



**SAÇTIRMA İLE BÜYÜTÜLMÜŞ 2B DİKEY MoSe₂
YAPILARIN ENERJİ DEPOLAMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

HALİL İBRAHİM TEBER

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Bilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi. Merve ACAR

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SAÇTIRMA İLE BÜYÜTÜLMÜŞ 2B DİKEY MoSe₂ YAPILARIN ENERJİ
DEPOLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

(Investigation of the Energy Storage Properties of 2D Vertically Aligned MoSe₂ Structures Grown by
Sputtering)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil İbrahim TEBER

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Merve ACAR

Erzurum
Temmuz, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Halil İbrahim TEBER tarafından hazırlanan “Saçtırma ile Büyütülmüş 2B Dikey MoSe₂ Yapıların Enerji Depolama Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışması 31/ 07 / 2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektronik Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Emre GÜR <i>Osmangazi Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Merve ACAR <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Esra KAVAZ PERİŞANOĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Aslı ıslak imzalıdır
Prof. Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: FYL-2024-14159

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Dr. Öğr. Üyesi Merve ACAR* danışmanlığında sunulan “Saçtırma ile Büyütülmüş 2B Dikey MoSe₂ Yapıların Enerji Depolama Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	4	30
Kuramsal Temeller	7	30
Materyal ve Yöntem	13	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Halil İbrahim TEBER	Dr. Öğr. Üyesi Merve ACAR
31.7.2025	31.7.2025
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, akademik yolculuğum boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden, değerli görüşleri ve yönlendirmeleriyle çalışmama önemli katkılar sağlayan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Merve ACAR’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu yolculuk boyunca çok özverili ve sabırlıydı. İhtiyaç duyduğum her an yanımdaydı.

Tez sürecim boyunca kendi zamanından feragat edip deney sistemlerini bana öğreten, motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan ve birçok konuda yardımcı olan Dr. Hülya AKÇAY’a en içtenlikle teşekkür ederim.

Tezimin deneysel çalışmaların yürütülmesinde bilgi ve emeğiyle önemli katkılar sağlayan Doç. Dr. Ufuk PERİŞANOĞLU’na değerli desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmada ölçüm ve analiz süreçlerinde sunduğu imkânlardan dolayı Atatürk Üniversitesine, alt yapısı kullanılan Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezin (DAYTAM) yönetimine ve değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından sağlanan finansal destek ile yürütülmüştür. 2B Dikalkojenitlerin Büyütülmesi ve Süperkapasitör Uygulaması adlı, FYL-2024-14159 numaralı proje kapsamında sunulan katkılar için BAP Koordinasyon Birimi’ne teşekkür ederim. Sağladıkları destek, araştırma sürecinin gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır.

Son olarak, her zaman yanımda olan, sabırları, sevgileri ve destekleriyle bana güç veren aileme en derin şükranlarımı sunarım.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SAÇTIRMA İLE BÜYÜTÜLMÜŞ 2B DİKEY MoSe₂ YAPILARIN ENERJİ DEPOLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Halil İbrahim TEBER

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Merve ACAR

Amaç: Bu çalışmada, iki boyutlu (2B) malzemelerden olan MoSe₂ malzemesi kullanılmıştır. Nano duvar yapılı MoSe₂ filmi farklı büyüme sürelerinde büyütülerek nano duvar yapısının süperkapasitör elektrot malzemesi üzerindeki davranışı gözlemlenmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda MoSe₂ filmi, magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak yüksek kalitede büyütülmüştür. Farklı kalınlıklarda büyütülen MoSe₂'nin fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu yapılmıştır. Ayrıca üretilen süperkapasitörün performansının değerlendirilmesi, kapasite ve şarj/deşarj ömürleri gibi özellikleri incelenmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: 2B'li MoSe₂ TMDC (geçiş metali dikalkojenitleri) malzemesi RF magnetron saçtırma (Radyo Frekans Magnetron Saçtırma) yöntemi kullanılarak tek bir adımda farklı kalınlıklarda büyütülmüştür. Büyütülen bu malzemenin süperkapasitör aygıt fabrikasyonuna uygun olup olmadığının değerlendirilmesi hususunda yapısal ve morfolojik analizleri için SEM, XPS, XRD, BET ve Raman yöntemleri kullanılmıştır. Elektrokimyasal davranışı için CV, GCD ve EIS analizleri yapılmıştır.

Bulgular: Yapılan çalışmalarda 2, 5, 9 ve 10 dakika süresince nikel köpük üzerine büyütülen MoSe₂ filmlerinin kapasite ve döngü kararlılıkları incelenmiştir. Bu incele sonucunda 2, 5, 9 ve 10 dakikalık numunelerde 3 mA/cm² akım yoğunluğunda sırası ile 172, 140.90, 429.50 ve 252 mF/cm² özgül kapasite elde edilmiştir. Burada en iyi performansı 9 dakikalık numune vermiştir. 9 dakikalık numunenin morfolojik analizlerine bakıldığında en düzgün nano duvar yapısını verdiği görülmüştür. 10 dakikalık numunenin büyütmenin olumsuzluklarından etkilenmeye başladığı ve nano duvar yapısının kıvrılarak aktif yüzey alanını azaltmaya başladığı ve bu sebepten dolayı kapasitesinin düştüğü gözlemlenmiştir. 9 dakikalık numune için kararlılık testi yapılmış ve 5000 döngü sonunda bile %97,43 kapasite korunumu gösterdiği bulunmuştur.

Sonuçlar: Elde edilen bulgular ışığında büyüme süresinin malzemenin nano yapısını doğrudan etkilediği ve bu etki süperkapasitörün davranışını doğrudan etkilediği bulunmuştur. Düşük büyüme sürelerinde kristal yapının tam oluşmaması ve nano duvarların tam oluşmaması kapasite üzerinde olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Büyütme süresinin optimum süre üzerine çıkması ile birlikte nano duvar yapılarının kıvrılarak iç içe geçmesi ve aktif yüzey alanının azalmasına neden olmakta ve bu da kapasiteyi düşürmektedir. Optimum sürede büyütülen filmin nano duvar yapıları, daha fazla aktif yüzey alanı sağladığı için iyonların tutunabileceği daha fazla alan oluşturmaktadır. 10 dakikalık büyütmede kapasitenin düşmesi ve nano duvar yapısının karmaşıklaşması sebebi ile optimum büyüme süresini 9 dakika olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: TMDC, Süperkapasitör, MoSe₂, Nanoteknoloji, Magnetron saçtırma

Temmuz 2025, 95 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION OF THE ENERGY STORAGE PROPERTIES OF 2D VERTICALLY ALIGNED MoSe₂ STRUCTURES GROWN BY SPUTTERING

Halil Ibrahim TEBER

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Merve ACAR

Purpose: In this study, the two-dimensional (2D) material MoSe₂ was utilized. MoSe₂ films with a nanowall structure were grown at different deposition times in order to observe the behavior of the nanowall structure on the performance of supercapacitor electrode materials. For this purpose, MoSe₂ films were grown with high quality using the magnetron sputtering method. The physical and chemical characterizations of MoSe₂ grown at different thicknesses were carried out. Additionally, the performance of the fabricated supercapacitor—such as capacitance and charge/discharge cycling stability—was evaluated.

Method: The 2D MoSe₂ TMDC (transition metal dichalcogenide) material was grown in a single step using the RF magnetron sputtering (Radio Frequency Magnetron Sputtering) technique at different thicknesses. To assess the suitability of the grown material for supercapacitor device fabrication, structural and morphological characterizations were performed using SEM, XPS, XRD, BET and Raman spectroscopy. Electrochemical behavior was analyzed through CV, GCD, and EIS measurements.

Findings: In the study, MoSe₂ films were grown on nickel foam for 2, 5, 9, and 10 minutes, and their capacitance and cycle stabilities were examined. As a result, specific capacitance values of 172, 140.90, 429.50, and 252 mF/cm² were obtained for the 2, 5, 9, and 10-minute samples, respectively, under a current density of 3 mA/cm². The best performance was observed in the 9-minute sample. Morphological analysis of the 9-minute sample revealed the most uniform nanowall structure. It was observed that the 10-minute sample began to be affected by the adverse effects of overgrowth, leading to the curling of nanowalls and a reduction in active surface area, which caused a decrease in capacitance. A stability test on the 9-minute sample showed that even after 5000 cycles, 97.43% of its capacitance was retained.

Conclusions: Based on the findings, it was determined that the deposition time directly affects the nanostructure of the material, which in turn has a direct impact on supercapacitor performance. At short deposition times, incomplete crystal formation and underdeveloped nanowalls negatively affect capacitance. When the deposition time exceeds the optimum value, the nanowall structures begin to fold and overlap, reducing the active surface area and thus decreasing capacitance. The nanowall structures of the film grown at the optimum duration provide a larger active surface area, offering more sites for ion adsorption. Due to the decrease in capacitance and structural complexity at 10 minutes, the optimum deposition time was determined to be 9 minutes.

Keywords: TMDC, Supercapacitor, MoSe₂, Nanotechnology, Magnetron sputter

July 2025, 95 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	iii
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	ix
GİRİŞ.....	10
Literatür Taraması.....	11
KURAMSAL TEMELLER.....	16
Süperkapasitörler.....	19
Süperkapasitörlerde Yük Depolama Mekanizmaları	22
Elektriksel Çift Tabakalı Kapasitörler (EDLC)	23
Psödokapasitörler	24
Hibrit Süperkapasitör	27
Süperkapasitörlerin Alt Parçaları	28
Elektrolitler	28
Sulu Elektrolitler	28
İyonik Sıvı Elektrolitler.....	28
Ayırıcı	29
Elektrotlar.....	29
İki Boyutlu Malzemeler	30
MXeneler.....	31
TMDC Malzemeler	32
Molibden Selen (MoSe ₂).....	35
TMDC Cihaz Uygulamaları.....	36
Alan etkili transistörler (FET).....	36

Fotodedektörler	37
Gaz Sensörleri	38
TMDC Büyütme Yöntemleri	41
Yukarıdan-Aşağı Yaklaşım	41
Mekanik Pul Kaldırma	41
Sıvı Yardımlı Pul Kaldırma	42
Aşağıdan-Yukarı Yaklaşım	43
Kimyasal Buhar Yığılma (CVD).....	43
Radyo Frekans (RF) Magnetron Saçırma Yöntemi	44
MATERYAL ve YÖNTEM	46
Materyal.....	46
Nikel Köpük (Ni-foam) Temizleme.....	47
MoSe ₂ İnce filmlerinin Magnetron Saçırma ile Büyütülmesi.....	48
Yöntem.....	50
Karakterizasyon Yöntemleri	51
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	51
X-ışın Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)	52
X-ışın Kırınımı (XRD).....	53
Raman Spektroskopisi.....	54
Brunauer-Emmett-Teller (BET).....	55
Elektrokimyasal Karakterizasyon Yöntemleri	56
Dönüşümlü Voltametri (CV).....	56
Galvanostatik Şarj-Deşarj (GCD)	57
Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)	59
XPS Analizleri	65
Büyütülen İnce Filmlerin XRD Analizleri.....	69
Büyütülen İnce Filmlerin Raman Analizleri.....	70
Büyütülen filmlerin BET Analizleri.....	71
Büyütülen İnce Filmlerin Elektrokimyasal Analizleri	71
Dönüşümlü voltametri (CV) analizleri.....	71
Galvanostatik şarj/deşarj (GCD) analizleri	77
Büyütülen filmlerin empedans analizleri	79
SONUÇ ve ÖNERİLER	83
KAYNAKÇA	84
ÖZ GEÇMİŞ.....	90

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Elektrolit Kapasitör, Süperkapasitör ve Pil karşılaştırması (Pandolfo & Hollenkamp, 2006)	21
Tablo 2. Enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması(Zhu et al., 2025).....	23
Tablo 3. Çeşitli TMDC’lerin elektriksel özellikleri (Chhowalla et al., 2013).....	34
Tablo 4. Sülfid tabanlı elektrot malzemelerin özellikleri (Perişanoğlu, 2023).....	36
Tablo 5. TMDC Tabanlı Süperkapasitörlerin Literatürde Rapor Edilen Performansları	40
Tablo 6. Kullanılan kimyasallar ve özellikleri.....	46
Tablo 7. Büyütme Parametreleri	50
Tablo 8. Farklı büyütme sürelerine ait BET yüzey Alanları.....	71
Tablo 9. MoSe ₂ Filmlerinin 20 mV/s Tarama Hızında CV Eğrilerinden Hesaplanan Özgül Kapasitans Değerleri	77
Tablo 10. MoSe ₂ filminin farklı akım yoğunluklarında GCD grafikleri üzerinden hesaplanmış özgül kapasitans değerleri	79
Tablo 11. MoSe ₂ filmlerinin Elektrokimyasal Empedans Spektroskopi Değerleri	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Enerji depolama aygıtlarının Ragone grafiği (Perişanoğlu, 2023).....	17
Şekil 2. Kapasitörlerin sınıflandırılması (Perişanoğlu, 2023)	19
Şekil 3. Süperkapsitör içyapısı	20
Şekil 4. Süperkapsitör Sınıfları (Perişanoğlu, 2023)	22
Şekil 5. EDLC Kapasitör Yapısı	24
Şekil 6. Psödokapsitör Yapısı.....	25
Şekil 7. Psödokapsitans yük depolama mekanizmaları (Wei et al., 2025).....	26
Şekil 8. Hibrit Kapasitör.....	27
Şekil 9. 2B'li Malzemeler	30
Şekil 10. Periyodik Tablo	32
Şekil 11. Külçe formdan katmanlı yapıya geçen malzemelerin atomik yapıları. Sol üst baştan itibaren grafit, h-BN, piktojenler, 2H-TMDC (MoSe_2 , MoS_2 , WS_2), 1T-TMDC (ReS_2 , TiS_2). Sol alttan itibaren III-VI yarı iletken, IV-VI Yarı iletkenler, Oksitler, Geçiş metal fosfor üç kükürtler, Hidroksitler (Backes, 2019)	33
Şekil 12. Elektronik bant yapıları (a) MoS_2 , (b) MoSe_2 , (c) WS_2 , (d) WSe_2 (Dybała et al., 2016).	34
Şekil 13. MoS_2 FET cihaz yapısı (Radisavljevic et al., 2011)	37
Şekil 14. WS_2 /Grafen Fotodedektör (Strauß et al., 2024).....	38
Şekil 15.(a) MoSe_2 -ZNRs hibrit H_2 gaz sensor (Abun et al., 2020), (b) Direnç bazlı SMO H_2 gaz sensörü (Gu et al., 2012).....	39
Şekil 16. Yukardan aşağı ve aşağıdan yukarı büyütme yöntemleri	41
Şekil 17. Kırtasiye bandı ile mekanik pul kaldırma	42
Şekil 18. Sıvı yardımcı pul kaldırma	43
Şekil 19. Kimyasal Buhar Yığılma (CVD) Yöntemi.....	43
Şekil 20. Magnetron Saçtırma yöntemi.....	44
Şekil 21. Ultrasonikasyon Cihazı	47
Şekil 22. Temiz Nikel Köpük.....	48
Şekil 23. Magnetron Saçtırma Sistemi	49
Şekil 24. a) Sisteme yerleştirilen temiz cam ve nikel köpük ve b) MoSe_2 ince film büyütülmüş cam ve nikel köpük	50
Şekil 25. Kullanılan SEM sistemi	52

Şekil 26. Kullanılan XPS sistemi	53
Şekil 27. Kullanılan XRD Sistemi	54
Şekil 28. CV ölçüm düzeneği.....	57
Şekil 29. 1 mA sabit akımda ölçülmüş GCD eğrisi	58
Şekil 30. İdeal ve ideal olmayan GCD eğri örnekleri(Perişanoğlu, 2023).....	58
Şekil 31. CV, GCD ve EIS ölçümleri için kullanılan deney düzeneği.....	59
Şekil 32. 2 dk. büyütülmüş numunenin SEM görüntüsü, a b) Cam alttaş üzerine c d) nikel köpük alttaş üzerine	60
Şekil 33. 5 dk. sürede büyütülmüş numunenin SEM görüntüsü, a b) cam alttaş üzerine c d) nikel köpük alttaş üzerine	61
Şekil 34. 9dk. sürede büyütülmüş numunenin SEM görüntüsü. a b) cam alttaş üzerine c d) nikel köpük alttaş üzerine	62
Şekil 35. 10dk. sürede büyütülmüş numunenin SEM görüntüsü. a b) cam alttaş üzerine, c d) nikel köpük alttaş üzerine	63
Şekil 36. 2 dk. süre büyütülmüş MoSe ₂ için a) Geniş tarama XPS spektrumu, b) Mo 3d bölgesi için yüksek çözünürlüklü spektrum, c) Se 3d bölgesi için yüksek çözünürlüklü spektrum.....	65
Şekil 37. 5 dk. süre büyütülmüş MoSe ₂ filminin genel XPS spektrumu, b) Mo 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum, c) Se 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum.....	66
Şekil 38. 9 dk. büyütülen MoSe ₂ filminin genel XPS spektrumu, (b) Mo 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum, (c) Se 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum.....	67
Şekil 39. 10 dk. süreyle büyütülen MoSe ₂ filminin genel XPS spektrumu, (b) Mo 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum, (c) Se 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum.....	68
Şekil 40. 2, 5, 9 ve 10 dk süreyle büyütülen MoSe ₂ ince filmlere ait XRD eğrileri	69
Şekil 41. Farklı büyütme sürelerinde (2, 5, 9 ve 10 dk) elde edilen MoSe ₂ ince filmlerin Raman spektrumları.	70
Şekil 42. Farklı büyütme sürelerine sahip MoSe ₂ elektrotlarının nikel köpük üzerindeki 100 mV/s tarama hızında kaydedilen CV eğrileri.....	72
Şekil 43. 2 dk. büyütülmüş MoSe ₂ elektrotuna ait (a) farklı tarama hızlarında CV eğrileri, (b) farklı akım yoğunluklarında GCD eğrileri, (c) EIS Nyquist diyagramı.	73
Şekil 44. 2 dk. büyütülmüş MoSe ₂ elektrotuna ait (a) farklı tarama hızlarında CV eğrileri, (b) farklı akım yoğunluklarında GCD eğrileri, (c) EIS Nyquist diyagramı.	74

Şekil 45. 9 dk. büyütölmüş MoSe ₂ elektrotuna ait (a) farklı tarama hızlarında CV eğrileri, (b) farklı akım yoğunluklarında GCD eğrileri, (c) EIS Nyquist diyagramı.	75
Şekil 46. 10 dk. büyütölmüş MoSe ₂ elektrotuna ait (a) farklı tarama hızlarında CV eğrileri, (b) farklı akım yoğunluklarında GCD eğrileri, (c) EIS Nyquist diyagramı.	76
Şekil 47. MoSe ₂ filminin farklı büyütme zamanlarına göre alınmış EIS eğrileri	81
Şekil 48. 9 dk. büyütölmüş filmin kararlılık testi.....	82



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Ω	: Ohm
θ	: Teta
Δt	: Zaman Farkı
ΔV	: Potansiyel Fark
A	: Amper
Å	: Angström
C _s	: Spesifik kapasitans
E	: Enerji yoğunluğu
F	: Farad
g	: Gram
h	: Saat
dk	: Dakika
j	: Akım yoğunluğu
mA	: Miliamper
mV	: Milivolt
nm	: Nanometre
V	: Volt
AA	: Alternatif Akım
AC	: Aktif Karbon
BP	: Siyah Fosfor
CM	: Santimetre
CV	: Dönüşümlü Voltmetri
CVD	: Kimyasal Buhar Yığılma
CVT	: Kimyasal Buhar Taşıma
DC	: Doğru Akım
EDLC	: Elektriksel Çift Katman Kapasitör
EPD	: Elektro Fiziksel Yığılma
ESR	: Eşdeğer Seri Direnç
GDC	: Galvanostatik Şarj Deşarj
h-BN	: Hekzagonal Bor Nitrür
HER	: Hidrojen Oluşum Reaksiyonu
Li-ION	: Lityum İyon
MG	: Miligram
MXene	: Geçiş Metal Karbürler
RF	: Radyo Frekansı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopisi
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskopisi
TMDC	: Geçiş Metal Dikalkojenitleri
TMO	: Geçiş Metal Oksitler
XRD	: X-Işını Kırınımı
BET	: Brunauer-Emmett-Teller

GİRİŞ

Günümüzde teknolojik gelişmelerin ivme kazanmasıyla birlikte, enerjiye olan talep sürekli artmaktadır. Akıllı cihazlardan elektrikli ulaşım araçlarına, taşınabilir tıbbi ekipmanlardan endüstriyel otomasyon sistemlerine kadar birçok alanda ortaya çıkan enerji ihtiyacı, hem nicelik hem de nitelik açısından yeni çözümler gerektirmektedir. Öte yandan, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı oluşu, karbon salınımına bağlı çevresel sorunlar ve enerji arz güvenliğini tehdit eden jeopolitik riskler, alternatif enerji üretim ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının süresiz ve değişken üretim karakteristikleri, enerji depolama sistemlerini enerji altyapılarının vazgeçilmez bir bileşeni hâline getirmiştir.

Bu doğrultuda, enerji üretiminin yanı sıra enerjinin verimli, güvenli ve uzun ömürlü şekilde depolanabilmesi güncel enerji teknolojilerinin temel araştırma alanlarından biri hâline gelmiştir. Geleneksel enerji depolama sistemlerinden biri olan lityum-iyon (Li-ion) piller, yüksek enerji yoğunluğu sunmalarına rağmen; sınırlı güç yoğunluğu, uzun şarj/deşarj süreleri, düşük çevrim ömrü ve yüksek üretim maliyetleri gibi dezavantajlar nedeniyle yeni nesil uygulamalarda yetersiz kalabilmektedir. Özellikle hızlı enerji gereksinimi duyan ya da sık çevrim içeren sistemlerde bu kısıtlar daha belirgin hâle gelmektedir (Saraç, 2024). Bu tür uygulamalar için öne çıkan alternatiflerden biri süperkapasitörlerdir. Süperkapasitörler; yüksek güç yoğunluğu, milisaniyeler seviyesinde şarj/deşarj kabiliyeti, düşük iç direnç ve uzun çevrim ömrü gibi üstün özellikleriyle dikkat çekmektedir. Enerji depolama mekanizmalarına göre süperkapasitörler üç ana gruba ayrılır: elektriksel çift katmanlı kapasitörler (EDLC), psödokapasitörler ve hibrit süperkapasitörler. EDLC’lerde enerji depolama, elektrot yüzeyinde fiziksel olarak adsorplanan iyonlar aracılığıyla, yani faradaik olmayan bir mekanizma ile gerçekleşir. Buna karşılık, psödokapasitörlerde enerji depolama; elektrot ile elektrolit arasında gerçekleşen hızlı ve tersinir faradaik (elektron transferine dayalı) reaksiyonlar yoluyla sağlanır. Hibrit süperkapasitörler ise bu iki mekanizmayı bir araya getirerek, hem yüksek güç yoğunluğu (EDLC özelliği) hem de yüksek enerji yoğunluğu (psödokapasitif özellik) sunmayı hedefler (Afif et al., 2019).

Süperkapasitör performansı büyük ölçüde elektrot malzemesinin yapısal ve elektrokimyasal özelliklerine bağlıdır. Elektrotun yüzey alanı, gözenek dağılımı, elektriksel iletkenliği ve çevrim kararlılığı gibi faktörler cihazın toplam kapasitansını ve enerji/güç yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, yüksek yüzey alanı, düşük iç direnç, çevre dostu yapı ve düşük üretim maliyetine sahip elektrot malzemelerinin geliştirilmesi, süperkapasitör performansını artırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Günümüzde bu

amaçla; karbon bazlı malzemeler (aktif karbon, karbon nanotüpler, grafen), metal oksitler (MnO_2 , NiO , Co_3O_4), iletken polimerler (PANI, PEDOT) ve özellikle son yıllarda öne çıkan iki boyutlu geçiş metali dikalkojenitleri (TMDC'ler) gibi malzemeler yoğun olarak araştırılmaktadır.

Literatür Taraması

Son yıllarda TMDC tabanlı malzemeler, süperkapasitör elektrotları için umut vadeden adaylar olarak öne çıkmaktadır. Ancak TMDC'lerin asidik ortamlarda hidrojen oluşum reaksiyonuna (HER) neden olan elektrokatalitik davranışları, enerji depolama performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla, grafen (GF) ve TMDC malzemeler kullanılarak sandviç benzeri katmanlı yapılar (GF/TMDC/GF) geliştirilmiştir. Bu yapı, TMDC'nin asidik ortamda gaz üretimini sınırlayarak, stabilitesini ve elektrokimyasal performansını artırmıştır. Sandviç yapıdaki elektrotların, 1 M H_2SO_4 çözeltisinde 0.35 V olan çalışma aralığını yaklaşık 1V' a kadar genişlettiği bildirilmiştir. Bu yapıların geleneksel GF/aktif karbon elektrotlarla karşılaştırıldığında, kapasitans değerlerinde kayda değer artışlar sağladığı gözlemlenmiştir. Sırasıyla GF/ MoS_2 /GF, GF/ MoSe_2 /GF, GF/ WS_2 /GF ve GF/ WSe_2 /GF yapılarında %7.4, %6.2, %14.8 ve %17.3 oranlarında kapasite artışı rapor edilmiştir (Chanarsa et al., 2024).

Bir başka çalışmada, Abhinandan Patra ve Changra Sekhar Rout tarafından gerçekleştirilen çalışmada, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene ile MoWS_2 malzemesi hidrotermal yöntemle sentezlenerek, negatif elektrot ve elektrokatalizör olarak kullanılmıştır. Geliştirilen simetrik süperkapasitör cihazı, 0.2 A/g akım yoğunluğunda 259 F/g özgül kapasitans göstermiştir. Asimetrik cihaz ise 1.3 V'lık bir potansiyel aralıkta, 7 A/g akım yoğunluğunda 60 F/g kapasiteye ulaşmıştır. Bu cihazın özgül enerjisi 14 Wh/kg olarak belirlenmiş; bu da yaklaşık 8 kW/kg özgül güç değerine karşılık gelmektedir. Galvanostatik şarj-deşarj (GCD) testleri sonucunda %93'lük kapasite kararlılığı elde edilmiştir. Ayrıca, HER açısından yapılan elektrokatalitik analizlerde, 52 mV/dec'lik bir Tafel eğimi ve 186 mV'lık aşınım potansiyeli (overpotential) elde edildiği rapor edilmiştir (Patra & Rout, 2023).

Özgün bir morfolojiye sahip manganez (Mn) katkılı WSe_2 (tungsten diselenid), hidrotermal yöntemle sentezlenmiştir. Bu özgün yapı sayesinde yüzey alanı artmış, iyon difüzyonu kolaylaşmıştır. Sentezlenen Mn katkılı WSe_2 , 1 A/g akım yoğunluğunda 1908 F/g gibi yüksek bir özgül kapasitans sergilemiş; bu değer katkısız WSe_2 'nin 593 F/g olan kapasitesinin oldukça üzerindedir. Mn katkılı WSe_2 elektrot malzemesinin özgül enerjisi 210 Wh/kg, özgül gücü ise 846 W/kg olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 10 mV/s tarama hızında gerçekleştirilen döngü testlerinde, 5000 çevrim sonunda dahi yüksek kararlılık gösterdiği

belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Mn katkılı WSe₂'nin süperkapasitör elektrot malzemesi olarak yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Faisal et al., 2024).

Psödökapasitif malzemeler, hızlı yüzey reaksiyonları yoluyla çalışır ve bu sayede süperkapasitörlerin enerji depolama kapasitesini önemli ölçüde artırabildikleri gösterilmiştir. Ancak bazı çalışmalarda, yüksek kapasite değerleri elde edilmesine rağmen, sıvı elektrolit ortamında elektrokimyasal çalışma gerilim aralığının 1 V'nin üzerine çıkamadığı bildirilmiştir. Bu sınırlamayı aşmak amacıyla, psödökapasitif TiS₂ (titanyum disülfür) kompozit elektrotlar, lityum açısından zengin bir elektrolit ortamında kullanılarak, dikey hizalanmış karbon nanotüplerle birlikte homojen bir yapı oluşturulmuştur. Bu tasarım sayesinde, 3 V'u aşan bir kararlı çalışma aralığında 195 F/g özgül kapasitans elde edildiği rapor edilmiştir. Oluşturulan nanoyapı, iyon difüzyonunu ve yüzey reaksiyonlarını kolaylaştırmış; böylece 10.000 çevrimden sonra dahi %95'in üzerinde kapasite korunumu sağlanmış ve 1250 W/kg'lık yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir. Ayrıca, geliştirilen esnek katı hal süperkapasitör ile 2.2 V'luk bir LED'in 60 saniye boyunca çalıştırılması başarılmıştır (Zang et al., 2018).

Kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi kullanılarak tantal (Ta), tungsten (W) ve zirkonyum (Zr) tabanlı TMDC malzemelerden süperkapasitör elektrotları üretilmiştir. Kalkojen element olarak kükürt (S₂) ve selenyum (Se₂) tercih edilmiştir. Bu yöntemle büyütülen TaS₂, TaSe₂, WS₂, WSe₂, ZrSe ve ZrS₂ elektrotları sırasıyla 151.11 F/cm², 102.6 F/cm², 116.1 F/cm², 152.3 F/cm², 127.3 F/cm² ve 141.8 F/cm² özgül kapasitans değerleri sergilemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek kapasitans değeri 152.3 F/cm² ile WSe₂ elektrotunda gözlemlenmiştir. Öte yandan, TaS₂ elektrodu geniş bir frekans aralığında çalışabilme özelliği göstererek 15 kHz'e kadar yüksek frekanslara karşı kararlılığını korumuştur. Bu bulgular, TMDC tabanlı elektrotların hem enerji depolama kapasitesi hem de frekans yanıtı açısından potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır (Habib et al., 2024).

2B MoSe₂ (Molibden diselenid) ve WSe₂ tabanlı hibrit heteroyapının, HER ve süperkapasitör uygulamaları açısından performansı incelenmiştir. MoSe₂ ve WSe₂ kristalleri, sıvı fazda pul kaldırma yöntemi kullanılarak hazırlanmış ve elektro-fiziksel çökeltme (EPD) yöntemiyle karbon fiber kumaş yüzeyine kaplanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen heteroyapı, HER uygulamalarında 10 mA/cm² akım yoğunluğunda yalnızca 158 mV'lik düşük bir aşırı potansiyel (overpotential) ve 46 mV/dec'lik düşük bir Tafel eğimi sergilemiştir. Süperkapasitör performansı açısından ise, 1 A/g akım yoğunluğunda 401 F/g özgül kapasitans değeri elde edilmiş; 5000 döngü sonunda kapasitenin %97.20'si korunarak yüksek çevrim kararlılığı gösterilmiştir. Ayrıca üretilen bu esnek yapı, 1000 bükme döngüsü sonrasında dahi mekanik esneklik kararlılığını korumuştur (Patel et al., 2022).

TMDC malzemeler, katmanlar arasına farklı maddeler eklenmesine ve çıkarılmasına olanak tanıyan eşsiz bir yapıya sahiptirler. Bu özellikten yararlanılarak, sodyum iyonları eklenmiş nanoçiçek morfolojisine sahip sodyum katkılı 1T–2H fazlı MoSe₂-GF elektrot malzemesi üretilmiştir. Sodyum iyonlarının MoSe₂-GF yapısına eklemek için tek basamaklı bir hidrotermal yöntem uygulanmıştır. Bu çalışmada, sodyum iyonlarının malzemenin katmanlar arası mesafesini genişleterek elektrolit iyonlarının difüzyonunu kolaylaştırdığı ve aynı zamanda Fermi seviyesini iletim bandına yaklaştırarak MoSe₂'nin elektriksel iletkenliğini artırdığı belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, 0.5 A/g akım yoğunluğunda 143.6 mAh/g özgül kapasite elde edilmiştir. Ayrıca, 100 mV/s tarama oranında kapasitesinin %92.8'ini koruyarak yüksek çevrim kararlılığı sergilemiştir (Guo et al., 2021).

Faradaik ve kapasitif enerji depolama uygulamalarında yaygın olarak kullanılan MoS₂ ve ReS₂ (Renyum disülfür) malzemeleri sistematik olarak karşılaştırılmıştır. ReS₂ malzemesi Li-ion pillerde anot olarak kullanıldığında, MoS₂'ye kıyasla daha yüksek özgül kapasite ve üstün döngü kararlılığı sergilemiştir. Külçe formdaki ReS₂ elektrot, MoS₂'ye göre yaklaşık iki kat daha fazla şarj depolayabilmiştir. Süperkapasitör uygulamalarında da benzer şekilde, külçe ReS₂ malzemesi, külçe MoS₂'ye göre yaklaşık beş kat daha fazla şarj depolama kapasitesi göstermiştir. Katmanlı yapıya geçildiğinde her iki malzemenin de performansında anlamlı artışlar gözlemlenmiştir: Katmanlı ReS₂'nin özgül kapasitansı %620 artışla 0.1 A/g akım yoğunluğunda 336 F/g'ye ulaşırken, MoS₂'de ise bu değer %530 artışla aynı akım yoğunluğunda 199 F/g olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, katmanlı ReS₂ malzemesinin, MoS₂'ye göre yaklaşık iki kat daha fazla kapasite sunduğunu göstermektedir (Nadar et al., 2022).

Magnetron saçtırma yöntemiyle, alttaş ile WS₂ arasına iletken CrN (krom nitrür) ve TiN (titanium nitrür) ara katmanları yerleştirilmiştir. Yapılan elektrokimyasal analizlerde, saf WS₂ elektrotunun özgül kapasitesi 600 C/g olarak ölçülürken, CrN ve TiN ara katmanlarının eklenmesi ile bu değer sırasıyla 830 C/g ve 1230 C/g'ye kadar yükselmiştir. Bu artış, ara katmanların elektrot performansı üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır. Üretilen süperkapasitör cihazlarında, WS₂/CrN//aktif karbon malzemesi 950 C/g, WS₂/TiN//aktif karbon malzemesi ise 1100 C/g özgül kapasite sergilemiştir. Ayrıca bu sistemler sırasıyla 6800 W/kg ve 7108 W/kg güç yoğunluğu değerlerine ulaşmıştır. Tam hücre döngü testleri sonucunda, WS₂/CrN//AC elektrodu 1000 çevrim sonunda %99.8, WS₂/TiN//AC elektrodu ise %99.9 kapasite korunumu göstermiştir. Enerji yoğunluğu açısından değerlendirildiğinde, CrN ara katmanlı sistem 98 Wh/kg, TiN ara katmanlı sistem ise 135 Wh/kg enerji yoğunluğu sunmuştur. Bu sonuçlar, ara katman mühendisliğinin TMDC tabanlı süperkapasitörlerde enerji ve güç performansını artırmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (Iqbal et al., 2025).

Doğrudan akım (DA) magnetron saçtırma yöntemiyle, herhangi bir bağlayıcı veya katkı maddesi kullanılmaksızın grafit alttaş üzerine WSe₂ elektrot malzemesi başarıyla büyütülmüştür. Elektrokimyasal karakterizasyon, sodyum sülfat (Na₂SO₄) elektroliti kullanılarak hem iki elektrotlu hem de üç elektrotlu sistemlerde gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde, 10 mV/s tarama hızında 149.75 mF/cm² yüzey kapasitansı elde edilmiştir. Bu değer, 19.33 mF/cm² kapasiteye sahip saf grafit elektrota göre yaklaşık 7.7 kat artış anlamına gelmektedir. Ayrıca, WSe₂/grafit elektrot 1 mA/cm² akım yoğunluğunda 118.62 mF/cm² yüzey kapasitansı, 19.93 mWh/cm² enerji yoğunluğu ve 549.79 mW/cm² güç yoğunluğu sergilemiştir. Uzun süreli çevrim performansı testlerinde, bu elektrot 2000 döngü sonunda kapasitesinin %86.15'ini koruyarak iyi bir elektrokimyasal kararlılık göstermiştir (Tomar et al., 2024).

Kimyasal buhar taşıma (CVT) yöntemi ile geçiş metallerinden Zr (zirkonyum) ve kalkojenlerden Se ve S kullanılarak katmanlı yapı oluşturarak süperkapasitör yapımı amaçlanmıştır. 1T fazında üretilen yarı iletken ZrX₂ yapısı elektrokimyasal performansı etkilese de yapısında bulunan nano pullar yüksek kararlılıkta iletken elektrot olarak görev yapmıştır. 10 mV/s tarama hızında ZrS₂ 18.8 F/g, ZrSe₂ 18 F/g özgül kapasite ve %90 kapasite korunumu göstermiş (Habib et al., 2023).

Külçe formunda ki WS₂ malzemesi, sıvı faz katman kaldırma yöntemi ile katmanlı yapıya dönüştürülmüştür. Bu işlemde çözücü olarak N-metil-pirolidon (NMP) kullanılmış; 3.5 saatlik sonikasyon işleminin ardından, 3000 d/dk hızında santrifüj uygulanmıştır. Elde edilen WS₂ pullarının kalınlıkları 65–115 nm arasında, yanal boyutları ise yaklaşık 4.9 µm olarak ölçülmüştür. Elektrokimyasal karakterizasyon, 3M KOH çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve 20–200 mV/s tarama hızı aralığında çevrim voltametrisi (CV) ölçümleri yapılmıştır. 20 mV/s tarama hızında 140 F/g özgül kapasite elde edilmiş; ayrıca elektrotun seri iç direnci (R_s) 161Ω olarak belirlenmiştir (Sharma & Deb, 2024).

Bu literatür çalışmaları, TMDC tabanlı malzemelerin gerek süperkapasitör gerekse li-ion pil uygulamalarında yüksek özgül kapasite, enerji yoğunluğu ve çevrim kararlılığı gibi temel elektrokimyasal parametrelerde umut vadeden sonuçlar verdiğini göstermektedir. Özellikle WS₂, MoS₂, MoSe₂, ReS₂, ZrS₂ gibi TMDC yapılarının farklı fazlarda ve morfolojilerde elde edilmesi, performans üzerinde doğrudan etkili olmuş; ara katman mühendisliği, katkılama, eksfoliasyon ve hibritleştirme gibi çeşitli stratejilerle bu performans daha da iyileştirilmiştir. Bununla birlikte, çoğu çalışma hidrotermal veya kimyasal eksfoliasyon gibi ıslak kimya temelli yöntemlere dayanmakta olup, bu yöntemler film homojenliği, kalınlık kontrolü ve cihaz entegrasyonu açısından çeşitli sınırlamalar barındırmaktadır. Bu noktada,

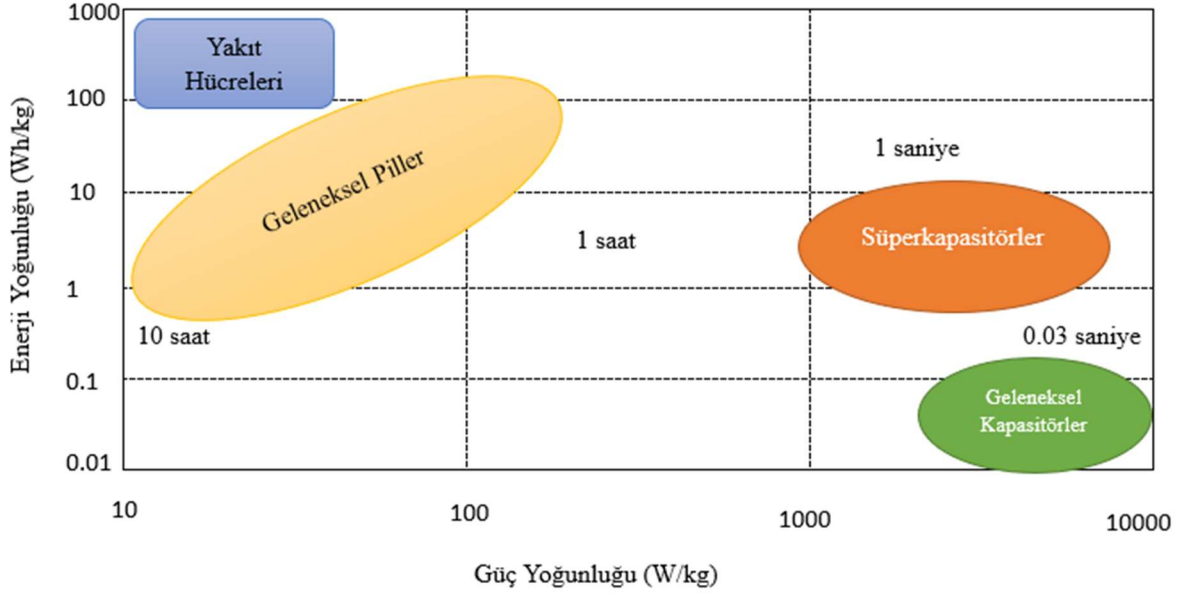
ince film üretiminde kontrollü büyüme sağlayan fiziksel buhar biriktirme (PVD) teknikleri öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, literatürde sınırlı sayıda örneği bulunan RF (radyo frekans) magnetron saçırma yöntemi kullanılarak, MoSe₂ tabanlı yapılar doğrudan alttaş üzerine büyütülecek ve herhangi bir bağlayıcı veya katkı maddesi kullanılmaksızın elektrot olarak kullanılabilir film formunda elde edilecektir. Üretilen ince filmler, farklı büyütme parametrelerine bağlı olarak yüzey morfolojisi, kristal yapı ve film kalınlığı açısından detaylı biçimde karakterize edilecektir. Ardından, elektrokimyasal performans değerlendirmeleri kapsamında CV, GCD ve EIS gibi yöntemlerle sistematik ölçümler gerçekleştirilecektir. Bu sayede, RF sputter yöntemiyle üretilmiş MoSe₂ elektrotların özgül kapasitans, enerji ve güç yoğunluğu ile çevrim kararlılığı gibi temel performans göstergeleri, literatürde farklı tekniklerle sentezlenmiş benzer TMDC yapılarla karşılaştırılacak; ayrıca film morfolojisi ile elektrokimyasal davranış arasındaki ilişkiler ortaya konacaktır.

KURAMSAL TEMELLER

Günümüzde enerji ihtiyacı, elektrik ile çalışan cihazların sayısının artması ile birlikte hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu problemin üzerinden gelmek için enerji depolama aygıtları kullanılarak enerji tüketiminin az olduğu zamanlarda üretilen fazla enerjinin depolanır. Enerji depolama aygıtlarına depolanan bu fazla enerji daha sonra enerji ihtiyacının fazla olduğu saatlerde kullanılmak üzere şebekeye verilir. Bu da enerji depolama sistemlerinin önemini karşımıza çıkarmaktadır. Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri, enerjiyi kimyasal reaksiyonda depolarlar. Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri cep telefonları, bilgisayarlar ve elektrikli/hibrit araçlarda kullanılırlar. Bu sistemlerde pozitif ve negatif olarak adlandırılan iki adet elektrot, elektrolit, ayırıcı ve akım toplayıcıdan oluşurlar. Enerji depolama aygıtlarının güç ve enerji yoğunlukları Ragone grafiği şeklinde Şekil 1’de gösterilmiştir (Perişanoğlu, 2023).

Enerji depolama aygıtları temelde piller ve kapasitörler olarak ayrılır. Günümüzde geleneksel enerji depolama sistemlerinden olan piller yüksek enerji yoğunluğuna sahip olsalar da düşük güç yoğunluklarına sahiptirler. Pillerle kıyaslandığında kapasitörler yüksek güç yoğunluğuna ve uzun çevrim ömrüne sahiptirler fakat enerji yoğunlukları düşüktür. Süperkapasitörler, piller ile geleneksel kapasitörler arasında yeni tip bir enerji depolama sistemidir. Süperkapasitörler ile ilgili çalışmalar genel olarak elektrikli çift katmanlı kapasitörlere (EDLC) odaklanmaktadır. EDLC’ler, elektrot malzemelerinin yüzeyinde fiziksel adsorpsiyon ve desorpsiyon yoluyla yükü depolar. EDLC’lerin yetersiz enerji yoğunluğu sebebiyle son yıllarda yüksek enerji ve güç yoğunlukları sebebiyle psödokapasitör veya hibrit kapasitörler üzerine çalışmalar sürdürülmektedir. Psödokapasitörlerde veya hibrit kapasitörlerde kullanılan elektrot malzemeleri, geniş aktif yüzey alanı, yüksek iletkenlik ve çevrim kararlılığına uygun yapıları için TMO ve TMDC’ler üzerine yoğunlaşmaktadır. Psödokapasitörler yüzeyde faradaik yük transferine dayanır ve elektrot malzeme yapıları şarj ve deşarj işlemi sırasında değişmez (Zhu, 2022).



Şekil 1. Enerji depolama aygıtlarının Ragone grafiği (Perişanoğlu, 2023)

Alman fizikçi Ewald Georg von Kleist 1745 yılında elinde tuttuğu alkol dolu cam şişeye yüksek gerilim uygulayarak elektrik yükünün depolandığını keşfetmiştir. 1746 yılında ise Hollandalı fizikçi Pieter van Musschenbroek Leyden kavanozunu icat etmiştir. 19. yüzyıldan sonra Ewald Georg von Kleist'in keşfettiği kapasitörde dielektrik malzeme cam olurken yıllar geçtikçe kâğıt ve porselen gibi yalıtkan malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda Charles Pollak ilk elektrolit kapasitörü icat etmiştir. Bu kapasitörde nötr veya alkalın elektrolitli alüminyum elektrotlar kullanmıştır. Bu şişe içerisinde depolanacak elektrik enerjisinin kapasite birimini Michael Faraday'ın isminden hareketle Faraday seçilmiştir (Karahan, 2008).

Elektriksel kapasitörler iki adet iletken plaka katmanının birbirlerinden elektriksel olarak yalıtılması ile oluşan enerji depolama aygıtıdır. Temel olarak şarj işlemi, iletken plakalara enerji verildiğinde plakalar arasında potansiyel fark oluşturulur. Plakalardan birisi pozitif diğeri negatif yüklenir. Bu adımda kapasitör şarj durumundadır. Plakaların ucuna bir yük bağlandığında plakalar yükleri ileterek deşarj olmaktadır (Süleymanoğlu, 2023).

Geleneksel kapasitörlerde kapasite hesabı şu şekilde olmaktadır. Kapasitörün kapasitesi C uygulanan V geriliminin pozitif Q yüklerine oranıdır:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

Kapasite C için, elektrotun yüzey alanı A ile doğru orantılı ve elektrotlar arasındaki mesafesi d ile ters orantılıdır:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{D} \quad (2)$$

Kapasitörün depoladığı enerji E ise:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3)$$

Kapasitörlerde harici yük direnci R olan bir seri devre olarak kabul edilir ve akım toplayıcı, elektrotlar ve dielektrik malzeme bileşenleri ESR olarak bilinen eşdeğer seri direnç ölçülen dirence katkıda bulunur. Deşarj esnasında gerilim bu dirençlerle belirlenir. Bir kapasitörün maksimum gücü P şu şekilde hesaplanır (Afif et al., 2019).

$$P = \frac{V^2}{4} * ESR \quad (4)$$

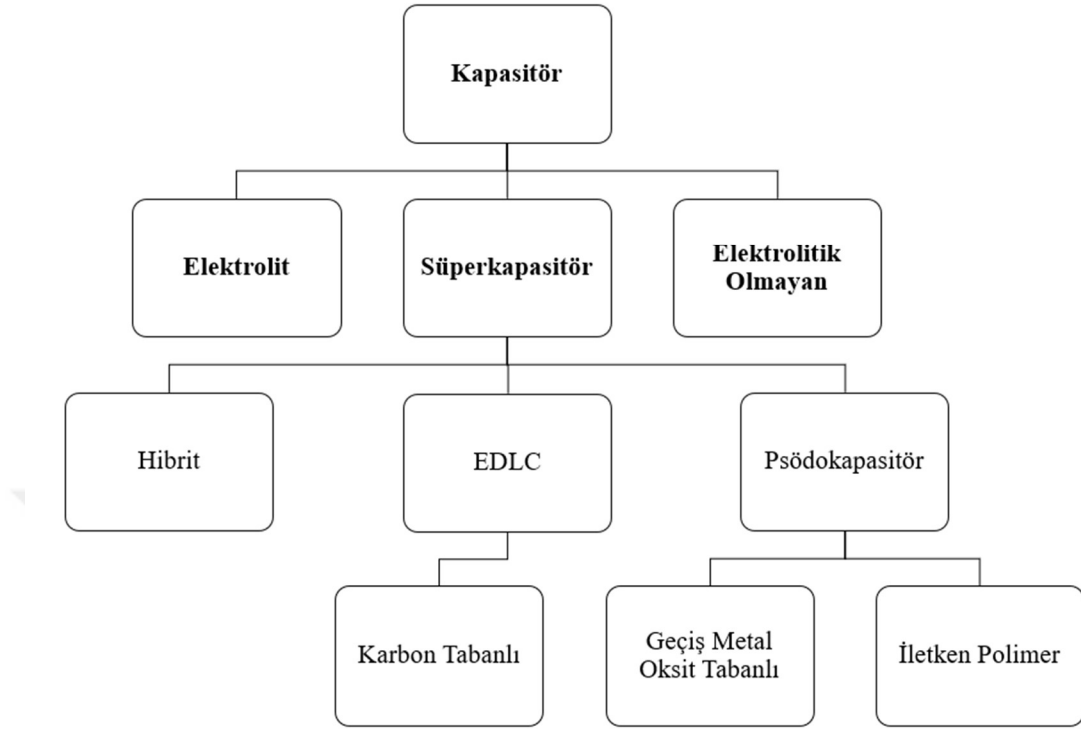
Yukardaki denklemden de görüldüğü üzere ESR'nin bir kapasitörün gücünün sınırladığını göstermektedir. Güç yoğunluğu yüksek kapasitörlerde yüksek olduğu için birim hacim başına az enerji depolamasına rağmen yüksek güç sağlarlar. Süperkapasitörlerde geleneksel kapasitörler ile benzer mantıkta çalışmalarına rağmen yüksek yüzey alanı, iletken levhalar arasında dielektrik malzeme olmaması, bunun yerine içerisinde elektrolit ve ince yalıtkan kullanılması Süperkapasitörlerin kapasitesini ve depoladığı enerjiyi artırır. Bu sebeple Süperkapasitörleri geleneksel kapasitörler ve piller arasında bir konuma yerleştirmektedir. Geleneksel süperkapasitörlerde, spesifik kapasitans (Cs), tek bir elektrot üzerindeki aktif malzemenin özelliğini belirlemek için kullanılır. Doğru bir şekilde ölçüm için üç elektrotlu bir hücre ile ölçülür fakat iki elektrotlu hücreden de elde edilebilir (Afif et al., 2019).

Simetrik süperkapasitör için;

$$C_s = \frac{4 * C_{hücre}}{\%a * W_{hücre}} \quad (5)$$

Yukardaki denklemde $C_{hücre}$ kapasitörün hücre kapasitesini, $W_{hücre}$ ise aygıtın ağırlığı, % a ise kullanılan aktif madde kütlesinin toplam hücre ağırlığına oranıdır. Asimetrik hücrenin sahip olduğu spesifik kapasitans değerini hesaplamak için her bir elektrot malzemenin pozitif elektrot ve negatif elektrot üzerindeki aktif malzemelerin kütleleri $C_{hücre}$ ve $W_{hücre}$ ile bilinmelidir (Afif et al., 2019). Yüksek güç yoğunluğu, daha uzun çevrim ömrü ve hızlı şarj/deşarj gibi üstünlüklerinin yüksek olduğu süperkapasitörler geliştirilmek istenmektedir (Öztürk & Gür, 2024).

Kapasitörler Şekil 2’de gösterildiği gibi 3 çeşit olarak sınıflandırılır.



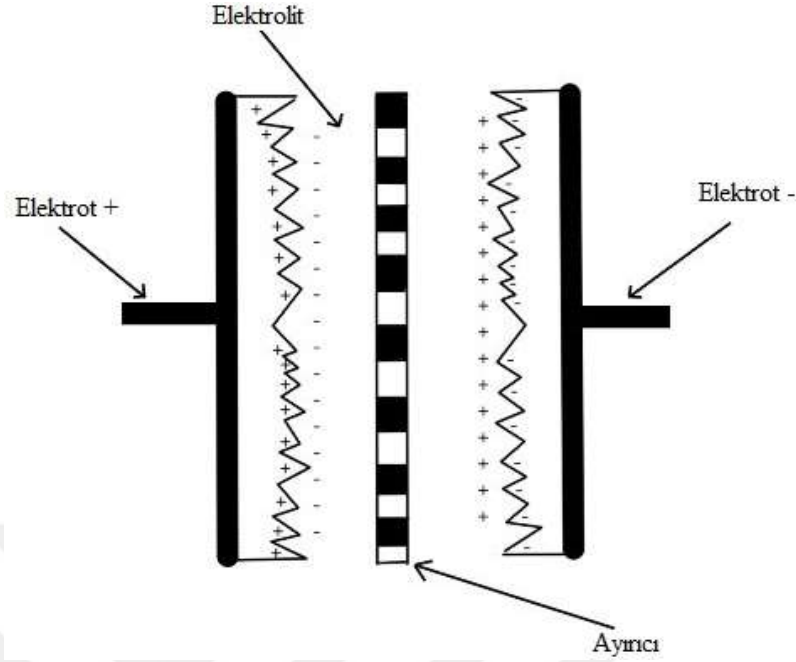
Şekil 2. Kapasitörlerin sınıflandırılması (Perişanoğlu, 2023)

Süperkapasitörler

İlk olarak 1950’li yıllarda General Electric firmasının yapmış olduğu şarj edilebilir piller çalışmasında elektrikli çift katman kapasitör etkisini keşfetmişlerdir. Gözlemlenen bu etkiyi Standard Oil of Ohio’daki araştırmacılar da yapmış oldukları yakıt hücresi tasarımında yeniden gözlemlemişlerdir. Standard Oil Company firması 1966 yılında, iki katmanlı bir arayüzde enerji depolayan bir cihazın patentini aldı. Fakat satışların iyi gitmemesi sebebiyle lisans haklarını 1971 yılında NEC firmasına devretmiş ve NEC firmasının ürettiği çift katmanlı kapasitörler ticari açıdan başarılı olmuş ve süperkapasitör olarak adlandırılmıştır (Önyılmaz, 2024; Tümkaya, 2023).

Süperkapasitörler, pillere kıyasla düşük iç dirençleri, yüksek enerji iletimi, enerji depolama sistemlerinin daha yüksek olması ve yüksek enerji depolama kapasitesi olan enerji depolama cihazlarıdır. Süperkapasitörler gözenekli karbon iki elektrot, elektrolit ve iyonların geçişine olanak tanıyan katı ya da sıvı bir ayırıcı içeren elektrotlarla çalışır. Süperkapasitörler geleneksel kapasitörlere göre iyi enerji kapasitesine, uzun ömür, iyi enerji depolama yeteneğine, yüksek güç yoğunluğuna, yüksek şarj/deşarj döngülerine ve kullanımda geniş

sıcaklık aralığına sahip olması bu aygıtları umut vaat eden aygıtlar yapmaktadır (Süleymanoğlu, 2023; Tümkaya, 2023).



Şekil 3. Süperkapasitör içyapısı

Şekil 3’de gösterilen kapasitör yapısı sayesinde, geleneksel kapasitörlerdeki katı dielektrik malzeme yerine çift katmanlı elektrokimyasal yapı kullanılması ile anot ve katot elektrotları arası çok kısa mesafeli kapasitör üretilmeye olanak tanımaktadır. Bu sayede küçük boyutta büyük kapasite veren kapasitörler üretilmektedir (Önyılmaz, 2024).

Süperkapasitörler piller ile kıyaslandığında yüksek güç oranına ve kısa deşarj sürelerine sahip olmalarına rağmen kısıtlı enerji yoğunluklarına sahiptirler. Piller ise yüksek deşarj ve enerji yoğunluğuna sahiptirler. Li-ion pillerin enerji yoğunluğu 200 Wh/Kg iken SC'lerin enerji yoğunluğu 0,1-5 Wh/Kg aralığındadır (Beaudin et al., 2014).

