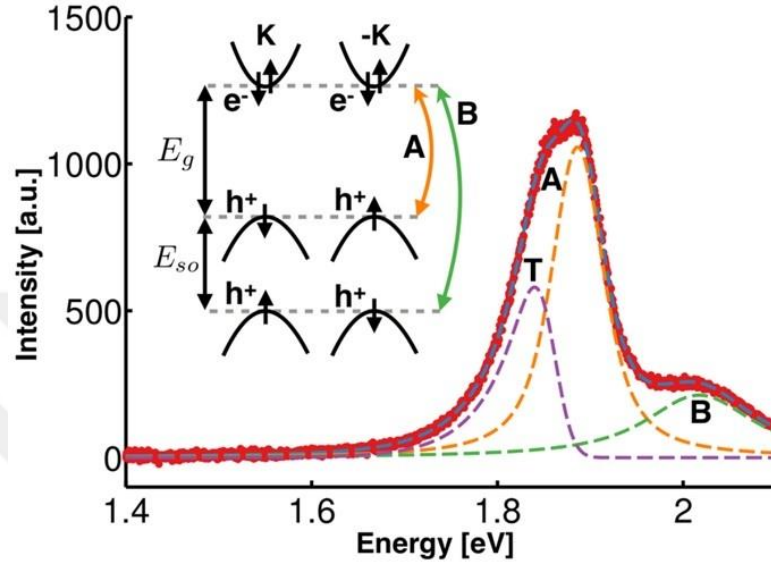


**Şekil 1.12.** SiO<sub>2</sub>/Si alttaş üzerinde mekanik olarak pul pul ayrılmış tek katmanlı MoS<sub>2</sub> ve CVD ile 800, 850 ve 900 °C’lerde büyütülmüş tek katmanlı MoS<sub>2</sub> (a) optik mikroskop görüntüleri ve (b) AFM topografik görüntüleri. AMF görüntüleri üzerindeki kırmızı kesikli çizgiler kesit profillerinin yerlerini göstermektedir (Ky vd., 2018).

### 1.7.3. MoS<sub>2</sub> fotoluminesans spektroskopisi

Fotoluminesans (PL) spektroskopisi ölçümleri, malzemelerin elektronik bant geçişleri hakkında bilgi edinmede oldukça faydalıdır. MoS<sub>2</sub>’nin optik özellikleri, katman sayısına büyük ölçüde bağlıdır. Bundan dolayı tek katmanlı MoS<sub>2</sub>’de, doğrudan eksitonik geçiş enerjileri nedeniyle güçlü bir fotoluminesans etkisi gözlenir, ancak bu, artan katman sayısı ile azalır ve bulk formunda fotoluminesans etkisi gözlenmez. Bunun nedeni, MoS<sub>2</sub>’nin bulk formunda dolaylı yasak bant boşluğuna ve tek katmanlı formunda direkt yasak bant boşluğuna sahip olmasıdır. Tek katmanlı MoS<sub>2</sub>, PL spektrumunda ~670 ve ~620 nm’de iki pik gösterir. Bu pikler Brillouin bölgesinin K noktasındaki doğrudan eksitonik geçişlerle ilişkilidir ve sırasıyla MoS<sub>2</sub>’nin A uyarımı ve B uyarımı olarak isimlendirilir (Splendiani vd., 2010). Ayrıca, ~670 nm’deki baskın pik, foton ile meydana getirilen (photogenerated) elektron–hole çiftinin yeniden birleşmesine (recombination) atfedilirken, ~620 nm’de gözlemlenen daha zayıf pik, MoS<sub>2</sub>’nin güçlü spin–yörünge eşleşmesi nedeniyle valans bant yarılmasına bağlanır (Zhu vd., 2011). Öte yandan, negatif (bir hole ve iki elektron) ve pozitif (bir elektron iki hole) lokalize parçacığımsı (quasiparticles) trion ile ilişkin PL pikleri ~680 nm’de gözlenir. Bununla birlikte, PL şiddetinin, artan MoS<sub>2</sub> katman sayısı ile azaldığı ve

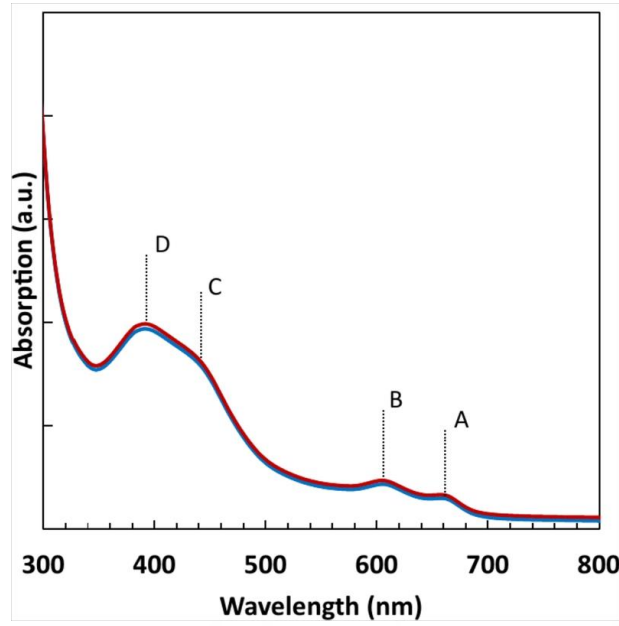
bunun nedenin optik bant yasak bant boşluğunun direkt bant geçişinden dolayıya bant geçişine doğru evrilmesi olduğu ifade edilmektedir (Mak vd., 2010). Ayrıca PL spektrumlarındaki A ve B uyarımları ile ve A- trionun pik pozisyonlarının, MoS<sub>2</sub> pulu üzerinde PL sinyali üreten bölge yani odaklanma yerine göre değişebilmektedir. Şekil 1.13'te tek katmanlı MoS<sub>2</sub> yapısına ilişkin PL spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 1.13. 273 K'da MoS<sub>2</sub>'nin PL spektrumu (zemin düzeltmesi yapılmıştır). A ve B eksitonları, T ise trionu göstermektedir (Christopher vd., 2017).

#### 1.7.4. MoS<sub>2</sub> UV-Vis spektroskopisi

2-boyutlu malzemeler için UV-Vis spektroskopisi de PL spektroskopisi gibi önemli bilgiler sunar. Elektromagnetik spektrumda morötesi ve görünür bölgelerde soğrulmanın olduğu dalga boyları bant geçişlerini olduğu yerler olup elektronik özellikleri belirlemede destekleyici bilgiler içerir. MoS<sub>2</sub> yapısı için görünür bölgedeki pikler (400-800 nm), MoS<sub>2</sub>'nin sınırlayıcı olmayan durumları olan d-orbitalleri arasındaki optik geçişlerle ilişkilidir (Mattheiss, 1973). A/B pikleri, Brillouin bölgesinin K ve K' noktalarındaki bant kenarı uyarımlarına karşılık gelir. C/D pikleri, işgal edilen dz<sup>2</sup> orbitali ile boş dxy, x<sup>2</sup>-y<sup>2</sup> ve dxz, dyz orbitalleri arasındaki bantlararası geçişlere karşılık gelir (Ahn vd., 2015; Coehoorn vd., 1987; King vd., 2013).



Şekil 1.14. MoS<sub>2</sub>'ye ait UV-Vis soğurma spektrumu (Ghayeb Zamharir vd., 2018).

### 1.8. 2-boyutlu Malzemelerin Geleceği

Moore yasası (Bir buçuk senede, bir entegre devre üzerine yerleştirilebilecek devre elemanı sayısı ikiye katlarken üretim maliyetleri aynı kalma hatta düşme eğilimindedir.) bir son noktaya yaklaştıkça, gelecekteki yarıiletken araştırmaların geliştirilmesi için yüksek performanslı ve düşük güçlü, çok işlevli nanoelektronik aygıtlara ihtiyaç olacaktır. Bu durumda işlevlerini daha da artırmak için mevcut silikon platformuna yeni malzemeler eklemek kaçınılmaz hale gelmektedir. 2-boyutlu ve tek katmanlı yarıiletkenler, ultra ince gövdelere, atom ölçeğinde yumuşaklığa, dangling bağırsız yüzeylere, yüksek taşıyıcı hareketliliğine (mobilitesine) ve ayarlanabilir yasak bant boşluğuna sahiptir. Bu eşsiz özellikler, bulk yapıda bulunmayan olağanüstü fiziksel ve kimyasal özelliklere izin verir. 2-boyutlu yarıiletken temelli elektronik aygıtları, geleneksel 3-boyutlu yarıiletkenlere oranla yüksek hız ve düşük güç tüketimine ile bilgisayar gibi cihazları için nano ölçeğe kadar ölçeklendirilebilmektedir. İlave olarak, 2-boyutlu malzemeler geniş bant ışığına, elektromanyetik dalgaya, manyetik alana, termal ve mekanik strese yanıt verebilmekte ve çeşitli kimyasalları, gazları ve biyomolekülleri algılayabilmektedir. Ayrıca, farklı esnek ve gerilebilir alt tabakalara uyum sağlama yeteneğine de sahiptirler, bu da bilgisayar dışı bileşenler, sensörler, insan-makine arayüzleri, kablosuz iletişim modülleri ve diğer pasif cihazlar arasında çok sayıda uygulama için uygun bir aday haline gelmesine yol açmaktadır.

Yapılan 2-boyutlu malzeme çalışmalarında CVD ile bağımsız üçgen pullar şeklinde (Şekil 1.12) MoS<sub>2</sub> yapıları elde edilmiştir. Bu yapılar büyütme parametrelerine

bağlı olarak büyük veya küçük olabildiği gibi birbirinden bağımsız veya üst üste de gelmiş olabilmektedir. Ayrıca devre uygulamalarında bir takım kısıtlılıklar da getirmektedir. Bu yapılar daha homojen ve kullanılabilir yapılar haline getirmek için PVD yöntemi başvurulan yöntemlerden bir diğeridir. MoS<sub>2</sub> bazlı bir cihaz yapmak için homojen ve homojen büyük ölçekli bir film elde etmek gerekir. Bu bağlamda, tez çalışmasında iki aşamalı büyütme yönteminin istenen sonuçları sağlayıp sağlamadığını araştırmak amaçlanmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, yüksek kristallikli MoO<sub>3</sub> filminin sülfürizasyonu ile MoS<sub>2</sub> ince film büyütme ve böylece MoO<sub>3</sub>'ün kalınlığını kontrol ederek MoS<sub>2</sub>'nin yapısını kontrol edebilmektir. Bu çalışma literatürde PVD yöntemleriyle yapılan MoS<sub>2</sub> fabrikasyon çalışmalarından MoO<sub>3</sub> ince film büyümesinin sıcaklığı ve koşulları açısından farklılık içermektedir. Tez çalışmasında homojen ve tekdüze bir MoS<sub>2</sub> ince film elde etmek için manyetik alan sıçratma yöntemi kullanılmış ve ardından sülfürleme işlemi yapılmıştır. Bu iki işlemin ardışık yapılması sonucu kuvars ve Si altaş üzerinde MoS<sub>2</sub> filmler başarı ile büyütülmüştür.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Grafen araştırmasının büyük başarısı, diğer 2-boyutlu atomik kristal türlerinde muazzam bir gelişmeyi tetiklemiştir (Chhowalla vd., 2013; R. Dong vd., 2014; Novoselov vd., 2012). Son yıllarda benzersiz elektronik, optik ve mekanik özellikleri nedeniyle 2-boyutlu malzemelere en çok çalışılan konuların başında gelmiştir (Zeng vd., 2018). Bu malzemeler, doğası gereği yığın halinde olup, tabakaları içinde güçlü kovalent bağlara ile tabakalar arasındaki zayıf van der Waals etkileşimlerine sahiptir. Bu özellikler, bu materyallerin 2D formda sentezlenmesini mümkün kılmaktadır (Sangwan ve Hersam, 2018; Zeng vd., 2018). Bu 2-boyutlu malzemelerin en ilginç gruplarından biri, kimyasal formülü  $MX_2$  ( $M = Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W, Tc, Re, Pd, Pt$  ve  $X = S, Se, Te$ ) olan geçiş metal dikalkojenleridir (TMDC). Formüldeki  $M$  bir geçiş metal atomunu temsil ederken  $X$  bir kalkojen atomunu temsil etmektedir. TMDC'lerin tek katmanlı formları incelendiğinde çok yönlü ve benzersiz elektrik, optik, kimyasal ve mekanik özellikler sunduğu tespit edilmiştir (Novoselov vd., 2016; Q. H. Wang vd., 2012; Xu vd., 2014). TMDC'lerin elektronik özellikleri metallere kadar değişebilmektedir. Aynı zamanda TMDC'ler yük yoğunluk dalgası ve süperiletkenlik gibi egzotik davranışlar da sergiler. TMDC'lerin katman bağımlı özellikleri dikkatleri büyük ölçüde kendine çekmiştir. Örnek olarak bulk TMDC'lerde gözlemlenen dolaylı bant geçişi tek tabaka formlarında yerini direkt bant geçişlerine bırakmaktadır. Grafen ve TMDC'ler on yıldır bilinmekte ve çalışılmaktadır. Ama atomik boyutta ince formunun özellikleri yani 2-boyutlu formları son on yılın trend konuları olup, nanoelektronik ve optoelektronikte büyük bir heyecan yaratmıştır.

TMDC'lerin oda sıcaklığındaki tek tabaka formları yarıiletken özellik göstermektedir. Bununla birlikte elektronik bant geçişleri de direkt olmaktadır (Mak vd., 2010; Splendiani vd., 2010). Yarıiletkenlerin elektronik bant yapısı direkt olarak ışığı soğurma ve yayma yeteneğini etkiler. Direkt yasak bant aralığına sahip yarıiletkenler için yasak bant aralığından daha büyük enerjiye sahip fotonlar kolaylıkla soğrulur ve yayılır. Dolaylı yasak bant boşluğunda momentumdaki farklılığı gidermek için ilave bir foton soğrulmalı veya yayılmalıdır. Bu tür yapılarda foton soğrulma ve yayılma daha az verimle gerçekleşmektedir. Bu açıdan bakıldığında 2-boyutlu TMDC'ler yeni nesil optoelektronik aygıtlar için ilgi çekici hale gelmektedir. Optoelektronik aygıtlar, ışığı üreten, tespit eden, etkileşen veya kontrol eden elektronik aygıtlardır. Karbon nanotüpler, yarıiletken kuantum noktalar, nano malzemeler

optoelektronik uygulamalar için (lazerler, LED'ler, güneş hücreleri, optik anahtarlar, fotodedektörler ve ekranlar gibi) kullanılmaya çalışılmıştır. Esnek ve saydam güneş panelleri, giyilebilir elektronik ve saydam ekranlar yeni nesil optoelektronik aygıtlar için gelecek vaat eden araştırma alanlarındandır.

TMDC'yi meydana getiren bileşikler içinde sentezlenmesi en kolay olan ve en çok çalışılanları MoS<sub>2</sub> (Radisavljevic vd., 2011), MoSe<sub>2</sub> (Shim vd., 2014), WS<sub>2</sub> (Ovchinnikov vd., 2014) ve WSe<sub>2</sub> (Allain ve Kis, 2014)'dir.

TMDC'lerin önde gelen bir üyesi olan molibden disülfür (MoS<sub>2</sub>) sahip olduğu özellikler açısından da en çok çalışılan TMDC malzeme özelliği taşımaktadır. Yasak bant boşluğunu katman sayısına bağlı olarak 1.2 eV dolaylı bant boşluğundan 1.9 eV direkt bant boşluğuna dönüştürme yeteneğine sahiptir (Ganatra ve Zhang, 2014; X. Li ve Zhu, 2015). Tek tabakalı formda yüksek bir açma/kapama akımı oranı (108), oda sıcaklığında 200 cm<sup>2</sup>/V.s'lik iyi bir hareketlilik sergiler (Radisavljevic vd., 2011). Bu nedenle kalınlığına bağlı özellikler(Mak vd., 2010) onu özellikle optoelektronikteki çeşitli uygulamalar için uygun hale getirmektedir (X. Zhang vd., 2018). MoS<sub>2</sub>, iki sülfür tabakası arasına sıkıştırılmış molibdeni olan (S-Mo-S) katmanlı bir malzemedir. Kristal içindeki atomlar arasında güçlü kovalent bağ ve katmanlar arasında zayıf van der Waals kuvvetleri vardır. Bundan dolayı son on yıla kadar çeşitli makinelerde kuru yağlayıcılar olarak işlev görmekteydi (Colas vd., 2015; Pietrzyk vd., 2018). Tek tabaka formunun sentezlenmesinde sonra MoS<sub>2</sub>, elektronik alanda hidrojen üretim reaksiyonlarında (HER) (Voiry vd., 2013; Xue vd., 2017), enerji depolama ve dönüştürmede (Xue vd., 2017; Yu vd., 2015; Q. Yun vd., 2018) ve sodyum (Xie vd., 2016) ve lityum piller (Feng vd., 2009) içinde elektrot olarak, piezoelektrik voltaj ve akım çıkışları üretmede (Wenzhuo, 2016), esnek elektronik uygulamalarında (Pu vd., 2012), optoelektronik (X. Zhang vd., 2018) ve güç veren nano cihazlarda (Cui vd., 2018; Wenzhuo, 2016) kullanılmak üzere araştırılmaktadır. İlave olarak MoS<sub>2</sub>'nin tek katmanlı formu güçlü bir fotoluminesans özellik gösterir. Bundan dolayı, ışık yayan diyotlar (LED) (P. J. Jeon vd., 2015) ve güneş pilleri (H. M. Dong vd., 2018; Jian vd., 2019; Radisavljevic vd., 2011; Zeng vd., 2018) gibi uygulamalar için de uygun bir adaydır.

Tek katmanlı MoS<sub>2</sub> büyütmek için pek çok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar içinden en bilineni ve en kolay olanı kimyasal buhar biriktirme yöntemidir. Metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemini kullanarak TMDC'lerden MoS<sub>2</sub> ve WS<sub>2</sub> ilk kez Hoffman sentezlemiştir (Hofmann, 1988). Bu ilk çalışmada MoS<sub>2</sub> ve WS<sub>2</sub> yalıtkanlar, cam, kuvars LiF, MgO ve mika gibi optik

malzemeler, Mo, Au, Pt, Al ve çelik gibi soy ve geçiş metallerinin üzerine büyütülmüştür. MoS<sub>2</sub> ve WS<sub>2</sub> yapısını oluşturmak için öncül olarak molibden ve tungsten elementlerinin hegzakarbonil gazları ile sülfür veya H<sub>2</sub>S gazı kullanılmıştır. Ancak büyütülen filmler normal kalınlıkta filmler olmuşlardır. 2-boyutlu atomik katmanları büyütme için CVD yönteminde çeşitli teknikler kullanılmıştır. Liu ve arkadaşları iki adımlı bir işlem ile MoS<sub>2</sub> tabakası elde etmişlerdir. (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>MoS<sub>4</sub> (Amonyum tetramolibdat) çözeltisi içine daldırdıkları alttaşları 500 °C sıcaklıkta Ar/H<sub>2</sub> gazı altında tavladıktan sonra 1000 °C’de sülfür buharını kullanarak sülfürizasyon işlemine tabi tutmuşlardır. Yüksek çözünürlüklü TEM analizleri MoS<sub>2</sub> kalınlığını 3 katman olarak belirlemiş ve oluşan MoS<sub>2</sub> yapısının diğer alttaşlar üzerine kolaylıkla transfer edilebildiğini tespit etmişlerdir (K.-K. Liu vd., 2012). Sülfür buharıyla yapılan sülfürizasyon işlemi MoS<sub>2</sub>’nin kristallliğini ileri derecede artırmaktadır. Diğer bir çalışmada az katmanlı TMDC’lerin geleneksel CVD ile elde edilebildiği gösterilmiştir. Zhan ve arkadaşları molibden metal filmlerin CVD ortamında sülfürlenmesi ile az katmanlı MoS<sub>2</sub> elde edildiğini bildirmişlerdir. Çok ince tabaka metalik molibden filmi, e-demeti buharlaştırma sistemi ile SiO<sub>2</sub> alttaşa kaplanmış ve CVD sistemine yerleştirilen alttaş üzerinden sülfür buharı geçirilmiştir. Büyüyen MoS<sub>2</sub> filmin boyutu alttaşın boyutlarına bağlı iken MoS<sub>2</sub> filmin kalınlığı metalik molibden filmin kalınlığına bağlı olduğu tespit edilmiştir (Zhan vd., 2012). Elementel öncüllerin yanı sıra geçiş metal oksitleri de CVD sisteminde öncül olarak kullanılmıştır. Lee ve arkadaşları bu yöntemle az katmanlı MoS<sub>2</sub> sentezlemişlerdir. Çalışmada MoO<sub>3</sub>, sülfürizasyon ile MoS<sub>2</sub>’ye dönüştürülmüştür. Alttaşa yapılan ön işlemlerin de MoS<sub>2</sub> tabakasının büyümesini desteklediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte çalışmada alttaşların tamamen kaplanması sağlanamamıştır (Y.-H. Lee vd., 2012). Liu ve arkadaşları bu tekniği daha hassas kullanarak optimizasyon yapmaya çalışmışlardır. Üç ısıtma bölgesine dolayısı ile daha uzun sabit sıcaklık bölgesine sahip bir CVD fırını ile MoO<sub>3</sub> ve sülfür arasındaki mesafenin film oluşumuna etkisini incelemişlerdir. Sentezlenen MoS<sub>2</sub>’ler gaz ve kimyasal algılama uygulamalarında güçlü yetenekler göstermiştir (B. Liu vd., 2014). Najmei ve arkadaşları molibden öncülleri olarak MoO<sub>3</sub> nanoribbonları hidrotermal yöntemle sentezleyerek farklı bir bakış açısı getirmiştir. Çalışmada alttaş üzerindeki nanoribbon sayısını kontrol ederek MoS<sub>2</sub> tabaka sayısını kontrol etmeyi amaçlamışlardır (Najmaei vd., 2013). McCreary ve arkadaşları tek katman MoS<sub>2</sub>’yi grafen üzerinde büyütme başarılmıştır. Çalışmada molibden öncülü olarak MoCl<sub>5</sub> kullanılmıştır. MoCl<sub>5</sub>’in miktarı ayarlanarak 1, 2 veya 3 katmanlı MoS<sub>2</sub> büyümesi

gözlemlenmiştir (McCreary vd., 2014). Huang ve arkadaşları geniş alanlı tek katmanlı WSe<sub>2</sub> yapısını safir alttaş üzerine WO<sub>3</sub> ve selenyum öncüllerini kullanarak CVD yöntemiyle büyütme başarımlarını göstermişlerdir. Çalışmada CVD işleminde Ar ve H<sub>2</sub> gaz karışımları kullanılmış böylece selenyum ile WO<sub>3</sub> arasında gerçekleşecek reaksiyon desteklenmiştir. Ayrıca gaz karışımının kullanılması WO<sub>3</sub> ile selenyum arasında yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen reaksiyonun (~900 °C) nispeten düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesini sağlamıştır (J.-H. Lee vd., 2014). Tek katmanlı TMDC'lerin CVD ile büyütülmesi esnasında pek çok parametre etkilidir. Bununla birlikte elde edilen tek kristal TMDC pulları veya alanları grafen pulları veya alanları ile kıyaslandığında nispeten küçük kalmaktadır. Ancak son zamanlarda yapılan bazı başarılı çalışmalar CVD ile büyük alanlı tek kristal TMDC elde edildiğini göstermiştir. Tek kristal TMDC'leri büyütme için ana çözümler, daha büyük alanlar/taneler oluşturmak için çekirdeklenme yoğunluğunu azaltmak ve daha az alan sınırı olan alanlar oluşturmak için büyüme sürecini kontrol etmektir. Laskar ve arkadaşları CVD yöntemini kullanarak (0001) yönelimine sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alttaş üzerinde büyük alanlı tek katmanlı MoS<sub>2</sub> büyütme başarımlarını göstermişlerdir. Çalışma, molibden metali buharlaştırılmış yüzeyin CVD ortamında sülfürlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Sülfürizasyon zamanını kontrol ederek yüksek kalitede MoS<sub>2</sub> filmlerin oluştuğunu çeşitli tekniklerle analiz ederek göstermişlerdir (Laskar vd., 2013) Bununla birlikte kalın filmlerin oluşması MoS<sub>2</sub>'nin uygulanabilirliğini azaltmaktadır. Bunun için öncül olarak molibden yerine oksitli bileşiği olan MoO<sub>3</sub>'ün kullanılması, MoS<sub>2</sub>'nin daha kontrollü büyümesini sağlamaktadır. Wang ve arkadaşları MoO<sub>3</sub> ve sülfürü öncül olarak kullanarak tek katmanlı MoS<sub>2</sub> elde etmişlerdir. Bu durum MoO<sub>3</sub>'ün sülfür ile reaksiyona girerek MoS<sub>2</sub> yapısını oluşturduğunu göstermiştir. CVD biriktirme parametrelerini değiştirerek yüksek yönelimli tek, iki, üç ve dört katmanlı MoS<sub>2</sub> pulları elde edilebilmektedir (X. Wang vd., 2013). Zande ve arkadaşları CVD yöntemi ile 120 µm boyutlarında MoS<sub>2</sub> pulları büyütme başarımlarını göstermişlerdir. Çalışmada atmosfer basıncında N<sub>2</sub> gazı ve ultra temiz alttaşlar kullanılmıştır (van der Zande vd., 2013). Zhang ve arkadaşları yine benzer yöntemle safir alttaşlar üzerine WO<sub>3</sub> ve sülfür öncüllerini kullanarak WS<sub>2</sub> tek katmanını oluşturmuşlardır. Çalışmada 900 °C sıcaklık, düşük basınç ve ~60 dakika büyütme süresi kullanılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen WS<sub>2</sub> pullarının boyutları 50 µm olmuştur (Y. Zhang vd., 2013). Rong ve arkadaşları ise daha büyük boyutlu WS<sub>2</sub> pullarını elde etmeyi başarmışlardır. Sülfürizasyon zamanını kontrol ederek çıplak gözle görülebilecek kadar büyük (370 µm) boyutlarda WS<sub>2</sub> büyütmişlerdir. Bununla birlikte

alttaş üzerinde büyümeyi destekleyecek aromatik çekirdekler de kullanmışlardır (Rong vd., 2014). Liang ve arkadaşları tek katmanlı TMDC büyümelerini destekleyecek ve bunun için alttaş üzerinde çekirdeklenmeyi sağlayacak başlangıç malzemelerini çalışmışlardır (Ling vd., 2014).

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki CVD yönteminde, 2-boyutlu TMDC'ler mikro- veya nano-boyutta bağımsız veya kısmen/tamamen üst üste binmiş pullar şeklinde büyümektedir. Büyük ölçekli MoS<sub>2</sub> yapıları oluşturmak için özel alttaşlar ve özel ön/son işlemler gerekmektedir. TMDC'lerin oluşum yeri kontrol edilemeyen pullar formunda olmaları pratikte bazı problemleri beraberinde getirmektedir. Bu durum tek ve az katmanlı TMDC büyütme için PVD tekniklerinin kullanılabilirliğini ön plana çıkarmıştır. Homojen ve büyük ölçekli 2-boyutlu MoS<sub>2</sub> büyütme için PVD yöntemi ve atomik tabaka biriktirme (ALD) yöntemi (Browning vd., 2015; Lei Liu vd., 2017) kullanılmıştır. Darbeli lazer biriktirme (PLD) (Loh ve Chua, 2014; Serrao vd., 2015), termal buharlaştırma (Ma ve Shi, 2013; S. Wu vd., 2013) ve manyetik alan sıçratma (Hussain vd., 2016; Pacley vd., 2016) en sık kullanılan teknikler arasındadır. Manyetik alan sıçratma yöntemi tek aşamalı ve iki aşamalı olarak yapılabilmektedir. Tek aşamalı büyütmede, sıçratılmış MoS<sub>2</sub> molekülleri, alttaş üzerinde film oluşturmaktadır. İki aşamalı büyütmede, manyetik alan sıçratma sistemi ile alttaş üzerinde önce MoO<sub>3</sub> yapısının oluşması daha sonra da alttaşın sülfürlenmesi ile MoS<sub>2</sub> yapısının oluşumu sağlanmaktadır. Magnetron püskürtme, düşük maliyetli ve kolay kontrol ile büyük ölçekli ticari imalatta yaygın olarak kullanılmaktadır. Manyetik alan sıçratma sistemi ile büyütülen MoS<sub>2</sub> ve diğer TMDC'ler, alttaş yüzeyine paralel temel düzlemler boyunca katman katman büyümektedir. Katman sayısı üretim koşullarına göre 2-50 arası olabilmektedir (Moser ve Lévy, 1994). Bunun için moleküller kinetik kristallenme bariyerinden daha büyük enerjili olmalıdır. Bu büyüme mekanizması MoS<sub>2</sub>'nin düşük yüzey enerjisinin bir sonucudur (Spirko vd., 2003). Eğer toplam enerji minimize edildiğinde bir sistem en kararlı durumdaysa, (002) yönelimli TMDC gibi daha düşük bir yüzey enerjisine sahip bir malzeme ile bir yüzeyin katman katman kaplanması süreci kendiliğinden gelişir. Temel düzlem büyümesinden sonra diğer düzlemlerde büyümelere geçiş olur (Moser ve Lévy, 1992). Bu geçiş, temel düzlemlerin yanlış hizalanmasına (çoğunlukla film biriktirme sistemindeki ortamındaki su buharı, oksijen gibi bir kirleticinin adsorpsiyonu) ve aktif bir TMDC kristal kenarının maruz kalmasına bağlanır. Kristalin kenarındaki yüzey enerjisi, temel düzlemden önemli ölçüde daha yüksektir, bu nedenle atomik bağlanma için itici güç daha yüksek olduğundan bu

kenarlarda büyüme daha hızlı gerçekleşir, çünkü enerji açık kenarın sonlandırılmasıyla azalır (Moser ve Lévy, 1993; Spalvins, 1980). İnert (002) temel düzlem yüzeylerinde adsorpsiyonu arttırmak için, gelen iyonlar öncelikle nokta kusurları (iyonik boşluklar) oluşturmak için kullanılabilir (Muratore ve Voevodin, 2009). Düşük sıcaklıklarda, bu karışık büyüme bölgesi genellikle amorf bir matris içine gömülmüş (100) yönlendirilmiş kristallerin bir karışımıdır. Daha yüksek sıcaklıklarda (>200 °C), 2–20 nm'den daha kalın biriktirilmiş TMDC filmler genellikle (002) ve (100) yönelimlerin bir karışımı ile trigonal prizmatik (2H) altıgen fazda kristallenir ve bir polikristal meydana getirir. Biriktirilen filmlerin kristal etki alanı büyüklüğü 10 ile 10000 nm arasında değişebilir. Sıçratma sistemi ile büyütülmüş TMDC film yapısının, vakum sistemindeki taban basıncı ile olan ilişkisi 1980'lerde Buck ve arkadaşları tarafından gözlemlenmiştir; ortamda bulunan su buharının çekirdeklenmeyi ve büyümeyi etkilediği belirlenmiştir (Buck, 1986). Substratın sıcaklığı, filmde bulunan kristalin yönelimi ve stokiometrisi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bir MoS<sub>2</sub> veya başka bir bileşik hedeften malzeme akışı hedef malzemenin bileşimi ile aynı olsa da, film üzerine biriken atomların oranları, hedef stokiometreden sapabilir. Bu durum, kalkojenlerin buhar basıncının metallerekinden üç mertebe büyük olmasından dolayı TMDC'ler için de geçerlidir. Yüksek sıcaklıklar kullanıldığında, filmlerin stokiometrisi, azaltılmış kalkojen içeriği ile hedeften daha fazla sapma gösterir. 2H yapısı geniş bir metal/kalkojen oranları aralığında tutulabilirken malzemenin özellikleri tüm uygulamaları için kalkojen boşluk konsantrasyonlarına duyarlıdır (Hong vd., 2015). Araştırmacılar, sıçratma sırasında H<sub>2</sub>S gazı gibi ilave bir kaynak ekleyerek kalkojen atomlarının hedeften kaybını telafi etmişlerdir (J. Tao vd., 2015). H<sub>2</sub>S gazı plazmada hidrojen ve sülfüre ayrılır. Hidrojen, büyüyen filme ilave sülfür entegrasyonunu teşvik ederek dışarı pompalanır. Film oluşumunda alıtış bileşimi de önemlidir. Kristallenmiş TMDC'lerin büyümesini, oksitlenmiş yüzeyler ile nikel gibi metal yüzeyler de kolaylaştırmaktadır. Bunun, yüzeyde düşük erime noktalı ötektik fazın oluşmasından sonraki buhar-sıvı-katı tip büyüme mekanizmalarına bağlı olduğu bildirilmiştir (Wei vd., 2007). Sıçratma yöntemiyle MoS<sub>2</sub> büyütmeyle yönelik ilk çalışma Muratore ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Çalışmada, büyüyen film yüzeyinde meydana gelen iyon enerjisi dağılımlarını ölçerek ve manyetik alan kuvvetini ve yönünü ayarlayarak hasarı önlemek için enerjik parçacıkları, büyüyen filmden uzaklaştırmak için yardımcı bir manyetik alan kullanmışlardır (Muratore vd., 2014). Bununla birlikte, manyetik alan sıçratma yöntemi kullanılarak 2-boyutlu MoS<sub>2</sub> ince film büyütmeyle ilişkin araştırmalar

yetersizdir (J. Tao vd., 2015). Doğrudan MoS<sub>2</sub> hedefinden büyütülen 2–5 katmanlı MoS<sub>2</sub> ince filmlerde farklı magnetron güçleri (Zhong vd., 2018) ve farklı alttaş sıcaklıkları (Huang vd., 2016) kullanılmıştır. MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin çekirdeklenmesi için en uygun sıcaklığın 400 °C olduğu belirlenmiş ve bu sıcaklıkta PL yoğunluklarında artışın olduğu gözlemlenmiştir. Büyüme işleminden sonra, tekrar sülfürizasyon işleminin, MoS<sub>2</sub> ince filmlerde, yetersiz sülfür miktarından dolayı moly-oksi-sülfür yapılarının oluşmasına neden olan etkileri kaldırarak film kalitesini artırdığı tespit edilmiştir (Matsuura vd., 2018).



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

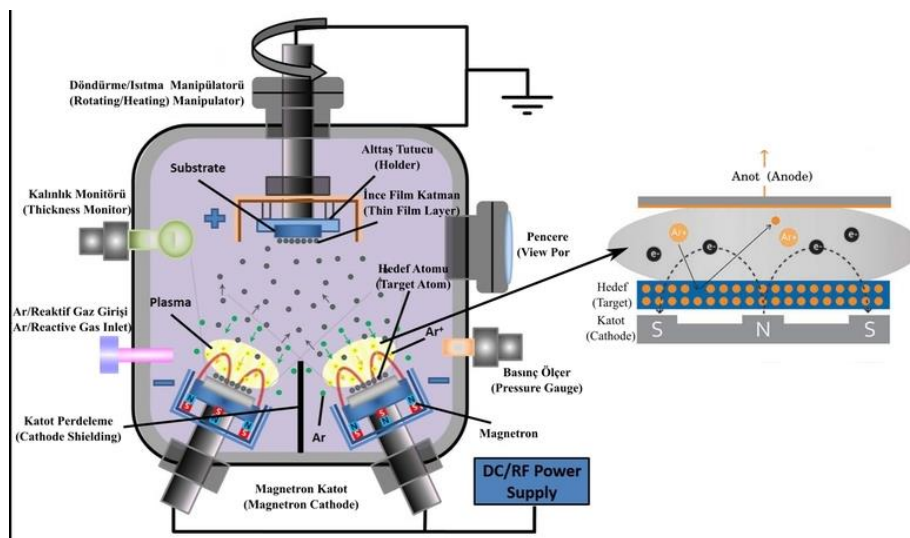
Tez çalışması iki kısımdan meydana gelmektedir. İlk kısımda MoS<sub>2</sub> filmlerin alttaş üzerine büyütülmesi yapılmıştır. İkinci kısımda ise MoS<sub>2</sub> filmlerin analizi yapılmıştır.

#### 3.1. İnce Film Büyütme Yöntemleri

İnce filmler buhar, sıvı ve gaz fazda büyütme olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar içinde en çok kullanılanları buhar fazda büyütmedir. Bu kısım da kendi içinde fiziksel (PVD veya Physical Vapor Deposition) ve kimyasal (CVD veya Chemical Vapor Deposition) buhar biriktirme olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. PVD büyütme de kendi içinde buharlaştırma (evaporation) ve sıçratma (sputtering) olarak iki kısma ayrılmaktadır. Buharlaştırma işleminde vakum ortamında kaplanacak malzeme erime sıcaklığının üzerine farklı tekniklerle çıkarılır ve malzemenin buharlaşarak alttaş üzerine kaplanması sağlanır. Sıçratma işleminde ise kaplanacak malzeme (hedef) üzerinde plazma oluşması sağlanır ve hedef malzemedan kopan atomlar istenilen alttaş üzerine gönderilir. Böylece atom atom kaplama yapılarak ince film büyütülür. CVD işleminde ise büyütülmesi istenen filmdeki malzeme veya malzemelere ait gazlar, uygun sıcaklıkta bir yüzey üzerinden geçirilmektedir.

PVD yöntemleri içinde sıçratma işlemleri de farklı tekniklerle yapılabilmektedir. Bunlar içinden manyetik alanda sıçratma işlemi en çok kullanılan yöntemlerdendir. Bu yöntemde hedef malzemesi (kaplanacak malzeme) ve alttaş uygun konumlarda aralarında belirli bir mesafe olacak şekilde bir vakum kazanı içine yerleştirilir. Hedef malzeme mıknatıslık özelliğine sahip magnetron denilen kısma yerleştirilir. Vakum alındıktan sonra ortama Ar (Argon) gazı gönderilir. Ar gazı bu sistem için plazma gazıdır. Argon seçilmesinin iki nedeni vardır. Bunlardan ilki argon gazının bir soy gaz olması ve ortamdaki atom veya moleküllerle reaksiyona girme isteğinin olmaması, ikincisi ise Ar atomlarının büyük olup çarptığı yüzeydeki atom veya atomları kazıyabilmesidir. Ortama verilen Ar gazındaki atomların çok küçük bir kısmı birbirleri ile çarpıştıkları zaman elektron kaybederek elektron (e-) ve Ar<sup>+</sup> iyonu meydana getirir. Bu negatif ve pozitif yüklü parçacıklar magnetronun manyetik alanına kapılırlar ve hedef malzemeye doğru ilerlemeye başlarlar. Bu esnada önlerine gelen diğer Ar atomlarına çarparak onların iyonlaşmalarına neden olurlar. Bu şekilde manyetik alan içinde e ve Ar<sup>+</sup> iyonlarından meydana gelen bir plazma oluşur. Burada negatif yüklü

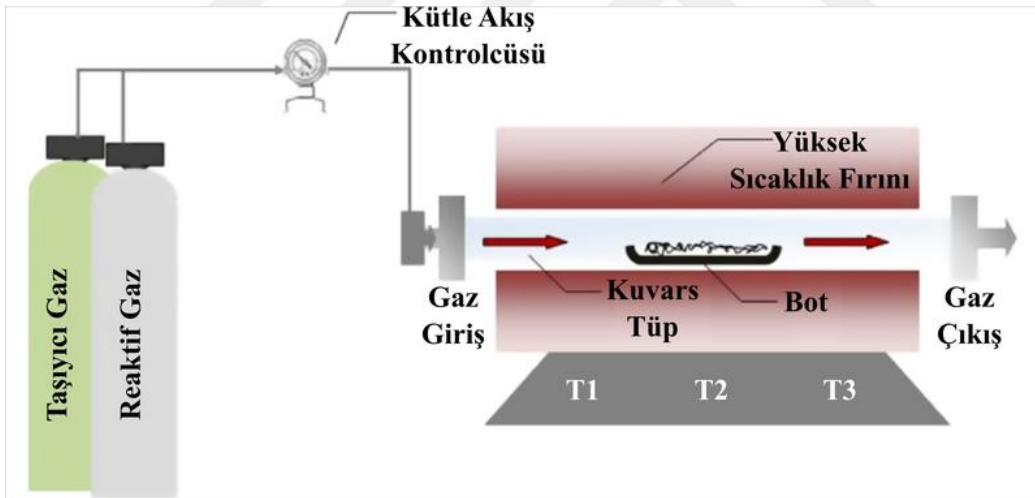
e'lar magnetrona yaklaşmazken pozitif yüklü  $Ar^+$  iyonları manyetik alanın etkisi ile hedef yüzeyine hızlı bir şekilde çarparlar. Çarpmanın etkisi ile hedef malzemenin yüzeyinden kopan atomlar pozitif yüklü olan ve alttaşın tutturulduğu yüzeye doğru giderler ve alttaş yüzeyine tutunurlar. Bu şekilde atomlar üst üste yerleşerek ince bir film oluştururlar. Bu tür kaplamada kalitesi ve yapısı mükemmel olan homojen filmler elde edilebilmektedir. Bu kaplama yönteminde vakum kazanı içerisinde Ar yanında reaktif gaz olarak  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$  gibi gazlar da verilebilmektedir. Böylece kopan atomların alttaş yüzeyine tutunmadan önce reaktif gazlarla reaksiyona girerek bileşik oluşturması ve oluşan bileşiğin alttaşa tutunması sağlanmaktadır. Reaktif kaplama ile oksit, nitrit gibi yapılar elde edilebilmektedir. Manyetik alan sıçratma yönteminde güç kaynağı olarak RF (Radio Frequency) ya da DC (Direct Current) kullanılabilir. DC ile yapılması planlanan kaplamalarda hedef malzemenin iletkenliğinin olması gerekmektedir. RF ile yapılması planlanan kaplamalarda ise iletken, yarı iletken veya dielektrik malzemelerin kaplaması yapılabilmektedir. Dielektrik malzemelerde hedef malzeme yüzeyinde şarj (yük birikimi) olduğundan dolayı bu yükün giderilmesi için uygulanan gücün atımlı olması gerekmektedir. Bundan dolayı dielektrik malzemeler sadece RF güç kaynağı kullanılarak kaplanabilirken iletken ve yarıiletken malzemeler hem DC hem de RF güç kaynağı kullanılarak kaplanabilmektedir. RF güç kaynağı frekansı olarak manyetik alan sıçratma sistemlerinde yaygın olarak 13.86 MHz frekansı kullanılmaktadır. Manyetik alan sıçratma sistemine ve oluşan plazmaya ilişkin şematik gösterim Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.1.** Manyetik alan sıçratma sistemi ve magnetron üzerinde oluşan plazmaya ilişkin şematik gösterim.

Buhar fazda büyütme yöntemlerinden biri olan CVD yönteminde ise büyütülecek filmin öncüllerini içeren gaz veya gazlar bir kütle akış kontrolcüsünden geçirilerek uygun stokiometriye CVD sistemine gönderilir. Sistem genel olarak bir CVD fırını, bir kütle akış kontrolcüsü olmak üzere iki kısımdan meydana gelirse de sistem içinde akan gazın tahliye edilmesini sağlayan vakum veya pompa sistemleri de kullanılmaktadır. Sistem içine yerleştirilen alttaş, öncüllerin aralarında reaksiyona gireceği ve/veya alttaş ile reaksiyona gireceği sıcaklığa kadar ısıtılır. CVD kazanı içine gönderilen reaktif gaz veya gazlar ile birlikte pasivasyonu sağlayan, taşıyıcı veya inert ortam meydana getiren gazlar da sisteme verilebilir. Sistem içine giren reaktif gazlar alttaşın bulunduğu ortamda kendi aralarında ve alttaş ile etkileşerek istenilen filmi meydana getirir. Fazlalık gazlar veya reaksiyon sonucu açığa çıkan gazlar sistemden bir vakum pompası yardımıyla tahliye edilir. Farklı özelliklere ve donanıma sahip CVD sistemleri olsa da yüksek sıcaklık ihtiyacı, tehlikeli olabilecek gazların kullanımından dolayı bir takım kısıtlılıkları beraberinde getirmektedir.

Tipik bir CVD sistemine ilişkin görsel Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kimyasal buhar biriktirme sistemine ilişkin şematik gösterim.

Tez çalışmasında  $\text{MoS}_2$  film üretmek için ilk olarak alttaşlar manyetik alan sıçratma sistemine yerleştirilmiştir. Reaktif sıçratma ile Mo-O ince film yapısı oluşturulmuş ve bu ince filmler CVD ortamına aktarılarak sülfürizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde  $\text{MoS}_2$  ince filmler alttaş üzerinde büyütülerek incelenmiştir.

## 3.2. MoS<sub>2</sub> İnce Filmlerin Büyütülmesi

### 3.2.1. Alttaş temizliği

MoS<sub>2</sub> ince filmler için alttaş olarak kuvars ve Si plaka (wafer) kullanılmıştır.

İlk olarak, kuvars alttaş, sabun ve su ile temizlenmiştir. Daha sonra aseton içine konulmuş ve 10 dakika boyunca ultrasonik temizleyicide bekletilmiştir. Bu şekilde yüzeyde olması muhtemel organik kirliliklerden arındırılmıştır. Daha sonra izopropil (IPA) alkol banyosuna konulan kuvars alttaş yine ultrasonik temizleyicide 10 dakika boyunca bekletilmiştir. IPA içinden çıkarılan kuvars alttaş deiyonize (DI) su ile 3 dakika boyunca durulanmış ve yüksek saflıkta nitrojen (N<sub>2</sub>) gazı ile kurutulmuştur.

Si plaka için izlenen temizleme süreci kuvars alttaş temizleme işleminden farklı yapılmıştır. 3-10 Ω.cm özdirence sahip p-tipi 525 µm kalınlığında (100) yönelimli Si plaka, 5 dakika boyunca 75 °C'de DI su ile seyreltilmiş NH<sub>4</sub>OH-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çözeltisi içinde bekletildikten sonra 3 dakika boyunca DI su ile durulanmıştır. Plastik bir cımbız yardımıyla 5 saniye boyunca %5'lik HF çözeltisine daldırılıp çıkartılmıştır. Tekrar DI su ile durulanan Si plaka N<sub>2</sub> ile kurutulmuştur.

Kuvars ve Si plaka için temizleme işlemleri eş zamanlı yapılarak aynı zamanda temizleme işlemleri bitirilmiştir. Hem kuvars hem de Si plaka, temizleme işleminden sonra hemen manyetik alan sıçratma sistemine ait örnek tutucuya yerleştirilmiştir.

### 3.2.2. Mo-O ince filmlerin oluşturulması

4" çaplı örnek tutucu tamamen bilgisayar kontrollü olan VAKSİS MİDAS/PVD 3M1T manyetik alan sıçratma sistemi içine yerleştirildikten sonra vakum alınmaya başlanmıştır. Mo-O ince filmi büyütmek için metalik molibden hedef malzemesi kullanılmıştır. %99.99 saflıkta 3" çaplı ve 0.25" kalınlıklı hedef RF güç kaynağına bağlı magnetron üzerine yerleştirilmiştir. Vakum seviyesi 3x10<sup>-7</sup> Torr'a ulaştığında, sistem içine 50 sccm (standard cubic centimeter per minute) oranında Ar akışı başlatılmıştır ve kazan basıncının 1x10<sup>-2</sup> Torr seviyesine çıkması beklenmiş ve RF alttaş plazma aktif edilmiştir. Böylece alttaşların yüzeyi oda sıcaklığında 100 W güç değerinde 10 dakika boyunca Ar plazma ile temizlenmiştir. Plazma temizliği gerçekleştirildikten sonra Ar akışı kesilmiş ve sistemin tekrar düşük vakum değerine inmesi beklenmiştir. Daha sonra alttaş tutucu 100/30 °C/dakika oranı ile 400 °C'ye kadar ısıtılmıştır. 400 °C sıcaklık değerinde 30 dakika beklendikten sonra vakum kazanı içine 50 sccm değerinde Ar gazı akışı başlatılmıştır. Basınç 5x10<sup>-2</sup> Torr seviyesine geldiğinde molibden hedef

malzemesinin takılı olduğu magnetrona güç verilerek plazma oluşturulmuştur. Verilen güç kademeli olarak artırılarak  $5 \text{ W/cm}^2$  değerine çıkartılmıştır. Bu esnada kazan basıncı,  $5 \times 10^{-3}$  Torr seviyesine düşürülmüş ve bu seviyede sabit kalması sağlanmıştır. Daha sonra vakum kazanı içine 12.5 sccm  $\text{O}_2$  gaz akışı başlatılmış ve Ar gaz akışı 37.5 sccm değerine düşürülmüştür. Böylece  $\text{O}_2/(\text{Ar} + \text{O}_2)$  oranının 1/4 olması sağlanmıştır. Plazmanın ve basıncın sabitlenmesi ve molibden üzerindeki kirliliklerin kalkması için büyütme önce 5 dakika beklenmiştir. Büyütme başlamadan önce örnek tutucu 20 devir/dakika süratle döndürülmeye başlanmıştır. Magnetron önündeki kapatma perdesi açıldıktan hemen sonra kronometrenin çalıştırılması ile beraber örnek tutucu önündeki kapatma perdesi de açılmıştır. Mo-O ince filmlerinin büyütme işlemleri 30, 60, 120, 180 ve 240 saniye boyunca gerçekleştirilmiştir.

Bu sürelerden dolayı örnek isimlendirmeleri de 30 saniye, 60 saniye, 120 saniye, 180 saniye ve 240 saniye olarak yapılmıştır.

Büyütme süresinin bitmesinin ardından ilk olarak örnek tutucu önündeki kapatma perdesi daha sonra da magnetron önündeki kapatma perdesi kapatılmış ve  $\text{O}_2$  akışı kesilmiştir. Ar akışı yeniden 50 sccm'e getirilerek vakum kazanının basıncının sabit kalması sağlanmıştır. Magnetrondaki güç kademeli azaltılarak sonlandırılmıştır. Ar akışı da kesildikten sonra örnek tutucunun sıcaklığı oda sıcaklığına ayarlanmış ve kendi halinde soğuması sağlanmıştır. Örnek tutucu oda sıcaklığına ulaştığında vakum alma işlemi sonlandırılmış ve sistem vakumu  $\text{N}_2$  gazı ile kırılmıştır. Tez çalışmalarının gerçekleştirildiği manyetik alan sıçratma sistemine ilişkin görsel Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Örnek tutucu üzerindeki alttaşlar ivedilikle CVD sistemine ait yatay kuvars tüp içindeki alümina bot üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.3. VAKSİS MİDAS/PVD 3M1T manyetik alan sıçratma sistemi.

### 3.2.3. Mo-O ince filmlerin sülfürizasyonu

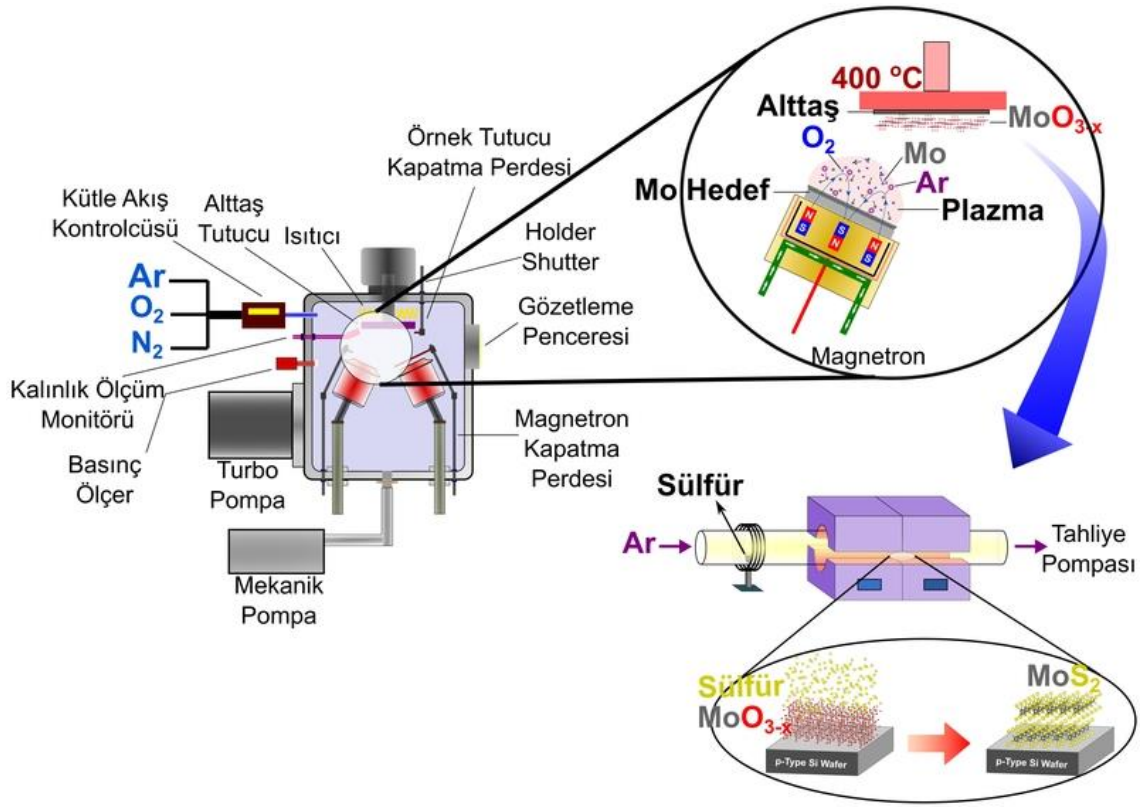
Sülfürizasyon işleminin gerçekleştirildiği CVD sistemi MTI-OTF 1200'dür. 3" çapa ve 180 cm uzunluğa sahip kuvars tüpü, iki ısıtma bölgesi olan fırın içinden geçmektedir. Altaşlar ısıtma bölgelerinin ortasına yerleştirilmiştir. Kuvars tüp içinde Ar gazının tüpe gireceği bölgeye yakın ısıtma bölgesi dışındaki ayrı bir ısıtma kuşağı bölgesi içine alümina pota ve pota içine içinde 0.5 gram toz sülfür yerleştirilmiştir. Altaşlar ve sülfür yerleştirildikten sonra kuvars tüp izole edilmiş ve mekanik pompa ile vakumu alınmıştır.  $1 \times 10^{-2}$  Torr basınca ulaşıldıktan sonra 100 sccm oranında %99.99

saflıkta Ar gazı akışı başlatılmıştır. Bu akış tüm tüm sülfürizasyon işlemi boyunca sabit tutulmuştur. Alttaşların olduğu bölgenin sıcaklığı 650 °C'ye ayarlanmış ve fırın çalıştırılmıştır. Alttaşlar 650 °C sıcaklığa ulaştığında ısıtma kuşağı çalıştırılmış ve 22 dakikada sülfür bulunan bölgeyi 115 °C'ye çıkarması sağlanmıştır. Eriyen ve buhar fazına geçen sülfür bitinceye kadar beklenmiş ve ısıtma kuşağı ile fırın kapatılarak soğumaya bırakılmıştır. Alttaşlar oda sıcaklığına ulaştığında kuvars oda Ar gazı ile doldurularak atmosfer basıncına getirilmiştir. Alümina bot üzerindeki alttaşlar hassas bir şekilde alınarak analiz aşamasına geçilmiştir. Mo-O filmlerin sülfürlendiği CVD sistemi Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. MTI-OTF 1200 düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme sistemi.

Manyetik alan sıçratma ve kimyasal buhar biriktirme sistemleri ard arda kullanılarak iki basamaklı bir MoS<sub>2</sub> büyümesi gerçekleştirilmiştir. MoS<sub>2</sub> büyümesine ilişkin adımların şematik gösterimi Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5. MoS<sub>2</sub> ince filmlerin büyütülme sürecinin şematik gösterimi.