Süperkapasitörler düşük özgül enerjiye sahip olmalarına karşın pek çok pilden daha yüksek özgül güce sahiptirler. Süperkapasitörlerin hücre tasarımının uygun bir şekilde tasarlanması ile hem özgül enerji hem de özgül güç açısından geliştirebilir ve hibrit sistemler olarak pillerle ya da bağımsız bir enerji kaynağı haline getirebilir. Bu kombinasyon ile süperkapasitörler piller ile geleneksel kapasitörler arasında yüksek güç kapasitesi ve gelişmiş özgül enerji ile yerini alabilir (Tablo 1) (Pandolfo & Hollenkamp, 2006).

Süperkapasitörler de sulu ve organik olmak üzere iki farklı tip elektrolit kullanılır. Sulu elektrolitler maliyeti, iletkenliklerinin yüksek olması, iç dirençlerinin düşüklüğü ve yanmaz olmaları organik bileşiklere göre avantajlıdır. Genel olarak sülfürik asit (H_2SO_4), sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve potasyum hidroksit (KOH) sulu elektrolitleri kullanılır ve çözelti içerisindeki iyonların yarıçapları farklıdır. H_2SO_4 çözeltisindeki H^+ iyonu 2.8 Å ile en küçük ve iyonun 35

$\text{mSm}^2\text{mol}^{-1}$ ile en yüksek iletkenliğe sahipken, KOH çözeltisi içerisindeki K^+ iyonu $3.31 \text{ \AA}$ yarıçap ile en büyüktür. Na_2SO_4 çözeltisi içerisindeki Na^+ iyonu $5 \text{ mSm}^2\text{mol}^{-1}$ ile en düşük iletkenliğe sahiptir (Ibukun & Jeong, 2019).

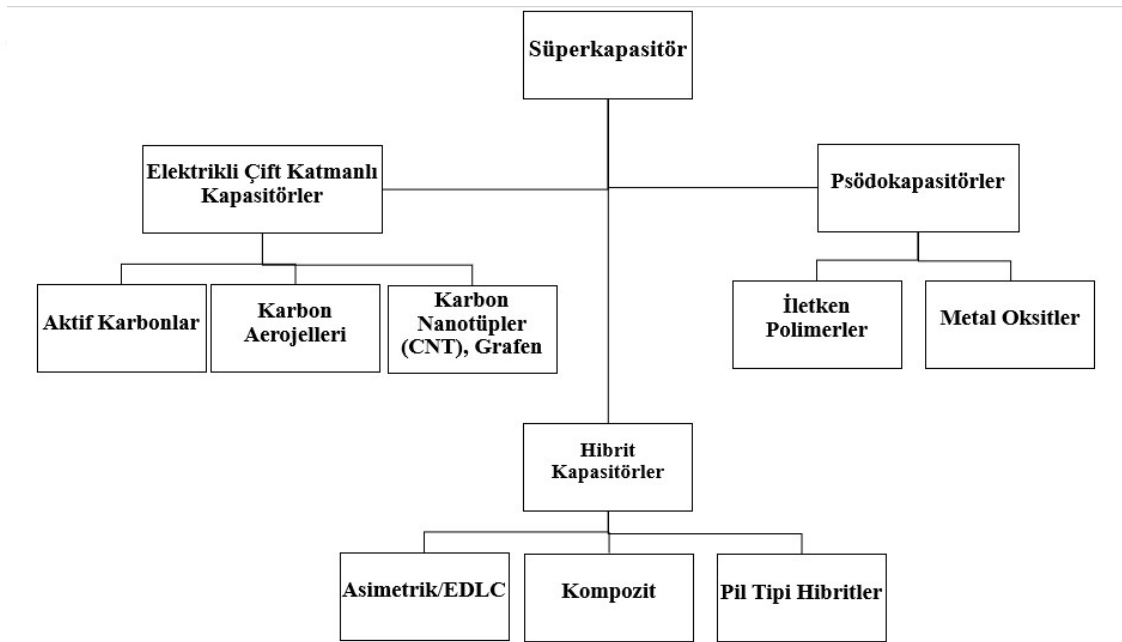
Tablo 1. Elektrolit Kapasitör, Süperkapasitör ve Pil karşılaştırması (Pandolfo & Hollenkamp, 2006)

Özellikler	Elektrolit Kapasitör	Karbon SüperKapasitör	Pil
Özgül Enerji (Whkg^{-1})	<0.1	1-10	10-100
Özgül Güç (Wkg^{-1})	>>10000	500-10000	<1000
Deşarj Süresi	10^{-6} ile 10^{-3} arası	Sn'den dk. kadar	0.3-3 saat
Şarj Süresi	10^{-6} ile 10^{-3} arası	Sn'den dk. kadar	1-5 saat
Şarj/Deşarj Verimi (%)	~100	85-98	70-85
Çevrim Ömrü	Sonsuz	>500000	~1000
Maksimum Gerilim Belirleyici	Dielektrik kalınlığı ve dayanıklılığı	Elektrot ve elektrolit dengesi	Faz reaksiyonlarının termodinamiği
Yük Depolama Belirleyici	Elektrot alanı ve dielektrik	Elektrot mikro yapısı ve elektrolit	Aktif Kütle ve Termodinamik

Süperkapasitörlerde Yük Depolama Mekanizmaları

Geleneksel kapasitörler, iletken levha arasında dielektrik malzemenin tamamında yüklerin elektrostatik olarak ayrışması ile enerji depolarlar. Bu yöntem, hızlı şarj ve deşarj döngüleri sağlayarak uzun döngü ömrü sağlar. Fakat düşük enerji yoğunlukları sebebiyle büyük miktarda enerji depolama kapasiteleri kısıtlıdır. Geleneksel kapasitörler, sinyal işleme, elektrikteki dalgalanmaların yumuşatılması ve yüksek frekans gerektiren işlerde kullanılmaktadır (Zhu et al., 2025).

Süperkapasitörler, enerji depolama mekanizmalarına göre üç ana sınıfa ayrılmaktadır: EDLC'ler, psödokapasitörler ve hibrit kapasitörler (Şekil 4).



Şekil 4. Süperkapasitör Sınıfları (Perişanoğlu, 2023)

EDLC'ler geleneksel kapasitörlere benzer bir şekilde çalışmaktadır. Depolanacak enerji elektrot ve elektrolit arayüzünde elektrostatik olarak depolanır. Buda bir çift tabaka oluşturur. EDLC'ler faradaik süreçlerinin olmaması sebebiyle enerji yoğunlukları düşük kalır. Buna karşılık yüksek güç yoğunluğu ve mükemmel döngü ömrü sergilerler(Zhu et al., 2025). Bu mekanizma, faradaik olmayan (yalnızca fiziksel) bir depolama süreci ile karakterize edilir. Buna karşılık, psödokapasitörler, geçiş metali oksitleri (TMO), TMDC'ler, katmanlı çift hidroksitler (LDH) ve MXene gibi elektrot malzemeleri kullanılarak tasarlanır. Bu yapılarda, elektrot yüzeyinde ve kenar bölgelerinde hızlı ve geri dönüşlü redoks reaksiyonları meydana

gelir. Faradaik mekanizmaya dayalı bu yapı, EDLC'lere kıyasla çok daha yüksek özgül kapasitans değerleri sunabilmektedir (Huang et al., 2020; Tümkaya, 2023).

Psödokapasitörler ise enerji depolama kapasitelerini faradaik tepkimeler aracılığıyla artırır. Bu mekanizmalar sayesinde, psödokapasitörler EDLC'lere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek enerji yoğunluğu elde ederler. Aynı zamanda orta ila yüksek güç yoğunluğu sağlar ve bataryalara göre daha iyi çevrim ömrü sunarlar. Bu sebepler ışığında, psödokapasitörler özellikle elektrikli araçlar ve şebeke dengelemesi gibi hibrit uygulamalar için son derece uygundur (Zhu et al., 2025).

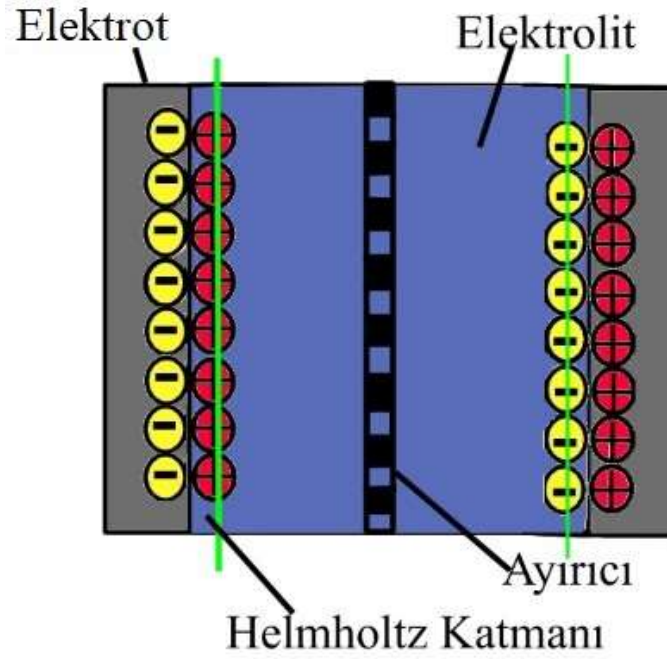
Tablo 2’de enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması verilmektedir.

Tablo 2. Enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması(Zhu et al., 2025)

Aygıt	Mekanizma	Enerji Yoğunluğu	Güç Yoğunluğu	Çevrim Ömrü
Geleneksel	Elektrostatik Yük Ayrımı	Düşük	Çok yüksek	Çok uzun
ELDC	Elektrostatik	Orta	Yüksek	Daha uzun
Psödokapasitör	Faradaik	EDLC’den yüksek	Orta-Yüksek	Uzun
Batarya	Kimyasal Reaksiyon	Yüksek	Düşük	Kısıtlı

Elektriksel Çift Tabakalı Kapasitörler (EDLC)

EDLC'ler yüksek enerji depolama kapasitesine sahip piller ile geleneksel dielektrik kapasitörler arasında güç ve enerji yoğunluğu performansına sahip enerji depolama aygıtlarıdır (Şekil 5) Geleneksel kapasitörler ile EDLC'ler ile aynı yük depolama sistemine sahip olsalar da birbirlerinden farklıdır. EDLC'lerde yük dielektrik malzemede depolanmak yerine elektrot ve elektrolit çiftindeki döngü tercih edilir. EDLC'ler elektrotların yüzeyi ile elektrolit arasındaki faz ara yüzünde Helmholtz çift tabakasında faradaik olmayan elektrostatik enerji depolar. EDLC'ler aktif karbon gibi yüksek yüzey alanına sahip malzemeler üzerine elektrostatik kuvvet yoluyla biriktirdiğinden, şarj esnasında faradaik reaksiyon gerçekleşmez. EDLC'ler de kapasite değeri tabaka kalınlığına ve yüzey alanına bağlıdır. Elektrotlar arasında iyon geçişine izin veren geçirgen bir ayırıcı ile elektrolit bulundurulması sebebiyle EDLC'ler pillere benzemektedir (Lei et al., 2013; Önyılmaz, 2024; Süleymanoğlu, 2023; Tümkaya, 2023).



Şekil 5. EDLC Kapasitör Yapısı

Yüzeyde yük oluşum mekanizması, çözeltideki iyonların yüzeye tutunması ve malzemenin kristal yapısındaki kusurlar vasıtasıyla gerçekleşir. Bu mekanizma elektrolit konsantrasyonuna ve iyon boyutuna bağlıdır. Kapasitörün kapasitesini küçük yük depolama alanına ve geniş ayırma alanına sınırlamaktadır. EDLC'lerin elektrot malzemesinde çok gözenekli yapılar kullanılarak daha fazla enerji depolaması sağlanabilir. EDLC, iki adet metal elektrota sahiptir. Bu elektrotlar bir çözelti içerisine batırılmıştır ve zıt yüklü elektrotların birbirini nötrlememesi için bir ayırıcı ile birbirinden ayrılmıştır. Yük depolama mekanizması yüzeyde gerçekleştiği için seçilen elektrot malzemesinin türü EDLC'nin özelliklerinin belirlenmesinde çok önemlidir (Benoy et al., 2022). EDLC'nin kapasitesi aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (6)$$

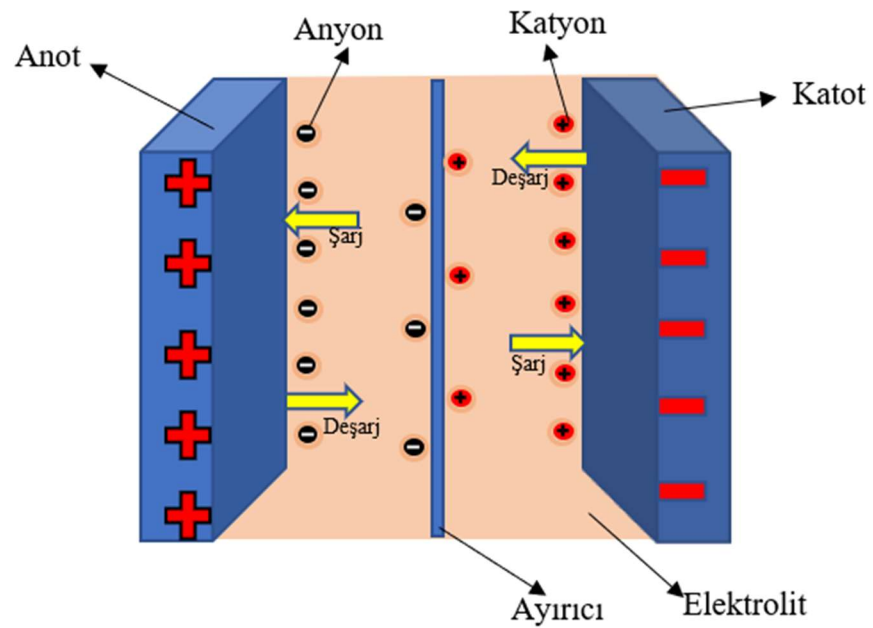
Burada C kapasite birimi Farad, A yüzey alanı, d iki katman arası mesafe ve ϵ_0 dielektrik sabiti.

Psödokapasitörler

EDLC'ler, yükü yüzey alanlı malzemesinde depolayarak yüksek güç yoğunluğu sergilemesine karşılık aktif malzemenin toplam kapasitesi elektrostatik itme ile sınırlıdır. Psödokapasitörler, EDLC'lerin hızlı şarj-deşarj özelliklerini, pillerin yüksek enerji yoğunluğu ile harmanlayan başka tip enerji depolama mekanizmasıdır. Bu mekanizma faradaik

reaksiyonlar yoluyla gerçekleşir. Psödokapasitörlerde redoks tepkimesi aktif malzemenin yüzeyinde veya yüzeye yakın bölgelerde yük transferi ile meydana gelir. Psödokapasitif yük depolama, bir malzemenin ya özgün ya da dışsal bir özelliği olarak tanımlanabilir. Özgün psödokapasitif malzemeler geniş bir parçacık boyutu ve morfoloji aralığında psödokapasitans sergiler. Buna karşılık, dışsal psödokapasitif malzemelerin elektrokimyasal özellikleri parçacık boyutuna bağlıdır. Ne yazık ki, özgün psödokapasitif malzemeler nadirdir (Cook et al., 2016).

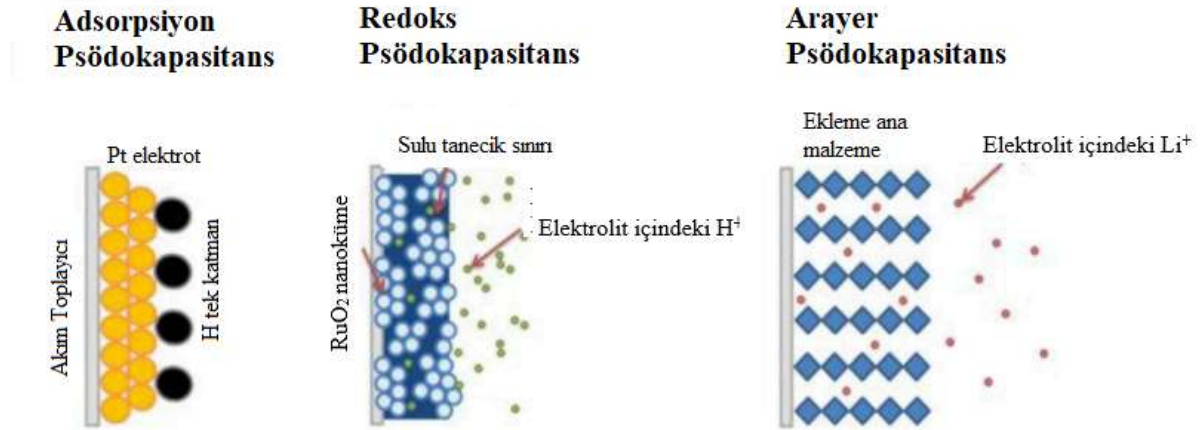
Psödokapasitörler yükü yalnızca aktif malzemenin yüzeyinde değil tamamında depolamaktadır (Şekil 6). Bu aktif malzemelerde yükler malzemenin elektron transferi anında oksidasyon durumunda kırılmadan ve kimyasal bağlar meydana gelmeden değiştiği tersinir faradaik redoks reaksiyonları ile depolanır. Bu reaksiyonlar elektrolit/elektrot yüzeyinde gerçekleşir. Redoks reaksiyonları oluşmasından dolayı yükler çok hızlı hareket eder. EDLC'lere kıyasla yüzlerce kat daha fazla yük ve enerji depolama kapasitesine sahiptirler. Yeni nesil geliştirilmiş elektrot malzemesine sahip psödokapasitörlerin yüksek enerji yoğunluğuna sahip pillerin dinamik limitlerini aşmak ve EDLC'ler ile kıyaslanabilir güç yoğunluğunu elde etmesi beklenmektedir. Ancak enerji depolamanın, elektrot yüzeyinde meydana gelen faradaik reaksiyonlar mekanik değişikliklere neden olarak aktif malzemenin büzülmesine ve şişmesine neden olabilir ve zayıf döngü kararlılığına sebep olur. Bu da düşük çevrim kararlılığına sebep olur ve bu psödokapasitenin olumsuz bir yönüdür (Chen et al., 2021; Önyılmaz, 2024; Süleymanoğlu, 2023; Tümkaya, 2023). Psödokapasitif malzemenin elektrik tepkisi teorik olarak EDLC'ler ile aynıdır (González et al., 2016).



Şekil 6. Psödokapasitör Yapısı

Psödökapasitörde, pillerdeki elektrokimyasal olaya benzer bir şekilde yük geçişi olur. Elektrot ve elektrolit arayüzeyine uygulanan potansiyel ile birlikte bir yük transferi gerçekleşmeye başlar. Psödökapasitörlerde toplam kapasitans, elektronik yük geçişi ile olan psödökapasitif katkı ile elektrolit ile elektrot yüzeylerindeki elektriksel çift katman katkısının toplamıdır (Benoy et al., 2022). Elektroanalitik yöntemler kullanılarak psödökapasitör ile pil malzemeleri ayırt edilebilir. Çünkü iki sisteminde enerji depolama süreçleri farklı kinetik sınırlamalara sahiptir. Pseudokapasitörlerde enerji depolama elektrot yüzeyinde veya yüzeye çok yakın bölgelerde gerçekleşen hızlı redoks reaksiyonlarına dayanır. Diğer taraftan, pil elektrotlarında enerji depolama, iyonların malzeme içerisine difüzyonuyla gerçekleşir (Benoy et al., 2022).

Psödökapasitif malzemelerin şarj depolama mekanizmalarına göre üç ana gruba ayrılabilir. Bunlar arayer temelli (interkalasyon temelli), Redoks-aktif psödökapasitans ve elektrosorpsiyon temelli olmak üzere ayrılır (Şekil 7). Burada interkalasyon grubunda hem kapasitif hemde pil benzeri davranışların avantajları birleşerek yüksek performanslı enerji depolamayı mümkün kılar. Redoks-aktif psödökapasitans etkide ise malzemelerin yüzeylerinde ya da yüzeylere yakın bölgelerde tersinir redoks tepkimelerini kolaylaştırarak verimli yük depolamaya katkı sağlar. Elektrosorpsiyon temelli psödökapasitansta ise son zamanlarda iyon adsorpsiyonu ve yüzey etkileşimini artıran işlevselleştirilmiş karbon malzemelerin kullanımıyla önemli gelişmeler kaydedilmiştir (Wei et al., 2025).



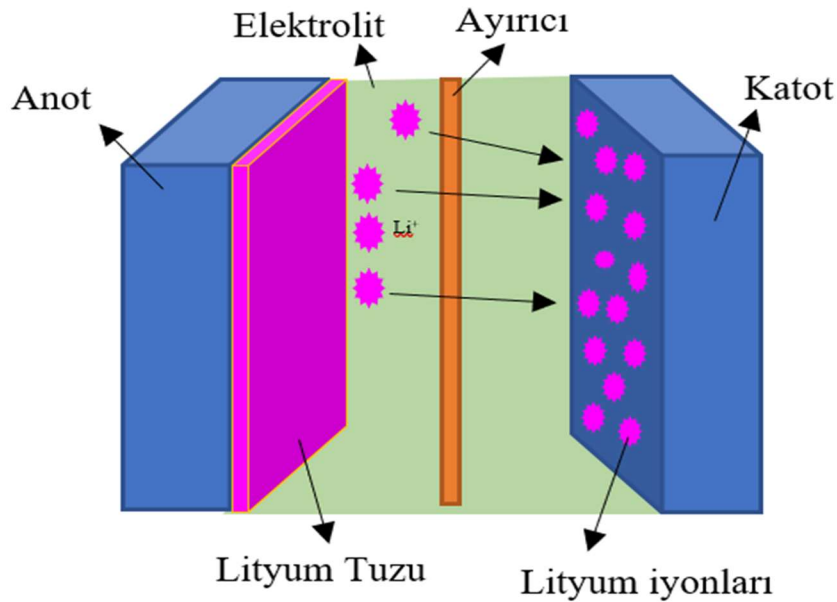
Şekil 7. Psödökapasitans yük depolama mekanizmaları (Wei et al., 2025)

Dış sisteme verimli ve başarılı bir şekilde taşıyıcı yükleri aktarmak için çelik, alüminyum, demir ve bakır gibi akım toplayıcı metaller kullanılır. Akım toplayıcı metaller üzerine kaplanacak katkı maddeleri çözelti ile akım toplayıcı yüzeyleri arasındaki direnci azaltabilir. Elektrolit ile akım toplayıcılar arasındaki bağlantı zamanla büzülmeye veya elektrolitin etken maddesinin azalması sonucu azalabilir. Bunun sonucunda yüzeyler arasında

oluşan direnç kapasitansın azalmasına ve malzemenin ömrünün kılmasına neden olur (Sharma & Chand, 2023).

Hibrit Süperkapasitör

Hibrit süperkapasitörler, enerji depolama sürecinde hem fiziksel (elektrostatik) hem de kimyasal (faradaik) mekanizmalardan yararlanan sistemlerdir. Bu cihazlar, EDLC ile psödokapasitörlerin yük depolama özelliklerini bir araya getirerek daha yüksek enerji ve güç yoğunluğu sunmayı hedeflemektedir. Hibrit sistemler genellikle EDLC tabanlı elektrotlar ile psödokapasitif özellik gösteren elektrot-elektrolit çiftlerinin ya da EDLC elektrotları ile lityum elektrot-elektrolit yapılarında kullanılan pil tipi malzemelerin kombinasyonu şeklinde tasarlanır. Bu kombinasyonlar sayesinde hem yüksek çevrim kararlılığı hem de yüksek kapasite sağlanabilmektedir. Özellikle lityum iyon kapasitörler (LIC), hibrit süperkapasitörlerin önemli bir alt türünü oluşturur. LIC sistemleri, elektrolit içerisinde lityum tuzu içeren bir pil tipi anot ile EDLC veya psödokapasitör karakterine sahip bir katotun kombinasyonu ile oluşturulmaktadır. Bu yapı, klasik süperkapasitörlere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu elde edilmesine olanak tanımaktadır. Şekil 8’de tipik bir lityum iyon kapasitör (LIC) mimarisi ile karbon/PbO₂ hibrit cihazlara ait yapısal örnekler sunulmaktadır (Huang et al., 2020; Sung & Shin, 2020; Zhong et al., 2015).



Şekil 8. Hibrit Kapasitör

Süperkapasitörlerin Alt Parçaları

Elektrolitler

Süperkapasitör bileşenlerinin önemli bir parçası da elektrolitlerdir. Elektrolitin yüksek iletkenliği sayesinde, iyonların elektrot yüzeyine doğru taşınması kolaylaşmaktadır ve süperkapsitörün performansı elektrolitin iletkenliğine göre belirlenmektedir. Kullanılan elektrolitin iletkenliği arttıkça direnç azalmakta ve potansiyel penceresinin artmasına buna bağlı olarak da enerji yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Süperkapasitörlerde kullanılacak elektrolitlerde belli başlı özellikler aranmaktadır. Bunlar geniş potansiyel penceresi, elektrokimyasal kararlılığının yüksek olması, yüksek iyonik konsantrasyon, düşük direnç, viskozite, iyon çapı, maliyet ve toksik olmaması gibi özellikler aranır. Fakat elektrolit iletkenliği çok artarsa potansiyel pencerede azalma meydana gelebilir ve düşük enerji yoğunluğu meydana gelebilir. Süperkapasitörlerde kullanılan elektrolitler dört kategoride sınıflandırılabilir: (1) Sulu elektrolit, (2) Organik elektrolit, (3) İyonik sıvılar ve (4) Jel veya Katı Polimer Elektrolitler (Memiş, 2025; Perişanoğlu, 2023).

Sulu Elektrolitler

Sulu elektrolitler, süperkapsitörlerin performansında önemli bir rol oynar. Sulu elektrolitler, laboratuvar ortamında kolay kullanılabilirlikleri ve yüksek iletkenlikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılır. Organik ve iyonik sıvılara göre daha yüksek iletkenliğe sahiptirler. Sulu elektrolitleri üç kategoriye ayırabiliriz: (1) alkali çözeltiler, (2) nötr çözeltiler ve (3) asidik çözeltiler. Sulu elektrolit kullanan süperkapasitörler yüksek iletkenliğe ve kapasitansa sahipken, düşük enerji yoğunluğu, çevrim kararlılığı ve sızdırma gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Süperkapasitörlerde kullanılan elektrolitlerin ESR 'sini, elektrolitin sıcaklık katsayısı ve iletkenlik parametreleri büyük oranda etkilemektedir. Sulu elektrolitler ile sulu olmayan elektrolitler karşılaştırıldığında pek çok avantajı vardır. Fakat sulu elektrolitlerin en büyük sınırlaması 1,3 V' dan düşük termodinamik sınıra sahip olmasıdır. Bu sınırdan daha yüksek olması durumunda çözeltinin kolayca elektroliz olması ve gaz üreten bir çözücü haline gelmesidir (Orhan, 2023).

İyonik Sıvı Elektrolitler

İyonik sıvılar, çözücü içermeyen ve oda sıcaklığında sıvı halde bulunan elektrolitlerdir. Bu sebeple, voltaj penceresi kararlılıkları yalnızca iyonların elektrokimyasal kararlılığı tarafından belirlenir. Süperkapasitörlerin tasarımında, hem anyon hemde katyon dikkatli seçilirse yüksek voltajlı süperkapasitör üretimi mümkün hale gelmektedir. Fakat bu sıvıların

oda sıcaklığındaki iyonik iletkenliği birkaç mS/cm seviyesinde olmasından dolayı genellikle yüksek sıcaklıkta kullanılırlar. Süperkapasitörlerin ve pillerin uygulama alanında -30 °C ile 60 °C arasındaki sıcaklıklarda kullanıldığından iyonik sıvılar bu gereksinimi karşılayamamaktadır (Simon & Gogotsi, 2008).