### 3.3. MoS<sub>2</sub> İnce Filmlerin Analizleri

#### 3.3.1. Yapısal Analizler

Kristal yapıda periyodik düzlemlerden yansıyan X-ışınları ile kristal yapı hakkında detaylı bilgi elde etmek mümkündür. Bu teknikle kristal yapıdaki fazlar belirlenebilmektedir. MoS<sub>2</sub> üretimine başlanmadan önce Mo-O filmlerin yapısı hakkında bilgi edinmek amacıyla X-ışınları kırınımı yöntemi kullanılmıştır. Bunun için sülfürizasyonu yapılacak Mo-O filmlerin büyüme şartlarında Soda Lime Glass (SLG) üzerinde büyütülmüş kalın filmler (~300 nm), 10–90° aralığında ve 0.01° adımlarla CuK $\alpha$  = 0.1541874 nm dalga boylu X-ışınına maruz bırakılmıştır. İnce film yüzeyine gelen X-ışını ile yüzey arasındaki açı ( $w$ ), 1° olarak sabitlenmiştir. Böylece süflürlenen Mo-O ince filmin yapısı hakkında bilgi edinilmiştir.

Üretilen örneklerin yüzey homojenliği hakkında genel bilgi edinmek amacıyla optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Leica marka optik mikroskobun 100X objektifinden elde edilen görüntüler bir CCD kamera ile kayıt edilerek dijital ortama aktarılmıştır.

Moleküllerin şiddetli bir monokromatik ışık ile uyarılması sonucunda saçılan ışık, moleküller hakkında ayrıntılı bilgiler sunmaktadır. Işık saçılması esnasında saçılan ışığın oldukça büyük bir kısmı gönderilen ışığın enerjisine sahip olur. Bu elastik saçılma olayı Rayleigh Saçılması olarak bilinir. Saçılan ışığın çok küçük bir kısmı ise (1/10000 veya 1/100000 oranlarında) elastik olmayan saçılmalardan gelir. Bu elastik olmayan saçılmalar Raman Saçılması olarak bilinir. Raman spektroskopisinde saçılan ışınlar belirli bir açı altında incelenir ve Rayleigh Saçılmaları elimine edilir. Geriye kalan ve elastik olmayan saçılmalardan kaynaklanan ışınlar dedekte edilir. Bu ışınların enerjisi, ışık ile etkileşime giren moleküllerin titreşim enerjilerine bağlı olarak farklılıklar gösterebilir. Yani molekülün titreşim enerji düzeyleri tespit hakkında bilgi edinilebilir. Raman spektroskopisinde molekül ile etkileşen ışığın dalga boyuna göre saçılan ışığın dalga boyunda oluşan farklar ölçülür. MoS<sub>2</sub> yapılarının incelenmesinde Raman spektroskopisi oldukça önemli ve değerli bilgiler verir. MoS<sub>2</sub> ince filmlerdeki atomlar arası bağlar hakkında ve moleküler titreşim düzeyleri hakkında bilgi edinebilmek için kuvars üzerinde büyütülen MoS<sub>2</sub> ince filmler Renishaw inVia Confocal Raman Spektrometresinde, 532 nm dalgaboylu lazer kullanılarak 3 mW gücü ile uyarılmıştır. Ölçümler 10 saniye uyarım süresi ve 10 tekrar ile alınmıştır. Ölçüm sonucunda ince filmlerden gelen Raman sinyalleri 300 – 500 cm<sup>-1</sup> dalga sayısı aralığında incelenmiştir. MoS<sub>2</sub> filmlerde MoS<sub>2</sub> dağılımını ve homojenliği tespit etmek amacıyla Raman haritalama kullanmak sıklıkla başvurulan bir yöntemdir. Bunun için aynı Raman spektrometresi kullanılarak 200x150 veri noktalı (toplam 30000 veri noktası) 40x30 µm<sup>2</sup> alan, 532 nm lazer, 3 mW lazer gücü ve 1 saniyelik uyarım süresi ile taranmıştır.

MoS<sub>2</sub> ince filmlerin yüzey topolojileri hakkında bilgi edinebilmek için Si plaka üzerinde büyütülen ince filmlerin 1x1 µm<sup>2</sup> alanları Park System marka ve XE6 model atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile incelenmiştir. Atomik kuvvet mikroskobu esnek bir manivela buna bağlı bir sivri uçtan (tip) meydana gelir. Sivri uç örnek yüzeyine yaklaştırılır. Bu esnada sivri uç ile örnek yüzeyi arasındaki elektrostatik etkileşimden dolayı belirli bir mesafe ve yüzeyde bir çizgi hattında sabitlenir. Sivri uç bir çıkıntı veya çukur ile karşılaşırsa elektrostatik etkileşim sivri uç ile yüzey arasındaki mesafenin sabit kalmasını sağlayacak şekilde yukarı veya aşağı hareket eder. Gezici sivri ucun hareketleri bir lazer yardımıyla algılanarak görüntüye çevrilir. Bu şekilde belirlenen bir yüzey satır satır taranarak yüzey topografisi elde edilir. Bu mikroskobun hassasiyeti nm mertebesinin altında olabilmektedir. Elde edilen görüntülerden hareketle AMF yazılımı kullanılarak tanecik boyutu analizi de yapılmıştır.

Taramalı elektron mikroskopunda yüksek gerilim altında hızlandırılan elektronlar malzeme yüzeyine odaklanır ve taratılır. Malzeme atomları ile elektron demeti arasında meydana gelen çeşitli etkileşimler uygun algılayıcılar ile toplanır ve dijital sinyaller çevrilerek ekrana verilir. Bu şekilde optik mikroskoplarının ayırma gücünün çok üstündeki çözünürlüklerde malzeme yüzeyi incelenebilmektedir. Si plaka üzerine büyütülen ince filmler TESCAN marka ve MAIA3 XMU modeli FE-SEM (Field Effect – Scanning Electron Microscope) cihazına konularak 50000 ve 150000 büyütme altlarında incelenmiştir.

### 3.3.2. Optik Analizler

2-boyutlu yapılar için oldukça önemli olan fotoluminesans spektroskopisi Renishaw inVia Confocal Raman Spektrometresinde alınmıştır. Kuvars alttaş üzerindeki MoS<sub>2</sub> filmler 3 mW lazer gücü ile 10 saniye boyunca uyarılmıştır. Daha sonra 590–770 nm arasında, filmlerdeki fotoluminesans etki dedektörle tespit edilmiştir. Bu ölçüm 10 kez tekrar edilip verilerin biriktirilmesi ile PL spektrumu elde edilmiştir. PL spektrumuna ilişkin veriler önce yumuşatma işleminden geçirilmiştir. PeakFit Editor yardımı ile ters evrişim (deconvolution) yapılarak PL spektrumunu meydana getiren piklere ayrıştırılmıştır.

İnce filmlerin UV-Vis karakterizasyonları SHIMADZU marka ve UV – 1800 modeli UV (Ultra Violet) Spektrometresinde yapılmıştır. 250 – 1000 nm dalga boyu aralığında, kuvars üzerinde büyütülmüş MoS<sub>2</sub> ince filmlerin soğurma (absorption) ve geçirme (transmittance) spektrumları alınmıştır. UV spektrumları ince filmlerin optik davranışları hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Bu bilgilerden hareketle MoS<sub>2</sub> ince filmlerin yasak bant aralıkları hesaplanabilmektedir. Bir yarıiletkende gönderilen ışının enerjisinin soğurma katsayısına etkisi ölçülerek yasak bant aralığı hesaplanabilmektedir. Gönderilen ışının sahip olduğu enerji malzemenin yasak bant aralığı enerjisinden büyükse ışın soğrulur küçük ise soğrulmadan geçer. t kalınlığındaki bir filme gönderilen ışığın şiddeti  $I_0$  ve dalga boyu  $\lambda$  olarak tanımlanırsa, geçen ışığın şiddeti gelen fotonun dalga boyuna ve filmin kalınlığına bağlı olarak değişir.

$$I_t = I_0.e^{-\alpha t} \quad (\text{Denklem 3.1})$$

Bu denklemden  $\alpha$  soğurma katsayısı olarak isimlendirilir ve  $\alpha$  soğurma katsayısı Denklem 3.2 ile elde edilir.

$$\alpha = (1/t).ln(I_0/I) \quad (\text{Denklem 3.2})$$

Denklem 3.2 ve UV-Vis ölçümlerinden faydalanarak  $\alpha$  soğurma katsayısı

$$\alpha = (1/t) \cdot \ln(100/T) \quad (\text{Denklem 3.3})$$

denklemleri ile hesaplanır. Bu denklemlerde t film kalınlığı, T geçen ışığın geçirgenlik yüzdesidir. Soğurma bölgesinde yasak enerji bant aralığı Tauc denklemleri denilen denklemlerle hesaplanmaktadır

$$(ah\nu) = A(h\nu - E_g)^\gamma \quad (\text{Denklem 3.4})$$

Bu denklemlerde A,  $10^{-7}$  ve  $10^{-8} \text{ m}^{-1}$  arasında değişen enerjiden bağımsız bir sabit,  $h\nu$  foton enerjisi,  $E_g$  yasak bant boşluğu ve  $\gamma$  bir sabittir. İzinli direkt geçişler için  $\gamma = 1/2$ , yasak direkt geçişler için  $\gamma = 3/2$  ve indirekt geçişler için ise  $\gamma = 2$ 'dir.  $(ah\nu)^2 - h\nu$  grafiğinde oluşan eğrinin üst kısmından  $h\nu$  eksenine çizilen doğrunun eksenini kestiği nokta  $E_g$  yasak bant boşluğu olarak alınmaktadır (Tauc vd., 1966).



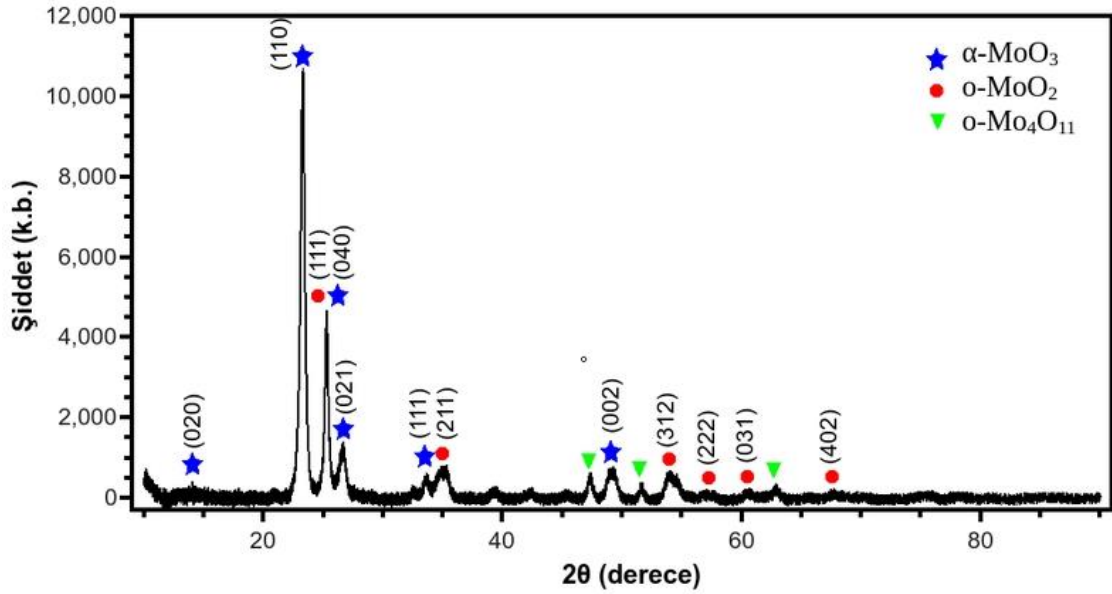
## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez çalışmasında, iki aşamalı bir yaklaşımla büyük ölçekli ve homojen MoS<sub>2</sub> filmlerin büyütülmesi ve yapılarının araştırılması hedeflenmiştir. Geleneksel CVD yöntemi tek katmanlı MoS<sub>2</sub> büyütme konusunda daha başarılı olsa da tek katmanlı MoS<sub>2</sub>'nin doğası gereği üçgen şekillerde büyümeler gerçekleştirmektedir. Mikron boyutlu bu yapılar, üst üste gelebildiği gibi birbirinden bağımsız yapılar halinde de bulunabilmektedir. Bu amaçla manyetik alan sıçratma yöntemi ile Mo-O ince filmlerin oluşumu sağlanmış ardından sülfürizasyon işlemi ile Mo-O ince filmlerin MoS<sub>2</sub> ince filmlere dönüşmesi sağlanmıştır. Temelde manyetik alan sıçratma işleminde üç farklı seçenek ile MoS<sub>2</sub> yapısı elde büyütülebilmektedir. Bunlardan ilki metalik molibden ince filminin büyütülmesi ve sülfürlenmesi, ikincisi direkt MoS<sub>2</sub> hedeften MoS<sub>2</sub> film büyütülmesi ve üçüncüsü MoO<sub>3</sub> ince filmin büyütülmesi ve sülfürlenmesi. Bu seçenekler içinden katman kalınlığının en hassas şekilde kontrol edilebildiği seçenek üçüncüsüdür. Tez çalışması farklı Mo-O büyütme süresi ile oluşan MoS<sub>2</sub> yapıları arasındaki ilişkiyi açıklamak üzere kurgulanmıştır. Bu amaçla 400 °C sıcaklıkta Mo-O ince filmler 30, 60, 120, 180 ve 240 saniye olmak üzere 5 farklı zamanda büyütülmüştür. Mo-O ince filmler, aynı şartlarda sülfürlenmiş ve elde edilen MoS<sub>2</sub> yapılarının detaylı analizi yapılmıştır.

### 4.1. Mo-O İnce Filmlerin Yapısal Analizi

Şekil 4.1, 400 °C altaş sıcaklığında O<sub>2</sub>/(Ar+O<sub>2</sub>) oranının 1/4 olduğu ortamda 5x10<sup>-3</sup> Torr basınçta büyüyen Mo-O sistemine ait X-ışınları kırınımı desenini göstermektedir. XRD desenlerinden, filmin kristal bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. 350 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, α-MoO<sub>3</sub> fazı (JPCDS 5-508) rapor edilmiştir (Epifani vd., 2004). Bu faz, Pnma uzay grubuna sahip ortorombik bir yapıdır; birim hücre parametreleri a = 13.825 Å, b = 3.694 Å ve c = 3.954 Å'dur; eksenler arasındaki açılar α = β = γ = 90°'dir. Birim hücre, biri molibden diğer üçü oksijen olmak üzere 4 atomdan meydana gelmektedir. Bu faza ait pikler XRD deseninde mavi yıldızlar ile gösterilmiştir. Bununla birlikte, 400 °C'de, α-MoO<sub>3</sub> fazının yanı sıra, MoO<sub>2</sub> fazının da varlığı tespit edilmiştir. Bu faz ait pikler kırmızı yuvarlaklar ile gösterilmiştir. MoO<sub>2</sub> fazı (JPCDS 32-0671), Pnma uzay grubunda olup a = 9.6921 Å, b = 8.4322 Å ve c = 4.7188 Å birim hücre parametreleri ile ortorombik bir yapıya sahiptir; eksenler arasındaki açılar α = β = γ = 90°'dir (Sen ve Mitra, 2014). α-MoO<sub>3</sub> ve MoO<sub>2</sub> fazlarına

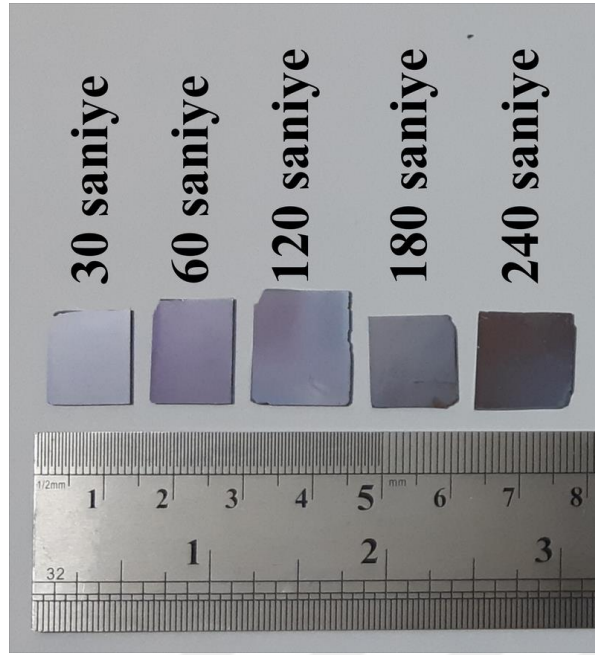
ait pikler dışındaki pikler, Mo-O sisteminin fazlarından biri olan  $\text{Mo}_4\text{O}_{11}$  fazına atfedilmiştir (Dang vd., 2014). Bu faza ait pikler XRD deseninde yeşil üçgenler ile gösterilmiştir. Molibden sahip olduğu yüksek koordinasyon sayısı ve oksijen duyarlılığından dolayı pek çok farklı stokiyometride oksit bileşik meydana getirebilmektedir. Bu oksit bileşiklerin pek çok Mo-O sisteminin alt-oksitleri (sub-oxide) olarak bilinir. XRD deseninde pek çok fazın gözlemlenmesinin altında yatan neden,  $\text{MoO}_3$  ince filmini oluşturmak için seçilen  $400\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığın Mo-O sistemi için bir faz dönüşüm sıcaklığı olmasıdır (L. Wang vd., 2016).



Şekil 4.1.  $400\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta büyüyen Mo-O ince filmlerin XRD deseni.

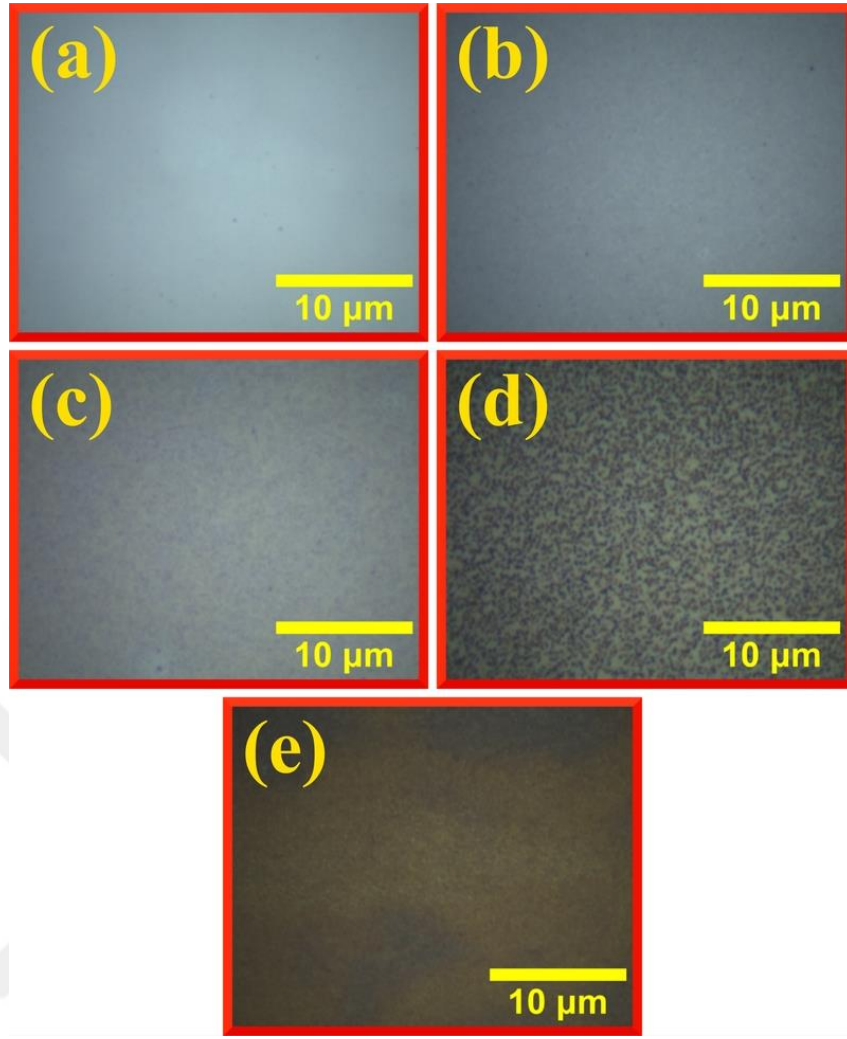
#### 4.2. $\text{MoS}_2$ İnce Filmlerin Yapısal Analizi

Yaklaşık  $2\text{--}3\text{ cm}^2$  alanlı Si plakalar üzerine büyütülmüş  $\text{MoS}_2$  filmlere ait fotoğraf Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Si plakalar üzerindeki renklenmelerin homojen olması film yayılımının büyük yüzey alanlarında homojen olduğu şeklinde yorumlanmıştır.



**Şekil 4.2.** Örneklerin gerçek boyuttaki görüntüleri.

MoS<sub>2</sub> örneklerinin 100X objektif ve CCD kamera kullanılarak elde edilen daha yüksek çözünürlüklü görüntüleri Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Si plaka üzerinde büyütülen MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin görüntülerinde 30 saniye örneğinde neredeyse homojen bir görüntü elde edilmiştir (Şekil 4.3 (a)). 60 saniye örneğinde (Şekil 4.3 (b)), yüzey üzerinde homojen dağılım gösteren farklı bir yapı olduğu tespit edilmiştir. 120 saniye örneğinde (Şekil 4.3 (c)), yüzeye homojen olarak dağılan bu yapılar gözlenmektedir. 180 saniye örneğinde (Şekil 4.3 (d)) koyu noktalar diğer örneklerden farklıdır. Noktalar daha koyu olup aralarındaki açık renkli boşluklar açıkça görülmektedir. 240 saniye örneği (Şekil 4.3 (e)), diğer 4 örnekten farklı olarak, geniş karanlık ve aydınlık alanlar sergilemektedir. Koyu renkli noktalar kaybolmuş yerini koyu ve açık renkli bölgeler almıştır. Örneklerin hiçbirinde mikron büyüklüğünde üçgen pullar gözlenmemiştir.

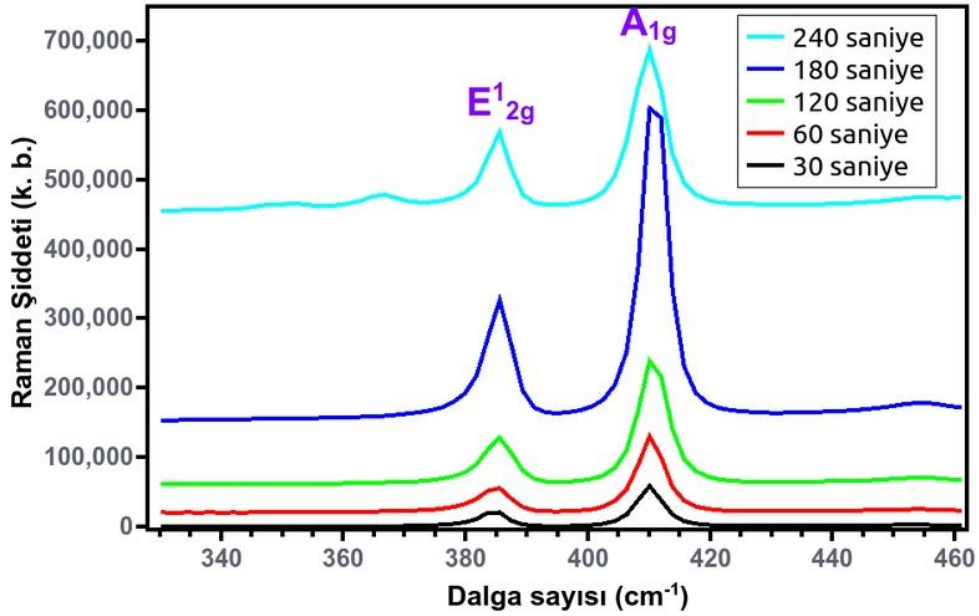


**Şekil 4.3.** Si plaka üzerinde büyütülen MoS<sub>2</sub> örneklerinin optik görüntüleri. (a), (b), (c), (d) ve (e) sırasıyla 30 saniye örneği, 60 saniye örneği, 120 saniye örneği, 180 saniye örneği ve 240 saniye örneğini göstermektedir.

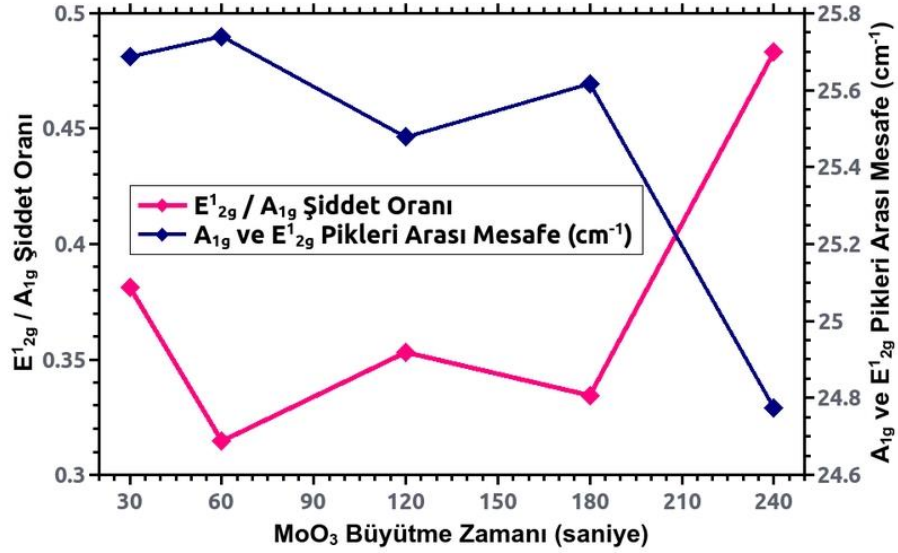
MoS<sub>2</sub> filmlerinin Raman spektrumları iki karakteristik pik gösterir. Mo–S atomları düzlem için yöneliminde ( $\sim 386 \text{ cm}^{-1}$ ) titreşirken S atomları düzlem yönelimine dik olarak ( $\sim 404 \text{ cm}^{-1}$ ) titreşir ve bu titreşimler sırasıyla E<sup>1</sup><sub>2g</sub> ve A<sup>1</sup><sub>g</sub> fonon titreşim modları ile ifade edilir (Shanmugam vd., 2012). E<sup>1</sup><sub>2g</sub> modunun, ara katman atomları olan molibden atomları arasındaki uzun menzilli Coulombic etkileşimi nedeniyle katman kalınlığındaki artıştan güçlü bir şekilde etkilendiği varsayılmaktadır. Ancak, A<sup>1</sup><sub>g</sub> modu, katman kalınlığından önemli ölçüde etkilenmez (Chakraborty vd., 2013). MoS<sub>2</sub> yapılarında, film kalınlığına bağlı olarak Raman piklerinin pozisyonu da etkilenir. Bahsi geçen iki pikin şiddeti, artan MoS<sub>2</sub> kalınlığı ile önemli ölçüde artar. İki karakteristik pik arasındaki mesafe, tek tabakalı MoS<sub>2</sub> için  $\sim 19 \text{ cm}^{-1}$  olarak tespit edilmiş olup (H. Li vd.,

2012; S. Sundaram vd., 2013). MoS<sub>2</sub> kalınlığının artışı ile artarak çok katmanlı MoS<sub>2</sub> için ~25-26 cm<sup>-1</sup> değerlerine çıkmaktadır (Gołasa vd., 2013).

Şekil 4.4, 30, 60, 120, 180 ve 240 saniye örnekleri için 330 ile 460 cm<sup>-1</sup> arasındaki MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin Raman saçılma spektrumlarını göstermektedir. Spektrumlarda MoS<sub>2</sub>'nin iki karakteristik piki gözlenmektedir. E<sup>1</sup><sub>2g</sub> modu ~385 cm<sup>-1</sup>'de, A<sup>1</sup><sub>g</sub> modu ~410 cm<sup>-1</sup>'de gözlenmiştir. Piklerin pozisyonları ile Mo-O ince filmlerin büyümesi arasında bir ilişki gözlenmemiştir. Pik pozisyonları her örnek için yaklaşık olarak aynıdır. İki karakteristik pik arasındaki mesafe ~24.8 ile ~25.8 cm<sup>-1</sup> arasında değişmektedir, bu değer büyütülen MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin çok katmanlı olduğunu göstermektedir (Şekil 4.5). Pik şiddetlerinin birbirine oranının, pik pozisyonlarının tepe noktaları arasındaki mesafeye bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Tepe noktaları arasındaki mesafe azaldıkça, pik şiddetlerinin oranı artmaktadır (Şekil 4.5).



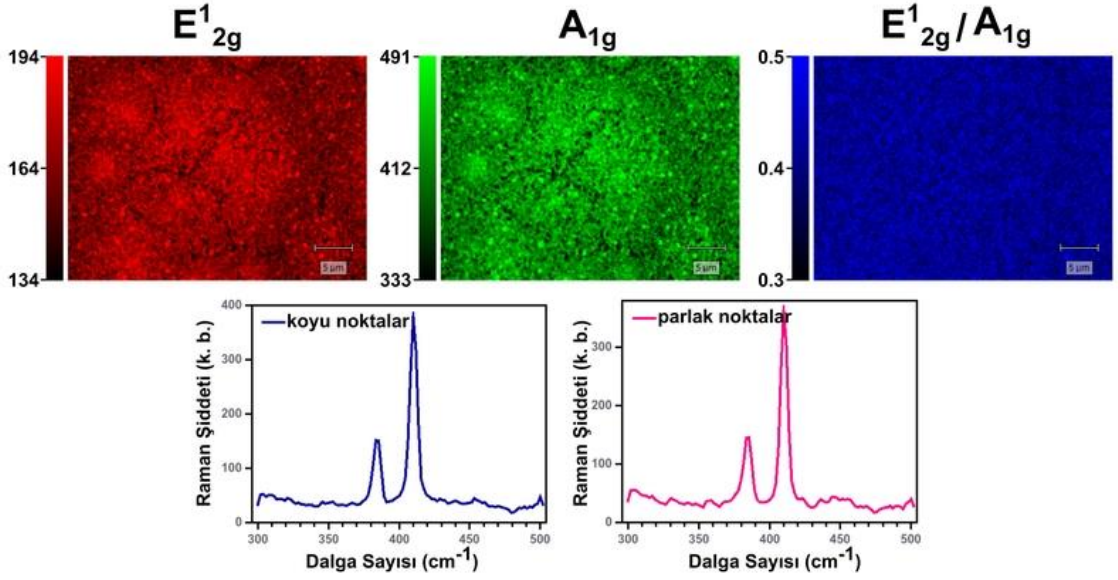
Şekil 4.4. Farklı Mo-O film büyüme süreleri için MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin Raman spektrumu.



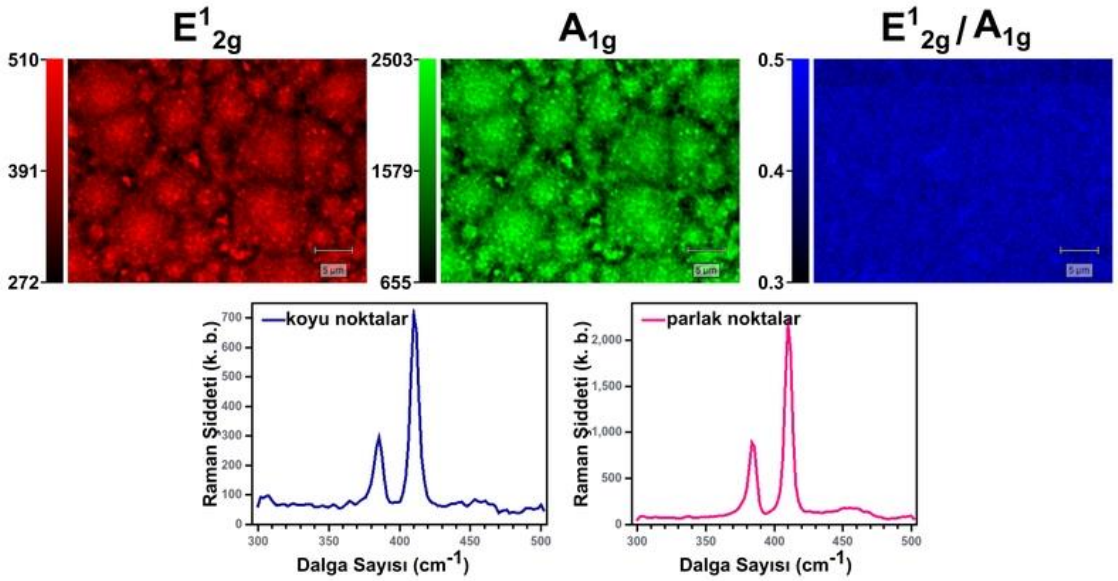
Şekil 4.5. Farklı Mo-O film büyüme süreleri için A<sup>1</sup><sub>g</sub> ve E<sup>1</sup><sub>2g</sub> pikleri arasındaki mesafe ve E<sup>1</sup><sub>2g</sub>/A<sup>1</sup><sub>g</sub> piklerinin şiddetleri oranı.

Şekil 4.6-10, Si plakalar üzerinde farklı büyüme süresine sahip Mo-O ince filmlerin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin Raman haritalamasını gösterilmiştir. Raman haritalamasında, MoS<sub>2</sub> yapısının karakteristik piklerine referansla renklendirme yapılmıştır. ~385 cm<sup>-1</sup>'de gözlenen E<sup>1</sup><sub>2g</sub> pikinin şiddetinin dağılımı kırmızı renk kullanılarak, ~410 cm<sup>-1</sup>'de gözlenen A<sup>1</sup><sub>g</sub> pikinin şiddetinin dağılımı yeşil renk kullanılarak haritalandırılmıştır. E<sup>1</sup><sub>2g</sub> pikinin şiddetinin A<sup>1</sup><sub>g</sub> pikinin şiddetine oranına dağılımını gösteren haritalama mavi renkle gösterilmiştir. Pik şiddetlerinin oranı, Şekil 4.5'da gösterildiği gibi pikler arasındaki mesafeyle ters orantılıdır. Bu renklemenin tersi, iki karakteristik pik arasındaki mesafe olarak da yorumlanabilir. 30 saniye örneği için net bir büyük küme oluşumu gözlenmemiştir (Şekil 4.6). MoS<sub>2</sub> dağılımının homojen olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, 60 saniye örneğinde (Şekil 4.7), net bir kümelenmenin olduğu gözlenmektedir. Buna ek olarak, pikler arasındaki oran ve pikler arasındaki mesafe bu kümelenmeler boyunca değişmemiştir. Bu küçük kümelenmeler optik mikroskop görüntülerinde de gözlenmiştir. (Şekil 4.3 (b)). Şekil 4.8'de, kümelenme net değildir, fakat dağılım homojendir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da, büyük kümelenmelerin olduğu açıkça gözlenmektedir. Ayrıca, bu kümelenmelerde, MoS<sub>2</sub>'nin karakteristik pik yoğunluklarındaki artış, çok katmanlı bir MoS<sub>2</sub> yapısının işaret etmektedir. Bu değişim, pik oranları kullanılarak yapılan haritalamada görülmektedir. Şekil 4.9 ve 4.10'daki mavi haritalamada, düşük pik oranları karanlık alanlar olarak görülmektedir. Bu alanlarda, pikler arasındaki mesafe fazladır. Bu

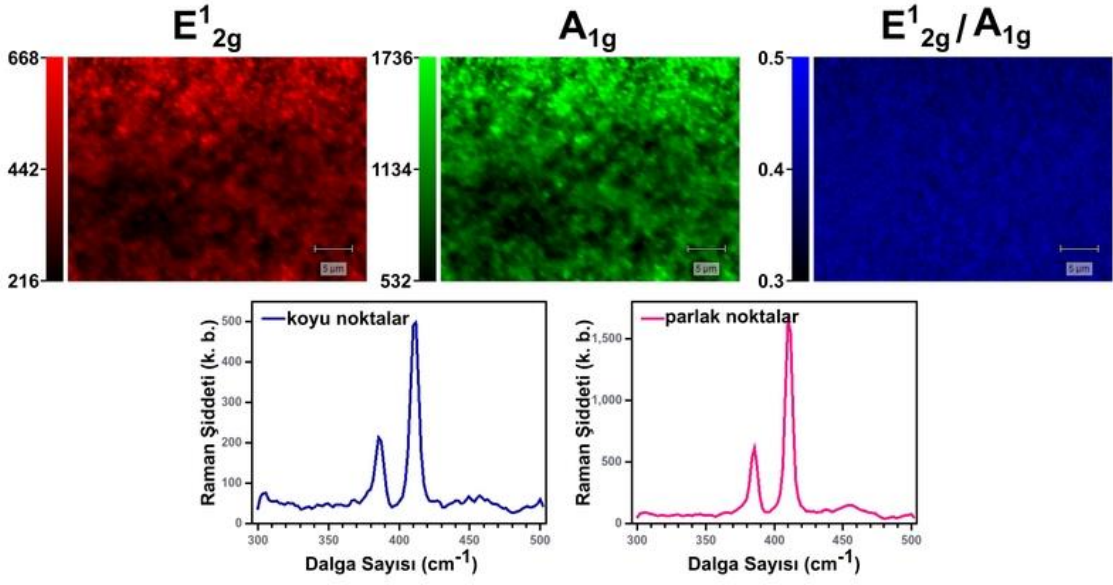
nedence, mavi renkli haritalamada, karanlık alanlar çok katmanlı MoS<sub>2</sub> yapısına sahip alanlar olarak yorumlanmıştır. Raman haritalaması sonucunda en homojen örnek 30 saniye örneği olarak tespit edilmiştir. Raman haritalamalarının altındaki grafikler, MoS<sub>2</sub>'nin tüm yüzeyde mevcut olduğunu göstermekle beraber haritadaki en karanlık ve en parlak bölgelerden alınmış noktasal Raman spektrumlarıdır.



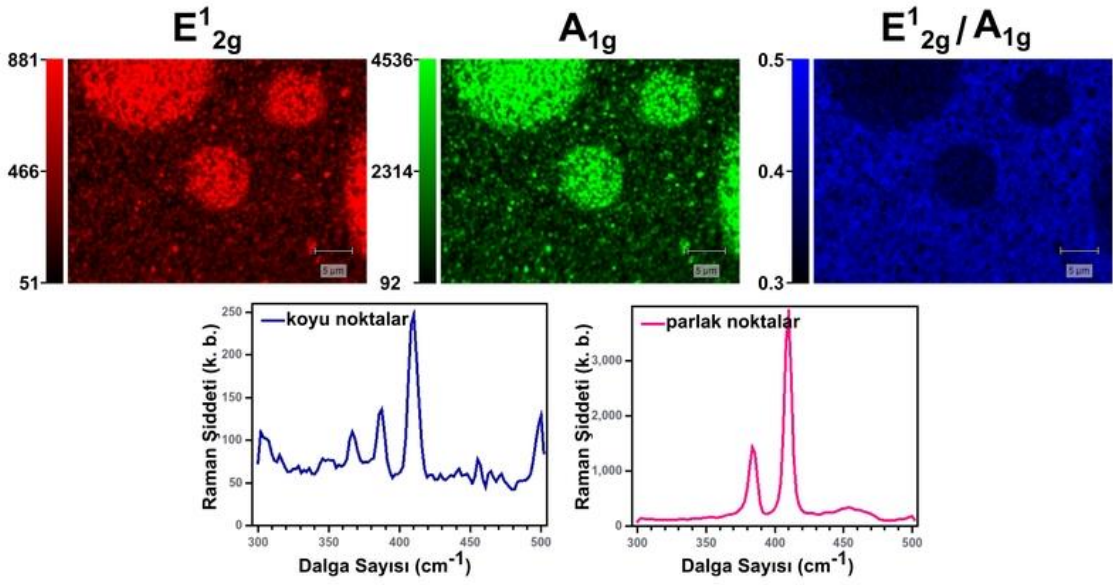
Şekil 4.6. 30 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filminin (30 saniye örneği) Raman haritalaması.



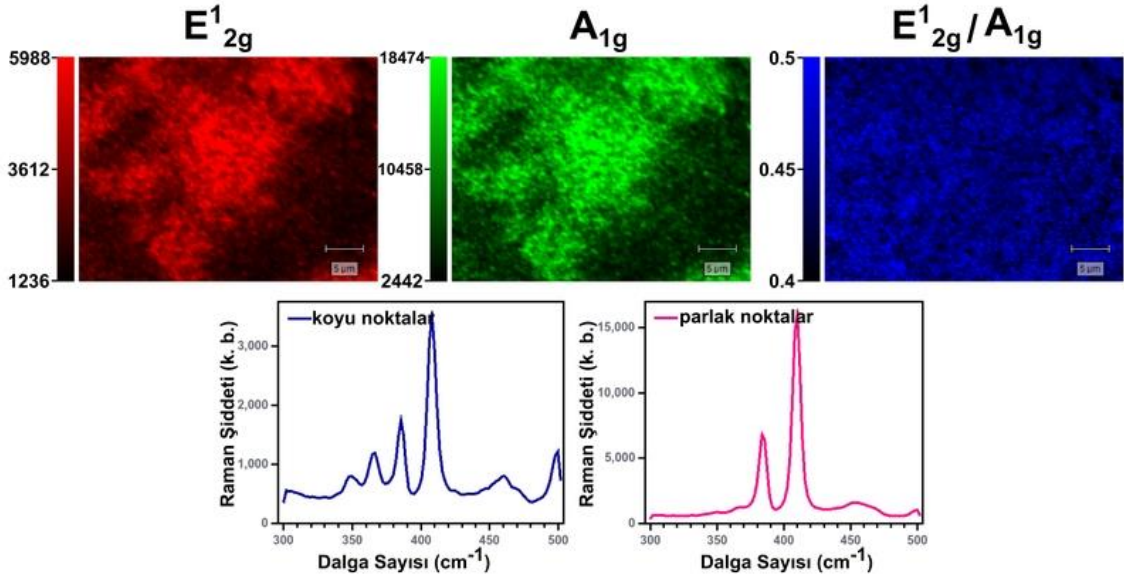
Şekil 4.7. 60 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filminin (60 saniye örneği) Raman haritalaması.



Şekil 4.8. 120 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filminin (120 saniye örneği) Raman haritalaması.



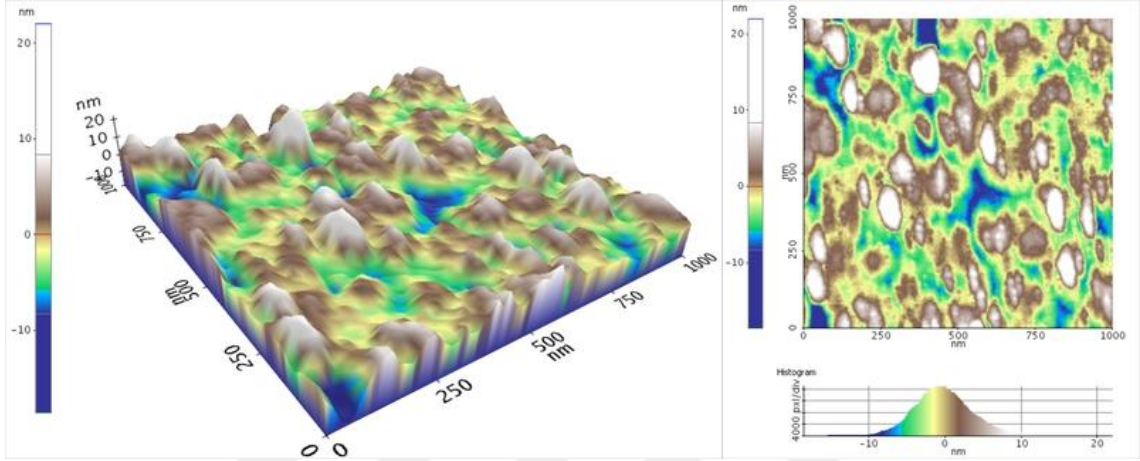
Şekil 4.9. 180 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filminin (180 saniye örneği) Raman haritalaması.



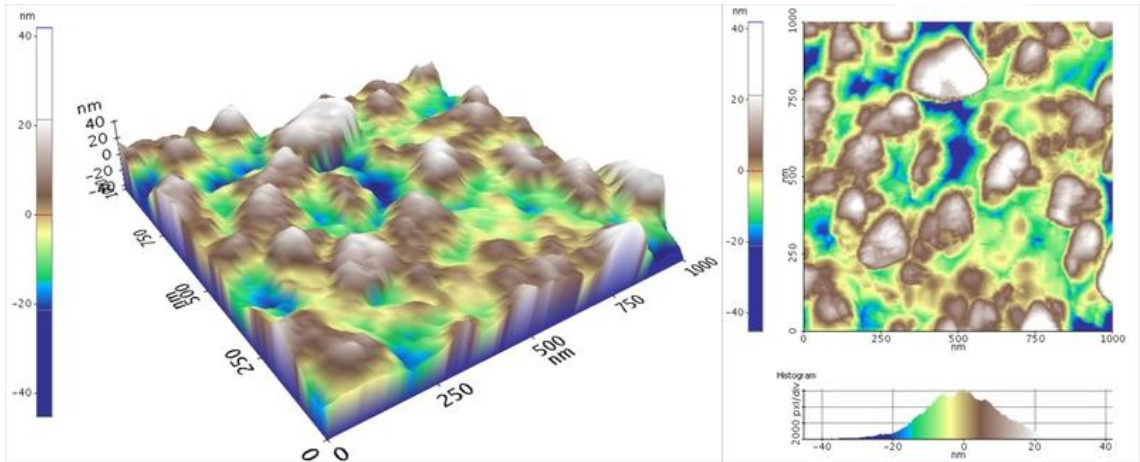
**Şekil 4.10.** 240 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filminin (240 saniye örneği) Raman haritalaması.

MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin 2 ve 3-boyutlu yüzey topografileri AFM ile alınmıştır. Görüntüler, 1x1 µm<sup>2</sup> yüzey alanı taranarak elde edilmiştir. Si plaka üzerinde büyütülen MoS<sub>2</sub> ince filmlerin yüzey topografileri Şekil 4.11–15’de gösterilmiştir. Topografi görüntüleri, Raman haritalama (Şekil 4.6–10) ve optik görüntüler (Şekil 4.3) ile uyumludur. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) AFM görüntülerinde köşegen çizgi boyunca hesaplanmıştır. Şekil 4.11’de, 30 saniye örneğinde küçük dağılımlar göze çarpmaktadır. Ra, 2.926 nm olarak ölçülmüştür. 60 saniye örneğinde (Şekil 4.12), yüzeydeki MoS<sub>2</sub> oluşumu daha belirgin olarak ifade edilebilir. Bu örnekte küçük kümelenmelerin de olduğu söylenebilir. 60 saniye örneği için Ra değeri 8.036 nm olarak ölçülmüştür. 120 saniye örneğinde (Şekil 4.13), yüzeyin tamamen kaplı olduğu ve farklı kümelenmeler daha görünür hale gelmiştir. Ra değeri 11.380 nm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 sırasıyla 180 saniye örneğini ve 240 saniye örneğini göstermektedir. MoS<sub>2</sub> kümelenmelerinin boyutlarının arttığı net bir şekilde görülmektedir. Ra değerleri sırasıyla 11.076 ve 19.738 nm olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, MoS<sub>2</sub> ince filmlerin AFM görüntülerinin optik görüntüler ve Raman haritalama görüntüleri ile uyum içinde olduğu yorumu yapılmıştır. Genel olarak Mo-O ince film büyütme süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını söylemek mümkündür. 120 ve 180 saniye örneklerinde yüzey pürüzlülük değerleri birbirine yakın olarak ölçülmüştür. Örneklerin Ra değerleri ortalama yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgi vermekte olup büyütülen filmlerin kalınlığına ilişkin doğru bilgi vermez. Ancak film

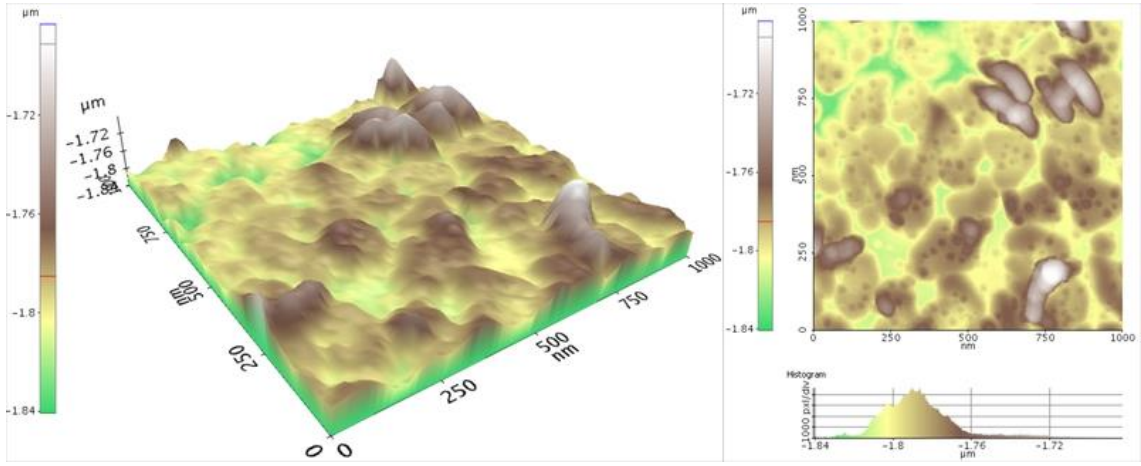
üzerindeki çukur ve tepelerin boyutlarının ortalaması olarak düşünüldüğünde filmin kalınlığı hakkında kabaca yorum yapmaya müsaade edebilir. Bir tek katman MoS<sub>2</sub>'nin kalınlığı 0.65 nm (X. Li ve Zhu, 2015) olarak düşünüldüğünde 30 saniye örneği 4–5 katman, 60 saniye örneği 12–13 katman, 120 saniye örneği 17–18 katman, 180 saniye örneği 17–18 katman ve 240 saniye örneği 30–31 katman kalınlığında olduğu yorumu yapılabilir. Mo-O ince filmi büyütme süresi ile MoS<sub>2</sub> ince filmin kalınlığı arasında bir ilişki olduğu göze çarpmaktadır.



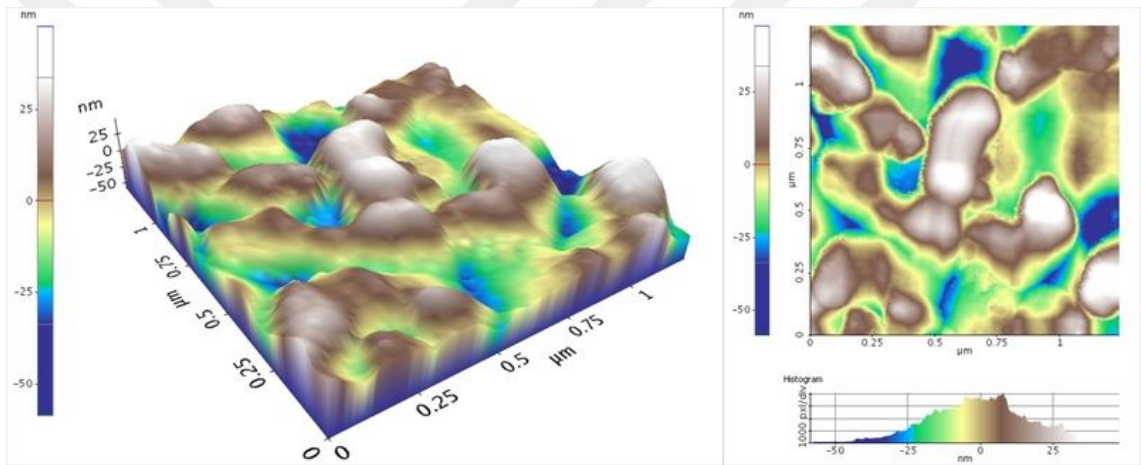
**Şekil 4.11.** 30 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (30 saniye örneği) AFM ile elde edilmiş 2 ve 3-boyutlu yüzey topografisi.



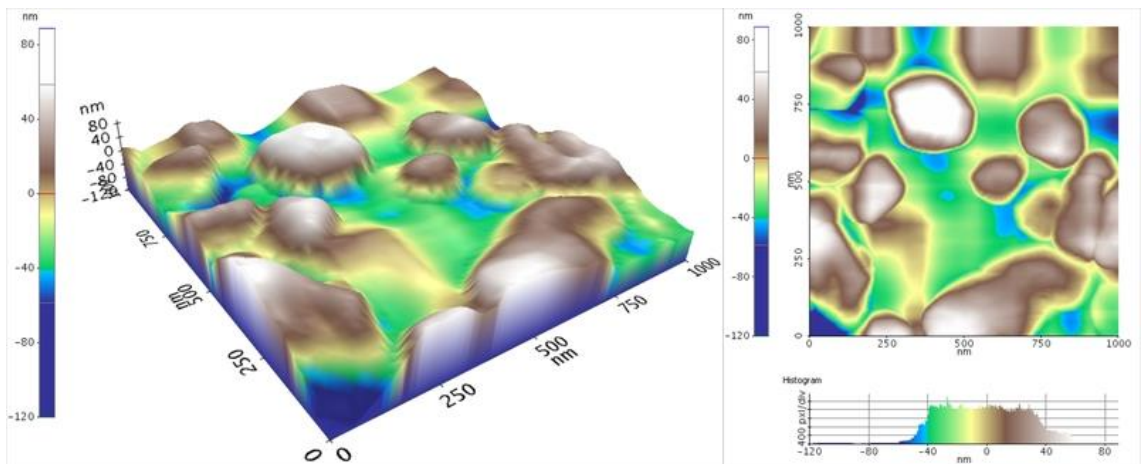
**Şekil 4.12.** 60 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (60 saniye örneği) AFM ile elde edilmiş 2 ve 3-boyutlu yüzey topografisi.



**Şekil 4.13.** 120 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (120 saniye örneği) AFM ile elde edilmiş 2 ve 3-boyutlu yüzey topografisi.

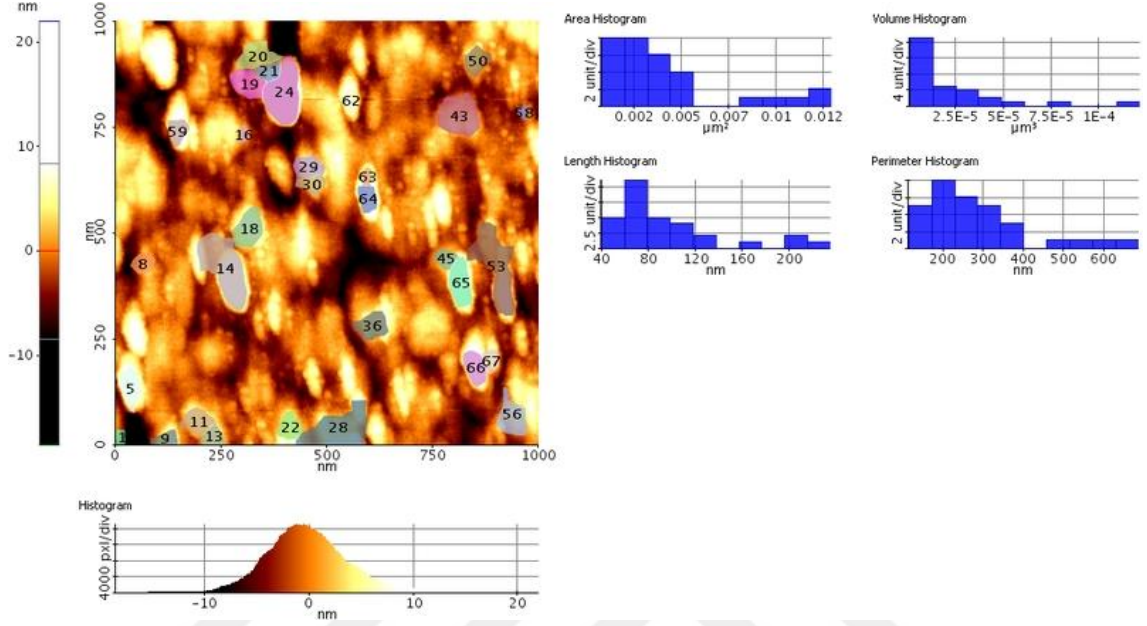


**Şekil 4.14.** 180 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (180 saniye örneği) AFM ile elde edilmiş 2 ve 3-boyutlu yüzey topografisi.