Ayırıcı

Ayırıcı (separator), pozitif ve negatif elektrotlar arasında konumlandırılarak fiziksel temasın önlenmesi ve elektrot-ayırıcı yüzey teması sağlanması açısından süperkapasitörün en önemli bileşenidir. Ayırıcı süperkapasitörün şarj ve deşarj esnasında iyonların serbest geçişine izin verirken elektron geçişine izin vermeyerek aygıtın güvenli olarak çalışmasını sağlar. Ayırıcılar elektrokimyasal performansla doğrudan katkısı olmasa da fiziki ve kimyasal özellikleri güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu, çevrim kararlılığı ve aygıt güvenliği üzerine büyük ölçüde etkisi olabilir. Bu sebeple iyi bir süperkapasitör yapılmak isteniyorsa ayırıcının fiziksel olarak dayanıklı olmasının yanında kimyasal ve ısıl kararlılıkta elzem gereklilikler haline gelmiştir. İyi bir ayırıcı tercih edilirken, homojen dağılmış kalınlığa ve gözenek boyutuna, iyonik direncinin az olmasına, yüksek ıslanabilirlik, çok sayıda gözeneğe sahip olması ve üstün depolama kapasitesi özellikleri tercih edilir (Li et al., 2022).

Elektrotlar

Elektrot malzemeleri, psödokapasitörlerin performansını belirlemede kritik öneme sahiptir. Pek çok araştırmacıların hedefi yüksek performanslı, basit üretim sürecine sahip ve maliyeti düşük elektrot malzemeleri geliştirmeyi hedeflemektedir (Xu et al., 2025).

Psödokapasitörler, elektrot malzemesinin yüzeyinde veya yüzeye yakın bölgelerde gerçekleşen hızlı ve tersinir redoks tepkimeleri yoluyla yük depolarlar. Psödokapasitörlerde kimyasal tepkime malzemenin hem içinde hem de yüzeyinde gerçekleştiği için redoks tepkimeleri, iyon adsorpsiyonu ve katkılama işlemleri içerir. Bu sebeple EDLC'lere göre daha yüksek özgül kapasite gösterirler. Bu avantajlarına karşılık kimyasal tepkime hızının yavaş olması psödokapasitörlerin şarj-deşarj hızını sınırlamaktadır. Günümüzde araştırılan psödokapasitif elektrot malzemeleri arasında metal oksitler (TMO), TMDC'ler ve iletken polimerler bulunmaktadır. Bu malzemeler arasında titanyum disülfid TiS_2 (Muller et al., 2015), molibden disülfid MoS_2 (Cook et al., 2016), molibden diselenid $MoSe_2$ (Li et al., 2020) ve çeşitli bileşikler bulunmaktadır (Xu et al., 2025).

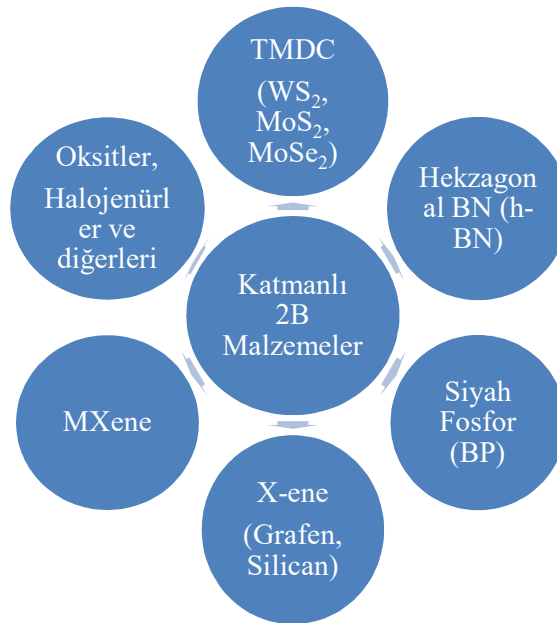
Geçiş metali dikalkojenitleri genellikle daha yüksek elektriksel iletkenlik gösterir. Yüksek iletkenlik hızlı şarj-deşarj döngülerini kolaylaştırır ve üstün yük transferine olanak tanır. Katmanlı yapıları sayesinde iyonların etkin şekilde araya girip çıkmasını sağlar. Buna ek

olarak, doğal olarak sahip oldukları mekanik kararlılık ve esneklik, elektrotların tekrarlanan döngüler altında bile yapısal bütünlüğünü korumasını sağlar. Bu da süperkapasitörlerin uzun vadeli dayanıklılığını artırır(Xu et al., 2025).

Doğaları gereği metal hidroksitler ve oksitler iyi bir elektriksel iletken değildirler. Bu malzemeler şarj-deşarj döngüleri esnasında iyonları eklenmesi ve çıkarılması sebebiyle hacimlerinde önemli değişimlere uğrayabilirler. İyon difüzyon mesafelerinin artması ve güç kapasitesinin azalması, elektrotların performansını olumsuz etkileyebilir (Wei et al., 2025).

İki Boyutlu Malzemeler

2B malzemeler, ilk kez 2004 yılında Andre Geim ve Konstantin Novoselov tarafından keşfedilmiş ve araştırma konusu haline getirilmiştir. Bu alandaki öncü çalışma, grafitin tek atom kalınlığındaki katmanı olan grafenin izole edilmesiyle başlamıştır. Grafen, karbon atomlarının altıgen (bal peteği) örgü yapısında düzlemsel olarak dizildiği, yalnızca bir atom kalınlığında bir malzemedir. Grafenin bu atomik yapısı, ona olağanüstü özellikler kazandırmaktadır: yüksek taşıyıcı mobilitesi, mekanik esneklik, termal iletkenlik ve görünür bölgede yüksek optik geçirgenlik, bu malzemeyi çok çeşitli teknolojik uygulamalar açısından cazip kılmıştır. Ancak, grafenin bant aralığına sahip olmaması, onu anahtarlama gerektiren elektronik devrelerde ve bant aralığının kritik olduğu optoelektronik uygulamalarda kullanışsız hale getirmiştir. Bu temel dezavantajı aşmak amacıyla, farklı yapısal ve elektronik özelliklere sahip 2B malzeme sınıfları Şekil 9, özellikle TMDC'ler gibi yarı iletken karakterli malzemeler, grafene alternatif olarak araştırılmaya başlanmıştır (Acar, 2020).



Şekil 9. 2B'li Malzemeler

MXeneler

2011 yılında 2B titanyum karbür (Ti_3C_2) yapısının keşfiyle birlikte, MXene ailesi iki boyutlu malzeme literatürüne katılmıştır (Hantanasirisakul & Gogotsi, 2023). MXeneler, genel olarak geçiş metali karbürleri, nitrürleri veya karbonitrürlerinden oluşan, katmanlı yapı gösteren bir 2B malzeme ailesidir. Bu malzemelerin genel kimyasal formülü M_{n+1}X_n şeklinde ifade edilir. Burada:

- M, erken geçiş metallerini (örneğin Ti, V, Nb),
- X, karbon (C) veya azotu (N),
- n ise 1 ile 3 arasında değişen bir tam sayıyı temsil eder.

Bugüne kadar teorik olarak yaklaşık 70 farklı MXene bileşiği öngörülmüş; bunlardan yaklaşık 20'si deneysel olarak sentezlenmiştir. Bu malzemeler, M_{n+1}X_n yapısının yüzeyinde yer alan fonksiyonel gruplarla birlikte $\text{M}_{n+1}\text{X}_n\text{T}_x$ genel formülüyle tanımlanır. Buradaki T_x , malzeme yüzeyinde bulunan oksijen (O), flor (F) ve hidroksil (OH) gibi fonksiyonel grupları ifade eder. Bu yüzey sonlandırmaları sayesinde MXeneler, yüksek düzeyde hidrofilik özellik gösterir. Aynı zamanda, geçiş metal karbür veya nitrür katmanlarında bulunan serbest elektronlar, bu malzemelere metalik iletkenlik kazandırır. Bu özelliklerin kombinasyonu, MXeneleri süperkapasitörler, piller, sensörler ve elektromanyetik kalkanlama gibi birçok uygulama için son derece cazip hale getirmektedir (Huang et al., 2018).

Doğada saf halde bulunmayan bor nitrür (BN) bileşiği, bor (B) ve azot (N) atomlarının eşit oranlı birleşimiyle elde edilmektedir. Bor elementi genellikle borik asit (H_3BO_3) veya bor trioksit (B_2O_3) gibi bileşiklerden sentezlenmektedir. İlk kez Balmain, erimiş haldeki H_3BO_3 ile potasyum siyanür (KCN) arasında gerçekleşen reaksiyonu kullanarak BN sentezlemiştir (Zhang et al., 2024). Bor nitrür, kristal yapısına bağlı olarak dört farklı fazda bulunabilir: altıgen BN (h-BN), rombohedral BN (r-BN), kübik BN (c-BN) ve wurtzite BN (w-BN). En yaygın form olan altıgen BN, grafen benzeri düzlemsel yapısıyla dikkat çeker. Bu yapıda, bor ve azot atomları arasında güçlü kovalent bağlar ile oluşan altı üyeli halkalar bulunur. Katmanlar ise birbirine zayıf van der Waals (vdW) kuvvetleriyle bağlanır. BN nanoyapıları (örneğin nanotüpler ve nanosheet'ler), yüksek gözeneklilik, geniş yüzey alanı ve biyouyumlu yapıları sayesinde özellikle ilaç taşıma gibi biyomedikal uygulamalarda dikkat çekmektedir. Ancak, kemoterapi gibi uygulamalarda ilaçların yalnızca çok küçük bir kısmının hedef tümör dokusuna ulaşması, tedavi etkinliğini azaltmakta ve sistemik olarak ciddi yan etkilere neden olabilmektedir. Bu nedenle BN tabanlı ilaç taşıyıcı sistemler, hedeflenebilirlik ve taşıma kapasitesi açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Wang et al., 2024).

TMDC Malzemeler

2B TMDC sahip oldukları eşsiz optik, mekanik, termal, elektriksel ve manyetik özellikler sayesinde dikkat çekmektedir. Bu özellikler, TMDC'leri fotodetektörler, alan etkili transistörler (FET) ve enerji dönüşüm uygulamaları gibi ileri teknolojilerde kullanılabilecek ideal malzeme adayları haline getirmiştir (Wang et al., 2020).

TMDC malzemeler, MX_2 genel kimyasal formülü ile tanımlanır; burada M, geçiş metali (örneğin Mo, W), X ise kalkojen atomlarını (örneğin S, Se, Te) temsil eder. Bu bileşikler, tek katman kalınlığında olduklarında genellikle 2H simetrisine sahip olup, doğrudan bant aralığı sergilerler. Bu özellik, özellikle optoelektronik uygulamalarda etkin ışık-madde etkileşimi sağlamaları açısından önemlidir. Şekil 10' de gösterildiği üzere, MX_2 yapısında geçiş metali (M) atomları, iki katman kalkojen (X) atomu arasında sandviç benzeri bir düzende konumlanarak, katmanlı bir yapı oluştururlar (Jin et al., 2018).

Geçiş Metalleri (M)

Kalkojenler (X)

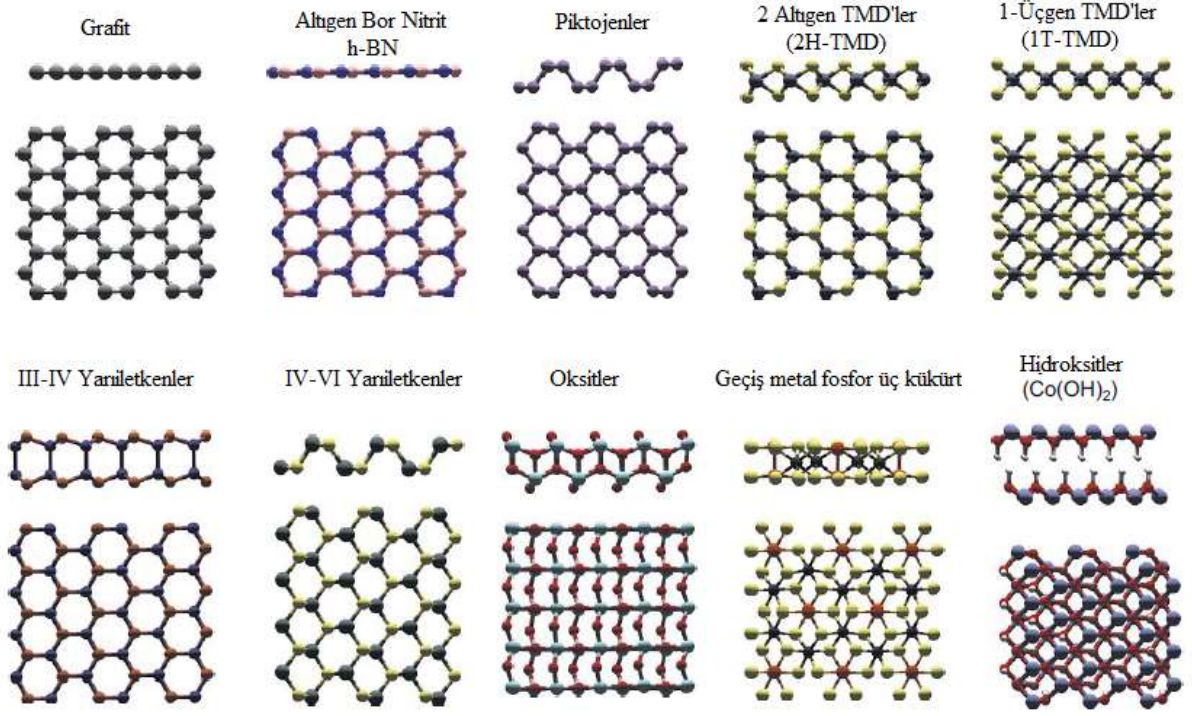
MX₂

H																		He
Li	Be												B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pb	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo	

Şekil 10. Periyodik Tablo

2B'li malzemeler, genellikle katmanların üst üste yığılmasıyla oluşan bir yapıya sahiptir. Her bir katman içinde, geçiş metali ile kalkojen atomları arasında güçlü kovalent bağlar bulunurken, farklı katmanlar birbiriyle zayıf vdW etkileşimleriyle bağlanır. Bu yapı, 2B malzemelerin külçe formdan katmanlı yapılara ve katmanlı yapılardan yeniden külçe forma dönüştürülmesine olanak tanır. Bu malzemelerin atomik düzeydeki inceliği sayesinde, geleneksel yarı iletkenlerde görülen kısa kanal etkisi (short-channel effect) 2B yapılar için önemli bir sınırlayıcı unsur olmaktan çıkar (Liu et al., 2017). VdW kuvvetleriyle istiflenmiş bu katmanlar; hekzagonal, üçgen prizmatik, oktahedral gibi farklı kafes simetrilerine sahip olabilir. Bu yapısal çeşitlilik (Şekil 11), 2B malzemelerin yalıtkan, yarı metalik veya iletken özellikler göstermelerine olanak tanır (Tablo 3). Külçe formda katmanlar arası zayıf vdW bağları sayesinde mekanik veya kimyasal yöntemlerle kolaylıkla tek katmanlı yapılara indirgenebilir. Tek katmanlı TMDC yapıları, yüksek özgül yüzey alanı, düşük yüzey pürüzlülüğü, daha az

yüzey kusuru ve sarkık bağlara (dangling bonds) sahip olmaları sayesinde gelişmiş fiziksel ve kimyasal özellikler sergiler. Ayrıca, TMDC malzemeleri külçe halde dolaylı (indirect) bant aralığına sahipken, tek katmanlı hale geldiklerinde doğrudan (direct) bant aralığı gösterirler (Şekil 12). Bu dönüşüm, özellikle yüksek sinyal gücü, optik kararlılık ve ışık-madde etkileşimi gerektiren uygulamalar (örneğin fotodetektörler, LED'ler, fotovoltaikler) açısından büyük avantaj sağlar (Bharti et al., 2023; Joseph et al., 2023; Özküçük, 2019).



Şekil 11. Külçe formdan katmanlı yapıya geçen malzemelerin atomik yapıları. Sol üst baştan itibaren grafit, h-BN, piktojenler, 2H-TMDC (MoSe_2 , MoS_2 , WS_2), 1T-TMDC (ReS_2 , TiS_2). Sol alttan itibaren III-VI yarı iletken, IV-VI Yarı iletkenler, Oksitler, Geçiş metal fosfor üç kükürtler, Hidroksitler (Backes, 2019)

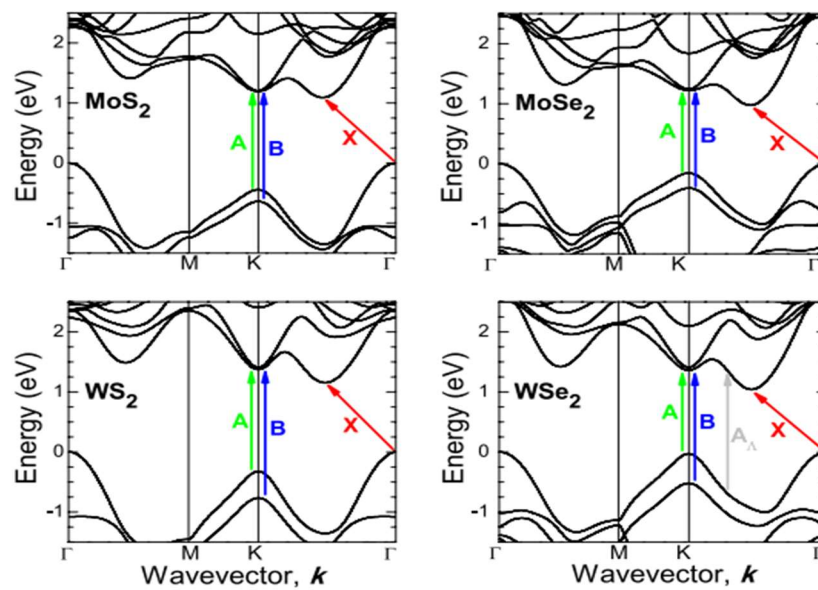
Ayrıca, bu tek katmanlı yapılar dikey olarak üst üste istiflenebileceği gibi, yatay düzlemde yan yana birleştirilerek vdW heteroyapıları oluşturulabilir (Gong et al., 2014). Bu heteroyapılar sayesinde farklı 2B malzemeler bir araya getirilerek yeni işlevsel özellikler kazandırılabilir. TMDC malzemeler, farklı geçiş metalleri ve kalkojenlerin kombinasyonlarına bağlı olarak yalıtkan, yarı iletken, iletken ve süper iletken özellikler gösterebilen bileşikler oluşturabilmektedir (Tablo 3) (Chhowalla et al., 2013).

Tablo 3.Çeşitli TMDC’lerin elektriksel özellikleri (Chhowalla et al., 2013)

M (Geçiş Metali)	X (Kalkojen)	Özellikler
Ti, Hf, Zr	S, Se, Te	Yarı iletken ($E_g = 0.2\sim 2$ eV), diyamanyetik
V, Nb, Ta	S, Se, Te	Dar bant aralıklı metal ($\rho\sim 10^{-4}$ $\Omega\cdot\text{cm}$) veya yarımetal, paramanyetik, anti-ferromanyetik veya diyamanyetik
Mo, W	S, Se, Te	Sülfür ve Selenit olanlar yarı iletken ($E_g = 1\sim 2$ eV), Tellür yarımetal ($\rho\sim 10^{-3}$ $\Omega\cdot\text{cm}$)
Tc, Re	S, Se, Te	Düşük bant aralıklı yarı iletken, diyamanyetik
Pd, Pt	S, Se, Te	Sülfür ve Selenit olanlar yarı iletken ($E_g \sim 0.4$ eV), Tellür metalik ve paramanyetik, PdTe_2 süperiletken

* ρ : Düzlemsel Öz direnç

Genel olarak, periyodik tablonun 4. ile 7. grubu arasında yer alan geçiş metallerine sahip TMDC bileşikleri katmanlı kristal yapılar sergilerken; 8. ile 10. grup geçiş metalleri ile oluşturulan bileşiklerde bu tür katmanlı yapıların bulunmadığı gözlemlenmektedir. TMDC bileşiklerinde geçiş metali atomları, bağ yapısını tamamlamak amacıyla genellikle dört değerlikli elektron sağlar. Bu bağlamda, geçiş metali ve kalkojen atomlarının yükseltgenme basamakları sırasıyla +4 ve -2 olmaktadır. Metal ve kalkojen iyonlarının iyonik yarıçaplarına ve yapısal özelliklerine bağlı olarak, bu bileşiklerdeki metal-kalkojen bağ uzunluğu yaklaşık 3.15–4.03 Å aralığında değişmektedir. Bu bağ uzunluğu, malzemenin elektronik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olan önemli bir yapısal parametredir (Han et al., 2015).

**Şekil 12.** Elektronik bant yapıları (a) MoS₂, (b) MoSe₂, (c) WS₂, (d) WSe₂ (Dybała et al., 2016).

TMDC malzemelerin katmanlar arası vdW bağ yapmalarında dolayı mekanik katman kaldırma ve sıvı katman kaldırma gibi yöntemler kullanılarak tek katmanlı yapılar oluşturulabilir. Oluşturulan bu tek katmanlı yapılar atomik sınırlandırmalardan dolayı x ve y ekseninde taşıyıcılar hareket ederken z ekseninde hareketleri kısıtlanmaktadır (Bostan, 2023).

Molibden Selen (MoSe₂)

2B malzemeler atomik düzeyde ince katmanlar halinde bulunduklarından dolayı oldukça yüksek bir yüzey alanına sahiptir. Bu yüksek yüzey alanı, elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşeceği daha fazla aktif bölge sunarak enerji depolama kapasitesini artırmaktadır. Bu özellikleri sayesinde 2B malzemeler, süperkapasitör elektrotlarında enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla oldukça avantajlıdır. TMDC'lerden biri olan molibden MoSe₂, özellikle MoS₂ ile benzer yapısal ve elektronik özellikler taşıması nedeniyle çoğunlukla benzeri bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar, MoSe₂'nin süperkapasitör uygulamaları için MoS₂'ye kıyasla daha yüksek potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu farkın temel nedeni, selenyumun kükürde göre daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olmasıdır. Selenyumun doğasında bulunan yarı-metal karakteri, MoSe₂'nin iletkenliğini artırmakta ve enerji depolama performansını iyileştirmektedir. Yapısal olarak değerlendirildiğinde, grafit malzemesinde iki katman arasındaki boşluk yaklaşık 0,335 nm iken, MoSe₂'de bu mesafe 0,646 nm'dir. Katmanlar arası bu geniş mesafe, iyonların yapıya difüzyonunu kolaylaştırarak difüzyon enerji bariyerini azaltır ve elektrot malzemesinin iyon iletkenliğini artırır. Bu sayede MoSe₂, süperkapasitör uygulamaları için daha hızlı şarj/deşarj özellikleri ve yüksek özgül kapasitans sergileyebilir. MoSe₂ yapısı, üç atomik katmandan oluşur: merkezde bir molibden (Mo) katmanı, bu katmanın üstünde ve altında ise iki selenyum (Se) katmanı yer alır. Düzlem içinde Mo-Se bağları güçlü kovalent bağlarla oluşurken, katmanlar arası etkileşim zayıf van der Waals bağları ile sağlanır. Bu durum, MoSe₂'nin kolayca soyulabilir 2B yapı formuna indirgenmesini mümkün kılar. Mo atomları, trigonal prizmatik veya oktahedral koordinasyon geometrisi içerisinde altı adet Se atomu ile bağlanır. Kristal yapısı altıgen (hexagonal) olup, kafes parametreleri $a = b = 0,329$ nm, $c = 1,289$ nm, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$ şeklindedir. Sonuç olarak, MoSe₂'nin yüksek elektriksel iletkenliği, geniş katmanlar arası boşluğu, güçlü düzlem içi bağları ve zayıf düzlem dışı etkileşimleri, onu süperkapasitör elektrotlarında kullanılabilecek yüksek performanslı bir 2B malzeme adayı haline getirmektedir (Gupta et al., 2023). Tablo 4'de sülfid tabanlı malzemelerin özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 4. Sülfid tabanlı elektrot malzemelerin özellikleri (Perişanoğlu, 2023)

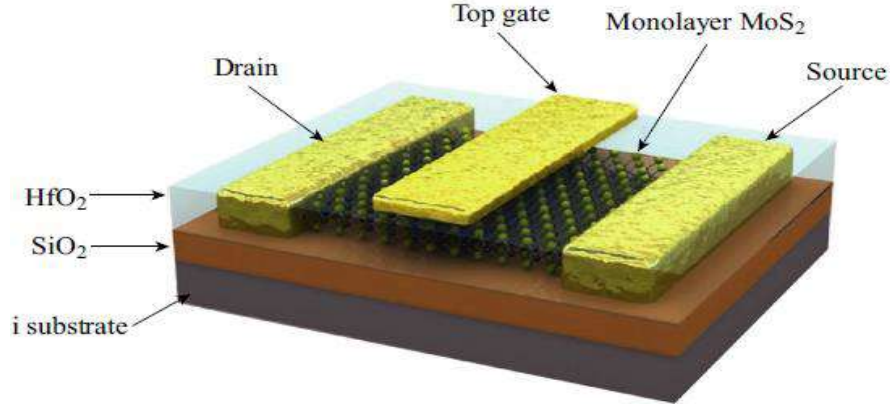
Özellikler	MoS ₂	MoSe ₂	WS ₂	WSe ₂
Molar kütle (g/mol ⁻¹)	160	254	248	342
Renk	Siyah/Kurşun Grisi katı	Kristal Katı	Mavi-Gri toz	Geriden siyaha katı, kokusuz
Yoğunluk (g/cm ³)	5,1	6,1	7,5	9,3
Suda çözünme	Çözünmez	-	Çözünür	Çözünmez
Erime Noktası(°C)	2375	>1200	1250	>1200
Özgü sabitleri (nm)	a=0,3(2H), 0,3(3R) c=1,3(2H), 1,8(3R)	a=0,3 c=1,2		a=0,3 c=1,3
Koordinasyon geometrisi	Trigonal prizmatik (Mo ^{IV}) Piramidal (S ⁻²)	Trigonal prizmatik (Mo ^{IV}) Piramidal (Se ⁻²)	Trigonal prizmatik (W ^{IV}) Piramidal (S ⁻²)	Trigonal prizmatik (W ^{IV}) Piramidal (Se ⁻²)
Kristal yapı	hP6, P63, mmc, hR9, R3m	hP6, boşluk grubu P63	Molybdenite	hP6, boşluk grubu P63

TMDC Cihaz Uygulamaları

Alan etkili transistörler (FET)

FET'ler zayıf akımlar ile büyük akımların kontrolü, anahtarlama ve sinyal yükseltme işlemlerinde kullanılan kapı, drenaj ve kaynak olarak üç adet bağlantı ucu bulunan elektronik elemanlardır. Transistörler değerlendirilirken verimliliği, kullanılan yarı iletken malzemenin mobilitesi ve iletim/kesim durumundaki akım geçiş oranları belirler (Bostan, 2023). Grafenin bant genişliğinin olmaması ve düşük anahtarlama oranı algılama uygulamalarını kısıtlamaktadır (Chen et al., 2020). Grafenin sıfır bant aralığına sahip olması sebebiyle FET uygulamalarında kullanılamaz. Grafen özelleştirilerek bu sorun aşılabılır ancak taşıyıcı yük hareketliliği bozulur (Kumar et al., 2023). Başka bir 2B malzeme olan siyah fosfor ise çevre şartlarında düşük kimyasal kararlılığa ve dayanıklılığa sahiptir. TMDC malzemelerden olan MoS₂ katmana bağlı bant aralığı 1.2- 1.8eV, yüksek transistör anahtarlama oranı ($\sim 10^8$) ve

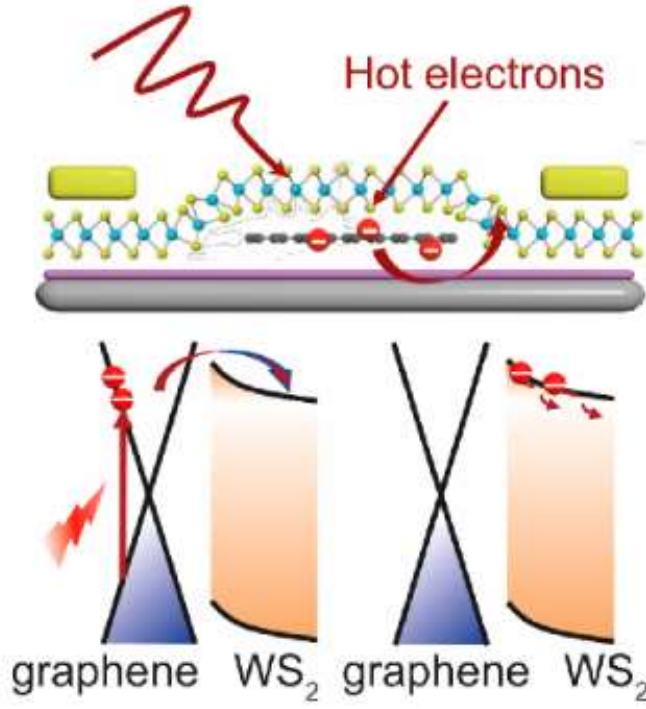
makul çevresel kararlılık gösterir. MOSFET sensörler ile karşılaştırıldığında 2B TMDC tabanlı FET'ler (Şekil 13) katmanlı yapıları dolayısıyla daha yüksek hassasiyet gösterirler (Radisavljevic et al., 2011).