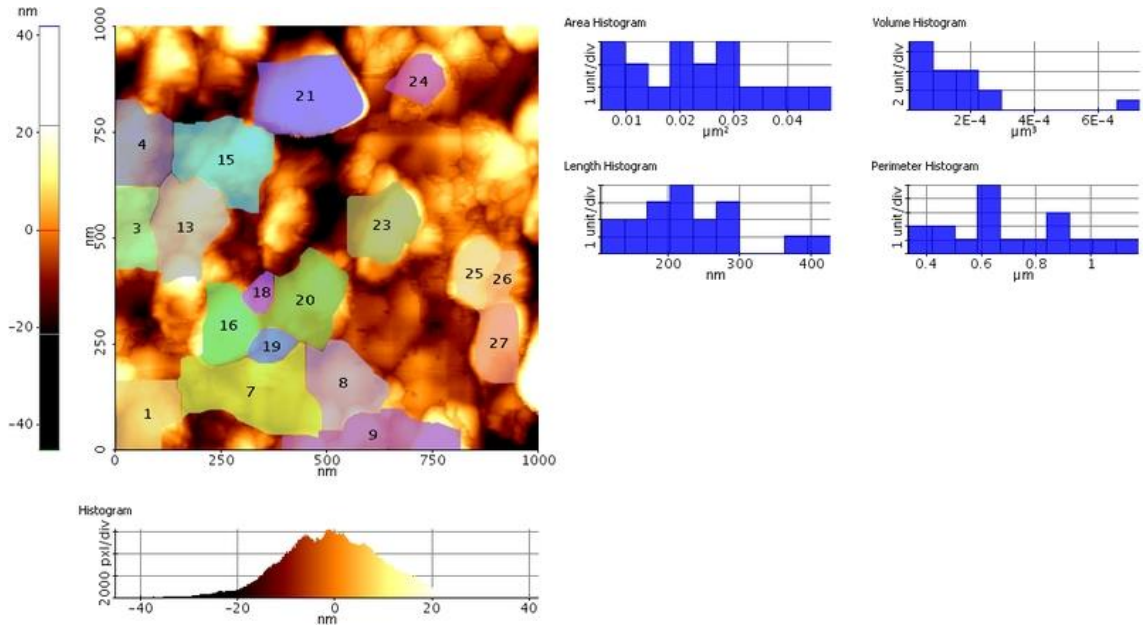


**Şekil 4.15.** 240 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filminin (240 saniye örneği) AFM ile elde edilmiş 2 ve 3-boyutlu yüzey topografisi.

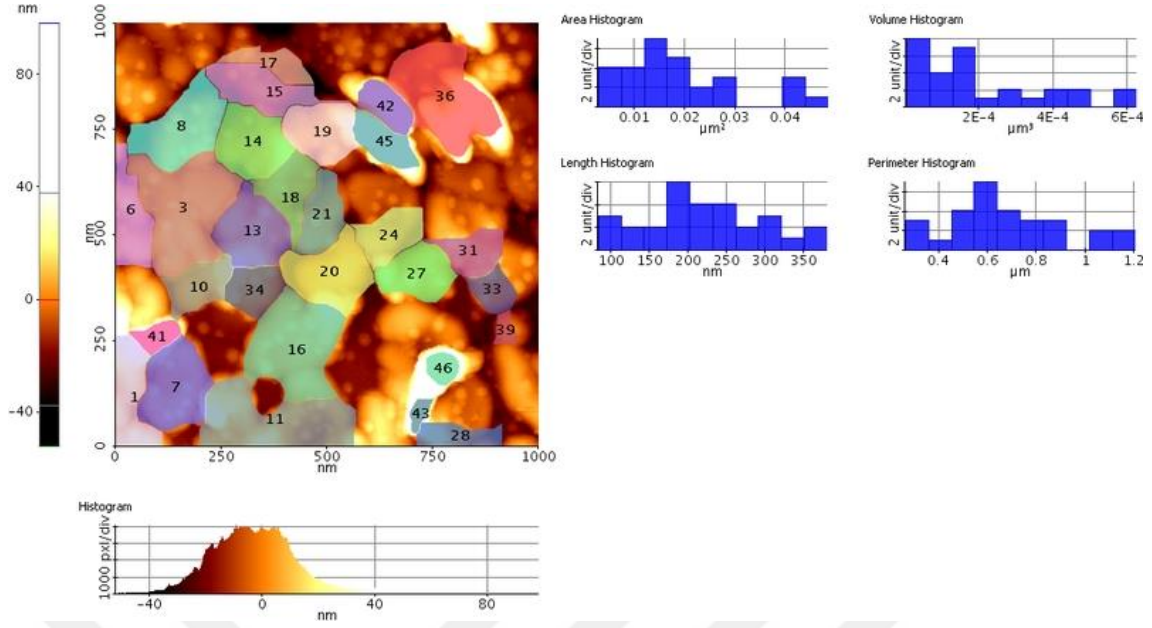
AFM görüntülerinden elde edilen tanecik boyutlarına ilişkin görseller ve tanecik boyutlarının dağılımına ilişkin histogramlar Şekil 4.16–20’de gösterilmiştir. Film üzerinde farklı boyutlarda tanecikler olmasına karşın ortalama tanecik boyutlarının Mo-O ince filmin büyüme süresinin artışıyla beraber arttığını söylemek mümkündür.



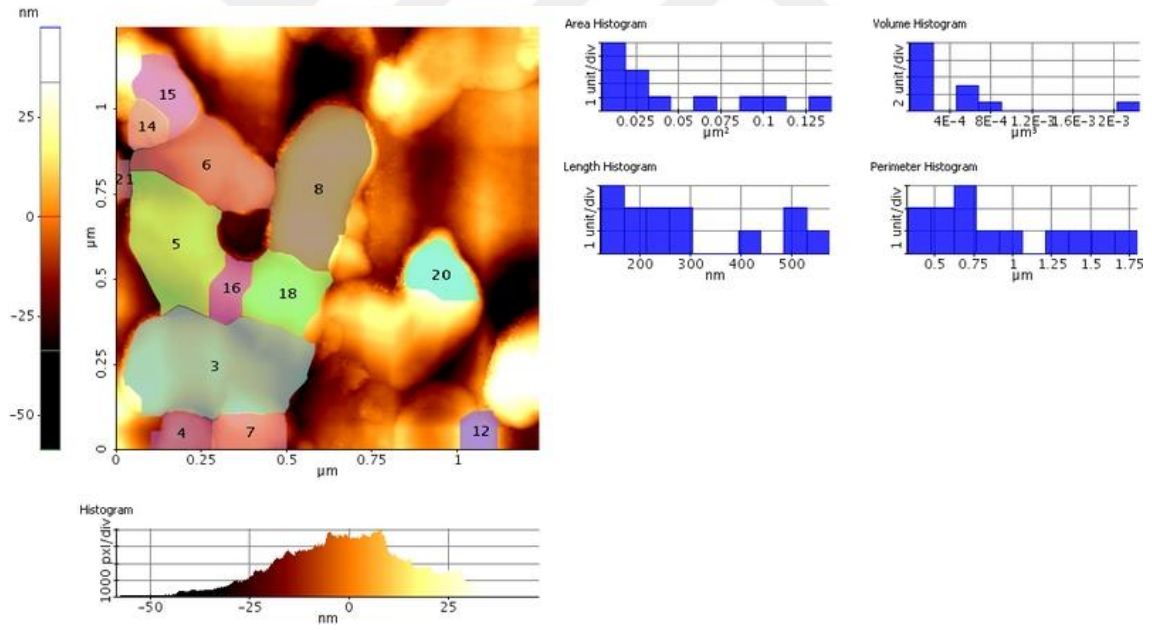
Şekil 4.16. 30 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (30 saniye örneği) 2-boyutlu AFM görüntüsü üzerinden elde edilmiş tanecik dağılımı.



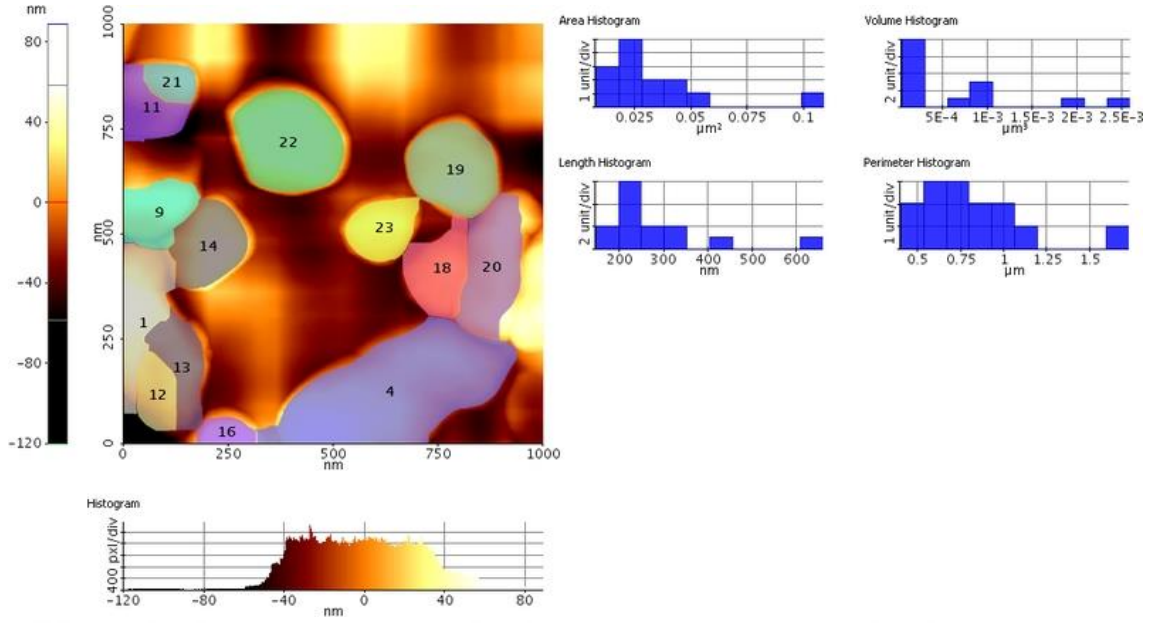
Şekil 4.17. 60 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (60 saniye örneği) 2-boyutlu AFM görüntüsü üzerinden elde edilmiş tanecik dağılımı.



**Şekil 4.18.** 120 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (120 saniye örneği) 2-boyutlu AFM görüntüsü üzerinden elde edilmiş tanecik dağılımı.



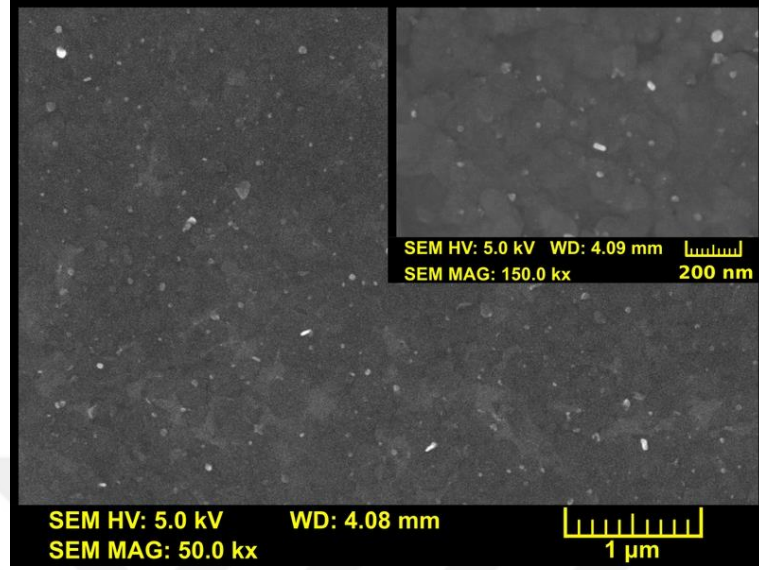
**Şekil 4.19.** 180 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (180 saniye örneği) 2-boyutlu AFM görüntüsü üzerinden elde edilmiş tanecik dağılımı.



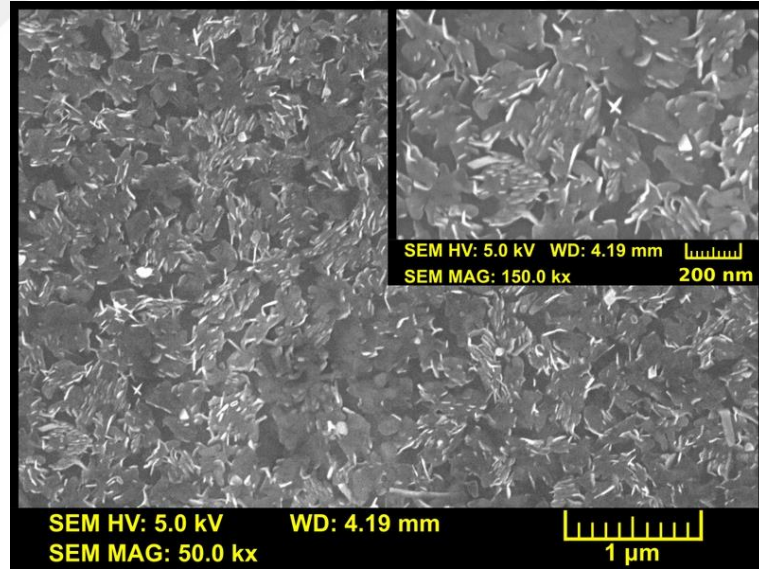
**Şekil 4.20.** 240 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (240 saniye örneği) 2-boyutlu AFM görüntüsü üzerinden elde edilmiş tanecik dağılımı.

Şekil 21–25 farklı Mo-O ince film büyütme sürelerinde Si plaka üzerindeki MoS<sub>2</sub> ince filmlerin filmlerinin 50kX ve 150 kX büyütme altında FESEM görüntülerini içermektedir. SEM analizleri ile optik mikroskoplarla inilemeyen çözünürlüklere inilerek yüzey morfolojisinin incelenmesine olanak sunar. Şekil 21’de gösterilen 30 saniye örneğinde, yüzeyde çok ince MoS<sub>2</sub> pullarının varlığı ve MoS<sub>2</sub> pulların formasyonu açıkça görülmektedir. MoS<sub>2</sub> pullar hemen hemen tüm yüzeyi homojen olarak kaplamıştır. Şekil 22’de gösterilen 60 saniye örneğinde, MoS<sub>2</sub> pullar daha belirgin hale gelmiştir. Bütün yüzeyin yoğun MoS<sub>2</sub> pulları ile kaplı olduğu görülmektedir. Şekil 23’te gösterilen 120 saniye örneğinde, MoS<sub>2</sub> pulları birleşerek nanometre boyutlu MoS<sub>2</sub> kristalleri oluşturmuştur. Bu nano ölçekli kristallerin sayısı çok olup ve MoS<sub>2</sub> kristalleri arasındaki mesafe kısadır. Bununla birlikte, bu parçacıklar arasında bağlantılar olduğu da gözlenmiştir. Şekil 24’te gösterilen 180 saniye örneğinde, MoS<sub>2</sub> kristalleri büyüyerek daha büyük ve birbirinden bağımsız kristaller meydana getirmişlerdir. Bununla birlikte kristaller arasındaki boşluk göze çarpmaktadır. Şekil 25’te gösterilen 240 saniye örneğinde, MoS<sub>2</sub> kristallerinin boyutunda önemli bir değişiklik olmamıştır, ancak kristal sayısında bir artış gözlenmiştir. AFM sonuçlarıyla tutarlı olan bu sonuçlara göre, MoS<sub>2</sub> kristallerinin büyümesi ve yoğunluğu artan Mo-O ince film büyütme süresi ile değişmektedir. Literatürde PVD (Ishihara vd., 2016; Jang vd., 2016; Late vd., 2014), CVD (Perkgoz ve Bay, 2016) veya kimyasal yöntemler

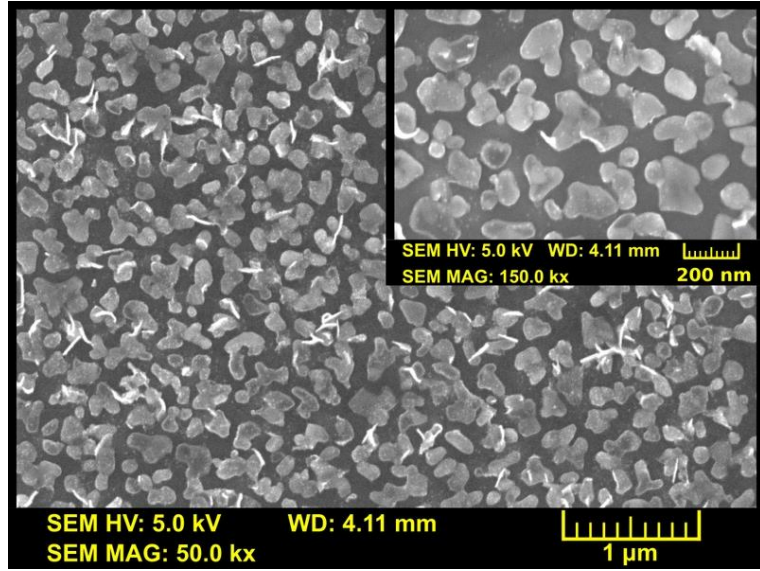
(Mattinen vd., 2017) kullanılarak büyütülen MoS<sub>2</sub>'nin SEM görüntülerinde bu kristalleşme gözlenmemiştir.



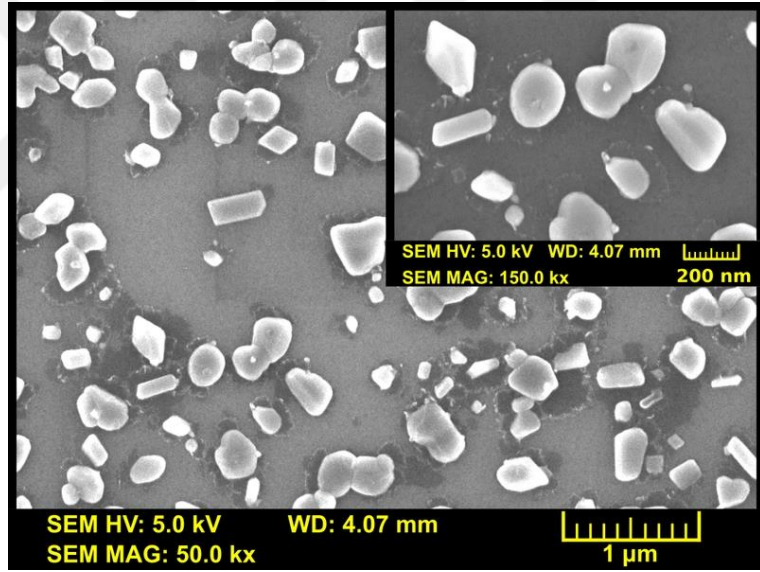
Şekil 4.21. 30 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> film (30 saniye örneği) için 50 kX ve 150 kX altındaki FE-SEM görüntüsü.



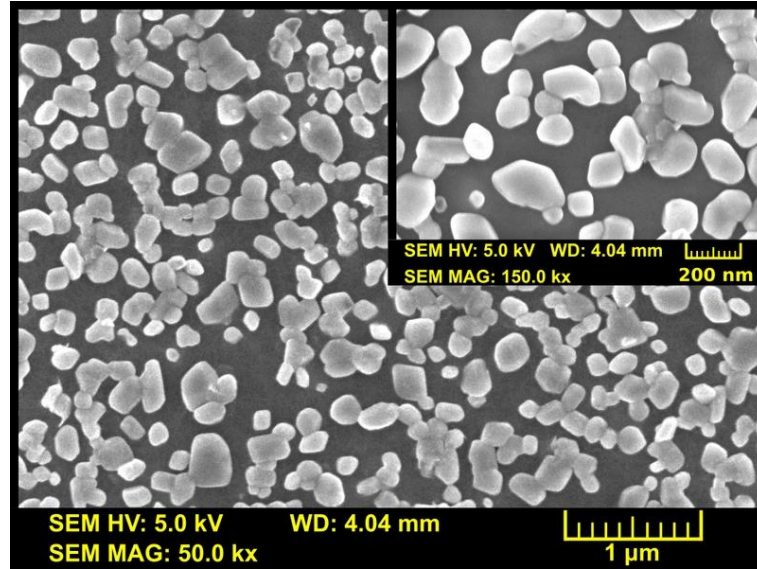
Şekil 4.22. 60 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> film (60 saniye örneği) için 50 kX ve 150 kX altındaki FE-SEM görüntüsü.



Şekil 4.23. 120 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> film (120 saniye örneği) için 50 kX ve 150 kX altındaki FE-SEM görüntüsü.



Şekil 4.24. 180 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> film (180 saniye örneği) için 50 kX ve 150 kX altındaki FE-SEM görüntüsü.



Şekil 4.25. 240 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> film (240 saniye örneği) için 50 kX ve 150 kX altındaki FE-SEM görüntüsü.

### 4.3. MoS<sub>2</sub> İnce Filmlerin Optik Analizi

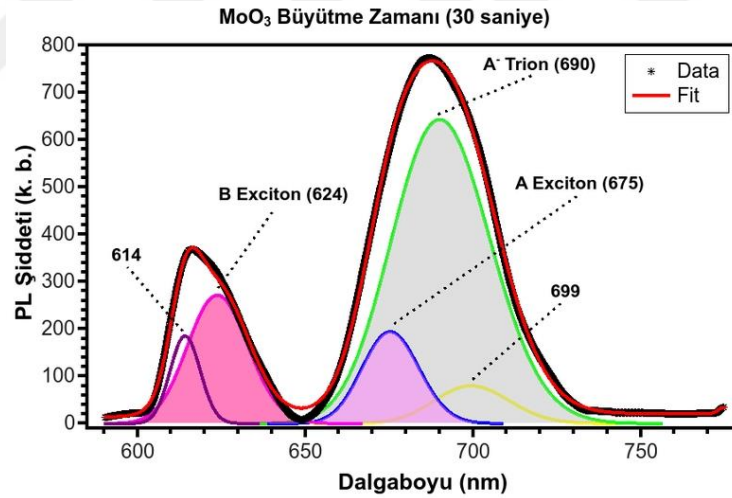
PL ölçümleri ile malzemelerin elektronik bant geçişleri hakkında bilgi edinmek mümkündür. MoS<sub>2</sub>'nin optik özellikleri katman sayısına güçlü bir şekilde bağlıdır. Tek katmanlı MoS<sub>2</sub>'lerde direkt eksitonik enerjilerden kaynaklı güçlü bir PL etki gözlemlenir ancak bu etki katman sayısının artışıyla hızlı bir şekilde azalmaktadır ve hatta bu MoS<sub>2</sub>'lerde herhangi bir PL etki gözlenmez. Bu MoS<sub>2</sub>'nin elektronik bant yapısından kaynaklanmaktadır. MoS<sub>2</sub>'ler tek katmanlı yapıdayken direkt yasak bant boşluğuna sahipken az katmanlı ve bulk formunda dolaylı yasak bant boşluğuna sahiptir.

Tek katman MoS<sub>2</sub> PL spektrumunda birisi ~670 nm ve diğeri ~620 nm'de olmak üzere iki pik sergiler. Bu pikler Brillouin bölgesindeki K noktasında meydana gelen direkt eksitonik geçişlerle ilgilidir ve sırasıyla A ve B eksitonlarını temsil eder (Splendiani vd., 2010). ~670 nm'de gözlemlenen baskın pik fotouyarımla meydana gelmiş elektron-hol çiftinin yeniden bir araya gelmesine atfedilir. ~620 nm'de gözlemlenen zayıf pik ise MoS<sub>2</sub>'nin güçlü spin-yörünge etkileşiminden dolayı meydana gelen valans bant yarılmaya atfedilir (Zhu vd., 2011). Öte yandan ~680nm'de gözlemlenen PL piki ise yerleşmiş negatif veya pozitif parçacığımsı (quasiparticle) olan triona atfedilir. Bunun yanında PL pik konumları MoS<sub>2</sub> pulunda odaklanılan yere göre kayma göstermektedir. Şekil 4.26–30 Si plaka üzerinde büyütülen MoS<sub>2</sub> ince filmlerin PL spektrumlarını göstermektedir. PL spektrumları ters evrişim ile alt Lorentzian piklerine ayrılmıştır. 30 saniye örneğinde (Şekil 4.26) literatürde 685 nm'de

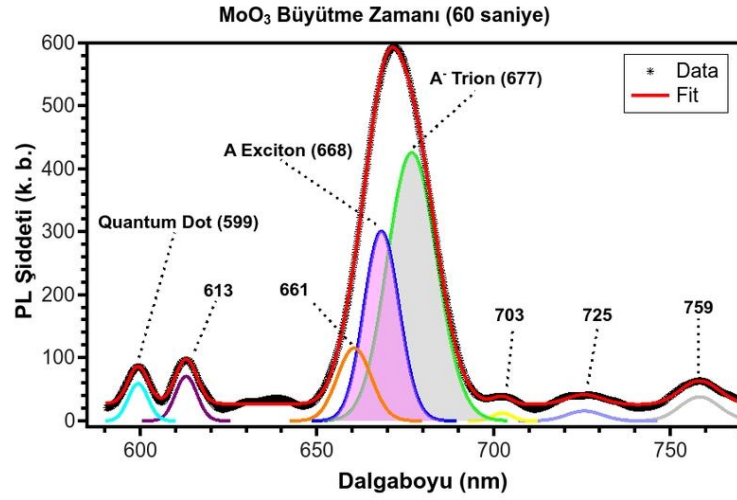
gözlemlenen  $A^-$  trion piki 690 nm'de gözlemlenmiştir. A ve B eksitonları ise sırasıyla 675 ve 624 nm'de gözlemlenmiştir. Bununla birlikte 614 ve 699 nm'de iki pikin varlığı da ters evrişim ile tespit edilmiştir. 60 saniye örneğinde (Şekil 4.27)  $A^-$  trion ve A eksiton piklerinin maviye kaydığı tespit edilmiştir. İlave olarak 599 nm'de gözlemlenen pikin MoS<sub>2</sub> kuantum noktalarla (Lin vd., 2015) ilişkili olabileceği düşünülmüştür. Ayrıca 613, 703, 725 ve 759 nm'lerde de PL piklerinin varlığı ters evrişim ile tespit edilmiştir. B eksiton piki çok zayıf olduğundan dolayı PL spektrumunda gözlenmemiştir. 120 saniye örneğinde (Şekil 4.28),  $A^-$  trion ve A eksiton piklerindeki maviye kayma daha da artarak sırasıyla 668 ve 659 nm'de gözlemlenmiştir. B eksiton piki literatürde tanımlandığı gibi 627 nm'de, MoS<sub>2</sub> kuantum noktalara ait PL piki de 600 nm'de gözlemlenmiştir. Bu örnekte PL şiddetinde büyük bir artış olduğu tespit edilmiştir. 180 saniye örneğinde (Şekil 4.29)

$A^-$  trion ve A eksiton piklerinin tekrar kırmızıya kayma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. En yüksek PL şiddeti bu örnekte kaydedilmiştir. 240 saniye örneğinde (Şekil 4.30)  $A^-$  trion ve A eksiton pikleri 180 saniye örneğindeki değerlere yakın şekilde sırasıyla 677 ve 665 nm'de gözlemlenmiştir. Ancak hem 180 saniye hem de 240 saniye örneklerinin her ikisinde de B eksitonuna ait pik tespit edilememiştir. Piklerin genişleri incelendiğinde en geniş pikin 30 saniye örneğinde olduğu, 60 saniye örneğinde büyük bir daralmanın olduğu, 120, 180 ve 240 saniye örneklerinde M-O filmin büyütme süresinin artışı ile genişlemenin de arttığı tespit edilmiştir.  $A^-$  trion ve A eksiton pikleri 180 saniye örneğine kadar maviye kayma eğilimi gösterirken 180 saniye ve 240 saniye örneklerinde kırmızıya kayma eğilimi göstermiştir. MoS<sub>2</sub>'nin PL spektrumlarında bu kaymanın nedenin açıklamak güçtür. Bunun, gerilme (Shi vd., 2013), kuantum sınırlılık etkisi (Miller vd., 1986) gibi nedenleri olabilir. Bununla birlikte MoS<sub>2</sub>'nin Bohr yarıçapı (~2 nm) (Doolen vd., 1998) ile karşılaştırıldığında çok büyük kuantum noktalarını için kuantum sınırlılık etkisinden bahsetmek uygun olmaz (Gan vd., 2015). İlave olarak manyetik alan sıçratma sisteminde büyüyen Mo-O ince filmi sadece MoO<sub>3</sub> fazı içermeyip aynı zamanda MoO<sub>2</sub> ve Mo<sub>4</sub>O<sub>11</sub> fazlarını da içermektedir (Şekil 4.1). Mo-O yapısından MoS<sub>2</sub> yapısına dönüşüm reaksiyonu düşünüldüğünde MoO<sub>2</sub> fazı MoO<sub>3</sub> fazından daha kaliteli MoS<sub>2</sub> yapıları oluşumu sağlamaktadır. Bununla birlikte sülfür atmosferi altında MoO<sub>3</sub>'ün MoS<sub>2</sub>'ye dönüşümü sırasında tamamlanmamış reaksiyon MoS<sub>2</sub> kristalleri içinde kontrol edilemeyen MoS<sub>2-y</sub>O<sub>y</sub> fazının oluşumuna yol açmaktadır (Lince vd., 1990). Bu durum, oksijenin yapıda kusur/boşluk oluşturması ihtimalini arttırmaktadır. Yapısal ve kimyasal etkilerin ötesinde, oksijenin varlığı atomik

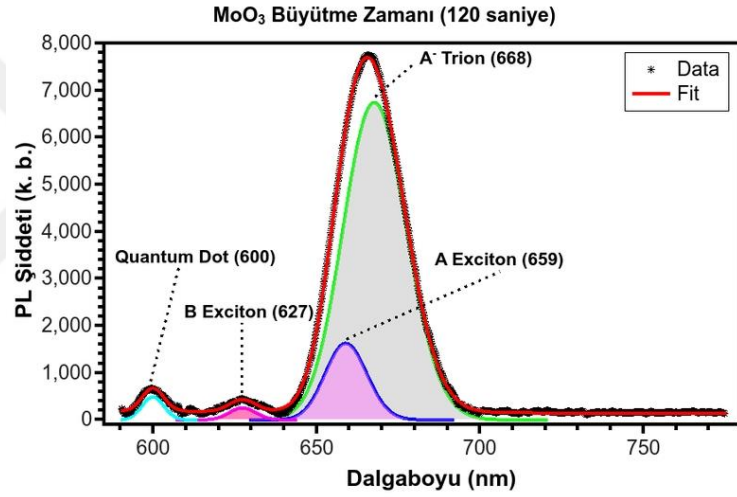
incelikteki MoS<sub>2</sub>'nin elektronik özelliklerini güçlü bir şekilde değiştirir (Park vd., 2013). Bu durum, MoO<sub>2</sub> fazından yüksek kaliteli MoS<sub>2</sub> nano yapılarının ve MoO<sub>3</sub> fazından oksijene bağlı kusurlu MoS<sub>2</sub> yapılarının bir arada bulunmasına yol açar. PL şiddetlerindeki artışın nedenini açıklamak için literatürde iki öneri sunulmaktadır. İlk olarak, 2H-MoS<sub>2</sub> oluşturmak için 1H-MoS<sub>2</sub> katmanlarının katlanmasıdır. Bu durum, çok katmanlı MoS<sub>2</sub>'deki dolaylı bant aralığından dolayı PL yoğunluğunda bir azalmaya neden olmaz, aksine, anormal PL artışı olan bir eksiton ile maviye kaymaya neden olur (Crowne vd., 2013). İkinci olarak, MoO<sub>2</sub> tarafından MoS<sub>2</sub>-MoO<sub>2</sub> hetero-yapısına sağlanan çok sayıda elektron, A<sup>-</sup> trion pik şiddetinde bir artışa neden olur (D. Li vd., 2017). Bu sonuçlara göre, Mo-O filminin büyüme süresi arttıkça filmdeki MoO<sub>2</sub> miktarının arttığını varsaymak mümkündür. Bu artış, MoO<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub> hetero-yapı ve katlanmış MoS<sub>2</sub> miktarında bir artış ile sonuçlanmaktadır. Mo-O filminin PL pikleri Şekil 4.26-30'da gösterilen aralığın dışında olduğundan (Illyaskutty vd., 2014), mevcut pikler sadece Mo-S sistemine ait piklerdir ve PL şiddetlerindeki anormal artış, Mo-O film içindeki MoO<sub>2</sub> fazına atfedilebilir.



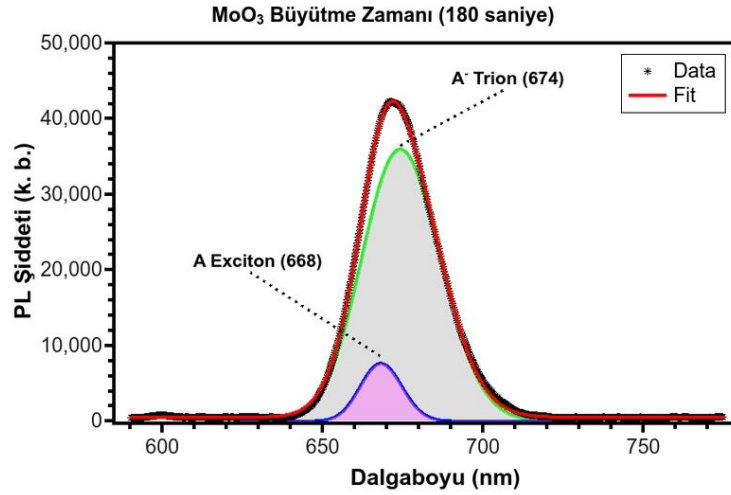
**Şekil 4.26.** 30 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (30 saniye örneği) normalize edilmemiş PL spektrumu. Ters evrişim ile ayrılmış piklerden gri kısım, A<sup>-</sup> trion pikini, açık magenta kısım A eksiton pikini ve pembe kısım B eksiton pikini göstermektedir.



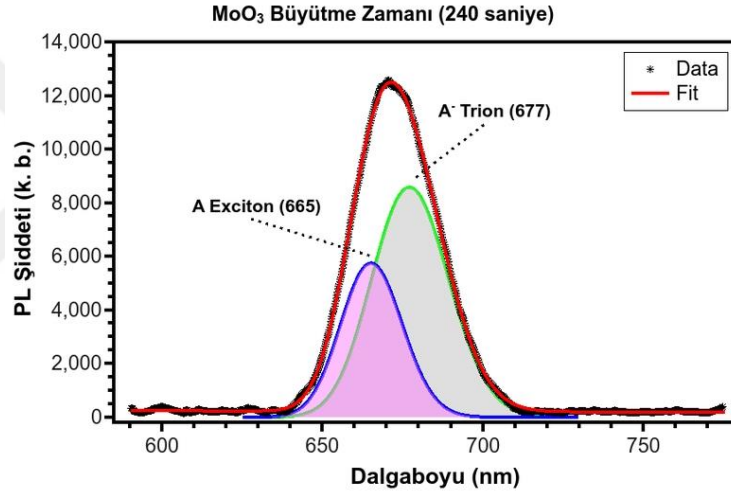
**Şekil 4.27.** 60 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (60 saniye örneği) normalize edilmemiş PL spektrumu. Ters evrişim ile ayrılmış piklerden gri kısım, A<sup>-</sup> trion pikini, açık magenta kısım A eksiton pikini göstermektedir.



**Şekil 4.28.** 120 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (120 saniye örneği) normalize edilmemiş PL spektrumu. Ters evrişim ile ayrılmış piklerden gri kısım, A<sup>-</sup> trion pikini, açık magenta kısım A eksiton pikini ve pembe kısım B eksiton pikini göstermektedir.



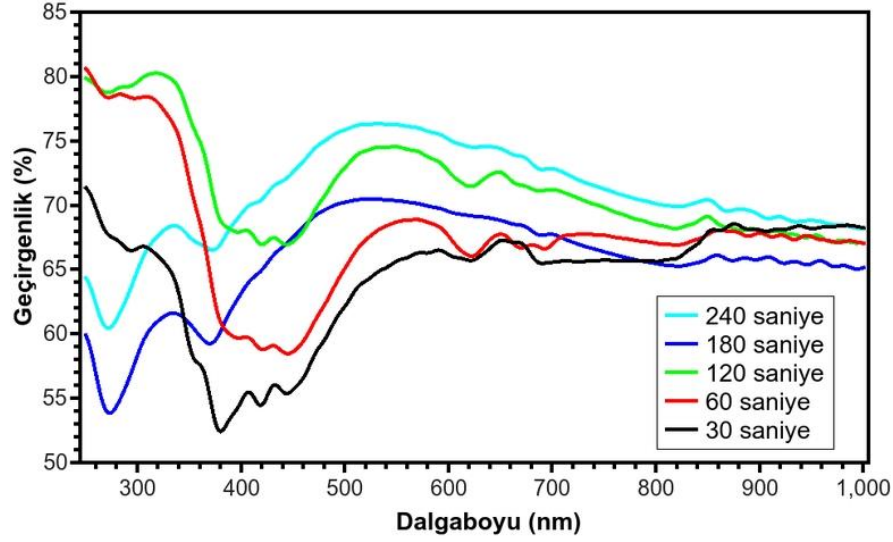
**Şekil 4.29.** 180 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (180 saniye örneği) normalize edilmemiş PL spektrumu. Ters evrişim ile ayrılmış piklerden gri kısım, A' trion pikini, açık magenta kısım A eksiton pikini göstermektedir.



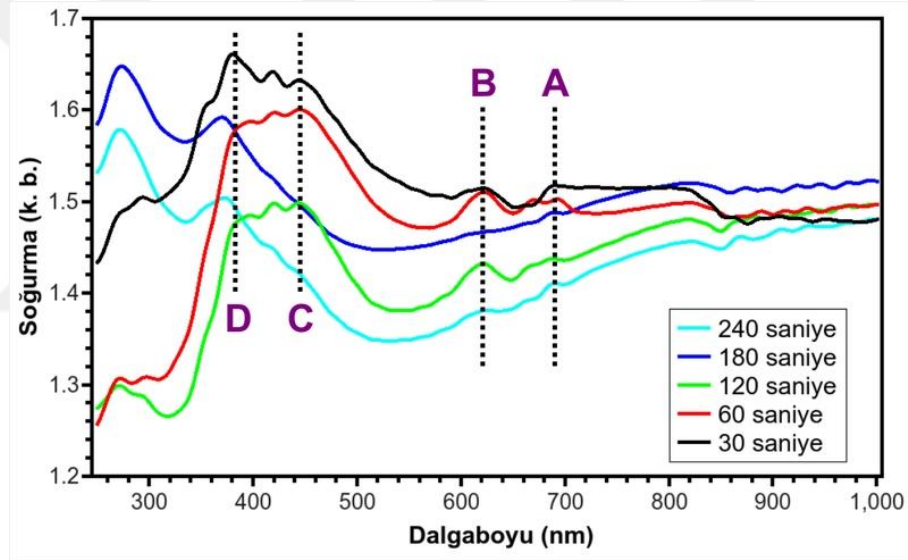
**Şekil 4.30.** 240 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (240 saniye örneği) normalize edilmemiş PL spektrumu. Ters evrişim ile ayrılmış piklerden gri kısım, A' trion pikini, açık magenta kısım A eksiton pikini göstermektedir.

Şekil 4.31'de kuvars alttaş üzerine farklı sürelerde büyütülmüş Mo-O ince filmlerinin sülfürizasyonu ile elde edilen MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin geçirgenlik spektrumunu gösterilmektedir. Şekil 4.32, aynı malzemeler için soğurma spektrumunu göstermektedir. Bu spektrumlarda A/B pikleri, Brillouin bölgesinin K ve K' noktalarındaki bant kenarı uyarımlarına karşılık gelir. C/D pikleri, işgal edilen  $d_{z^2}$  orbitali ile boş  $d_{xy}$ ,  $x^2-y^2$  ve  $d_{xz}$ ,  $d_{yz}$  orbitalleri arasındaki bantlararası geçişlere karşılık gelir (Ahn vd., 2015; Coehoorn vd., 1987; King vd., 2013). Şekil 4.32'de A piki ~695 nm'de gözlemlenirken B piki ~620 nm'de gözlemlenmiştir. A ve B piklerinde belirgin

bir kırmızı ve maviye kayma gözlenmemiştir. Bu durum bant kıyıları arasındaki geçişe atfedilen yasak bant boşluğunun önemli ölçüde değişmediğini göstermektedir. Tüm örneklerde C ve D pikleri gözlenmiştir. Bununla birlikte 180 ve 240 saniye örneklerinde C/D piklerinde maviye kayma gözlemlenmiştir. Bu yasak bant boşluğunun genişlemesine işaret eder. Bu duruma neden olan mekanizmaya Mo-O filmin manyetik alan sıçratma sistemi içindeki büyüme sıcaklığı etkisi büyüktür. 400 °C sıcaklı Mo-O filminin içinde farklı fazların da oluşumunu sağlamıştır (Şekil 4.1). Sülfürizasyon sırasında, MoO<sub>2</sub> üzerinde ve çevresinde oluşan MoS<sub>2</sub>'nin yapısı bir moli-oksi-sülfür'dür (Ikram vd., 2019). Mo-O filminin büyüme süresi arttıkça, filmdeki MO<sub>2</sub> fazının miktarı da artmaktadır ve bu katlanmış MoS<sub>2</sub> miktarında artışa neden olur. Katlanma çok katmanlı bir MoS<sub>2</sub> olarak algılanmamalıdır. MoS<sub>2</sub> katmanlarının istifleme düzeni de katmanlar arasındaki bağlantıyı ve dolayısıyla iki katmanlı MoS<sub>2</sub>'nin bant yapısını modüle eder. Bu yapıda, istiflenmeden kuvvetli bir şekilde etkilenmeyen ve katmanlar arasında üst üste binmenin olduğu lokalize Mo-d orbitalleri arasındaki geçişten kaynaklanan bir eksitonik geçiş vardır. Bu dolaylı bant geçişi, sırasıyla K-Γ hattı ile Γ noktasında Mo-d ve S-p orbitallerinin linner kombinasyonlarından oluşan minimum ve maksimum bant kenarları arasında gerçekleşir. Bu orbitallerin ara katmanlar arasında güçlü bir üst üste binmeye sahip olduğu için, dolaylı geçiş enerjisi istifleme düzenine çok duyarlıdır (T. Jiang vd., 2014). Sonuç olarak Mo-O ince filmin büyüme süresi arttıkça yapısında daha fazla MoO<sub>2</sub> fazı meydana geliyor ve bu da daha fazla MoS<sub>2</sub> oluşumu ile sonuçlanıyor. Bu durum da bantlar arası dolaylı geçişlerde daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulacağı yani yasak bant boşluğunun artacağı şeklinde yorumlanabilir. Bu durum Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'daki anormal PL şiddet artışı ile Şekil 4.32'de 180 saniye ve 240 saniye örneklerindeki maviye kaymayı açıklamaktadır.



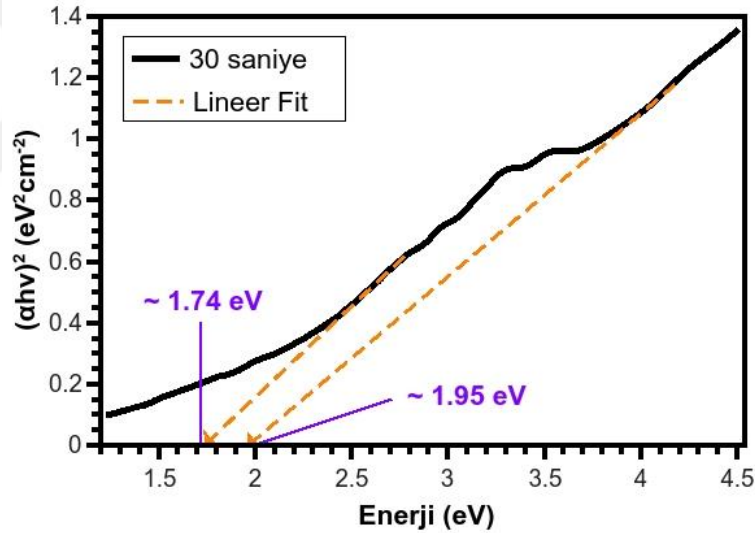
Şekil 4.31. Kuvars üzerine büyümüş MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin geçirgenlik spektrumları.



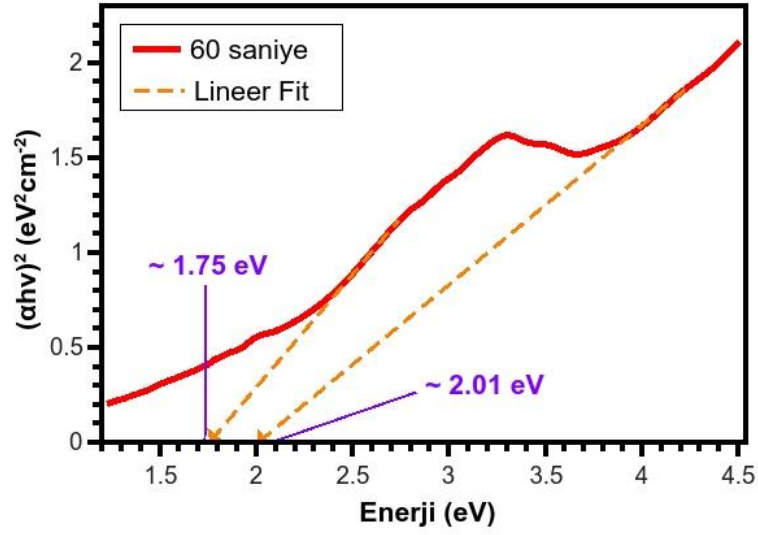
Şekil 4.32. Kuvars üzerine büyümüş MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin soğurma spektrumları.

MoS<sub>2</sub> ince filmlerinin optik bant aralıklarını hesaplamak için Denklem 3.4'te ifade edilen Tauc denklemi kullanılmıştır. Büyütülen MoS<sub>2</sub> filmler için Tauc denkleminde geçişlere bağlı katsayı ( $\gamma$ ) 2 alınmıştır. Bu katsayı dolaylı geçişlere sahip malzemeler için kullanılmaktadır. Büyütülen MoS<sub>2</sub> ince filmlerde tek katmanlı oluşum gözlenmediği için direkt geçişlere bağlı katsayı olan 1/2 değeri kullanılmamıştır. Şekil 4.32'de gösterilen soğurma spektrumu verileri kullanılarak elde edilen Tauc çizimleri Şekil 4.33–37'de gösterilmektedir. Grafik üzerindeki lineer bölgelerden çizilen doğru parçalarının enerji eksenlerini kestiği yerler incelendiğinde her örnek için iki tane yasak

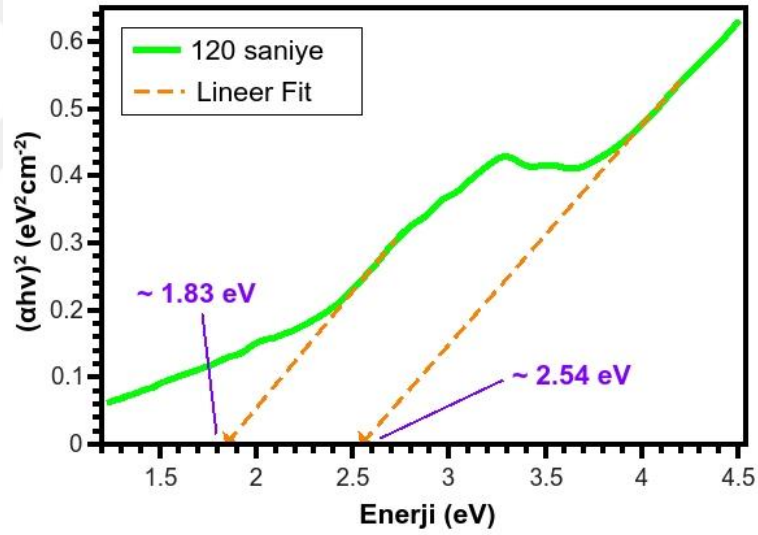
bant boşluğu olduğu görülmektedir. 30, 60, 120, 180 ve 240 saniye örneklerinde sırasıyla yasak bant boşlukları 1.74–1.95, 1.75–2.01, 1.83–2.54, 1.83–2.70 ve 1.79–2.78 eV olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, bant kıyılarından geçişleri ifade eden yasak bant boşluklarında büyük bir değişimin olmadığını ancak bantlar arası geçişleri ifade eden yasak bant boşluklarında bir artışın olduğunu göstermektedir. Bu aynı zamanda Şekil 4.32’de gösterilen soğurma spektrumundaki C/D piklerinin sola kaymasını da açıklamaktadır. Literatürde, birkaç nanometre boyutunda MoS<sub>2</sub> kuantum noktasının bant boşluğunun yaklaşık 1.9 eV olduğu bulunmuştur (Ahn vd., 2015). Bununla birlikte, elde edilen MoS<sub>2</sub> ince filmlerde 20 nm ile 200 nm arasında birçok küçük MoS<sub>2</sub> kristali tespit edilmiştir (Şekil 4.23–25). Bu nedenle, yasak bant boşluğunun MoS<sub>2</sub> ince filmlerindeki kuantum sınırlama etkisi nedeniyle artmadığı ve yasak bant boşluğundaki artışın, Mo-O ince film matrisi içindeki MoO<sub>2</sub> fazının varlığı nedeniyle katlanmış MoS<sub>2</sub> oluşumundan kaynaklandığı düşünülmüştür.



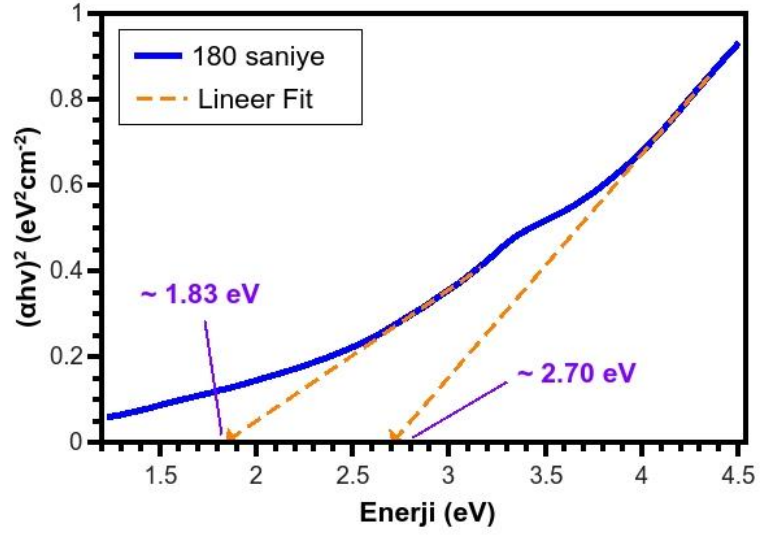
**Şekil 4.33.** 30 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (30 saniye örneği) Tauc-çizimi. Kalın çizgi Tauc eğrisini, kesik çizgiler eğrideki doğrusal parçalara teğeti göstermektedir.



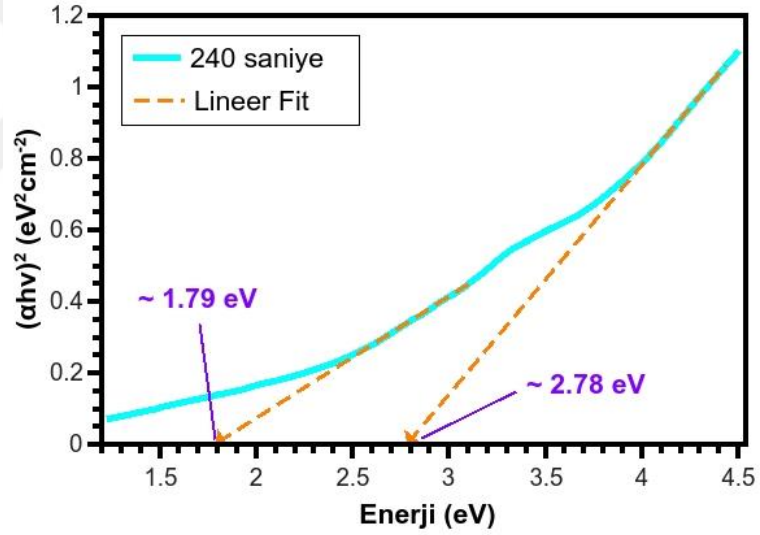
**Şekil 4.34.** 60 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (60 saniye örneği) Tauc-çizimi. Kalın çizgi Tauc eğrisini, kesikli çizgiler eğrideki doğrusal parçalara teğeti göstermektedir.



**Şekil 4.35.** 120 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (120 saniye örneği) Tauc-çizimi. Kalın çizgi Tauc eğrisini, kesikli çizgiler eğrideki doğrusal parçalara teğeti göstermektedir.



**Şekil 4.36.** 180 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (180 saniye örneği) Tauc-çizimi. Kalın çizgi Tauc eğrisini, kesikli çizgiler eğrideki doğrusal parçalara teğeti göstermektedir.