Şekil 13. MoS₂ FET cihaz yapısı (Radisavljevic et al., 2011)

Fotodedektörler

Fotodedektörler, algıladıkları ışığı elektriksel sinyallere dönüştüren cihazlardır. Geçiş metali dikalkojenitleri (TMDC), yüksek optik özellikleri ve ışığa duyarlılıkları sayesinde fotodedektör uygulamaları için oldukça dikkat çekicidir ve bu nedenle geniş çapta araştırılmaktadır (Bay, 2019). TMDC malzemeler külçe formundayken genellikle indirekt bant aralığına sahiptir. Ancak, bu malzemeler tek katmanlı forma indirgendiklerinde yaklaşık 1–2 eV aralığında doğrudan bant aralığına sahip olurlar (Xia et al., 2014). Bu bant aralığı, yakın kızılötesi ve görünür ışık spektrumlarına karşılık gelmekte olup fotodedektör uygulamaları (Şekil 14) açısından oldukça elverişlidir (Zhou et al., 2019). Tek katmanlı TMDC yapılar, yüksek optik absorpsiyonları, direkt optik geçişleri ve hızlı taşıyıcı dinamikleri sayesinde hem yüksek hassasiyet hem de hızlı yanıt süreleri sunmaktadır. Bu performans artışı, doğrudan bant geçişlerine sahip malzemelerin genellikle daha yüksek soğurma katsayısına ve daha kısa taşıyıcı rekombinasyon sürelerine sahip olmalarıyla açıklanmaktadır (Strauß et al., 2024).

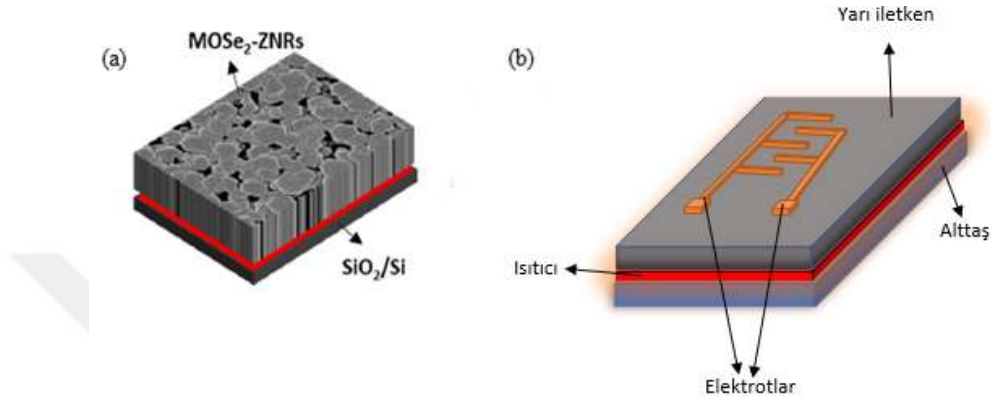


Şekil 14. WS₂/Grafen Fotodedektör (Strauß et al., 2024)

Gaz Sensörleri

Gaz sensörleri, yaşadığımız alandaki hava kalitesinin ölçümünden askeri amaçlı kullanıma kadar pek çok yerde kullanılmaktadır. Temel prensipleri, algılama yüzeyinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonların elektrik sinyallerine dönüştürülmesine dayanır. Özellikle FET tabanlı gaz sensörlerde, kanal iletkenliği; algılanan gaz ile yüzey arasındaki redoks reaksiyonlarına bağlı olarak değişir (Dai et al., 2022). Metal oksit tabanlı gaz sensörleri genellikle 200–500 °C sıcaklık aralığında (Şekil 15) çalışır ve algılama yüzeyleri negatif oksijen iyonları ile katkılanmıştır. Gaz molekülleri bu yüzeyle etkileşime girdiğinde, yüzey yük dağılımı değişir ve bu değişim sensörün elektriksel direnci ile tespit edilir. Oksitleyici gazlar p-tipi yarı iletkenlerde serbest yük taşıyıcılarını azaltarak direnci artırırken; indirgen gazlar yük taşıyıcılarını artırarak direnci azaltır. Gaz ortadan kalktığında sensör başlangıç direncine döner. Sensör performansı; duyarlılık, seçicilik, cevap süresi ve toparlanma süresi gibi parametrelerle değerlendirilir. Gaz sensörlerde sensör cevabı, hassasiyet, seçicilik, cevap zamanı ve toparlanma süresi gibi çeşitli parametreler sensör performansını etkileyen önemli parametrelerdir. Bu parametreler, sensörün hızını ve doğruluğunu belirler (Dai et al., 2022; Özküçük, 2019). Burada sensör cevabı sensörün gaz molekülleri ile etkileşime girmeden önceki direnci ve gaz moleküllerine maruz kaldıktan önce ve sonra sensörde meydana gelen direnç değişiminin oranı olarak verilir. Seçicilik ise belirli bir gaz grubunu sezme ve farklı gaz moleküllerine verdiği tepkidir. Tepki süresi, gaz moleküllerine maruz kaldıktan ne kadar süre sonra malzemenin gaz moleküllerine tepkisini gösterdiği süredir. Kısaca ifade edersek

malzemedeki direnç değişimi gazla etkileşime girdikten ne kadar süre sonra meydana geldiğinin ölçütüdür. Toparlanma süresi veya iyileşme süresi olarak da adlandırılan parametre, malzemenin gaz moleküllerine maruz kaldıktan sonra ne kadar süre sonra ilk baştaki durumuna dönmesi olarak tanımlanır. Bu süre ne kadar kısa olursa daha sensörün tepki yeteneği daha hızlı olur (Özküçük, 2019). FET cihazlarda H_2 gazı sezmek için yapılan çalışmalarda kısa kanal etkisi (SCE) sebebiyle algılama performanslarını düşürmektedir. Tünel tipi FET’lerde ise yüksek parazitik kapasitansı ve kapı akımı gerektirmesidir (Mokkapati et al., 2019).



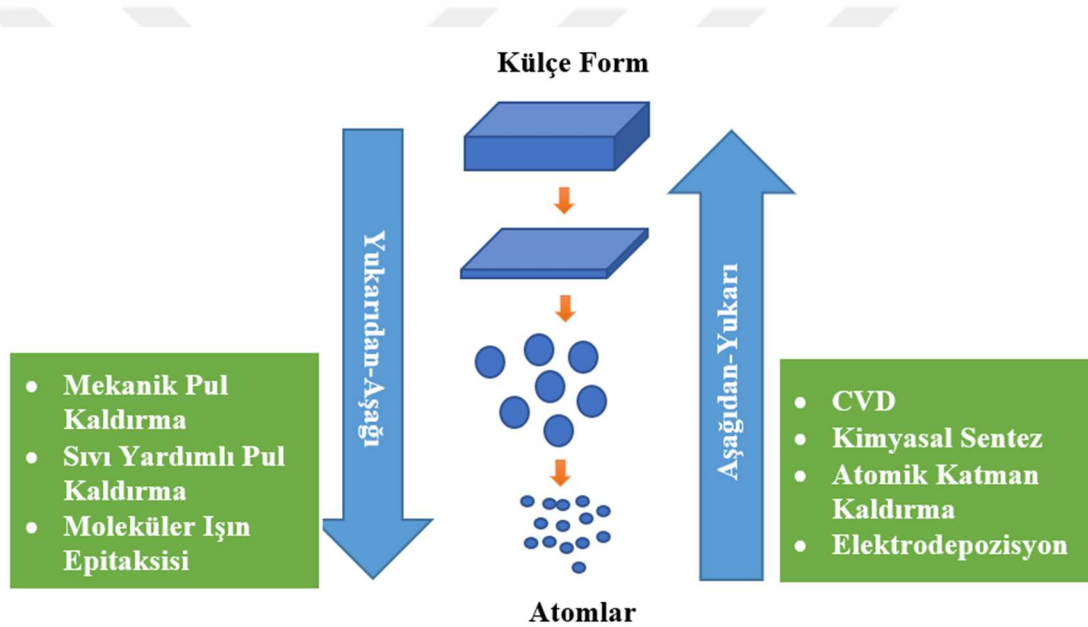
Şekil 15.(a) MoSe₂-ZNRs hibrit H₂ gaz sensör (Abun et al., 2020), (b) Direnç bazlı SMO H₂ gaz sensörü (Gu et al., 2012)

Tablo 5. TMDC Tabanlı Süperkapasitörlerin Literatürde Rapor Edilen Performansları

	Alttaş	Büyütme Yöntemi	Malzeme	Elektrolit	Enerji Yoğunluğu	Güç Yoğunluğu	Spesifik Kapasite	Stabilite	Ref.
1	-	Hidrotermal	MoSe ₂ ve grafen pulları kompozit	Katı hal PVA-KOH jel elektrolit	48.7 Wh/kg	3 kW/kg	748 F/g	13,000 (%78)	(Jana et al., 2025)
2	Esnek Mo folyo	Isıl tavlama	MoS ₂ , MoSe ₂	0.5 M H ₂ SO ₄	-	-	MoS ₂ : 35 mF/cm ² MoSe ₂ :25 mF/cm ²	-	(Vikraman et al., 2024)
3	Grafit	Kolay hidrotermal yöntem	MoS ₂	2M KOH	103.51 Wh/kg	3807.59 W/kg	1866.66 F/g (5 mV/s)	3000 (%93,52)	(Asghar et al., 2023)
4	Grafit	Spin kaplama + CVD	MoSe ₂	0.5 M H ₂ SO ₄	-	-	-	MoSe ₂ -800 °C 30dk boyunca. 1000 (%9 azalma)	(Chouki et al., 2021)
5	Karbon fiber kağıt	Tek-pot hidrotermal reaksiyon yöntemi	MoSe ₂	0.5 M H ₂ SO ₄ ve 1 M KOH	-	-	Cdl 23–38 mF/cm ² , 1T@2H-16 için 37.46 mF/cm ²	-	(Liu et al., 2022)
6	Grafit folyo	Sıvı pul kaldırma yöntemi	MoSe ₂	0.5 M H ₂ SO ₄	-	-	15 F/g (0.1 A/g)	12(%95)	(Arora, 2022)
7	Nikel-Köpük	in-situ selenizasyon	2H-MoSe ₂	2 M KOH	-	-	46.22 mAh/g (2 A/g)	2000(%64) SSC cihazı 10000 (%105)	(Upadhyay & Pandey, 2021)
8	ITO	Microwave	MoSe ₂	0.5 M H ₂ SO ₄	-	-	257.38 F/g 1 A g ⁻¹	5000 (%95)	(Vattikuti et al., 2020)
9	-	Hidrotermal	MoSe ₂ -MXene	3M KOH	58.8 Wh/kg	800.3 W/kg	1531.2 F/g 1 A g ⁻¹	10,000 (94.1%)	(Arulkumar et al., 2023)
10	-	Hidrotermal	MoSe ₂ -Au	1M H ₂ SO ₄	67 Wh/kg	-	1338 F/g 1 A g ⁻¹	500 (95%)	(Layek et al., 2024)
11	-	Hidrotermal	MoSSe/rGO	6 M KOH	-	-	373 F/g 1 A g ⁻¹	4600 Döngü %89.5 korunum	(Gowrisankar et al., 2021)
12		Hidrotermal	Ni ₂ P/NiSe ₂ /MoSe ₂ -- Ni ₂ P/NiSe ₂ /MoSe ₂ //AC	4 M KOH	23.5 Wh/kg (AC)	400 W/kg (AC)	607.5 F/g 0.5A/g 66.1 F/g (AC) 0.5 A/g	1000 (%87.9) (AC) 45000(%116,6)	(Suet al., 2025)
13	-	Hidrotermal	MnSe ₂ /MoSe ₂ @MWCNT NiSe ₂ /MoSe ₂ @MWCNT	3 M KOH	-	-	1969 F/g (MnSe ₂) 1699 F/g (NiSe ₂)	3000 %99 (Mn) %97 (Ni)	(Chaharganeh Kalanistani et al., 2025)

TMDC Büyütme Yöntemleri

TMDC tabanlı cihazların performansı büyük ölçüde malzemenin elektriksel özelliklerine bağlıdır. Bu elektriksel özellikler ise doğrudan olarak elde edilen filmin kristal yapısı (latis) ve yapısal kalitesi ile ilişkilidir. Bu nedenle, yüksek kaliteli TMDC malzemelerin elde edilebilmesi için büyütme (sentez) ve yığma (depozisyon) süreçlerinin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir. TMDC malzemelerin büyütülmesinde sıklıkla kullanılan yöntemler arasında kimyasal buhar yığma (CVD), fiziksel buhar yığma (PVD), atomik katman yığma (ALD) ve darbeli lazer yığma (PLD) gibi ileri düzey ince film teknolojileri yer almaktadır (Şekil 16) (Baek et al., 2023). 2B TMDC malzemeler yukarıdan-aşağı ve aşağıdan-yukarı olmak üzere genellikle iki farklı stratejiyle sentezlenirler (Özküçük, 2019).



Şekil 16. Yukarıdan aşağı ve aşağıdan yukarı büyütme yöntemleri

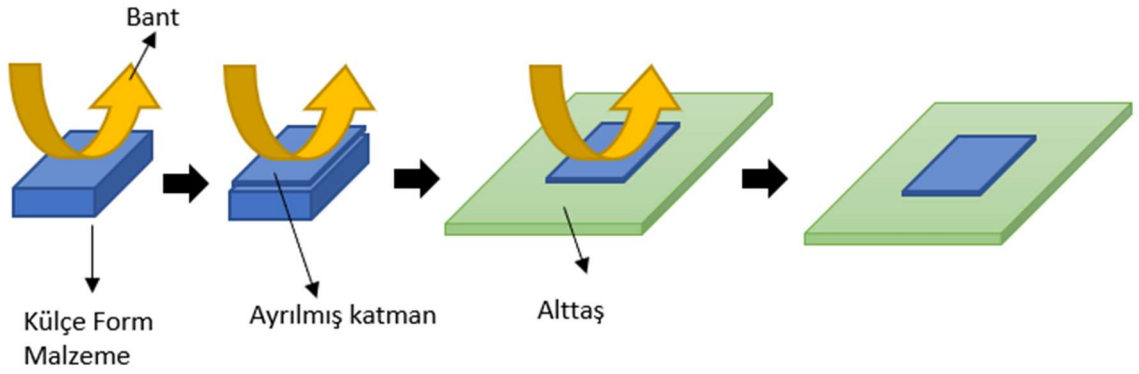
Yukarıdan-Aşağı Yaklaşım

Yukarıdan-aşağı büyütme yaklaşımında mikro ve nano boyutlarda ayırma içerir. Bu katmanları kaldırabilmek için mekanik pul kaldırma, sıvı yardımcı pul kaldırma ve elektrokimyasal pul kaldırma yöntemleri uygulanır (Özküçük, 2019).

Mekanik Pul Kaldırma

2B'lu TMDC üretmek için en kolay yöntem kırtasiye bant yöntemidir (Novoselov et al., 2005). Sp² karbonun tek katmanlı formu olan grafen latis yapısı elmasın latis yapısıyla aynı şekilde altıgendir. Bu yöntem kullanılarak grafenin katmanlar arasındaki zayıf vdW bağları kırılarak

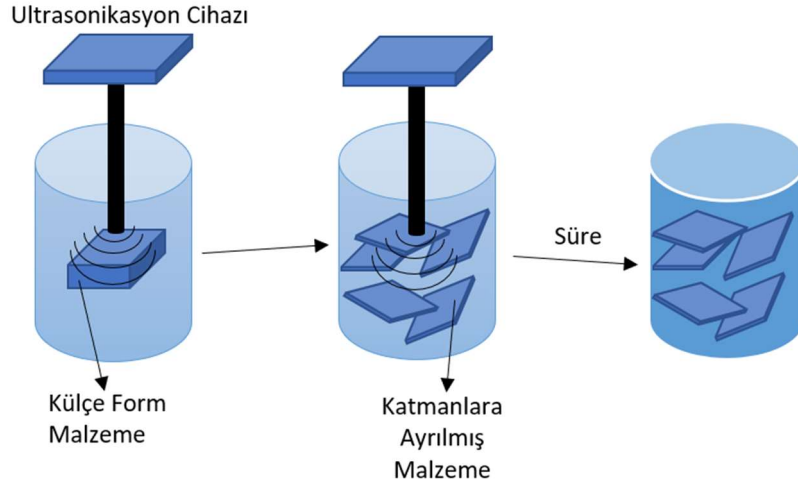
bu katmanlar ayrıştırılır. Bu yöntem Şekil 17’da gösterilen üç adımda yapılır ve kırtasiye bandı kullanılır. Şekil 17’da gösterildiği gibi bir adet kırtasiye bandı külçe formdaki grafene ya da TMDC malzemeye yapıştırılır. İkinci adımda TMDC malzemenin zayıf vdW bağları kırılan katmanlar banda yapışır. Üçüncü adımda bu bant aktarılmak istenen altaşa bastırılır ve bant kaldırılır. Yapıştırılan bant kaldırıldığında tek katmanlı veya birkaç katmanlı TMDC hedef yüzeye aktarılmış olur. Bant çıkarıldıktan sonra aseton veya benzeri bir sıvı ile yıkanır. Bu yöntemde aktarılan pullar homojendir fakat boyutlarını ve kalınlığını kontrol etmek mümkün değildir (Bay, 2019; Butanovs, 2020; Özküçük, 2019).



Şekil 17. Kırtasiye bandı ile mekanik pul kaldırma

Sıvı Yardımlı Pul Kaldırma

Sıvı yardımcı pul kaldırma yöntemi kimyasal çözücüler, sıvılar, polimerler gibi sıvı maddeler kullanılarak pul oluşturma prensibine dayanır. Şekil 18’teki temsilde gösterildiği gibi pul sayısını arttırmak için genellikle ultrasonik dalga üreten bir cihaz ve santrifüj cihazları kullanılır. Bu yöntem külçe formundaki TMDC malzemedan pul oluşturmak için en etkili yöntemdir (Bay, 2019). Bu yöntemde, külçe formda olan ve katmanlarına ayrılmak istenilen malzeme bir çözücü içerisine konulur. Külçe formdaki zayıf vdW bağlarına dışardan birkaç saat boyunca ultrason enerjisi verilir. Uygulanan ultrason dalgaları kavitasyon olarak adlandırılan küçük kabarcıklar oluşur. Oluşan bu kabarcıklar patladığında içlerindeki basınç serbest kalır ve güçlü bir kesme kuvveti oluşturur. Zayıf vdW bağlarında oluşan bu kuvvet ile itme ve çekme olayı bağların kırılmasına neden olur. Burada kaliteli düzeyde pul elde edebilmenin püf noktası ultrason enerjisinin gücü ve süresinin dikkatlice ayarlanmasıdır. Ayrıca bu işlemde herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşmamakta yalnızca fiziksel olarak katmanlar birbirinden ayrılmakta. Sıvı yardımcı katman kaldırma yönteminin dezavantajı ise üretilen TMDC’lerin pul boyutları sınırlı olmasıdır (Bay, 2019; Butanovs, 2020; Özküçük, 2019).

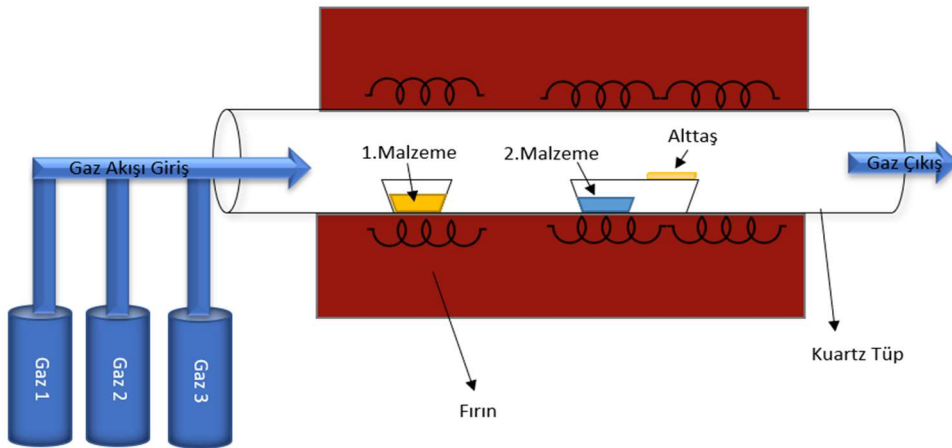


Şekil 18. Sıvı yardımlı pul kaldırma

Aşağıdan-Yukarı Yaklaşım

Kimyasal Buhar Yığıma (CVD)

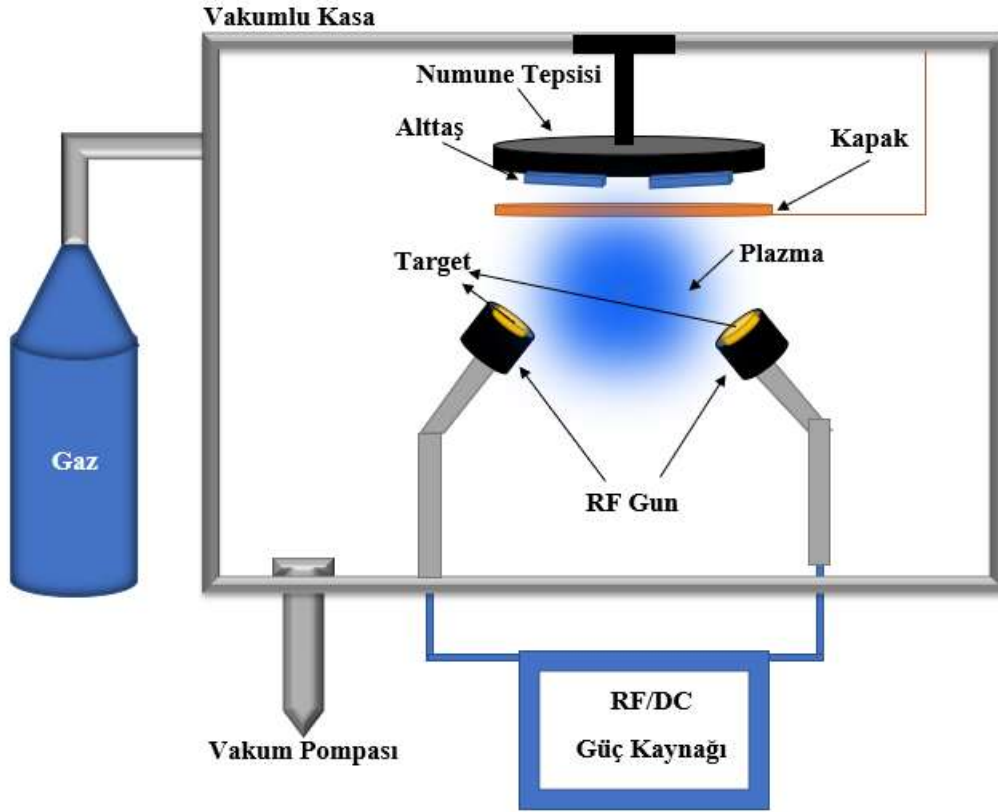
Kolay ve kullanıcı dostu olan CVD yöntemi, morfoloji, kristal yapı ve atomik kusurları kontrol edilebilen basit ucuz ve yüksek kaliteli TMDC üretmek için etkili bir yöntemdir (Bay, 2019; Bharti et al., 2023). Şekil 19’da gösterimi yapılan CVD’de, hidrojen (H_2), azot (N_2), argon (Ar_2) ve bunların karışımları olan taşıyıcı gazlar yardımıyla buharlaşmış öncü malzemeler quartz tüp içerisinde reaksiyon odasına taşınır (Baek et al., 2023; Özküçük, 2019). Yüksek sıcaklık bölgesinde bulunan alttaş üzerinde taşıyıcı gaz yardımıyla taşınan buharlaşmış öncü malzemeler kimyasal bir reaksiyon oluşturur (Öztürk & Gür, 2024). Altıgen simetriye sahip TMDC kristali, üçgen şekilli nano boyutta ince filmlerin alttaş üzerine yığılmasına neden olur (Baek et al., 2023). Nano yaprakların kalınlık ve boyutlarının kontrol edilmesinde öncü miktarının önemli olduğu rapor edilmiştir (Öztürk & Gür, 2024). Metal ve ametal malzemelerin çoğunu CVD yöntemi ile üretmek mümkündür (Bay, 2019).



Şekil 19. Kimyasal Buhar Yığıma (CVD) Yöntemi

Radyo Frekans (RF) Magnetron Saçtırma Yöntemi

Fiziksel buhar yığıma (PVD) yöntemlerinden birisi olan saçtırma (sputter) yöntemi ince film oluşturmada güvenilir, esnek ve etkili yöntemlerden birisidir. Grove doğru akım (da) parlama deşarj kullanarak gazların elektrokimyasal polaritesini araştırırken yığılmalar gözlemlemiştir. Bu gözlem sonraki yıllarda Wright tarafından, film oluşturan malzemenin kaynağı olarak katot kullanılmış ve metalik filmlerin saçtırma yoluyla yığılmasını göstermiştir. Saçtırma yöntemi başta katot saçtırma ya da diyot temelli olsa da ilerleyen yıllarda termal buharlaştırma yerini almıştır. Gelişen vakum yöntemleriyle birlikte pek çok metal malzeme yığılmaya başlanmıştır. Saçtırma yönteminde RF kullanılarak dielektrik malzemeler yığılmaya başlanmıştır. İlerleyen yıllarda manyetik saçtırma yöntemi geliştirilmiş ve plazma temelli saçtırma teknolojinin temeli olmuştur (Gudmundsson, 2020).



Şekil 20. Magnetron Saçtırma yöntemi

Magnetron saçtırma yöntemi üretiminin kolay olması, kalınlığı kontrol edebilme ve tekdüze yüzeyler oluşturmak sebebiyle en çok kullanılan büyütme tekniklerinden biridir. Magnetron saçtırma yöntemi bir PVD yöntemidir. Magnetron saçtırma yönteminde alttaş üzerine hedef malzemeyi kaynaktan fırlatarak ince film oluşturma yöntemidir. Bu işlemde argon, azot ve oksijen gibi gaz iyonlarının oluşturduğu bir plazma ortamında gerçekleşir. Büyütülecek yüzeye yüksek enerjili elektrik alan ile yönlendirilmiş parçacıkları kademeli olarak çarptırılır. Bu iyon çarpması sonucunda hedef malzemeden atomlar sökülür. Alttaş

zerinde ince film oluşturmak için hedeflenen malzemenin yüzeyinden koparılmış olan partiküller alttaş boyunca taşınır. Oluşan eř yüzeyli ince filmin kalınlığını yığma süresini ayarlayarak değiştirilebilir. Klasik saçtırma işlemi düşük yığma hızı, yüksek alttaş sıcaklığı ve düşük iyonlaşma verimliliği gibi dezavantajları vardır. Bu olumsuzluklar magnetron saçtırma yöntemi ile aşılmıştır (Erdoğan, 2022; Hong et al., 2021; Yang et al., 2024).



MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Nikel köpük malzemesi hücre boyutu 110 PPI, saflığı >%99 ve kimyasal bileşimi Ni+Co >%99.99 özelliklerine sahiptir.