**Şekil 4.37.** 240 saniye süresince büyütülmüş Mo-O filmin sülfürizasyonu ile elde edilmiş MoS<sub>2</sub> filmin (240 saniye örneği) Tauc-çizimi. Kalın çizgi Tauc eğrisini, kesikli çizgiler eğrideki doğrusal parçalara teğeti göstermektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, farklı kalınlıklara sahip Mo-O ince filmleri, 30, 60, 120, 180 ve 240 saniye sürelerince 400 °C'de reaktif manyetik alana sıçratma yöntemi ile büyütülmüştür. Daha sonra düşük basınç altındaki CVD sisteminde sülfürizasyon işlemi ile MoS<sub>2</sub> ince filmlerine dönüştürülmüştür. XRD sonuçları MoO<sub>3</sub> fazının yanı sıra MoO<sub>2</sub> ve Mo<sub>4</sub>O<sub>11</sub> fazlarının da varlığını göstermiştir. Bunun nedeni, Mo-O ince film büyütme için seçilen 400 °C sıcaklığın Mo-O sistemi için faz geçiş sıcaklığı olmasıdır. Optik mikroskop görüntülerinde, nano boyutlu partiküllerin özellikle 180 ve 240 saniye sürelerince Mo-O büyütülmesi ile elde edilen MoS<sub>2</sub> filmlerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar SEM ve AFM ile de desteklenmiştir. AFM görüntülerinden elde edilen tanecik boyutlarına ilişkin histogramlar da Mo-O filmin büyütme süresinin artışı ile tanecik boyutlarında artış olduğunu doğrulamıştır. Raman ölçümleri çok katmanlı MoS<sub>2</sub> varlığını göstermesine rağmen, PL yoğunluklarındaki anormal artış gözlemlenmiştir ve bu durum literatürde belirtilen MoS<sub>2</sub>'nin katman kalınlığındaki artış ile birlikte PL şiddetlerindeki anormal düşüş ile tamamiyle zıtlık göstermektedir. Bu durum Mo-O ince filmin yapısında bulunan MoO<sub>2</sub> fazı ile ilişkilendirilmiştir. Mo-O ince filmin kalınlığı arttıkça film içerisindeki MoO<sub>2</sub> miktarı da artmaktadır. Bu da katlanmış MoS<sub>2</sub> yapılarının oluşumuna yol açmaktadır. İlave olarak MoO<sub>3</sub> yapısındaki oksijen de yapısal kusurlar meydana getirmektedir. Bu şekilde oluşan MoS<sub>2</sub> yapısı nispeten kalın olmasına karşın tek katmanlı MoS<sub>2</sub> gibi davranmıştır. Yine MoS<sub>2</sub> filmlerde iki yasak bant boşluğunun gözlenmiştir. Brillouin bölgesindeki K noktasında gözlenen ve bant kıyıları arası geçişi ifade eden bant boşluğunun bir kaç katmanlı MoS<sub>2</sub> bant boşluğu değerine yakın olduğu ve bu değer MoS<sub>2</sub>'nin kalınlığı ile bir ilişkisi olmadığı tespit edilmiştir. Öte yandan MoS<sub>2</sub> yapısındaki bantlar arasındaki geçişe atfedilen yasak bant boşluğunda ise MoS<sub>2</sub> kalınlığına bağlı olarak bir artış gözlenmiştir. Bu durum da yine MoO<sub>2</sub> yapısı ile ilişkilendirilmiştir. Filmlerin görünür bölgedeki düşük dalga boylarında yüksek soğurumu, yapısal olarak çok katmanlı olmasına rağmen, tek katmanlı bir MoS<sub>2</sub> gibi davrandığını kanıtlamaktadır. Sonuç olarak yapısal olarak çok katmanlı olduğu halde PL ve optik yasak bant boşluğu gibi bazı özellikleri itibari ile az katmanlı ve tek katmanlı MoS<sub>2</sub> ince filmler iki adımlı bu yöntemle başarıyla büyütülmüştür.

İki adımlı (manyetik alan sıçratma + CVD) yöntemle büyütülen MoS<sub>2</sub> ince filmler sahip oldukları yüksek yasak bant boşluğu, yüksek PL verimi, homojen ve büyük ölçekli olmasından dolayı optoelektronik aygıtlar için iyi bir aday olmaktadır.

Başlangıç öncülü olarak kullanılan Mo-O ince filmlerin büyüme sıcaklığı ve süreleri ayarlanarak farklı özelliklerde kullanışlı MoS<sub>2</sub> filmler yapmak mümkün olabilmektedir.



## 6. KAYNAKLAR

- Ahn, C., Lee, J., Kim, H. U., Bark, H., Jeon, M., Ryu, G. H., Lee, Z., Yeom, G. Y., Kim, K., Jung, J., Kim, Y., Lee, C., ve Kim, T. (2015). Low-temperature synthesis of large-scale molybdenum disulfide thin films directly on a plastic substrate using plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Advanced Materials*, 27(35), 5223–5229. <https://doi.org/10.1002/adma.201501678>
- Allain, A., ve Kis, A. (2014). Electron and hole mobilities in single-layer WSe<sub>2</sub>. *ACS Nano*, 8(7), 7180–7185. <https://doi.org/10.1021/nn5021538>
- Ataca, C., Şahin, H., ve Ciraci, S. (2012). Stable, single-layer MX<sub>2</sub> transition-metal oxides and dichalcogenides in a honeycomb-like structure. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(16), 8983–8999. <https://doi.org/10.1021/jp212558p>
- Balendhran, S., Ou, J. Z., Bhaskaran, M., Sriram, S., Ippolito, S., Vasic, Z., Kats, E., Bhargava, S., Zhuiykov, S., ve Kalantar-zadeh, K. (2012). Atomically thin layers of MoS<sub>2</sub> via a two step thermal evaporation–exfoliation method. *Nanoscale*, 4(2), 461–466. <https://doi.org/10.1039/C1NR10803D>
- Boscher, N D, Carmalt, C. J., Palgrave, R. G., Gil-Tomas, J. J., ve Parkin, I. P. (2006). Atmospheric pressure CVD of molybdenum diselenide films on glass. *Chemical Vapor Deposition*, 12(11), 692–698. <https://doi.org/10.1002/cvde.200606502>
- Boscher, Nicolas D, Blackman, C. S., Carmalt, C. J., Parkin, I. P., ve Prieto, A. G. (2007). Atmospheric pressure chemical vapour deposition of vanadium diselenide thin films. *Applied Surface Science*, 253(14), 6041–6046. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.01.002>
- Boscher, Nicolas D, Carmalt, C. J., ve Parkin, I. P. (2006). Atmospheric pressure chemical vapor deposition of WSe<sub>2</sub> thin films on glass-highly hydrophobic sticky surfaces. *J. Mater. Chem.*, 16(1), 122–127. <https://doi.org/10.1039/B514440J>
- Brivio, J., Alexander, D. T. L., ve Kis, A. (2011). Ripples and layers in ultrathin MoS<sub>2</sub> membranes. *Nano Letters*, 11(12), 5148–5153. <https://doi.org/10.1021/nl2022288>
- Browning, R., Padigi, P., Solanki, R., Tweet, D. J., Schuele, P., ve Evans, D. (2015). Atomic layer deposition of MoS<sub>2</sub> thin films. *Materials Research Express*, 2(3), 35006. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/2/3/035006>
- Buck, V. (1986). Structure and density of sputtered MoS<sub>2</sub>-films. *Vacuum*, 36(1), 89–94. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0042-207X\(86\)90277-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0042-207X(86)90277-0)
- Buscema, M., Barkelid, M., Zwiller, V., van der Zant, H. S. J., Steele, G. A., ve Castellanos-Gomez, A. (2013). Large and tunable photothermoelectric effect in single-layer MoS<sub>2</sub>. *Nano Letters*, 13(2), 358–363. <https://doi.org/10.1021/nl303321g>

- Cai, Y., Lan, J., Zhang, G., ve Zhang, Y.-W. (2014). Lattice vibrational modes and phonon thermal conductivity of monolayer MoS<sub>2</sub>. *Phys. Rev. B*, 89(3), 35438. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.035438>
- Carmalt, C. J., Parkin, I. P., ve Peters, E. S. (2003). Atmospheric pressure chemical vapour deposition of WS<sub>2</sub> thin films on glass. *Polyhedron*, 22(11), 1499–1505. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0277-5387\(03\)00194-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0277-5387(03)00194-3)
- Castellanos-Gomez, A., Poot, M., Steele, G. A., van der Zant, H. S. J., Agrait, N., ve Rubio-Bollinger, G. (2012). Elastic properties of freely suspended MoS<sub>2</sub> nanosheets. *Advanced Materials*, 24(6), 772–775. <https://doi.org/10.1002/adma.201103965>
- Chakraborty, B., Matte, H. S. S. R., Sood, A. K., ve Rao, C. N. R. (2013). Layer-dependent resonant Raman scattering of a few layer MoS<sub>2</sub>. *Journal of Raman Spectroscopy*, 44(1), 92–96. <https://doi.org/10.1002/jrs.4147>
- Cheiwchanchamngij, T., ve Lambrecht, W. R. L. (2012). Quasiparticle band structure calculation of monolayer, bilayer, and bulk MoS<sub>2</sub>. *Phys. Rev. B*, 85(20), 205302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.205302>
- Chhowalla, M., Shin, H. S., Eda, G., Li, L.-J., Loh, K. P., ve Zhang, H. (2013). The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nature Chemistry*, 5(4), 263–275. <https://doi.org/10.1038/nchem.1589>
- Christopher, J. W., Goldberg, B. B., ve Swan, A. K. (2017). Long tailed trions in monolayer MoS<sub>2</sub>: Temperature dependent asymmetry and resulting red-shift of trion photoluminescence spectra. *Scientific Reports*, 7(1), 14062. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14378-w>
- Coehoorn, R., Haas, C., ve de Groot, R. A. (1987). Electronic structure of MoSe<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub> and WSe<sub>2</sub>. II. The nature of the optical band gaps. *Phys. Rev. B*, 35(12), 6203–6206. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.35.6203>
- Coehoorn, R., Haas, C., Dijkstra, J., Flipse, C. J. F., de Groot, R. A., ve Wold, A. (1987). Electronic structure of MoSe<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub> and WSe<sub>2</sub>. I. Band-structure calculations and photoelectron spectroscopy. *Phys. Rev. B*, 35(12), 6195–6202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.35.6195>
- Colas, G., Saulot, A., Regis, E., ve Berthier, Y. (2015). Investigation of crystalline and amorphous MoS<sub>2</sub> based coatings: Towards developing new coatings for space applications. *Wear*, 330–331, 448–460. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.011>

- Coleman, J. N., Lotya, M., O'Neill, A., Bergin, S. D., King, P. J., Khan, U., Young, K., Gaucher, A., De, S., Smith, R. J., Shvets, I. V., Arora, S. K., Stanton, G., Kim, H.-Y., Lee, K., Kim, G. T., Duesberg, G. S., Hallam, T., Boland, J. J., Wang, J. J., Donegan, J. F., Grunlan, J. C., Moriarty, G., Shmeliov, A., Nicholls, R. J., Perkins, J. M., Grievson, E. M., Theuwissen, K., McComb, D. W., Nellist, P. D., ve Nicolosi, V. (2011). Two-Dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials. *Science*, 331(6017), 568–571. <https://doi.org/10.1126/science.1194975>
- Crowne, F. J., Amani, M., Birdwell, A. G., Chin, M. L., O'Regan, T. P., Najmaei, S., Liu, Z., Ajayan, P. M., Lou, J., ve Dubey, M. (2013). Blueshift of the A-exciton peak in folded monolayer 1H-MoS<sub>2</sub>. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 88(23), 1–7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.235302>
- Cui, X., Xu, Q., Ni, X., Zhang, Y., ve Qin, Y. (2018). Atomic-thick 2D MoS<sub>2</sub>/insulator interjection structures for enhancing nanogenerator output. *J. Mater. Chem. C*, 6(4), 899–906. <https://doi.org/10.1039/C7TC05458K>
- Dam, S., Thakur, A., G., A., ve Hussain, S. (2019). Synthesis and characterisation of MoS<sub>2</sub> thin films by electron beam evaporation. *Thin Solid Films*, 681, 78–85. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.04.041>
- Dang, J., Zhang, G. H., ve Chou, K. C. (2014). Phase transitions and morphology evolutions during hydrogen reduction of MoO<sub>3</sub> to MoO<sub>2</sub>. *High Temperature Materials and Processes*, 33(4), 305–312. <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0061>
- Ding, Y., Wang, Y., Ni, J., Shi, L., Shi, S., ve Tang, W. (2011). First principles study of structural, vibrational and electronic properties of graphene-like MX<sub>2</sub> (M=Mo, Nb, W, Ta; X=S, Se, Te) monolayers. *Physica B: Condensed Matter*, 406(11), 2254–2260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.03.044>
- Dong, H. M., Guo, S. D., Duan, Y. F., Huang, F., Xu, W., ve Zhang, J. (2018). Electronic and optical properties of single-layer MoS<sub>2</sub>. *Frontiers of Physics*, 13(4), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11467-018-0797-8>
- Dong, R., Guo, Z., Palmer, J., Hu, Y., Ruan, M., Hankinson, J., Kunc, J., Bhattacharya, S. K., Berger, C., ve de Heer, W. A. (2014). Wafer bonding solution to epitaxial graphene-silicon integration. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47(9), 94001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/9/094001>
- Doolen, R., Laitinen, R., Parsapour, F., ve Kelley, D. F. (1998). Trap state dynamics in MoS<sub>2</sub> nanoclusters. *Journal of Physical Chemistry B*, 102(20), 3906–3911. <https://doi.org/10.1021/jp9805252>
- Eda, G., Yamaguchi, H., Voiry, D., Fujita, T., Chen, M., ve Chhowalla, M. (2011). Photoluminescence from chemically exfoliated MoS<sub>2</sub>. *Nano Letters*, 11(12), 5111–5116. <https://doi.org/10.1021/nl201874w>

- Enyashin, A. N., Yadgarov, L., Houben, L., Popov, I., Weidenbach, M., Tenne, R., Bar-Sadan, M., ve Seifert, G. (2011). New Route for stabilization of 1T-WS<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub> Phases. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(50), 24586–24591. <https://doi.org/10.1021/jp2076325>
- Epifani, M., Imperatori, P., Mirengi, L., Schioppa, M., ve Siciliano, P. (2004). Synthesis and characterization of MoO<sub>3</sub> thin films and powders from a molybdenum chloromethoxide. *Chemistry of Materials*, 16(25), 5495–5501. <https://doi.org/10.1021/cm048997i>
- Feng, C., Ma, J., Li, H., Zeng, R., Guo, Z., ve Liu, H. (2009). Synthesis of molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) for lithium ion battery applications. *Materials Research Bulletin*, 44(9), 1811–1815. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2009.05.018>
- Frindt, R. F. (1966). Single crystals of MoS<sub>2</sub> several molecular layers thick. *Journal of Applied Physics*, 37(4), 1928–1929. <https://doi.org/10.1063/1.1708627>
- Gan, Z. X., Liu, L. Z., Wu, H. Y., Hao, Y. L., Shan, Y., Wu, X. L., ve Chu, P. K. (2015). Quantum confinement effects across two-dimensional planes in MoS<sub>2</sub> quantum dots. *Applied Physics Letters*, 106(23). <https://doi.org/10.1063/1.4922551>
- Ganatra, R., ve Zhang, Q. (2014). Few-layer MoS<sub>2</sub>: A promising layered semiconductor. *ACS Nano*, 8(5), 4074–4099. <https://doi.org/10.1021/nn405938z>
- Geim, A. K., ve Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- Ghayeb Zamharir, S., Karimzadeh, R., ve Aboutalebi, S. H. (2018). Laser-assisted tunable optical nonlinearity in liquid-phase exfoliated MoS<sub>2</sub> dispersion. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 124(10), 0. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2115-2>
- Gnanasekar, P., Periyagounder, D., Nallathambi, A., Subramani, S., Palanisamy, M., ve Kulandaivel, J. (2018). Promoter-free synthesis of monolayer MoS<sub>2</sub> by chemical vapour deposition. *CrystEngComm*, 20(30), 4249–4257. <https://doi.org/10.1039/c8ce00576a>
- Gołasa, K., Grzeszczyk, M., Korona, K. P., Bozek, R., Binder, J., Szczytko, J., Wyszmołek, A., ve Babiński, A. (2013). Optical properties of molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>). *Acta Physica Polonica A*, 124(5), 849–851. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.124.849>
- Goncalves, G., Marques, P. A. A. P., Granadeiro, C. M., Nogueira, H. I. S., Singh, M. K., ve Grácio, J. (2009). Surface modification of graphene nanosheets with gold nanoparticles: The role of oxygen moieties at graphene surface on gold nucleation and growth. *Chemistry of Materials*, 21(20), 4796–4802. <https://doi.org/10.1021/cm901052s>

- Guinea, F., Katsnelson, M. I., ve Geim, A. K. (2010). Energy gaps and a zero-field quantum Hall effect in graphene by strain engineering. *Nature Physics*, 6(1), 30–33. <https://doi.org/10.1038/nphys1420>
- Hofmann, W. K. (1988). Thin films of molybdenum and tungsten disulphides by metal organic chemical vapour deposition. *Journal of Materials Science*, 23(11), 3981–3986. <https://doi.org/10.1007/BF01106824>
- Hong, J., Hu, Z., Probert, M., Li, K., Lv, D., Yang, X., Gu, L., Mao, N., Feng, Q., Xie, L., Zhang, J., Wu, D., Zhang, Z., Jin, C., Ji, W., Zhang, X., Yuan, J., ve Zhang, Z. (2015). Exploring atomic defects in molybdenum disulphide monolayers. *Nature Communications*, 6(1), 6293. <https://doi.org/10.1038/ncomms7293>
- Huang, J. H., Chen, H. H., Liu, P. S., Lu, L. S., Wu, C. T., Chou, C. T., Lee, Y. J., Li, L. J., Chang, W. H., ve Hou, T. H. (2016). Large-area few-layer MoS<sub>2</sub> deposited by sputtering. *Materials Research Express*, 3(6), 1–7. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/3/6/065007>
- Hussain, S., Shehzad, M. A., Vikraman, D., Khan, M. F., Singh, J., Choi, D. C., Seo, Y., Eom, J., Lee, W. G., ve Jung, J. (2016). Synthesis and characterization of large-area and continuous MoS<sub>2</sub> atomic layers by RF magnetron sputtering. *Nanoscale*, 8(7), 4340–4347. <https://doi.org/10.1039/c5nr09032f>
- Ikram, M., Liu, L., Liu, Y., Ullah, M., Ma, L., Bakhtiar, S. U. H., Wu, H., Yu, H., Wang, R., ve Shi, K. (2019). Controllable synthesis of MoS<sub>2</sub>@MoO<sub>2</sub> nanonetworks for enhanced NO<sub>2</sub> room temperature sensing in air. *Nanoscale*, 11(17), 8554–8564. <https://doi.org/10.1039/c9nr00137a>
- Illyaskutty, N., Sreedhar, S., Sanal Kumar, G., Kohler, H., Schwotzer, M., Natzeck, C., ve Pillai, V. P. M. (2014). Alteration of architecture of MoO<sub>3</sub> nanostructures on arbitrary substrates: Growth kinetics, spectroscopic and gas sensing properties. *Nanoscale*, 6(22), 13882–13894. <https://doi.org/10.1039/c4nr04529g>
- Ishihara, S., Hibino, Y., Sawamoto, N., Suda, K., Ohashi, T., Matsuura, K., Machida, H., Ishikawa, M., Sudoh, H., Wakabayashi, H., ve Ogura, A. (2016). Properties of single-layer MoS<sub>2</sub> film fabricated by combination of sputtering deposition and post deposition sulfurization annealing using (t-C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>. *Japanese Journal of Applied Physics*, 55(6). <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.06GF01>
- Jang, Y., Yeo, S., Lee, H.-B.-R., Kim, H., ve Kim, S.-H. (2016). Wafer-scale, conformal and direct growth of MoS<sub>2</sub> thin films by atomic layer deposition. *Applied Surface Science*, 365, 160–165. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.038>
- Jeon, J., Jang, S. K., Jeon, S. M., Yoo, G., Jang, Y. H., Park, J.-H., ve Lee, S. (2015). Layer-controlled CVD growth of large-area two-dimensional MoS<sub>2</sub> films. *Nanoscale*, 7(5), 1688–1695. <https://doi.org/10.1039/C4NR04532G>

- Jeon, P. J., Kim, J. S., Lim, J. Y., Cho, Y., Pezeshki, A., Lee, H. S., Yu, S., Min, S. W., ve Im, S. (2015). Low power consumption complementary inverters with n-MoS<sub>2</sub> and p-WSe<sub>2</sub> dichalcogenide nanosheets on glass for logic and Light-Emitting Diode circuits. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7(40), 22333–22340. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b06027>
- Jian, J., Chang, H., ve Xu, T. (2019). Structure and properties of single-layer MoS<sub>2</sub> for nano-photoelectric devices. *Materials*, 12(2), 1–10. <https://doi.org/10.3390/ma12020198>
- Jiang, J.-W., Park, H. S., ve Rabczuk, T. (2013). Molecular dynamics simulations of single-layer molybdenum disulphide (MoS<sub>2</sub>): Stillinger-Weber parametrization, mechanical properties, and thermal conductivity. *Journal of Applied Physics*, 114(6), 64307. <https://doi.org/10.1063/1.4818414>
- Jiang, T., Liu, H., Huang, D., Zhang, S., Li, Y., Gong, X., Shen, Y. R., Liu, W. T., ve Wu, S. (2014). Valley and band structure engineering of folded MoS<sub>2</sub> bilayers. *Nature Nanotechnology*, 9(10), 825–829. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.176>
- Joensen, P., Frindt, R. F., ve Morrison, S. R. (1986). Single-layer MoS<sub>2</sub>. *Materials Research Bulletin*, 21(4), 457–461. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-5408\(86\)90011-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-5408(86)90011-5)
- Johari, P., ve Shenoy, V. B. (2012). Tuning the electronic properties of semiconducting transition metal dichalcogenides by applying mechanical strains. *ACS Nano*, 6(6), 5449–5456. <https://doi.org/10.1021/nn301320r>
- Kam, K. K., ve Parkinson, B. A. (1982). Detailed photocurrent spectroscopy of the semiconducting group VIB transition metal dichalcogenides. *The Journal of Physical Chemistry*, 86(4), 463–467. <https://doi.org/10.1021/j100393a010>
- King, L. A., Zhao, W., Chhowalla, M., Riley, D. J., ve Eda, G. (2013). Photoelectrochemical properties of chemically exfoliated MoS<sub>2</sub>. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(31), 8935–8941. <https://doi.org/10.1039/c3ta11633f>
- Kobayashi, K., ve Yamauchi, J. (1995). Electronic structure and scanning-tunneling-microscopy image of molybdenum dichalcogenide surfaces. *Phys. Rev. B*, 51(23), 17085–17095. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.17085>
- Kolobov, A. V., ve Tominaga, J. (n.d.). Springer Series in Materials Science 239 Two-Dimensional Transition-Metal Dichalcogenides. <http://www.springer.com/series/856>
- Kuc, A., Zibouche, N., ve Heine, T. (2011). Influence of quantum confinement on the electronic structure of the transition metal sulfide TS<sub>2</sub>. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 83(24), 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.83.245213>
- Kumar, A., ve Ahluwalia, P. K. (2012). A first principle comparative study of electronic and optical properties of 1H - MoS<sub>2</sub> and 2H - MoS<sub>2</sub>. *Materials Chemistry and Physics*, 135(2–3), 755–761. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.05.055>

- Kumar, A., ve Ahluwalia, P. K. (2013). Mechanical strain dependent electronic and dielectric properties of two-dimensional honeycomb structures of MoX<sub>2</sub> (X=S, Se, Te). *Physica B: Condensed Matter*, 419, 66–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physb.2013.03.029>
- Kumar, N., Tomar, R., Wadehra, N., Devi, M. M., Prakash, B., ve Chakraverty, S. (2018). Growth of highly crystalline and large scale monolayer MoS<sub>2</sub> by CVD: The role of substrate position. *Crystal Research and Technology*, 53(6), 1800002. <https://doi.org/10.1002/crat.201800002>
- Ky, D. L. C., Tran Khac, B. C., Le, C. T., Kim, Y. S., ve Chung, K. H. (2018). Friction characteristics of mechanically exfoliated and CVD-grown single-layer MoS<sub>2</sub>. *Friction*, 6(4), 395–406. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0172-8>
- Laskar, M. R., Ma, L., Kannappan, S., Sung Park, P., Krishnamoorthy, S., Nath, D. N., Lu, W., Wu, Y., ve Rajan, S. (2013). Large area single crystal (0001) oriented MoS<sub>2</sub>. *Applied Physics Letters*, 102(25), 252108. <https://doi.org/10.1063/1.4811410>
- Late, D. J., Shaikh, P. A., Khare, R., Kashid, R. V., Chaudhary, M., More, M. A., ve Ogale, S. B. (2014). Pulsed laser-deposited MoS<sub>2</sub> thin films on W and Si: Field emission and photoresponse studies. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 6(18), 15881–15888. <https://doi.org/10.1021/am503464h>
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., ve Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385–388. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>
- Lee, J.-H., Lee, E. K., Joo, W.-J., Jang, Y., Kim, B.-S., Lim, J. Y., Choi, S.-H., Ahn, S. J., Ahn, J. R., Park, M.-H., Yang, C.-W., Choi, B. L., Hwang, S.-W., ve Whang, D. (2014). Wafer-scale growth of single-crystal monolayer graphene on reusable hydrogen-terminated germanium. *Science*, 344(6181), 286–289. <https://doi.org/10.1126/science.1252268>
- Lee, Y.-H., Zhang, X.-Q., Zhang, W., Chang, M.-T., Lin, C.-T., Chang, K.-D., Yu, Y.-C., Wang, J. T.-W., Chang, C.-S., Li, L.-J., ve Lin, T.-W. (2012). Synthesis of large-area MoS<sub>2</sub> atomic layers with chemical vapor deposition. *Advanced Materials*, 24(17), 2320–2325. <https://doi.org/10.1002/adma.201104798>
- Li, D., Xiao, Z., Golgir, H. R., Jiang, L., Singh, V. R., Keramatnejad, K., Smith, K. E., Hong, X., Jiang, L., Silvain, J. F., ve Lu, Y. (2017). Large-area 2D/3D MoS<sub>2</sub>–MoO<sub>2</sub> heterostructures with thermally stable exciton and intriguing electrical transport behaviors. *Advanced Electronic Materials*, 3(7). <https://doi.org/10.1002/aelm.201600335>
- Li, H., Zhang, Q., Yap, C. C. R., Tay, B. K., Edwin, T. H. T., Olivier, A., ve Baillargeat, D. (2012). From bulk to monolayer MoS<sub>2</sub>: Evolution of Raman scattering. *Advanced Functional Materials*, 22(7), 1385–1390. <https://doi.org/10.1002/adfm.201102111>

- Li, T., ve Galli, G. (2007). Electronic Properties of MoS<sub>2</sub> Nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(44), 16192–16196. <https://doi.org/10.1021/jp075424v>
- Li, W., Zhang, Y., Long, X., Cao, J., Xin, X., Guan, X., Peng, J., ve Zheng, X. (2019). Gas sensors based on mechanically exfoliated MoS<sub>2</sub> nanosheets for room-temperature NO<sub>2</sub> detection. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(9), 1–12. <https://doi.org/10.3390/s19092123>
- Li, X., ve Zhu, H. (2015). Two-dimensional MoS<sub>2</sub>: Properties, preparation, and applications. *Journal of Materiomics*, 1(1), 33–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmat.2015.03.003>
- Li, Y., Wang, H., Xie, L., Liang, Y., Hong, G., ve Dai, H. (2011). MoS<sub>2</sub> Nanoparticles grown on graphene: An advanced catalyst for the hydrogen evolution reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 133(19), 7296–7299. <https://doi.org/10.1021/ja201269b>
- Lin, H., Wang, C., Wu, J., Xu, Z., Huang, Y., ve Zhang, C. (2015). Colloidal synthesis of MoS<sub>2</sub> quantum dots: size-dependent tunable photoluminescence and bioimaging. *New J. Chem.*, 39(11), 8492–8497. <https://doi.org/10.1039/C5NJ01698C>
- Lince, J. R., Hilton, M. R., ve Bommannavar, A. S. (1990). Oxygen substitution in sputter-deposited MoS<sub>2</sub> films studied by extended X-ray absorption fine structure, X-ray photoelectron spectroscopy and X-ray diffraction. *Surface and Coatings Technology*, 43–44(PART 2), 640–651. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(90\)90008-Z](https://doi.org/10.1016/0257-8972(90)90008-Z)
- Ling, X., Lee, Y.-H., Lin, Y., Fang, W., Yu, L., Dresselhaus, M. S., ve Kong, J. (2014). Role of the seeding promoter in MoS<sub>2</sub> growth by chemical vapor deposition. *Nano Letters*, 14(2), 464–472. <https://doi.org/10.1021/nl4033704>
- Liu, B., Chen, L., Liu, G., Abbas, A. N., Fathi, M., ve Zhou, C. (2014). High-performance chemical sensing using Schottky-contacted chemical vapor deposition grown monolayer MoS<sub>2</sub> transistors. *ACS Nano*, 8(5), 5304–5314. <https://doi.org/10.1021/nn5015215>
- Liu, H. F., Wong, S. L., ve Chi, D. Z. (2015). CVD growth of MoS<sub>2</sub>-based two-dimensional materials. *Chemical Vapor Deposition*, 21(10-11-12), 241–259. <https://doi.org/10.1002/cvde.201500060>
- Liu, K.-K., Zhang, W., Lee, Y.-H., Lin, Y.-C., Chang, M.-T., Su, C.-Y., Chang, C.-S., Li, H., Shi, Y., Zhang, H., Lai, C.-S., ve Li, L.-J. (2012). Growth of large-area and highly crystalline MoS<sub>2</sub> thin layers on insulating substrates. *Nano Letters*, 12(3), 1538–1544. <https://doi.org/10.1021/nl2043612>
- Liu, Lei, Huang, Y., Sha, J., ve Chen, Y. (2017). Layer-controlled precise fabrication of ultrathin MoS<sub>2</sub> films by atomic layer deposition. *Nanotechnology*, 28(19), 195605. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa6827>