MoSe₂ target malzemesi, 2” çapta ve 0,25” kalınlıkta, saflığı >%99 ve yoğunluğu ~7g/cm³ özelliklerine sahiptir.

Temizleme işlemleri için kullanılan kimyasallar ve özellikleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Kullanılan kimyasallar ve özellikleri

Kimyasalın İsmi	Marka	Özellik	Amaç
Etanol	Sigma-Aldrich	Alkol	Nikel köpük elektrodun temizlenmesinde
Saf su	-	Su	Durulama amaçlı
Aseton	Sigma-Aldrich	Asit	Nikel köpük temizleme işleminde
Hidrojen Peroksit (H₂O₂)	Sigma-Aldrich	Asit	Cam temizleme işleminde
KOH	Sigma-Aldrich	Baz	Elektrokimyasal karakterizasyon
Hidroklorik asit (HCl)	Isolab	Asit	Nikel köpük temizleme işleminde
Sülfirik Asit (H₂SO₄)	Sigma-Aldrich	Asit	Cam temizleme işleminde

Alttaş Temizliği

Bir alttaş üzerine ince film büyütülmeden önce, yüzeydeki partikül, organik kir ve iyonik kalıntıların tamamen uzaklaştırılması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, çalışmada kullanılan cam ve nikel köpük alttaşların yüzeyleri temiz oda koşullarında, ilgili hijyen ve kontaminasyon kurallarına uygun biçimde titizlikle hazırlanmıştır.

Cam Alttaşların Temizliği

Büyük boyuttaki cam plakalar, 1 × 1,5 cm boyutlarında dikkatlice kesilmiştir. İlk olarak, kesilen cam parçaları laboratuvar tipi deterjanla yıkanmış ve bol su ile durulanmıştır. Ardından camlar, normal musluk suyu içeren beherlere yerleştirilmiş ve bir süre bekletilmiştir. Bu su boşaltılarak yerine deiyonize (DI) su eklenmiş, camlar petri kaplarına yerleştirilerek DI su ile

tamamen kaplanmış ve ultrasonik banyoda (Şekil 21) 15 dk. süreyle sonikasyona tabi tutulmuştur. Sonikasyon işlemi sonrasında camlar iki kez DI su ile durulanmış ve işlem bir kez daha 15 dk. sonikasyonla tekrarlanmıştır.

Yüzeydeki organik kalıntıların tamamen uzaklaştırılması amacıyla, çeker ocak altında pirana çözeltisi hazırlanmıştır. %20 oranında hidrojen peroksit (H_2O_2) ve sülfürik asit (H_2SO_4) karışımıyla elde edilen bu çözelti, yüksek oksitleyici özelliğe sahip olduğundan cam temizliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Temizlenmiş camlar bu çözelti içerisinde bir gün boyunca bekletilmiştir. Ertesi gün, camlar çözelti içerisinden alınarak iki kez DI su ile durulanmış ve ardından DI su içeren petri kaplarında tekrar 15 dk. sonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Son olarak, cam yüzeylerin tekrar kirlenmesini önlemek amacıyla DI su içerisinde muhafaza edilmiştir.



Şekil 21. Ultrasonikasyon Cihazı

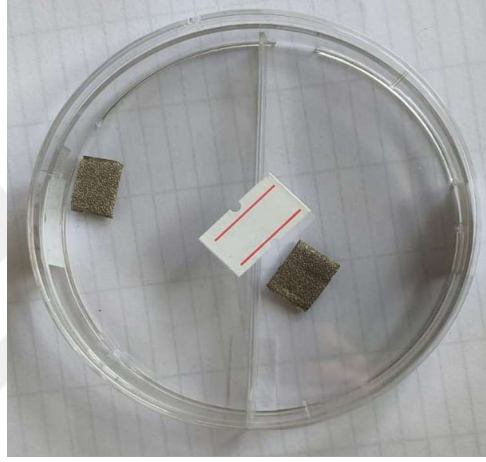
*DAYTAM temiz oda

Nikel Köpük (Ni-foam) Temizleme

Nikel köpük (Ni-foam) alttaşlar, büyük levhalar hâlinde temin edilmiş olup 1×1.5 cm boyutlarında parçalar hâlinde kesilmiştir. Elde edilen küçük boyuttaki nikel köpük parçaları üzerlerindeki organik kalıntıların uzaklaştırılması amacıyla %100 aseton içerisine daldırılarak 5 dk. süreyle ultrasonik banyoda işleme tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrasında örnekler

deiyonize su ile durulanmış ve aynı işlem %100 etanol ile tekrar edilmiştir. Etanol sonikasyonu da yine 5 dk. sürmüştür.

Organik kalıntılardan arındırılan nikel köpükler, yüzeylerindeki olası oksit tabakasının giderilmesi amacıyla %37 oranında hidroklorik asit (HCl) çözeltisi içerisinde yerleştirilmiş ve 5 dk. süreyle tekrar ultrasonik banyoda bekletilmiştir. İşlem sonunda numuneler bol DI su ile durulanmış ve son bir kez DI su içerisinde kısa süreli sonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Temizlenen örneklerin yüzeylerindeki sıvı, basınçlı azot gazı yardımıyla uzaklaştırılmış; ardından 60 °C sıcaklıktaki etüvde kurutularak işlemler tamamlanmıştır. Kuruyan numuneler kontaminasyondan korunmak amacıyla temiz petri kaplara aktarılmış ve deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere saklanmıştır (Şekil 22).



Şekil 22. Temiz Nikel Köpük

MoSe₂ İnce filmlerinin Magnetron Saçtırma ile Büyütülmesi

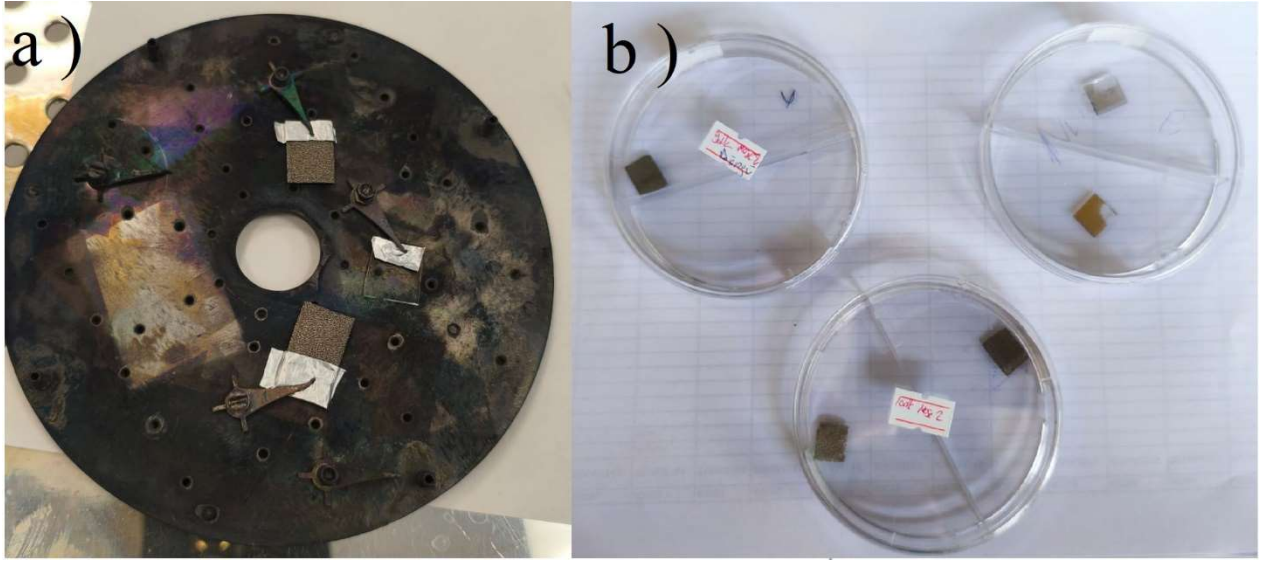
Büyütme işlemleri PVD yöntemlerinden birisi olan RF magnetron saçtırma yöntemi ile yapıldı. Yüzey alanı geniş malzeme üretme, kalınlık kontrol etme ve yüksek ergime noktasına sahip malzemeleri alttaş üzerine homojen olarak büyütmeye olanak tanınması saçtırma yöntemini kullanışlı yapmaktadır. Büyütülen filmlerin kristal yapıları, morfolojileri ve kimyasal maddelerin tepkimeye girme oranları saçtırma sistemi ile kontrol edilebilir. İnce filmlerin büyütülme işlemi Atatürk Üniversitesi DAYTAM biriminde yer alan VAKSİS marka magnetron saçtırma sisteminde yapılmıştır (Şekil 23).



Şekil 23. Magnetron Saçtırma Sistemi

*DAYTAM Temiz Oda

RF saçtırma yöntemi ile Tablo 7’de verilen parametrelere göre alttaşlar üzerine farklı büyütme zamanlarında ince film büyütülmüştür. Malzemeler 2 dk., 5 dk., 9 dk. ve 10 dk. olmak üzere etiketlenmiştir. Cam alttaşlar morfolojik ve karakterizasyonu için, nikel köpük alttaş ise elektrokimyasal ölçümler için kullanılmıştır. Temizlenmiş nikel köpük ve cam alttaşlar sisteme yerleştirildi (Şekil 24). Saçtırma haznesi Tablo 7’de verilen temel basınca getirildi. Saçtırma gazı olarak argon kullanıldı. Temel basınç istenen seviyeye geldikten sonra 300 °C sıcaklık ayarlandı ve ısıtıcıdan kaynaklı kirliliğin gitmesi için 30 dk. tekrar vakumda bekletildi. İçerideki kirlilik sistemin izin verdiği kadar temizlendikten sonra büyütme işlemine geçildi. Büyütme basıncı argon gazı ile (100 sscm) 20 mTorr’a ayarlandı. Miknatıslara güç 120W güç verildi. Kaynak üzerinde olabilecek kirliliklere karşı 5 dk. boşta çalıştırıldı. Kaynak temizliği artırdan koruma tepsisi açılarak büyütme işlemleri yapıldı. Büyütme işleminde 4 farklı sürede dört adet ince film büyütüldü. Büyütme işlemi sonrasında kazan içi oda sıcaklığına düşene kadar beklendi ve numuneler dışarı çıkarıldı (Şekil 24 (b)).



Şekil 24. a) Sisteme yerleştirilen temiz cam ve nikel köpük ve b) MoSe₂ ince film büyütülmüş cam ve nikel köpük

Tablo 7. Büyütme Parametreleri

Süre	Temel Basınç	Büyütme Basıncı	Güç	Alttas Döndürme Hızı	Sıcaklık	Alttas	Kaynak Malzeme
2 dk.	3×10^{-6}	20 mTor	120 W	5 dv/dk.	300 °C	Nikel Köpük, Cam	MoSe ₂
5 dk.	2.6×10^{-6}	20 mTor	120 W	5 dv/dk.	300 °C	Nikel Köpük, Cam	MoSe ₂
9 dk.	2.7×10^{-6}	20 mTor	120 W	5 dv/dk.	300 °C	Nikel Köpük, Cam	MoSe ₂
10 dk.	3.2×10^{-6}	20 mTor	120 W	5 dv/dk.	300 °C	Nikel Köpük, Cam	MoSe ₂

Yöntem

Bu tez kapsamında üretilen TMDC tabanlı ince filmlerin yapısal, yüzeysel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çok yönlü karakterizasyon teknikleri uygulanmıştır. Yüzey morfolojisi ve topografik özellikler, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Kristal yapı ve faz analizi, X-Işını Kırınımı (XRD) ile gerçekleştirilmiştir. Kimyasal bağ yapıları ve yüzey bileşimi hakkında bilgi edinmek için X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) kullanılmıştır. Raman spektroskopisi ile malzemenin faz yapısı ve kristallik düzeyi analiz edilmiştir. Ayrıca, spesifik yüzey alanı ve gözeneklilik özellikleri Brunauer–Emmett–Teller (BET) yöntemi ile belirlenmiştir. Bu analizler, üretilen MoSe₂

filmlerin yapısal ve elektrokimyasal performansı ile yüzey özellikleri arasındaki ilişkinin ortaya konulmasında kritik rol oynamaktadır.

Karakterizasyon Yöntemleri

RF magnetron saçtırma yöntemi ile farklı sürelerde büyütülen MoSe₂ filmleri XRD yöntemi kullanılarak kristal yapıları belirlendi ve yüzey morfolojisinin analizi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. RAMAN spektroskopisi kullanılarak büyütülen filmin kalitesine ve oluşan yapıdaki örgü kusurlarına bakıldı. Farklı kalınlıklarda büyütülen MoSe₂ filmlerinin yüzeyindeki kompozisyonun ve elementlerin oksidasyon hallerinin belirlenmesinde X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) cihazı kullanıldı.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

SEM, analiz yapılmak istenen numune üzerini yüksek enerjili elektron demeti ile tarayarak bir görüntü oluşturan bir elektron mikroskobu çeşididir. Elektronlar, numune üzerindeki atomlar ile etkileşime girerek, yüzey morfolojisi, kimyasal bileşim ve elektriksel iletkenlik gibi özellikler hakkında bilgi taşıyan sinyaller üretir. SEM, 1 ile 5 nm altındaki detayları gösterecek yüksek çözünürlüklü yüzey görüntüleri oluşturabilir. SEM görüntüleri, elektron demetinin ince olması sebebiyle geniş bir alan derinliğine sahip olur ve bu da görüntülere üç boyutlu bir görünüm kazandırır. SEM' in çalışma prensibi şöyledir. Vakum altında elektronlar üretilir ve bir elektrik alan içinde bu elektronlar hızlandırılır. Hızlandırılmış bu elektron demeti elektromanyetik merceklere geçerek numune üzerine bombardıman yapılır. Elektron bombardımanı sonucunda yüzeyden farklı türde elektronlar yayılır. Bir sensör yardımı ile bu ikincil elektronlar algılanır ve sinyalin şiddeti, taranan ana elektron demeti ile kıyaslanarak numune yüzeyinin görüntüsü oluşturulur (Boddolla & Thodeti, 2018).

Saçtırma ile büyütülen MoSe₂ filmleri morfolojik yapılarını gözlemlemek için Atatürk Üniversitesi DAYTAM biriminde yer alan Zeiss Sigma 300 markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı (Şekil 25). SEM cihazı film yüzeyi üzerine odaklanmış elektronlar göndererek yüzeyi tarar ve tarama sonunda yüzeyin yüksek çözünürlükte görüntüsünü alır.



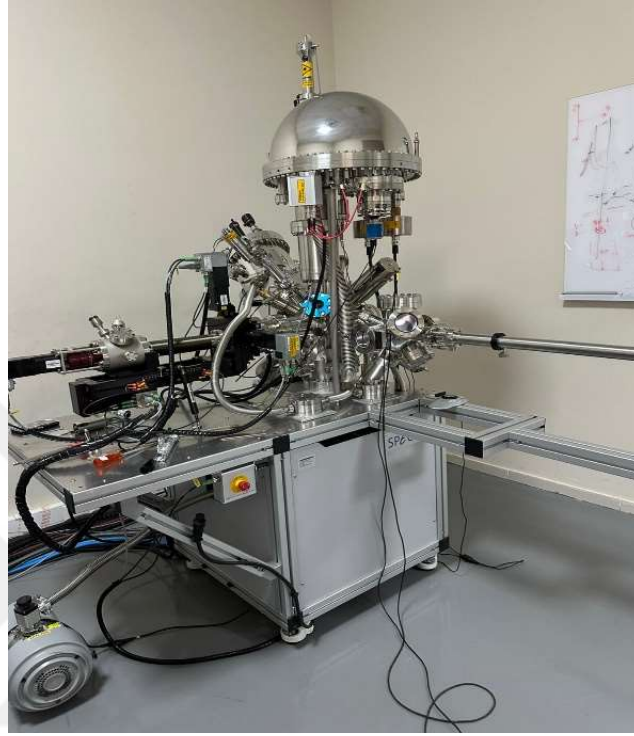
Şekil 25. Kullanılan SEM sistemi

X-ışın Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)

X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), 1887 yılında Heinrich Hertz tarafından keşfedilen fotoelektrik etkiye dayanır. Hertz, ışık ile ışımlanmış yüzeylerin elektron yaydığını gözlemlemiştir ve teorik olarak 1905 yılında Albert Einstein tarafından açıklanmıştır. X-ışını tarafından uyarılmış ilk fotoemiyon olayı Robinson ve Rawlinson tarafından gözlemlenmiştir. Bu yöntemi analiz aracı olarak ilk olarak Steinhardt ve Serfass tarafından kullanılsa da günümüzdeki gelişmiş halini İsveç'teki Uppsala Üniversitesi'nden Kai Siegbahn tarafından yapılmıştır. Başlangıçta kimyasal analiz için elektron spektroskopisi (ESCA) olarak isimlendiriliyordu.

XPS analizi yüzeye duyarlı bir tekniktir. Bu yöntem ile malzeme yüzeyi X-ışını bombardımanına tutulur ve malzeme yüzeyinden yansıyan elektronların kinetik enerjileri ölçülür. Hidrojen ve helyum dışındaki bütün elementler tespit edilebilir. Yüzey hassasiyeti ve numunenin kimyasal durumu hakkında bilgilerin elde edilmesi bu tekniği güçlü kılan iki temel özelliktir. Tüm malzemelerin yüzeyleri vardır ve diğer malzemeler ile bu yüzeyler etkileşime girer. Yüzey ıslanabilirliği, yapışma, korozyon, yük transferi ve kataliz gibi faktörlerin tümü yüzeyler ve yüzey kontaminasyonu ile belirlenir. Bu sebeple yüzeyleri incelemek ve anlamak önemlidir (Stevie & Donley, 2020).

Saştırma yöntemi ile büyütölmüş MoSe₂ nano duvar yapılı filmler Atatürk Üniversitesi DAYTAM bünyesindeki Specs-Flex marka X-Ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) (Şekil 26) cihazı kullanılarak yapıdaki elementlerin kimyasal kompozisyonu ve oksidasyon halleri analiz edildi. Analiz sonunda büyütölmüş filmlerin oksidasyon seviyeleri, bağ oluşumları ve bağlanma enerjileri gibi kimyasal bilgileri elde edildi.



Şekil 26. Kullanılan XPS sistemi

X-ışın Kırınımı (XRD)

XRD, birim hücre boyutları, bağ açıları, kimyasal bileşim ve malzemelerin kristalografik yapısı gibi kristal bir maddenin kafes yapısı hakkında değerli bilgiler sağlayan tahribatsız bir analitik teknik türüdür. Katot ışın tüpü (CRT) tarafından üretilen X-ışınları, tek dalga boyuna indirilerek filtrelenir ve ışın demeti haline getirilerek numuneye gönderilir. Numune üzerine gelen radyasyonların dalga boyunu kırınım açısı ve kafes aralığı ile ilişkilendiren Bragg yasasına dayalı yapıcı girişim üretir. XRD, kristal yapıdaki malzemenin faz tanımlaması ve birim hücre boyutları ile atomlar arası uzaklıklar arasında bilgi veren hızlı bir tekniktir. Numuneye yönlendirilen ışınlar, kristal yapıdaki numuneye çarptığında ve Bragg Yasası'nın şartları sağlandığında yapıcı girişim ve kırınım ışınları oluşur. Bragg denklemi ($n\lambda = 2d \sin\theta$), ışığın dalga boyu (λ), kırınım açısı (θ) ve kristal yapının düzlemleri arasındaki mesafeyle (d) olan ilişkiyi açıklar. Numune, belirli 2θ açılarıyla taranarak bu ilişki gözlemlenir (Boddolla & Thodeti, 2018).

RF saçırma yöntemi ile büyütülen MoSe₂ filmler kristal yapısının özelliklerini incelemek ve sahip oldukları fazları belirlemek için Atatürk Üniversitesi DAYTAM biriminde yer alan Panalytical Empyrean XRD kullanıldı (Şekil 27).



Şekil 27. Kullanılan XRD Sistemi

Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi (RS), numuneye yönlendirilen fotonunun bir moleküle çarpıp dağınık bir foton üretmesiyle meydana gelen esnek olmayan saçılmanın frekans kaymasını ölçmek için özelleşmiş bir tekniktir. Saçılan ışığın orijinal fotondan daha düşük frekansa sahip olursa Stokes Raman saçılması eğer ki daha yüksek frekansta olur ise bu da anti-Stokes Raman saçılması olarak adlandırılır. Anti-Stokes Raman durumunda foton enerjisini molekülün bağından alır ve bu bağ başlangıçta uyarılmış titreşim durumundadır. Bileşiklerin parmak izi niteliğinde olan Raman spektrumu, bilinmeyen numunelerin ya da karışımların nitel analizinde kullanılabilir. Raman spektroskopisi, optik fiberlerle birlikte kullanıldığında uzaktan algılama açısından büyük bir avantaja sahiptir. Raman spektroskopisi, gerçek zamanlı izleme sistemlerinde kullanılmıştır. Gerçek zamanlı izleme sistemlerinde, yasadışı uyuşturucu, zehirli madde tespitinde, kimyasal ve biyolojik savaş ajanlarının tespitinde kullanılmıştır. Yüzey Geliştirilmiş Raman Spektroskopisi (SERS), Yüzeyle Güçlendirilmiş Hiper Raman Saçılması (SEHRS), Uç-uyarımli Raman spektroskopisi (TERS), Koherent Anti-Stokes Raman

Spektroskopisi (CARS), Uyarılmış Raman Saçılması (SRS) gibi farklı Raman tipleri bulunmaktadır (Rostron et al., 2016).

Büyütülen MoSe₂ filmler örgü kusurlarına ve ince filmin kalitesini belirlemek için Atatürk Üniversitesi DAYTAM biriminde yer alan WITech alpha 300R Raman cihazı kullanıldı.

Brunauer-Emmett-Teller (BET)

Langmuir teorisinin uzantısı bir uzantısı olan BET analizi, 1938 yılında Stephen Brunauer, Paul Emmett ve Edward Teller tarafından geliştirilmiş ve araştırmacıların soyadlarının ilk harflerinden ismini almıştır. BET yüzey alanını belirlemede kullanılır. BET yüzey analizinde, genellikle azot gazı kullanılır. Bunun sebebi yüksek saflıkta kolayca elde edilebilmesi ve pek çok katı malzeme ile güçlü etkileşimler göstermektedir. Gaz ve katı malzemeler arasındaki etkileşim genelde zayıf olduğundan yüzey sıvı azot kullanılarak soğutulur. Bunun sebebi, tespit edilebilir miktarda adsorpsiyon sağlamak içindir. Bunun ardından numuneye miktarı bilinen azot gazı adım adım verilir. Kısmi vakum koşulları yaratılarak atmosfer basıncından daha az bağıl basınç elde edilir. Doyma basıncına ulaştıktan sonra, basınç artırılrsa bile adsorpsiyon gerçekleşmez. Adsorpsiyon sürecinden kaynaklanan basınç değişimleri, bir basınç transdüseri ile izlenir. Adsorpsiyon katmanları oluştuktan sonra, numune azot dolu hücreden çıkarılır ve ısıtılarak adsorplanmış azotun numuneden salınarak miktarının belirlenmesi sağlanır. Toplanan veriler, adsorplanan gaz miktarının bağıl basınca göre değişimini gösteren BET izotermi (BET isotherm) şeklinde grafik olarak sunulur(Hwang & Barron, 2011).

Filmlerin BET analizleri için Atatürk Üniversitesi DAYTAM biriminde bulunan Micromeritics Flex marka cihaz kullanıldı.

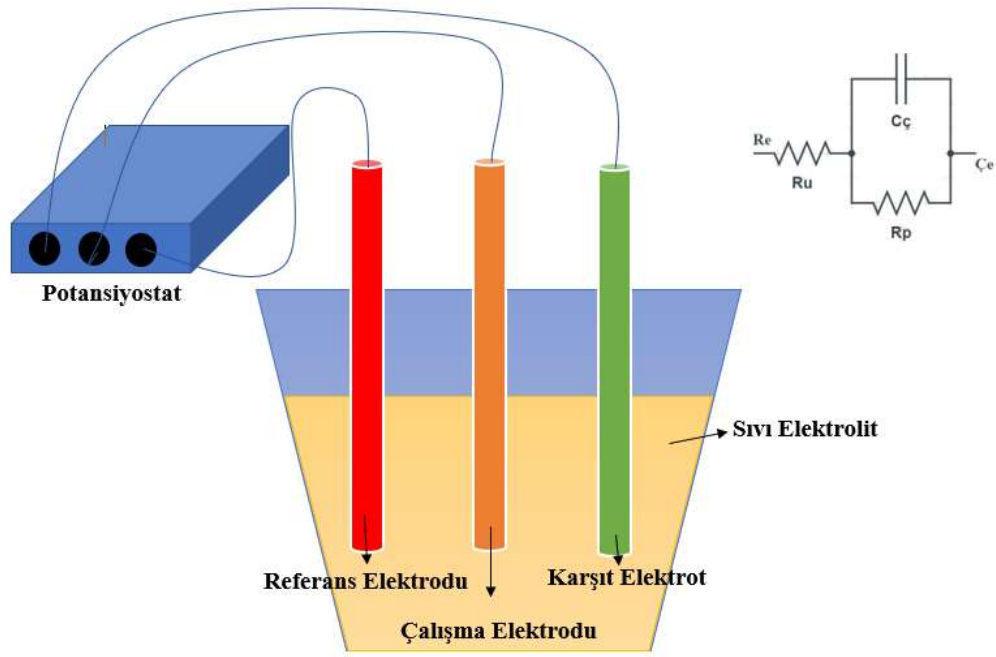
Elektrokimyasal Karakterizasyon Yöntemleri

Dönüşümlü Voltametri (CV)

Veri depolama uygulamalarında en kritik unsur, elektrot malzemesinin doğru şekilde sınıflandırılmasıdır. Bu sınıflandırmanın temelini, malzemenin yük depolama mekanizmasının doğru bir şekilde belirlenmesi oluşturur. Elektrot malzemesinin faradaik (redoks tepkimelerine dayalı) ya da elektrik çift katmanlı (EDL) bir mekanizma ile mi enerji depoladığı, ilk etapta döngü voltametri (CV) ve galvanostatik yük-deşarj (GCD) ölçümleriyle anlaşılabilir. CV eğrileri, malzemenin depolama mekanizmasına göre karakteristik şekiller gösterir. Bu eğriler, elektrik çift katmanlı kapasiteye sahip malzemelerde ideal dikdörtgen şekli gösterirken; faradaik özellikteki malzemelerde ise belirgin platolar, keskin tepe noktaları ya da simetrik oksidasyon–indirgenme zirveleri içeren eğriler gözlemlenir (Mathis et al., 2019). CV sistemi, belirli bir potansiyel aralığında sabit tarama hızı ile çalışarak, elektrota uygulanan potansiyele karşı oluşan akım değerlerinin ölçülmesine dayanır. Ölçüm sırasında, elektrota sabit hızda potansiyel uygulanır; ardından aynı hızla ters yönde taranarak geri dönülür. Bu sırada geçen akım ölçülerek akım-gerilim (I–V) eğrisi elde edilir. Elde edilen eğri, malzemenin elektrokimyasal özelliklerini ve enerji depolama mekanizmasını analiz etmek için önemli bilgiler sunar (Önyılmaz, 2024).

Şekil 28’te örnek bir CV ölçüm düzeneği şematik olarak sunulmuştur. Bu sistemde:

- **Çalışma elektrodu**, elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği ve verinin toplandığı ana elektrottur. I–V eğrisi bu elektrottan elde edilir.
- **Karşıt (yardımcı) elektrot**, sistemde akımın tamamlanmasını sağlayan yardımcı bir elemandır ve çalışma elektrodunun istenilen potansiyelde kalmasını sağlar.
- **Referans elektrot** ise, sabit potansiyel gösteren ve üzerinden akım geçmeyen bir elektrottur. Çalışma elektrodunun potansiyelinin hassas şekilde ölçülmesinde referans olarak kullanılır (Lazanas & Prodromidis, 2023).



Şekil 28. CV ölçüm düzeneği

CV verileri kullanarak spesifik kapasite hesabı aşağıdaki formül kullanılmıştır;

$$C_s = \frac{\int I(V)dV}{v \cdot A \cdot \Delta V}$$

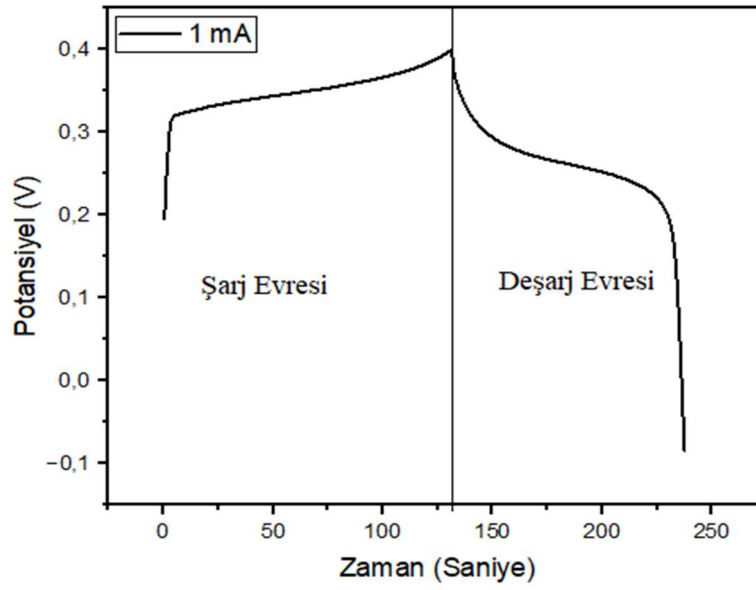
Formülde C_s spesifik kapasite (F/cm^2), $\int I(V)dV$ CV eğrisi altında kalan alan, v tarama hızı (V/s), A elektrodun etkin yüzey alanı (cm^2) ve ΔV potansiyel penceresi (V) belirtir.

Galvanostatik Şarj-Deşarj (GCD)

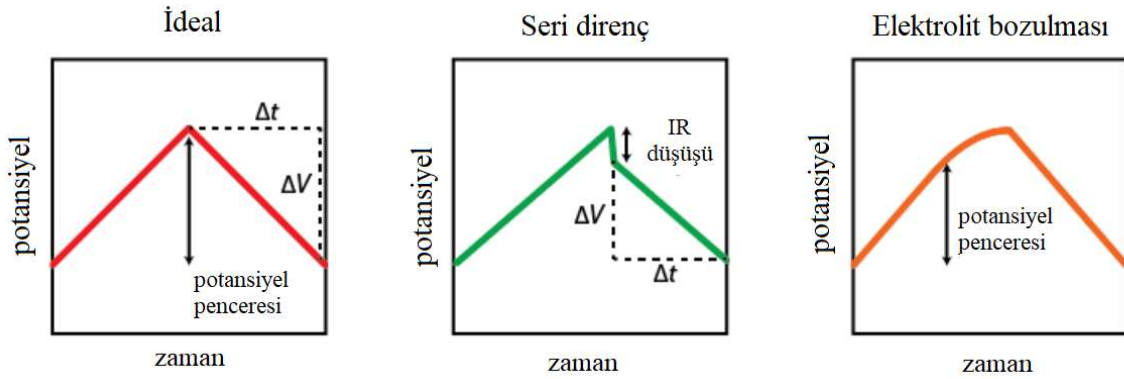
Malzemenin gerçek dünya uygulamalarındaki performansını doğru bir şekilde değerlendirebilmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri GCD analizidir. GCD sistemi, bir elektrot malzemesinin dayanıklılığı ve elektrokimyasal hücre kararlılığı hakkında önemli bilgiler sunar. Aynı zamanda, süperkapasitörün kapasitesini ve şarj-deşarj hızına bağlı olarak değişen performans parametrelerini ortaya koyar. Bu yöntemde süperkapasitöre sabit bir akım uygulanarak, belirlenmiş bir potansiyel aralığında şarj ve ardındandeşarj işlemi gerçekleştirilir.

GCD ölçümlerinde elde edilen gerilim grafiği, değişen pozitif ve negatif eğimle idealde doğrusal bir yapı göstermektedir. Ayrıca, Şekil 29’da 1 mA sabit akım altında ölçülen bir örnek GCD eğrisi sunulmaktadır. Ancak, seri direnç (R_s) ve benzeri içsel sistem dirençleri nedeniyle bu doğrusal yapı çoğu zaman bozulur. Özellikle şarjdandeşarja geçiş evresinde, hücre geriliminde ani bir düşüş (IR düşüşü) gözlemlenir. Bu durum, iç direnç kaynaklı enerji kaybının bir göstergesidir ve GCD eğrisinin simetrisini bozar. Bu olgu, Şekil 30’de ideal ve ideal

olmayan GCD eğrileri karşılaştırılarak görsel olarak ifade edilmiştir (Önyılmaz, 2024; Perişanoğlu, 2023).



Şekil 29. 1 mA sabit akımda ölçülmüş GCD eğrisi



Şekil 30. İdeal ve ideal olmayan GCD eğri örnekleri(Perişanoğlu, 2023).

GCD verileri kullanarak spesifik kapasite hesabı aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$C_s = \frac{2 \cdot I \cdot t}{V \cdot A}$$

Formülde C_s spesifik kapasite (F/cm^2), I deşarj akımı (A), t deşarj süresi (s), A elektrodun etkin yüzey alanı (cm^2) ve V potansiyel aralığı (V) belirtir.

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)

EIS, elektrokimyasal sistemlerin kinetik ve yapısal özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlayan güçlü bir analiz yöntemidir. EIS; yarı iletken karakterizasyonu, kimyasal sensörler, enerji dönüşüm sistemleri ve özellikle enerji depolama cihazları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gerçek hayatta kullanılan elektrot sistemleri, birden fazla elektrokimyasal süreç içerdiğinden doğrudan ve basit bir modelle ölçülemez. Bu nedenle, bu karmaşık süreçleri temsil edebilmek için eşdeğer devre modelleri kullanılır (Şekil 28). Bu modeller, sistemin davranışını elektriksel elemanlar (direnç, kapasitör, Warburg elemanı vb.) ile temsil eder. Bu tür sistemlerde, klasik direnç yerine empedans (Z) adı verilen ve hem dirençsel hem de reaktif bileşenleri içeren karmaşık bir büyüklük kullanılır. Empedans, genel anlamda bir sistemin akıma karşı gösterdiği frekans bağımlı zorluk olarak tanımlanır. EIS yöntemi, sistemi zamanla değişmeyen (lineer ve kararlı) kabul eder ve geniş bir frekans aralığında uygulanan küçük genlikli sinyale karşı sistemin verdiği cevabı ölçerek analiz eder. Bu analiz, sistemin elektriksel özelliklerini ifade eden bir transfer fonksiyonu üzerinden gerçekleştirilir. EIS verileri genellikle Nyquist diyagramı şeklinde sunulur. Bu diyagramda x-ekseni, empedansın gerçek bileşeni olan ohmik direnci temsil ederken; y-ekseni, empedansın imajiner bileşenini, yani kapasitif ve difüzyon kontrollü tepkimeleri ifade eder (İnal, 2016; Lazanas & Prodromidis, 2023).

Bu tez çalışmasında, tüm CV, GCD ve EIS ölçümleri Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Temiz Oda Laboratuvarı'nda bulunan GAMRY Reference 600 model cihaz kullanılarak, üç elektrotlu sistem ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 31).



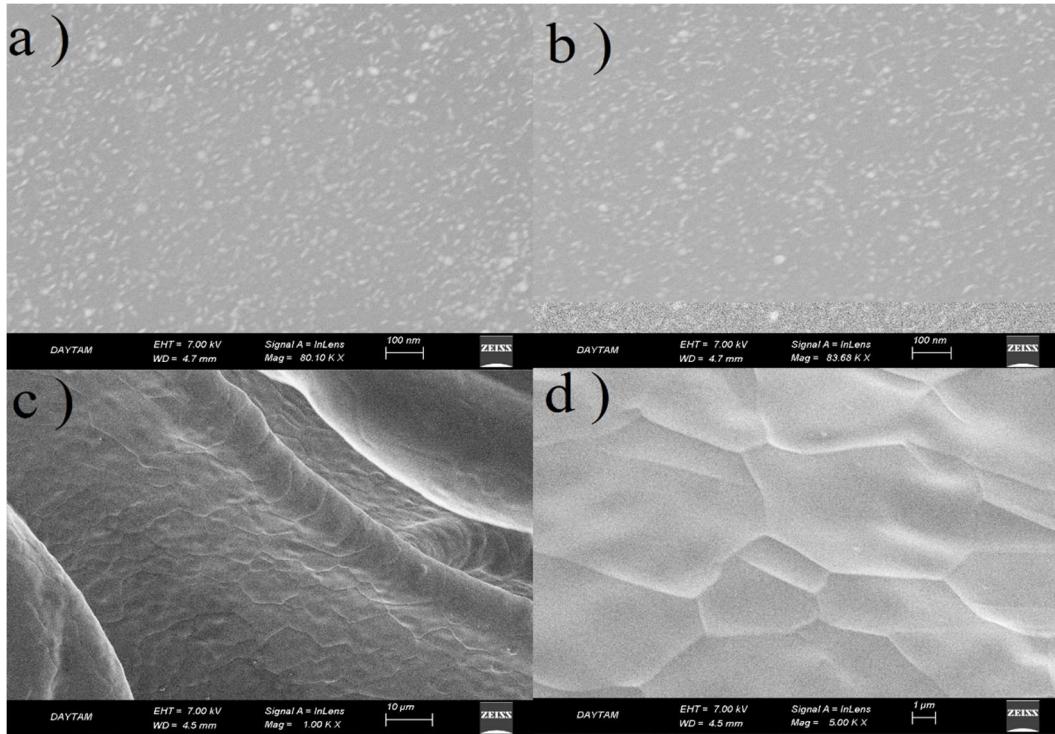
Şekil 31. CV, GCD ve EIS ölçümleri için kullanılan deney düzeneği

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, farklı büyütme sürelerinin MoSe₂ ince filmlerde oluşturduğu yapısal ve morfolojik değişimlerin, özellikle oluşan nanoduvlar yapılarının elektrokimyasal performansa etkisi incelenmiştir. RF magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak, Tablo 7’de belirtilen parametrelere göre MoSe₂ filmleri dört farklı büyütme süresiyle (2, 5, 9 ve 10 dakika) hazırlanmıştır.

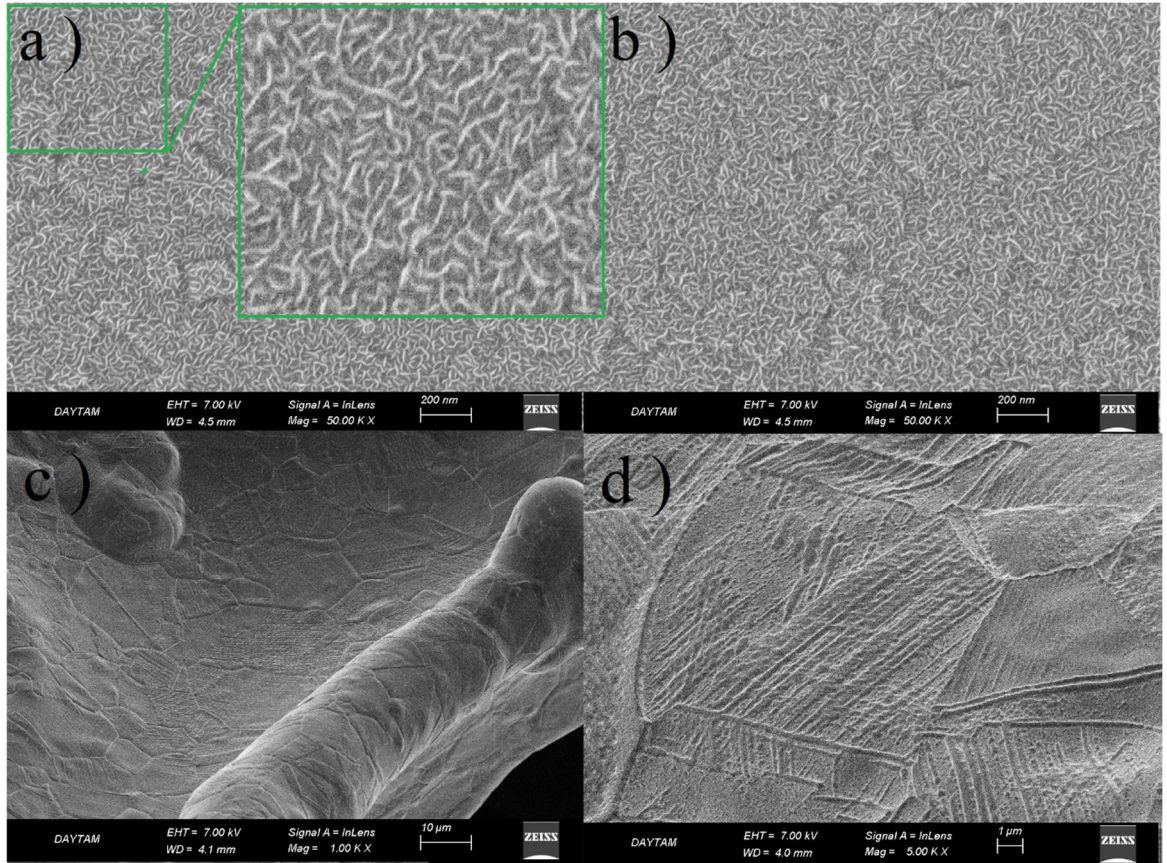
Yapısal (XRD ve Raman), yüzey (SEM, BET) ve kimyasal (XPS) karakterizasyonların ardından, elektrokimyasal analizler (CV, GCD ve EIS) gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda nanoduvlar yapısının enerji depolama davranışına olan etkisi detaylı olarak tartışılmıştır.

Şekil 32’da cam ve nikel köpük alttaşlar üzerine 2 dk. büyütme süresiyle elde edilen MoSe₂ ince filmlere ait SEM görüntüleri sunulmuştur. Şekil 32 (a, b)’de cam yüzeyinden farklı bölgelerden alınan görüntülerde, çekirdeklenme sürecinin yeni başladığı ve yüzeyde homojen bir tabakanın henüz oluşmadığı gözlemlenmektedir. Şekil 32 (c,d)’de ise nikel köpük alttaş üzerinde farklı büyütme oranlarında elde edilen SEM görüntüleri yer almakta olup nikel köpük yapısından dolayı çekirdeklenme net olarak gözükmemektedir. Bu aşamada, istenilen düzeyde iyi tanımlanmış nano duvar yapısının henüz oluşmadığı hem boyut hem de yoğunluk açısından yeterli gelişimin sağlanamadığı anlaşılmaktadır.



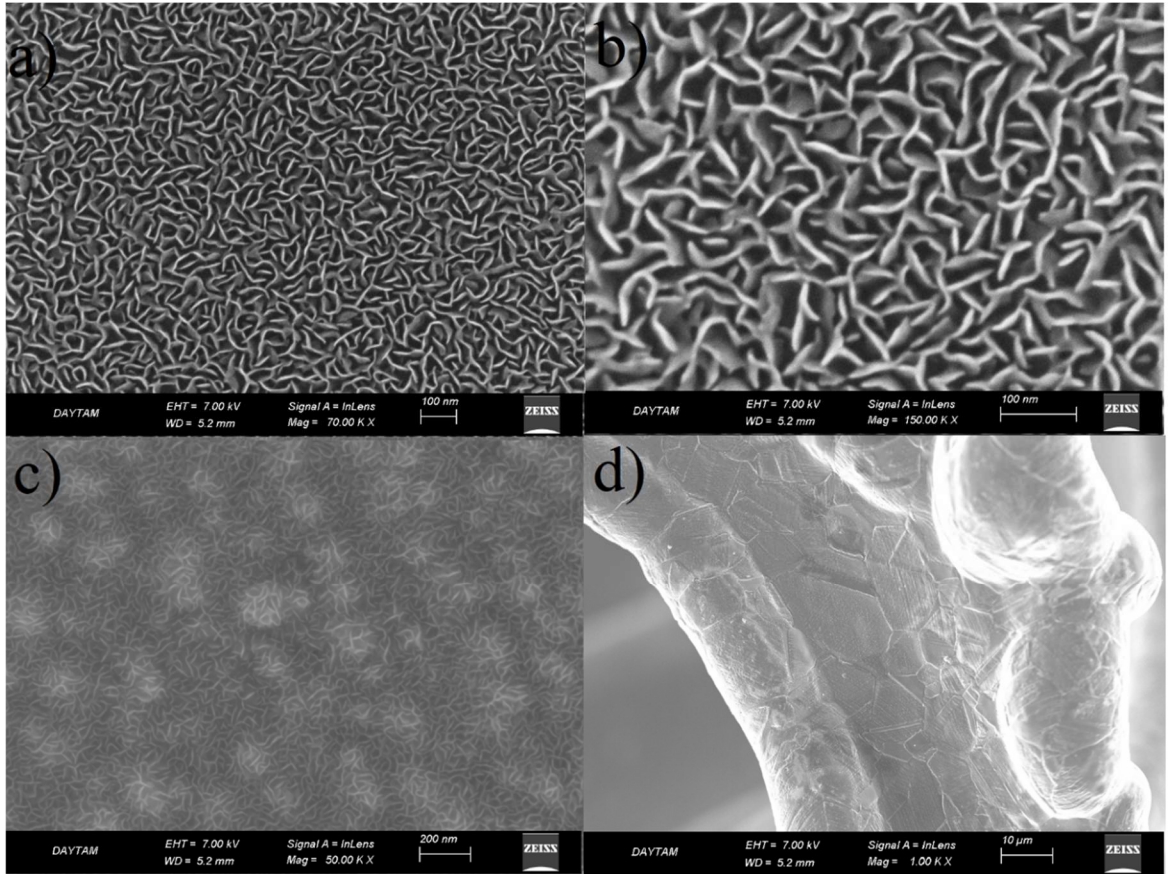
Şekil 32. 2 dk. büyütülmüş numunenin SEM görüntüsü, a b) Cam alttaş üzerine c d) nikel köpük alttaş üzerine

Şekil 33’de nikel köpük üzerine 5 dk. süresince büyütülen MoSe₂ ince filmlerinin SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 33 (a, b)’de cam yüzeyinden farklı bölgelerden alınan görüntülerde, malzeme yüzeyinde homojen olarak kıvrımlı ve dikey yönlü nano duvarların oluştuğu görülmektedir. MoSe₂ malzeme yüzeyine sıkıca ve birbirine yakın bir şekilde istiflendiği görülmektedir. 2 dk.lık ince filmi ile karşılaştırıldığında nano duvarların daha büyük, homojen bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Şekil 33 (c, d)’de nikel köpük alttaş üzerinde farklı büyütme oranlarında elde edilen SEM görüntüleri yer almakta olup, nikel köpüğün tipik 3 boyutlu süngerimsi yapısı net bir şekilde seçilebilmektedir. Yüzey üzerinde yer yer belirgin tabakalı yapılar ve yaprak benzeri geniş yüzey alanları gözlemlenmektedir. Yüzeyde çekirdeklenmiş ve kısmen birbirine paralel dizilmiş lameller yapılar görülmektedir; bu da dikey yönelimli nanoyapıların oluşum sürecinde olduğuna işaret eder.



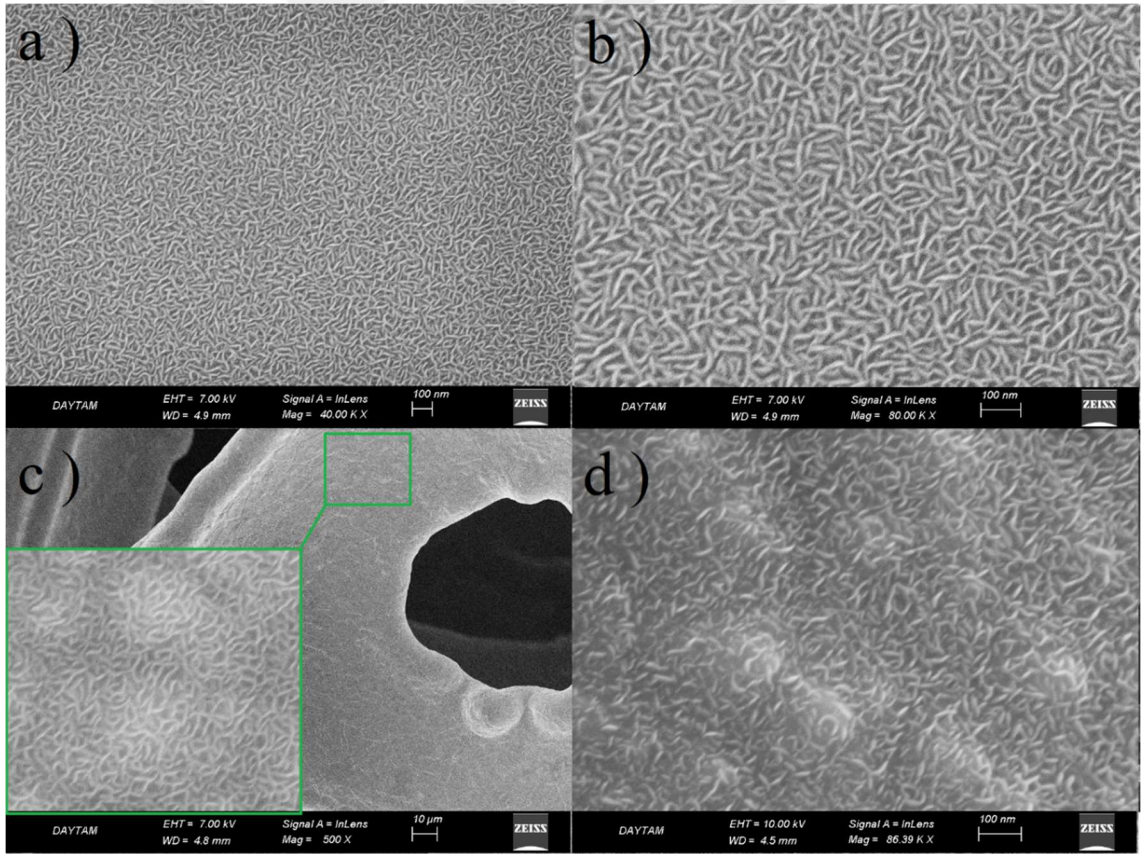
Şekil 33.5 dk. sürede büyütülmüş numunenin SEM görüntüsü, a b) cam alttaş üzerine c d) nikel köpük alttaş üzerine

Şekil 34'de, cam ve nikel köpük alttaşlar üzerine 9 dk. süreyle büyütülen MoSe_2 ince filmlere ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 34(a, b)'de cam yüzeyinden farklı büyütme oranlarında alınan görüntülerde, homojen şekilde dağılmış, kıvrımlı ve dikey yönelimli nano duvar yapılarının olduğu gözlemlenmektedir. Bu yapılar, yüksek yüzey alanı ve artırılmış kenar düzlemi oranı sağlayarak, iyon ve elektron taşınımı için optimum yollar oluşturur. Ayrıca bu yapı, elektrolit iyonlarının aktif yüzeyin iç kısımlarına nüfuz etmesini engellemeyecek düzeyde geçirgenlik sergilemektedir. Şekil 34 c'de ise nikel köpük alttaş üzerinden farklı büyütme oranlarında elde edilen SEM görüntülerinde, MoSe_2 'nin dikey yönelimli nano duvar yapılarının nikel köpük yüzeyini başarılı bir şekilde homojen olarak kapladığı görülmektedir. Şekil 34 d'de yüzeyde çekirdeklenen ve paralel şekilde dizilen lameller, dikey yönelimli nanoyapıların gelişim sürecine işaret etmektedir.



Şekil 34. 9dk. sürede büyütülmüş numunenin SEM görüntüsü. a b) cam alttaş üzerine c d) nikel köpük alttaş üzerine

Şekil 35 (a, b) cam alttaş üzerine, Şekil 35 (c, d) ise nikel köpük alttaş üzerine 10 dk. süreyle büyütülmüş MoSe₂ ince filmlere ait SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 35 (a b)'de cam yüzey üzerinde homojen şekilde dağılmış, iyi tanımlanmış dikey yönelimli nano duvar yapılarının oluştuğu gözlemlenmektedir. Şekil 35 (b, c)'de ise nikel köpük yüzeyine MoSe₂'nin homojen bir biçimde kaplandığı ve nano duvarların yoğunlukla yer aldığı görülmektedir. Bu morfolojik yapı, literatürde raporlanan sonuçlarla da örtüşmektedir (Perişanoğlu, 2023). 9 dk. büyütme süresiyle elde edilen filmlerle karşılaştırıldığında, 10 dk. büyütülen örneklerde nano duvarlar arasındaki mesafelerin belirgin şekilde azaldığı ve yapıların daha sıklaştığı dikkat çekmektedir. SEM görüntüleri genel olarak değerlendirildiğinde, kaplama süresinin artmasıyla birlikte MoSe₂ filmlerinde nanoduvvarların yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Ancak büyütme süresinin artmasıyla birlikte nano duvarların sıklaşması ve kıvrımlı hale gelmesi, elektrolit iyonlarının difüzyon yollarını kısıtlayarak iyon taşınımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, 9 dk.lık büyütme süresinin yoğunluk, homojenlik ve erişilebilirlik açısından optimum morfolojik özelliklere sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 35. 10dk. sürede büyütülmüş numunenin SEM görüntüsü. a b) cam alttaş üzerine, c d) nikel köpük alttaş üzerine

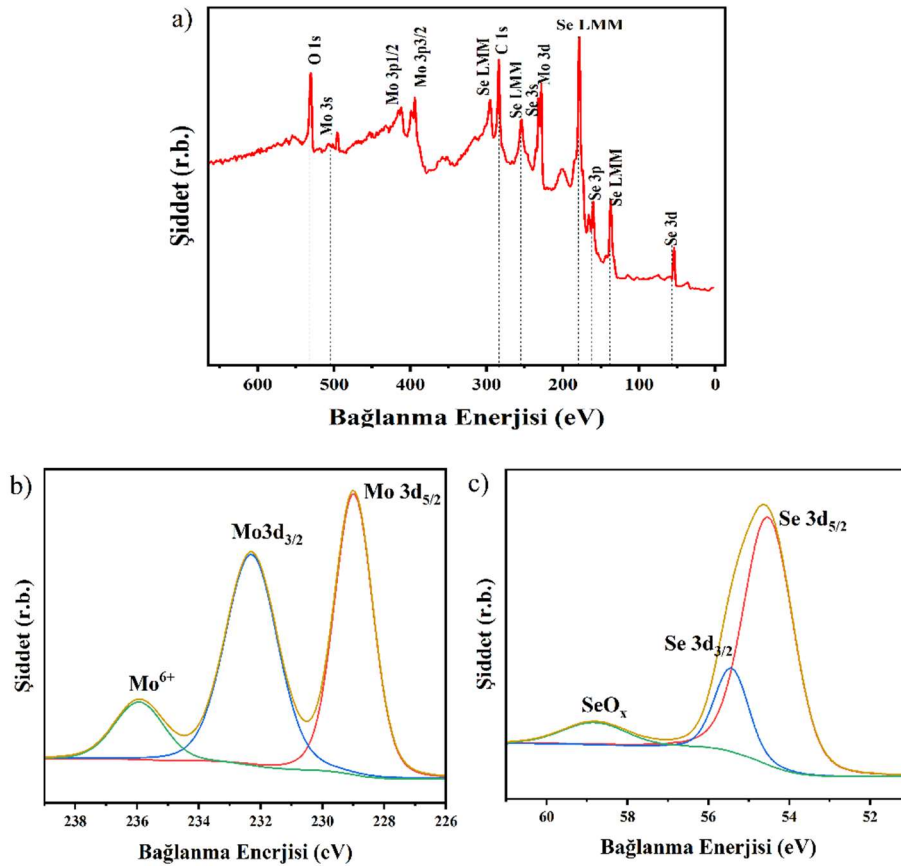
Genel olarak SEM görüntüleri karşılaştırıldığında, kaplama süresi arttıkça MoSe₂ filmlerinin yoğunluğu ve morfolojik karmaşıklığının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Büyütme süresinin uzamasıyla birlikte nano duvar yapılarının daha sık hale geldiği ve yapısal kıvrımların ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum, yüzey alanını artırsa da aşırı sıklaşma, elektrolit iyonlarının aktif bölgelere ulaşımını zorlaştırarak iyon difüzyonunu kısıtlayabilir. Bu bağlamda, 9 dakikalık büyütme süresi, optimum yoğunluk ve homojenlik sunarak ideal bir morfoloji profili sergilemektedir.