- Liu, Leitao, Kumar, S. B., Ouyang, Y., ve Guo, J. (2011). Performance limits of monolayer transition metal dichalcogenide transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58(9), 3042–3047. <https://doi.org/10.1109/TED.2011.2159221>
- Liu, X., Zhang, G., Pei, Q.-X., ve Zhang, Y.-W. (2013). Phonon thermal conductivity of monolayer MoS<sub>2</sub> sheet and nanoribbons. *Applied Physics Letters*, 103(13), 133113. <https://doi.org/10.1063/1.4823509>
- Liu, X., Zhang, G., ve Zhang, Y.-W. (2015). Graphene-based thermal modulators. *Nano Research*, 8(8), 2755–2762. <https://doi.org/10.1007/s12274-015-0782-2>
- Loh, T. A. J., ve Chua, D. H. C. (2014). Growth mechanism of pulsed laser fabricated few-layer MoS<sub>2</sub> on metal substrates. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 6(18), 15966–15971. <https://doi.org/10.1021/am503719b>
- López-Posadas, C. B., Wei, Y., Shen, W., Kahr, D., Hohage, M., ve Sun, L. (2019). Direct observation of the CVD growth of monolayer MoS<sub>2</sub> using in situ optical spectroscopy. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 10(Cvd), 557–564. <https://doi.org/10.3762/BJNANO.10.57>
- Ma, X., ve Shi, M. (2013). Thermal evaporation deposition of few-layer MoS<sub>2</sub> films. *Nano-Micro Letters*, 5(2), 135–139. <https://doi.org/10.5101/nml.v5i2.p135-139>
- Mak, K. F., Lee, C., Hone, J., Shan, J., ve Heinz, T. F. (2010). Atomically thin MoS<sub>2</sub>: A new direct-gap semiconductor. *Physical Review Letters*, 105(13), 2–5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.136805>
- Matsuura, K., Ohashi, T., Muneta, I., Ishihara, S., Kakushima, K., Tsutsui, K., Ogura, A., ve Wakabayashi, H. (2018). Low-carrier-density sputtered MoS<sub>2</sub> film by vapor-phase sulfurization. *Journal of Electronic Materials*, 47(7), 3497–3501. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6191-z>
- Mattheiss, L. F. (1973). Energy Bands for 2H-NbSe<sub>2</sub> and 2H-MoS<sub>2</sub>. *Phys. Rev. Lett.*, 30(17), 784–787. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.30.784>
- Mattinen, M., Hatanpää, T., Sarnet, T., Mizohata, K., Meinander, K., King, P. J., Khriachtchev, L., Räisänen, J., Ritala, M., ve Leskelä, M. (2017). Atomic layer deposition of crystalline MoS<sub>2</sub> thin films: New molybdenum precursor for low-temperature film growth. *Advanced Materials Interfaces*, 4(18), 1–11. <https://doi.org/10.1002/admi.201700123>
- McCreary, K. M., Hanbicki, A. T., Robinson, J. T., Cobas, E., Culbertson, J. C., Friedman, A. L., Jernigan, G. G., ve Jonker, B. T. (2014). Large-area synthesis of continuous and uniform MoS<sub>2</sub> monolayer films on graphene. *Advanced Functional Materials*, 24(41), 6449–6454. <https://doi.org/10.1002/adfm.201401511>
- Miller, D. A. B., Chemla, D. S., ve Schmitt-Rink, S. (1986). Relation between electroabsorption in bulk semiconductors and in quantum wells: The quantum-confined Franz-Keldysh effect. *Phys. Rev. B*, 33(10), 6976–6982. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.33.6976>

- Moser, J., ve Lévy, F. (1992). Growth mechanisms and near-interface structure in relation to orientation of MoS<sub>2</sub> sputtered thin films. *Journal of Materials Research*, 7(3), 734–740. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.0734>
- Moser, J., ve Lévy, F. (1993). Crystal reorientation and wear mechanisms in MoS<sub>2</sub> lubricating thin films investigated by TEM. *Journal of Materials Research*, 8(1), 206–213. <https://doi.org/10.1017/S0884291400120539>
- Moser, J., ve Lévy, F. (1994). Random stacking in MoS<sub>2-x</sub> sputtered thin films. *Thin Solid Films*, 240(1), 56–59. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090\(94\)90693-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090(94)90693-9)
- Muratore, C., Hu, J. J., Wang, B., Haque, M. A., Bultman, J. E., Jespersen, M. L., Shamberger, P. J., McConney, M. E., Naguy, R. D., ve Voevodin, A. A. (2014). Continuous ultra-thin MoS<sub>2</sub> ve films grown by low-temperature physical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 104(26), 261604. <https://doi.org/10.1063/1.4885391>
- Muratore, C., ve Voevodin, A. A. (2009). Control of molybdenum disulfide basal plane orientation during coating growth in pulsed magnetron sputtering discharges. *Thin Solid Films*, 517(19), 5605–5610. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.01.190>
- Najmaei, S., Liu, Z., Zhou, W., Zou, X., Shi, G., Lei, S., Yakobson, B. I., Idrobo, J.-C., Ajayan, P. M., ve Lou, J. (2013). Vapour phase growth and grain boundary structure of molybdenum disulphide atomic layers. *Nature Materials*, 12(8), 754–759. <https://doi.org/10.1038/nmat3673>
- Nicolosi, V., Chhowalla, M., Kanatzidis, M. G., Strano, M. S., ve Coleman, J. N. (2013). Liquid exfoliation of layered materials. *Science*, 340(6139). <https://doi.org/10.1126/science.1226419>
- Novoselov, K. S., Fal'ko, V. I., Colombo, L., Gellert, P. R., Schwab, M. G., ve Kim, K. (2012). A roadmap for graphene. *Nature*, 490(7419), 192–200. <https://doi.org/10.1038/nature11458>
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V, Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I. V, Dubonos, S. V, ve Firsov, A. A. (2005). Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 438(7065), 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature04233>
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V, Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V, Grigorieva, I. V, ve Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- Novoselov, K. S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T. J., Khotkevich, V. V, Morozov, S. V, ve Geim, A. K. (2005). Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), 10451–10453. <https://doi.org/10.1073/pnas.0502848102>

- Novoselov, K. S., Mishchenko, A., Carvalho, A., ve Castro Neto, A. H. (2016). 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*, 353(6298). <https://doi.org/10.1126/science.aac9439>
- Ovchinnikov, D., Allain, A., Huang, Y., Dumcenco, D., Kis, A., Federale, E. P., ve Engineering, E. (2014). Electrical transport properties of single-layer WS<sub>2</sub>. *ACS Nano*. 8, 8174–8181. <https://doi.org/10.1021/nm502362b>
- Özden, A., Ay, F., Sevik, C., ve Perkgöz, N. K. (2017). CVD growth of monolayer MoS<sub>2</sub>: Role of growth zone configuration and precursors ratio. *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(6S1), 06GG05. <https://doi.org/10.7567/jjap.56.06gg05>
- Özküçük, G. U., Odacı, C., Şahin, E., Ay, F., ve Perkgöz, N. K. (2020). Glass-assisted CVD growth of large-area MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> and MoSe<sub>2</sub> monolayers on Si/SiO<sub>2</sub> substrate. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 105, 104679. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104679>
- Pacley, S., Hu, J., Jespersen, M., Hilton, A., Waite, A., Brausch, J., Beck-Millerton, E., ve Voevodin, A. A. (2016). Impact of reduced graphene oxide on MoS<sub>2</sub> grown by sulfurization of sputtered MoO<sub>3</sub> and Mo precursor films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 34(4), 041505. <https://doi.org/10.1116/1.4952399>
- Park, W., Park, J., Jang, J., Lee, H., Jeong, H., Cho, K., Hong, S., ve Lee, T. (2013). Oxygen environmental and passivation effects on molybdenum disulfide field effect transistors. *Nanotechnology*, 24(9). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/9/095202>
- Peng, Y., Meng, Z., Zhong, C., Lu, J., Yu, W., Jia, Y., ve Qian, Y. (2001). Hydrothermal synthesis and characterization of single-molecular-layer MoS<sub>2</sub> and MoSe<sub>2</sub>. *Chemistry Letters*, 30(8), 772–773. <https://doi.org/10.1246/cl.2001.772>
- Perkgoz, N. K., ve Bay, M. (2016). Investigation of single-wall MoS<sub>2</sub> monolayer flakes grown by chemical vapor deposition. *Nano-Micro Letters*, 8(1), 70–79. <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0064-2>
- Perumal Veeramalai, C., Li, F., Guo, T., ve Kim, T. W. (2019). Highly flexible memristive devices based on MoS<sub>2</sub> quantum dots sandwiched between PMSSQ layers. *Dalton Transactions*, 48(7), 2422–2429. <https://doi.org/10.1039/c8dt04593c>
- Peters, E. S., Carmalt, C. J., ve Parkin, I. P. (2004). Dual-source chemical vapour deposition of titanium sulfide thin films from tetrakisdimethylamidotitanium and sulfur precursors. *J. Mater. Chem.*, 14(23), 3474–3477. <https://doi.org/10.1039/B410390D>
- Pietrzyk, B., Miszczak, S., Kaczmarek, Ł., ve Klich, M. (2018). Low friction nanocomposite aluminum oxide/MoS<sub>2</sub> coatings prepared by sol-gel method. *Ceramics International*, 44(7), 8534–8539. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.055>

- Pop, E. (2010). Energy dissipation and transport in nanoscale devices. *Nano Research*, 3(3), 147–169. <https://doi.org/10.1007/s12274-010-1019-z>
- Pu, J., Yomogida, Y., Liu, K.-K., Li, L.-J., Iwasa, Y., ve Takenobu, T. (2012). Highly flexible MoS<sub>2</sub> thin-film transistors with ion gel dielectrics. *Nano Letters*, 12(8), 4013–4017. <https://doi.org/10.1021/nl301335q>
- Radisavljevic, B., Radenovic, A., Brivio, J., Giacometti, V., ve Kis, A. (2011). Single-layer MoS<sub>2</sub> transistors. *Nature Nanotechnology*, 6(3), 147–150. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.279>
- Ramasubramaniam, A. (2012). Large excitonic effects in monolayers of molybdenum and tungsten dichalcogenides. *Phys. Rev. B*, 86(11), 115409. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.115409>
- Rong, Y., Fan, Y., Leen Koh, A., Robertson, A. W., He, K., Wang, S., Tan, H., Sinclair, R., ve Warner, J. H. (2014). Controlling sulphur precursor addition for large single crystal domains of WS<sub>2</sub>. *Nanoscale*, 6(20), 12096–12103. <https://doi.org/10.1039/C4NR04091K>
- S. Sundaram, R., Engel, M., Lombardo, A., Krupke, R., C. Ferrari, A., Avouris, P., ve Steiner, M. (2013). Electroluminescence in single layer MoS<sub>2</sub>. *Nano Letters*, 13(4), 1416–1421. <https://doi.org/10.1021/nl400516a>
- Sangwan, V. K., ve Hersam, M. C. (2018). Electronic transport in two-dimensional materials. *Annual review of physical chemistry*, 69, 299–325. <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-050317-021353>
- Scalise, E., Houssa, M., Pourtois, G., Afanas'ev, V., ve Stesmans, A. (2012). Strain-induced semiconductor to metal transition in the two-dimensional honeycomb structure of MoS<sub>2</sub>. *Nano Research*, 5(1), 43–48. <https://doi.org/10.1007/s12274-011-0183-0>
- Sen, U. K., ve Mitra, S. (2014). Synthesis of molybdenum oxides and their electrochemical properties against Li. *Energy Procedia*, 54(August), 740–747. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.315>
- Serrao, C. R., Diamond, A. M., Hsu, S. L., You, L., Gadgil, S., Clarkson, J., Carraro, C., Maboudian, R., Hu, C., ve Salahuddin, S. (2015). Highly crystalline MoS<sub>2</sub> thin films grown by pulsed laser deposition. *Applied Physics Letters*, 106(5), 3–7. <https://doi.org/10.1063/1.4907169>
- Shanmugam, M., Durcan, C. A., ve Yu, B. (2012). Layered semiconductor molybdenum disulfide nanomembrane based Schottky-barrier solar cells. *Nanoscale*, 4(23), 7399–7405. <https://doi.org/10.1039/c2nr32394j>
- Shen, Y. R. (1974). Distinction between resonant Raman scattering and hot fluorescence. *Physical Review B*, 9(2), 622–626. <http://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.9.622>

- Shi, H., Pan, H., Zhang, Y.-W., ve Yakobson, B. I. (2013). Quasiparticle band structures and optical properties of strained monolayer MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub>. *Phys. Rev. B*, 87(15), 155304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.155304>
- Shim, G. W., Yoo, K., Seo, S. B., Shin, J., Jung, D. Y., Kang, I. S., Ahn, C. W., Cho, B. J., ve Choi, S. Y. (2014). Large-area single-layer MoSe<sub>2</sub> and its van der Waals heterostructures. *ACS Nano*, 8(7), 6655–6662. <https://doi.org/10.1021/nn405685j>
- Sivarajan, S., ve Padmanabhan, R. (2016). Characterization of thermally evaporated MoS<sub>2</sub> thin film coatings. *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 2532–2536. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.172>
- Spalvins, T. (1980). Tribological properties of sputtered MoS<sub>2</sub> films in relation to film morphology. *Thin Solid Films*, 73(2), 291–297. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090\(80\)90492-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090(80)90492-7)
- Spirko, J. A., Neiman, M. L., Oelker, A. M., ve Klier, K. (2003). Electronic structure and reactivity of defect MoS<sub>2</sub>: I. Relative stabilities of clusters and edges, and electronic surface states. *Surface Science*, 542(3), 192–204. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(03\)00957-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-6028(03)00957-9)
- Splendiani, A., Sun, L., Zhang, Y., Li, T., Kim, J., Chim, C. Y., Galli, G., ve Wang, F. (2010). Emerging photoluminescence in monolayer MoS<sub>2</sub>. *Nano Letters*, 10(4), 1271–1275. <https://doi.org/10.1021/nl903868w>
- Tang, W., Rassay, S. S., ve Ravindra, N. M. (2017). Electronic & optical properties of transition-metal dichalcogenides. *Madridge Journal of Nanotechnology & Nanoscience*, 2(1), 58–64. <https://doi.org/10.18689/mjnn-1000111>
- Tao, J., Chai, J., Lu, X., Wong, L. M., Wong, T. I., Pan, J., Xiong, Q., Chi, D., ve Wang, S. (2015). Growth of wafer-scale MoS<sub>2</sub> monolayer by magnetron sputtering. *Nanoscale*, 7(6), 2497–2503. <https://doi.org/10.1039/c4nr06411a>
- Tao, L., Chen, K., Chen, Z., Chen, W., Gui, X., Chen, H., Li, X., ve Xu, J. Bin. (2017). Centimeter-scale CVD growth of highly crystalline single-layer MoS<sub>2</sub> film with spatial homogeneity and the visualization of grain boundaries. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(13), 12073–12081. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b00420>
- Taube, A., Judek, J., Łapińska, A., ve Zdrojek, M. (2015). Temperature-dependent thermal properties of supported MoS<sub>2</sub> monolayers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(9), 5061–5065. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b00690>
- Tauc, J., Grigorovici, R., ve Vancu, A. (1966). Optical properties and electronic structure of amorphous germanium. *Physica Status Solidi (B)*, 15(2), 627–637. <https://doi.org/10.1002/pssb.19660150224>
- Tian, C., Wu, J., Ma, Z., Li, B., Li, P., Zu, X., ve Xiang, X. (2019). Design and facile synthesis of defect-rich C-MoS<sub>2</sub>/rGO nanosheets for enhanced lithium-sulfur battery performance. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 10, 2251–2260. <https://doi.org/10.3762/bjnano.10.217>

- Topsakal, M., Cahangirov, S., Bekaroglu, E., ve Ciraci, S. (2009). First-principles study of zinc oxide honeycomb structures. *Phys. Rev. B*, 80(23), 235119. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.235119>
- Tumino, F., Casari, C. S., Passoni, M., Russo, V., ve Li Bassi, A. (2019). Pulsed laser deposition of single-layer MoS<sub>2</sub> on Au(111): from nanosized crystals to large-area films. *Nanoscale Adv.*, 1(2), 643–655. <https://doi.org/10.1039/C8NA00126J>
- van der Zande, A. M., Huang, P. Y., Chenet, D. A., Berkelbach, T. C., You, Y., Lee, G.-H., Heinz, T. F., Reichman, D. R., Muller, D. A., ve Hone, J. C. (2013). Grains and grain boundaries in highly crystalline monolayer molybdenum disulphide. *Nature Materials*, 12(6), 554–561. <https://doi.org/10.1038/nmat3633>
- Voiry, D., Salehi, M., Silva, R., Fujita, T., Chen, M., Asefa, T., Shenoy, V. B., Eda, G., ve Chhowalla, M. (2013). Conducting MoS<sub>2</sub> nanosheets as catalysts for hydrogen evolution reaction. *Nano Letters*, 13(12), 6222–6227. <https://doi.org/10.1021/nl403661s>
- Wang, L., Zhang, G. H., ve Chou, K. C. (2016). Study on oxidation mechanism and kinetics of MoO<sub>2</sub> to MoO<sub>3</sub> in air atmosphere. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 57, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.03.001>
- Wang, Q. H., Kalantar-Zadeh, K., Kis, A., Coleman, J. N., ve Strano, M. S. (2012). Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nature Nanotechnology*, 7(11), 699–712. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.193>
- Wang, X., Feng, H., Wu, Y., ve Jiao, L. (2013). Controlled Synthesis of Highly Crystalline MoS<sub>2</sub> Flakes by Chemical Vapor Deposition. *Journal of the American Chemical Society*, 135(14), 5304–5307. <https://doi.org/10.1021/ja4013485>
- Wei, R., Yang, H., Du, K., Fu, W., Li, M., Yu, Q., Chang, L., Zeng, Y., Sui, Y., Zhu, H., ve Zou, G. (2007). Preparation of type-II MoS<sub>2</sub> film by chemical bath deposition onto Si coated with electrolessly Ni. *Materials Science and Engineering: B*, 138(3), 259–262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.01.024>
- Wenzhuo, W. (2016). Piezotronics in 2D Piezoelectric Semiconductors. <https://nanohub.org/resources/23882>
- Wilson, J. A., ve Yoffe, A. D. (1969). The transition metal dichalcogenides discussion and interpretation of the observed optical, electrical and structural properties. *Advances in Physics*, 18(73), 193–335. <https://doi.org/10.1080/00018736900101307>
- Wu, S., Huang, C., Aivazian, G., Ross, J. S., Cobden, D. H., ve Xu, X. (2013). Vapor-solid growth of high optical quality MoS<sub>2</sub> monolayers with near-unity valley polarization. *ACS Nano*, 7(3), 2768–2772. <https://doi.org/10.1021/nn4002038>

- Wu, X., Yang, N., ve Luo, T. (2015). Unusual isotope effect on thermal transport of single layer molybdenum disulphide. *Applied Physics Letters*, 107(19), 191907. <https://doi.org/10.1063/1.4935603>
- Xie, X., Makaryan, T., Zhao, M., Van Aken, K. L., Gogotsi, Y., ve Wang, G. (2016). MoS<sub>2</sub> nanosheets vertically aligned on carbon paper: A Freestanding electrode for highly reversible sodium-ion batteries. *Advanced Energy Materials*, 6(5), 1502161. <https://doi.org/10.1002/aenm.201502161>
- Xiong, F., Wang, H., Liu, X., Sun, J., Brongersma, M., Pop, E., ve Cui, Y. (2015). Li intercalation in MoS<sub>2</sub>: In-situ observation of its dynamics and tuning optical and electrical properties. *Nano Letters*, 15(10), 6777–6784. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02619>
- Xu, X., Yao, W., Xiao, D., ve Heinz, T. F. (2014). Spin and pseudospins in layered transition metal dichalcogenides. *Nature Physics*, 10(5), 343–350. <https://doi.org/10.1038/nphys2942>
- Xue, Y., Zhang, Q., Wang, W., Cao, H., Yang, Q., ve Fu, L. (2017). Opening two-dimensional materials for energy conversion and storage: A Concept. *Advanced Energy Materials*, 7(19), 1602684. <https://doi.org/10.1002/aenm.201602684>
- Yan, R., Simpson, J. R., Bertolazzi, S., Brivio, J., Watson, M., Wu, X., Kis, A., Luo, T., Hight Walker, A. R., ve Xing, H. G. (2014). Thermal conductivity of monolayer molybdenum disulfide obtained from temperature-dependent Raman spectroscopy. *ACS Nano*, 8(1), 986–993. <https://doi.org/10.1021/nn405826k>
- Yu, X.-Y., Hu, H., Wang, Y., Chen, H., ve Lou, X. W. (David). (2015). Ultrathin MoS<sub>2</sub> nanosheets supported on N-doped carbon nanoboxes with enhanced lithium storage and electrocatalytic properties. *Angewandte Chemie International Edition*, 54(25), 7395–7398. <https://doi.org/10.1002/anie.201502117>
- Yue, Q., Kang, J., Shao, Z., Zhang, X., Chang, S., Wang, G., Qin, S., ve Li, J. (2012). Mechanical and electronic properties of monolayer MoS<sub>2</sub> under elastic strain. *Physics Letters A*, 376(12), 1166–1170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physleta.2012.02.029>
- Yun, Q., Lu, Q., Zhang, X., Tan, C., ve Zhang, H. (2018). Three-dimensional architectures constructed from transition-metal dichalcogenide nanomaterials for electrochemical energy storage and conversion. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(3), 626–646. <https://doi.org/10.1002/anie.201706426>
- Yun, W. S., Han, S. W., Hong, S. C., Kim, I. G., ve Lee, J. D. (2012). Thickness and strain effects on electronic structures of transition metal dichalcogenides: 2H-MX<sub>2</sub> semiconductors (M=Mo, W; X=S, Se, Te). *Phys. Rev. B*, 85(3), 33305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.033305>
- Zeng, M., Xiao, Y., Liu, J., Yang, K., ve Fu, L. (2018). Exploring two-dimensional materials toward the next-generation circuits: From monomer design to assembly control [Review-article]. *Chemical Reviews*, 118(13), 6236–6296. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00633>

- Zhan, Y., Liu, Z., Najmaei, S., Ajayan, P. M., ve Lou, J. (2012). Large-area vapor-phase growth and characterization of MoS<sub>2</sub> atomic layers on a SiO<sub>2</sub> substrate. *Small*, 8(7), 966–971. <https://doi.org/10.1002/smll.201102654>
- Zhang, X., Biekert, N., Choi, S., Naylor, C. H., De-Eknamkul, C., Huang, W., Zhang, X., Zheng, X., Wang, D., Johnson, A. T. C., ve Cubukcu, E. (2018). Dynamic photochemical and optoelectronic control of photonic fano resonances via monolayer MoS<sub>2</sub> Trions. *Nano Letters*, 18(2), 957–963. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b04355>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Ji, Q., Ju, J., Yuan, H., Shi, J., Gao, T., Ma, D., Liu, M., Chen, Y., Song, X., Hwang, H. Y., Cui, Y., ve Liu, Z. (2013). Controlled growth of high-quality monolayer WS<sub>2</sub> layers on sapphire and imaging its grain boundary. *ACS Nano*, 7(10), 8963–8971. <https://doi.org/10.1021/nm403454e>
- Zhong, W., Deng, S., Wang, K., Li, G., Li, G., Chen, R., ve Kwok, H. S. (2018). Feasible route for a large area few-layer MoS<sub>2</sub> with magnetron sputtering. *Nanomaterials*, 8(8), 1–12. <https://doi.org/10.3390/nano8080590>
- Zhu, Z. Y., Cheng, Y. C., ve Schwingenschlögl, U. (2011). Giant spin-orbit-induced spin splitting in two-dimensional transition-metal dichalcogenide semiconductors. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 84(15), 1–5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.153402>

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Ayşe Karataş  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Sivas 05.08.1991  
**Telefon** : 05414366077  
**Faks** : -  
**e-mail** : ayse.karatas.959@gmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: İzzettin Çalışlar Lisesi, MERKEZ UŞAK	2009
Üniversite	: Necmettin Erbakan Üniversitesi Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği, MERAM KONYA	2015
Yüksek Lisans	: Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik, MERAM KONYA	-

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013-2014	Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi	Öğrenci Asistanlığı
2017	Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi	Araştırmacı
2017-Devam ediyor	Konya Bilim Merkezi	Sergi Rehberi

**UZMANLIK ALANI:** Fizik

**YABANCI DİLLER:** İngilizce

### BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

### YAYINLAR ve AKADEMİK FAALİYETLER

- Karataş, A.** ve Yılmaz, M. (2020). Molybdenum disulfide thin films fabrication from multi-phase molybdenum oxide using magnetron sputtering and CVD systems together. Superlattices and Microstructures, 143, 106555. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106555>.  
(Yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır)
- Acar, V.G., **Karataş, A.**, Yılmaz M., Dereli, Ö., Doğan O. (2017). Effect of Zr Doping to Electrical Properties of Si in the SiO<sub>2</sub> Matrix. The European Materials Research Society (E-MRS) 2017 Spring Meeting and Exhibit, Strasbourg/France (Poster Presentation)

3. **Karataş, A.,** Dağ, R. Acar, V.G., Yılmaz, M., Dereli, Ö. (2017). Photoluminescence Properties of Zr-Doped Si Nanocrystals in SiO<sub>2</sub> Dielectric Matrix. The European Materials Research Society (E-MRS) 2017 Spring Meeting and Exhibit, Strasbourg/France (Poster Presentation)
4. **Karataş, A.,** Dereli, Ö., Yılmaz, M. (2016). A DFT Study on EPR Parameters of Liquid Phase Acetonitrile Radical. 10<sup>th</sup> International Conference on Luminescence and ESR Dosimetry (LUMIDOZ-10), Adana/TURKEY (Poster Presentation)
5. **Karataş, A.,** Dereli, Ö., Yılmaz, M. (2016). A DFT study on EPR Parameters of Liquid Phase Isoorotic Acid Radicals. 10<sup>th</sup> International Conference on Luminescence and ESR Dosimetry (LUMIDOZ-10), Adana/TURKEY (Poster Presentation)
6. **Karataş, A.,** Dereli, Ö., Yılmaz, M. (2016). Gas Phase DFT Study on Molecule and Radical Structures of Acetonitrile. 32<sup>nd</sup> International Physics Congress, Bodrum/Muğla/Turkey (Poster Presentation)
7. **Karataş, A.,** Dereli, Ö., Yılmaz, M. (2016). A DFT Study on Molecular Structure of 3-Nitroacetanilide. 32<sup>nd</sup> International Physics Congress, Bodrum/Muğla/Turkey (Poster Presentation)