XPS Analizleri

2 dk. boyunca büyütülen MoSe₂ filminin kimyasal bileşimi XPS ile analiz edilmiştir (Şekil 36). Şekil 36a'da gösterilen genel tarama spektrumu, numunede molibden (Mo), selenyum (Se), karbon (C) ve oksijen (O) elementlerinin varlığını doğrulamaktadır.

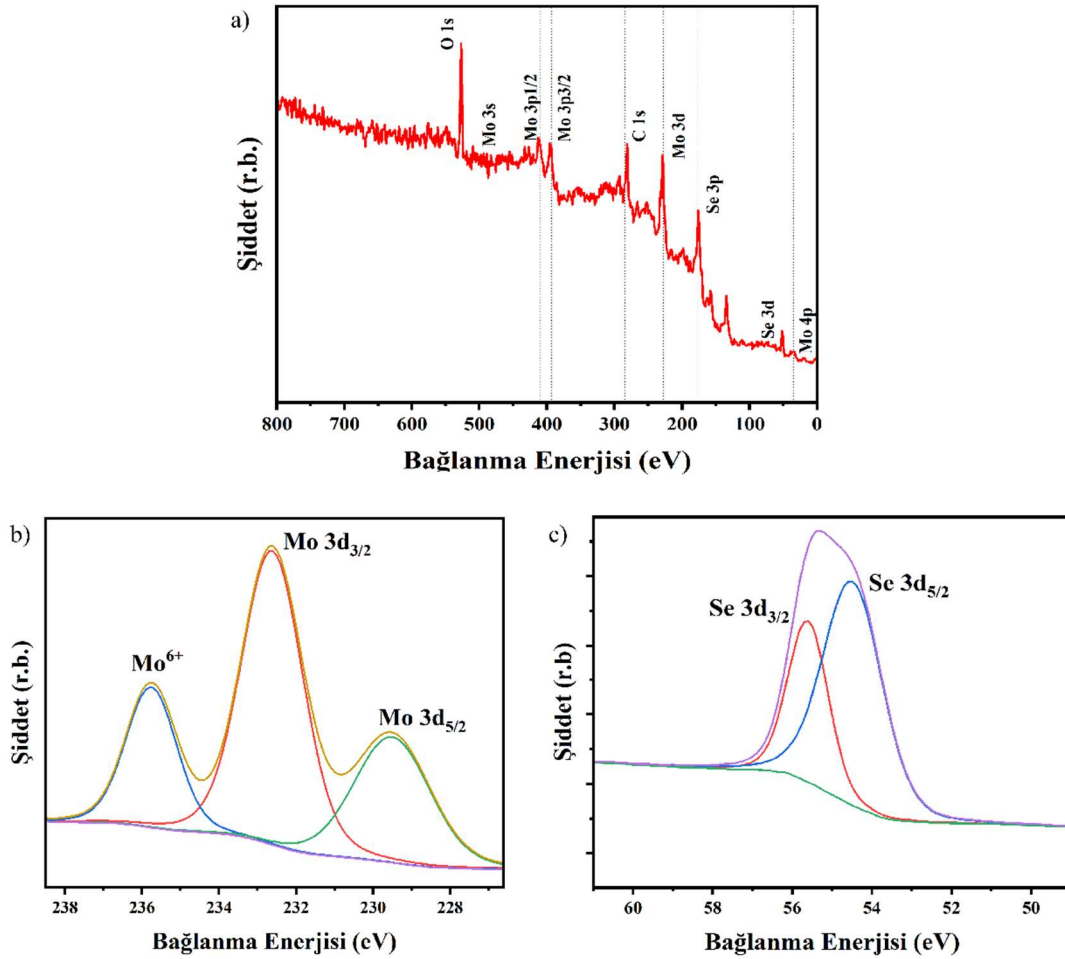
Mo 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum (Şekil 36b), üç belirgin pik içermektedir. Bunlardan 228,99 eV ve 232,32 eV enerjilerindeki pikler sırasıyla Mo 3d_{5/2} ve Mo 3d_{3/2} orbitallerine karşılık gelmekte olup, MoSe₂ yapısındaki Mo–Se bağlarına atfedilmektedir. 235,94 eV'de gözlemlenen zayıf pik ise Mo⁶⁺ türlerinin varlığını göstermekte olup, bu durum yüzeyde oluşan doğal oksitlenme tabakasına işaret etmektedir (Xiao et al., 2023). Şekil 36c'de verilen Se 3d spektrumu, 54,55 eV ve 55,44 eV bağlanma enerjilerinde yer alan piklerle Se 3d_{5/2} ve Se 3d_{3/2} çiftini temsil etmektedir. Buna ek olarak, spektrumda gözlenen SeO₂'ye ait sinyal, selenyumun kısmi yüzey oksidasyonunu göstermektedir. Ayrıca spektrumda yer alan Se LMM geçişi, Auger elektron geçişine işaret etmektedir. Numune yüzeyinde tespit edilen C ve O elementleri, yüzeyin havaya maruz kalması sonucu oluşan kontaminasyonla ilişkilendirilebilir. Bu da malzeme yüzeyinde oluşan doğal oksit katmanına işaret eder.



Şekil 36. 2 dk. süre büyütülmüş MoSe₂ için a) Geniş tarama XPS spektrumu, b) Mo 3d bölgesi için yüksek çözünürlüklü spektrum, c) Se 3d bölgesi için yüksek çözünürlüklü spektrum.

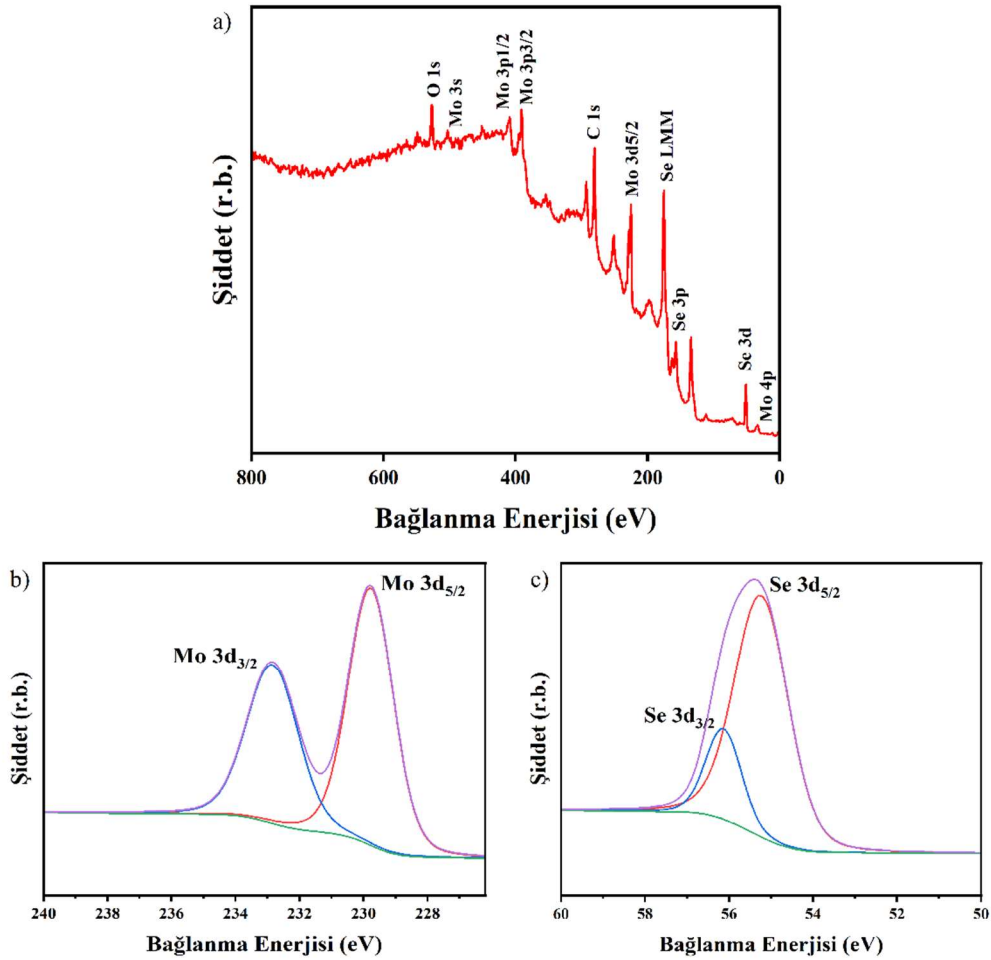
5 dk. büyütülen MoSe₂ filminin kimyasal bileşimi, X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) ile analiz edilmiştir (Şekil 37). Şekil 37a’da sunulan geniş tarama spektrumu, numunede Mo, Se, C ve O elementlerinin varlığını ortaya koymaktadır.

Mo 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum (Şekil 37b), üç belirgin pik içermektedir. 229,52 eV ve 232,64 eV’deki pikler sırasıyla Mo 3d_{5/2} ve Mo 3d_{3/2}’ye karşılık gelmekte olup, MoSe₂ yapısındaki Mo–Se bağlarına atfedilmektedir. 235,80 eV’deki zayıf pik ise Mo⁶⁺ türlerinin varlığına işaret etmekte ve yüzeyde meydana gelen oksidasyon süreçlerinin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Xiao et al., 2023). Şekil 37c’de verilen Se 3d spektrumu, 55,35 eV ve 56,29 eV bağlanma enerjilerinde yer alan piklerle sırasıyla Se 3d_{5/2} ve Se 3d_{3/2}’ye karşılık gelmektedir. Bu pikler, MoSe₂ bileşiğinde yer alan Se–Mo bağlarını temsil etmektedir. Numunedeki C ve O sinyalleri ise genellikle yüzeyin atmosferle temasından kaynaklanan kontaminasyonla ilişkilendirilmektedir.



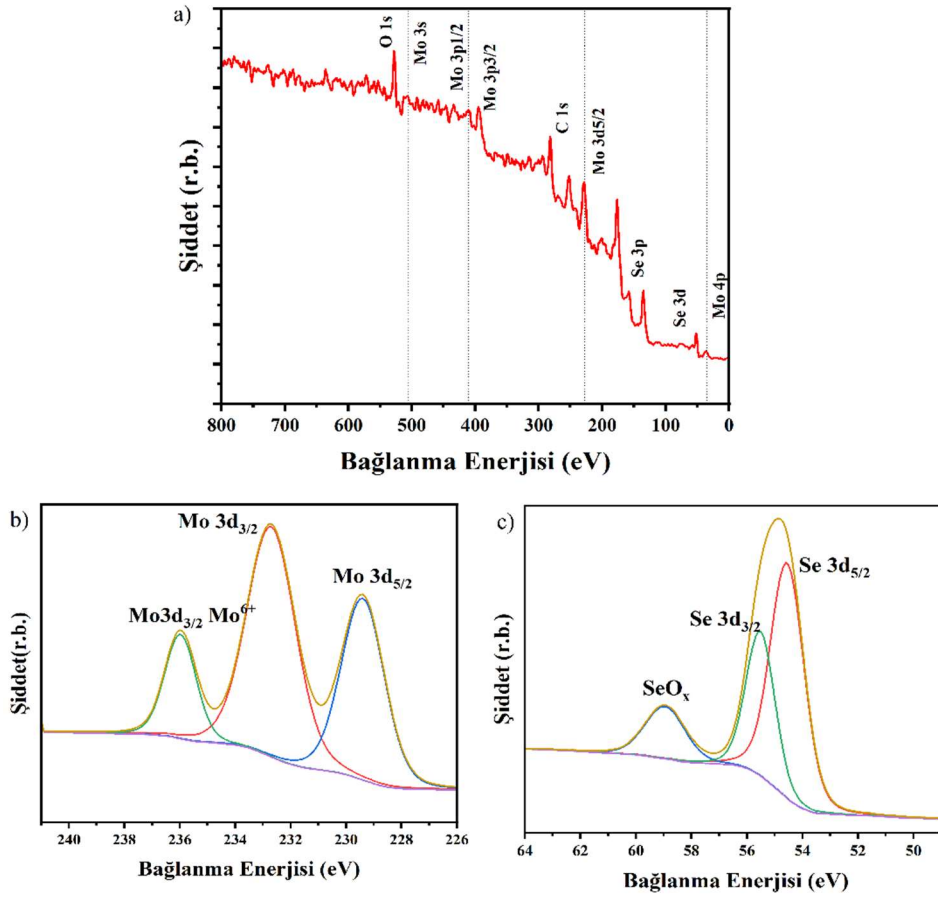
Şekil 37. 5 dk. süre büyütülmüş MoSe₂ filminin genel XPS spektrumu, b) Mo 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum, c) Se 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum.

9 dk. boyunca büyütülen MoSe₂ filminin kimyasal bileşimi, XPS ile karakterize edilmiştir (Şekil 38). Şekil 38a’da sunulan genel tarama spektrumu, numunede Mo, Se, C ve O elementlerinin varlığını açıkça göstermektedir. Mo 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum (Şekil 38b), MoSe₂ yapısına karşılık gelen iki ana pik içermektedir. 230,5 eV ve 233,6 eV’de konumlanan bu pikler sırasıyla Mo 3d_{5/2} ve Mo 3d_{3/2} orbitallerine karşılık gelmekte olup, Mo–Se bağlarını temsil etmektedir. Mo⁶⁺ bileşenine ait belirgin bir sinyal gözlenmemiştir, bu da yüzey oksidasyonunun sınırlı düzeyde olduğunu düşündürmektedir. Şekil 38c’deki Se 3d spektrumu, 55,35 eV ve 56,29 eV’de yer alan piklerle sırasıyla Se 3d_{5/2} ve Se 3d_{3/2}’ye atfedilmiştir. Bu pikler, MoSe₂ yapısındaki Se–Mo bağlarını göstermektedir. C ve O elementlerinin varlığı, numune yüzeyinin havaya maruz kalması sonucu oluşan kontaminasyonla ilişkilendirilebilir.



Şekil 38. 9 dk. büyütülen MoSe₂ filminin genel XPS spektrumu, (b) Mo 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum, (c) Se 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum.

10 dk. boyunca büyütülen MoSe₂ filminin kimyasal bileşimi, X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) ile analiz edilmiştir (Şekil 39). Şekil 39a'da yer alan genel tarama spektrumu, numunede Mo, Se, C ve O elementlerinin varlığını ortaya koymaktadır. Mo 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum (Şekil 39b), üç ayrı pik içermektedir. 229,4 eV ve 232,7 eV enerjilerinde gözlemlenen pikler sırasıyla Mo 3d_{5/2} ve Mo 3d_{3/2}'ye karşılık gelmekte olup, Mo–Se bağlarını temsil etmektedir. 236 eV'deki zayıf pik ise Mo⁶⁺ türlerinin varlığına işaret etmekte ve bu durum yüzeyde meydana gelen oksidasyon süreçlerinin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Xiao et al., 2023). Şekil 39c'deki Se 3d spektrumu, 54,58 eV ve 55,54 eV'de konumlanan Se 3d_{5/2} ve Se 3d_{3/2} piklerini içermektedir. Ayrıca 59 eV civarında gözlemlenen belirgin bir tepe, SeO_x türlerinin varlığını göstermekte olup, elektrot yüzeyindeki selenyumun oksidasyonuna atfedilmektedir (Zhou et al., 2017). Numunede tespit edilen C ve O elementleri ise büyük olasılıkla yüzeyin atmosfere maruz kalması sonucu oluşan kontaminasyonla ilişkilidir.

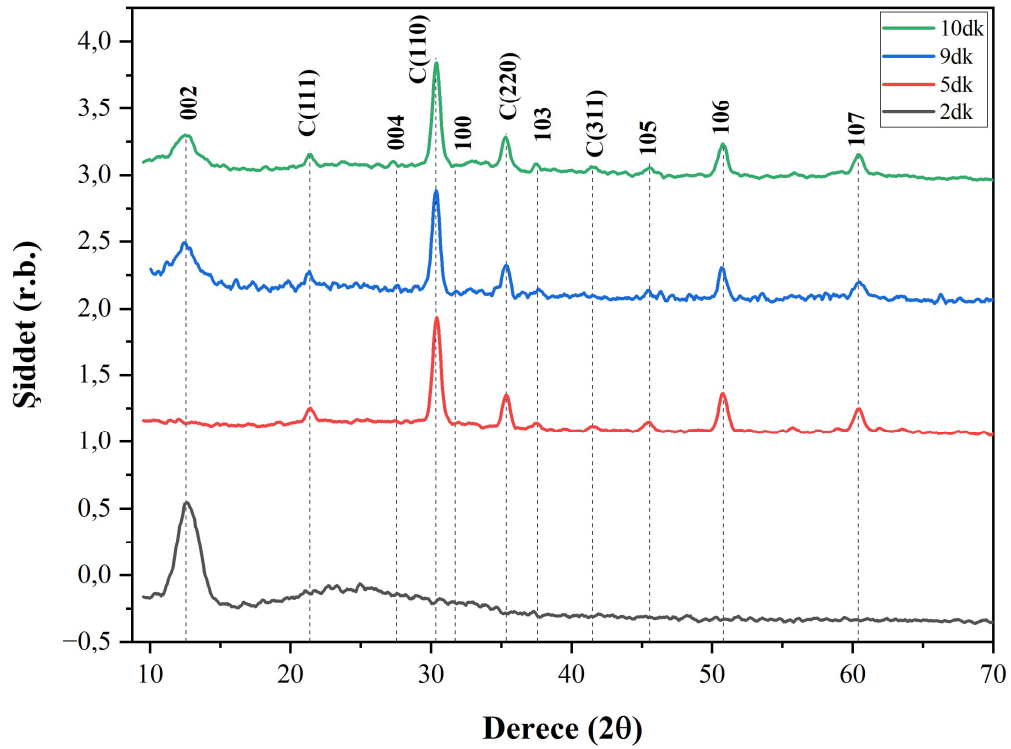


Şekil 39. 10 dk. süreyle büyütülen MoSe₂ filminin genel XPS spektrumu, (b) Mo 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum, (c) Se 3d bölgesine ait yüksek çözünürlüklü spektrum.

Büyütülen İnce Filmlerin XRD Analizleri

Şekil 40'de sunulan XRD desenleri, farklı büyütme sürelerinde (2, 5, 9 ve 10 dk) elde edilen MoSe₂ ince filmlerin kristal yapılarını değerlendirmek amacıyla küçük geliş açısı (grazing incidence) yöntemi kullanılarak kaydedilmiştir. Her bir numunenin büyütme süresine göre XRD deseninde gözlemlenen pikler ve bunlara karşılık gelen düzlemler gösterilmiştir.

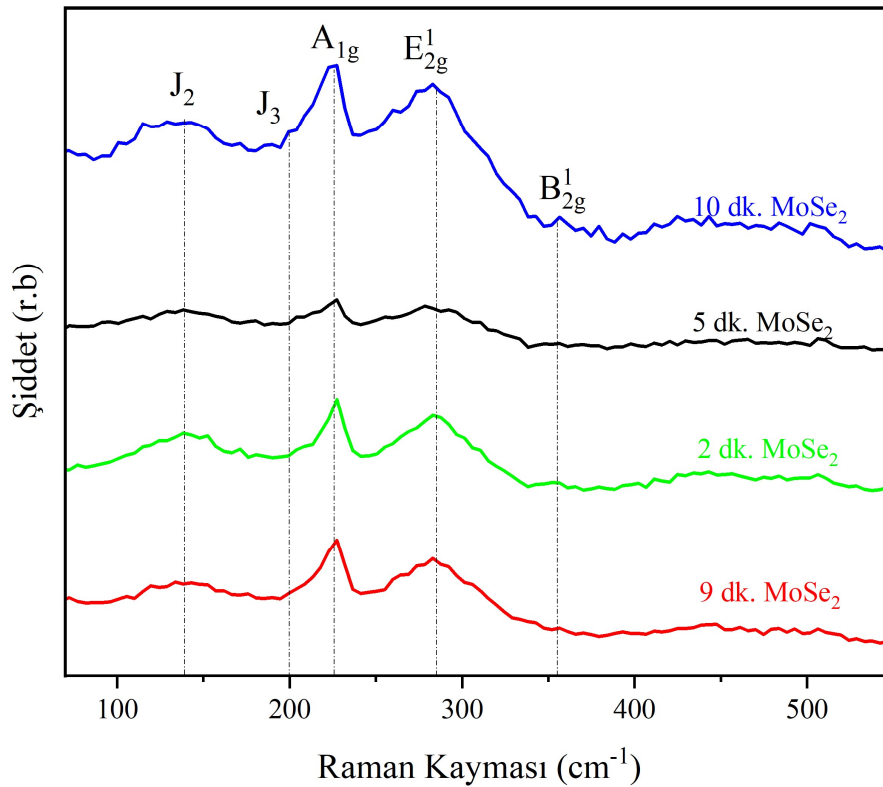
MoSe₂ nanoyapılarında; 12,61°, 27,62°, 31,71°, 37,54°, 45,61°, 50,82°, 55,78° ve 60,37° 2 θ değerlerinde kırınım pikleri gözlenmiştir. Bu pikler sırasıyla (002), (004), (100), (103), (105), (106) ve (107) kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir. Özellikle (002) düzlemi, MoSe₂'nin tipik katmanlı yapısına işaret etmekte olup, hekzagonal 2H fazının varlığını teyit etmektedir. Yüksek açılarda yer alan (105), (106) ve (107) düzlemlerine ait kırınım piklerinin belirginliği, kristalin büyüme yönündeki gelişmişliğini ve yüksek derecede kristallliği göstermektedir. Ayrıca, C(111) ve C(110) olarak işaretlenen bazı pikler numune yüzeyinde kalan karbon kontaminasyonuna veya alttaş kaynaklı katkılara ait olabilir.



Şekil 40. 2, 5, 9 ve 10 dk süreyle büyütülen MoSe₂ ince filmlere ait XRD eğrileri

Büyütülen İnce Filmlerin Raman Analizleri

Farklı büyütme sürelerine sahip MoSe₂ ince filmlerin yapısal özelliklerini daha ayrıntılı değerlendirmek amacıyla Raman spektroskopisi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 41'de sunulmuştur. Raman analizi, filmlerin kristal fazlarını ve titreşimsel modlarını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere, 228 cm⁻¹ ve 286,5 cm⁻¹'de gözlemlenen belirgin pikler sırasıyla A_{1g} (Se atomlarının düzlem dışı titreşimi) ve E_{2g}¹ (Mo ve Se atomlarının düzlem içi titreşimi) modlarına karşılık gelmektedir. Bu pikler, tipik 2H fazlı MoSe₂ yapısının varlığını doğrulamaktadır (Sarker et al., 2018; Yuwen et al., 2016). Ayrıca, 353 cm⁻¹ civarında gözlemlenen zayıf pik, B_{2g}¹ moduna karşılık gelmekte olup, MoSe₂'nin külçe (bulk) formuna özgüdür. Bu pik, genellikle Raman-aktif olmayan bir moddur; ancak burada zayıf da olsa görünür hâle gelmiştir ve yoğunluğunun büyütme süresi arttıkça azaldığı dikkat çekmektedir (Vattikuti et al., 2020; Yamamoto et al., 2014). Düşük frekans bölgesinde ise 1T fazına ait olduğu bilinen J₂ (~152,2 cm⁻¹) ve J₃ (~216,3 cm⁻¹) modları gözlemlenmiştir. Bu modlar, özellikle elektriksel iletkenliği yüksek yapılarla ilişkilendirilmekte ve elektrokimyasal performans açısından önem taşımaktadır (Jana et al., 2025; Jiang et al., 2016; Yin et al., 2017; Zhang et al., 2016).



Şekil 41. Farklı büyütme sürelerinde (2, 5, 9 ve 10 dk) elde edilen MoSe₂ ince filmlerin Raman spektrumları.

Büyütülen filmlerin BET Analizleri

Farklı zamanlarda büyütülmüş MoSe₂ ince filmlerinin yüzey alanını belirlemek için (Brunauer-Emmett-Teller) BET analizi yapılmıştır ve yüzey alanı sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. Analiz sonucunda yüzey alanı 5,8057 m²/g ile en büyük olan numune 9 dk. bulunmuştur. 2 dakikalık numuneye bakıldığında nano duvarların tam oluşmaması nedeni ile yüzey alanın küçük kaldığı görülmektedir. 10 dakikalık numuneye bakıldığında, büyütmenin olumsuzlukları burada da görülmektedir.

Tablo 8. Farklı büyütme sürelerine ait BET yüzey Alanları

Numune	BET Yüzey Alanı (m ² /g)
2 dk.	0,0570
5 dk.	0,8011
9 dk.	5,8057
10 dk.	0,3451

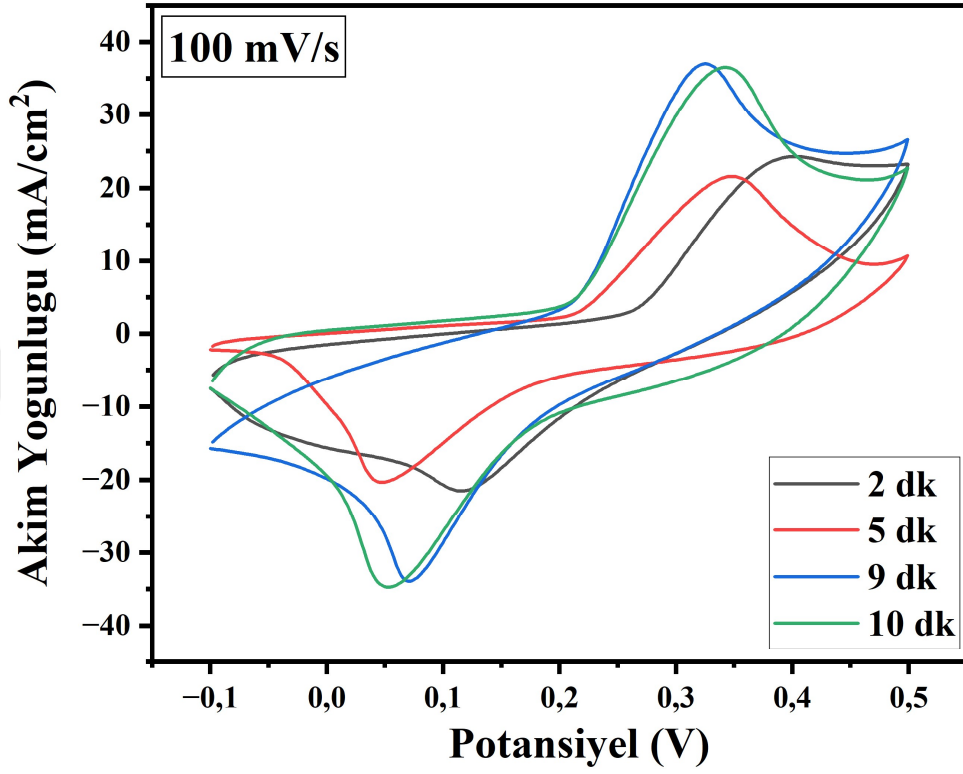
Büyütülen İnce Filmlerin Elektrokimyasal Analizleri

RF Magnetron Saçırma yöntemi kullanılarak 2 dk., 5 dk., 9 dk. ve 10 dk. olarak farklı zamanlamalarda büyütülen MoSe₂ ince filminin süperkapasitör davranışını belirlemek için CV ölçümü, GCD eğrileri ve EIS testleri yapılmıştır. Elektrokimyasal ölçümler için sulu elektrolitlerden 1M KOH çözeltisi kullanılmış, karşıt elektrot olarak platin ve referans elektrot olarak gümüş tel kullanılmıştır. CV ölçümleri, 0,5 V’dan sonra bozulmaya başladığı için potansiyel penceresi -0,1-0,5 V ayarlanmış ve ölçümler bu aralıkta yapılmıştır. GCD analizleri 1-3-5-7 mA/cm² şeklinde 4 ayrı akım yoğunluğunda yapılmıştır.

Dönüşümlü voltametri (CV) analizleri

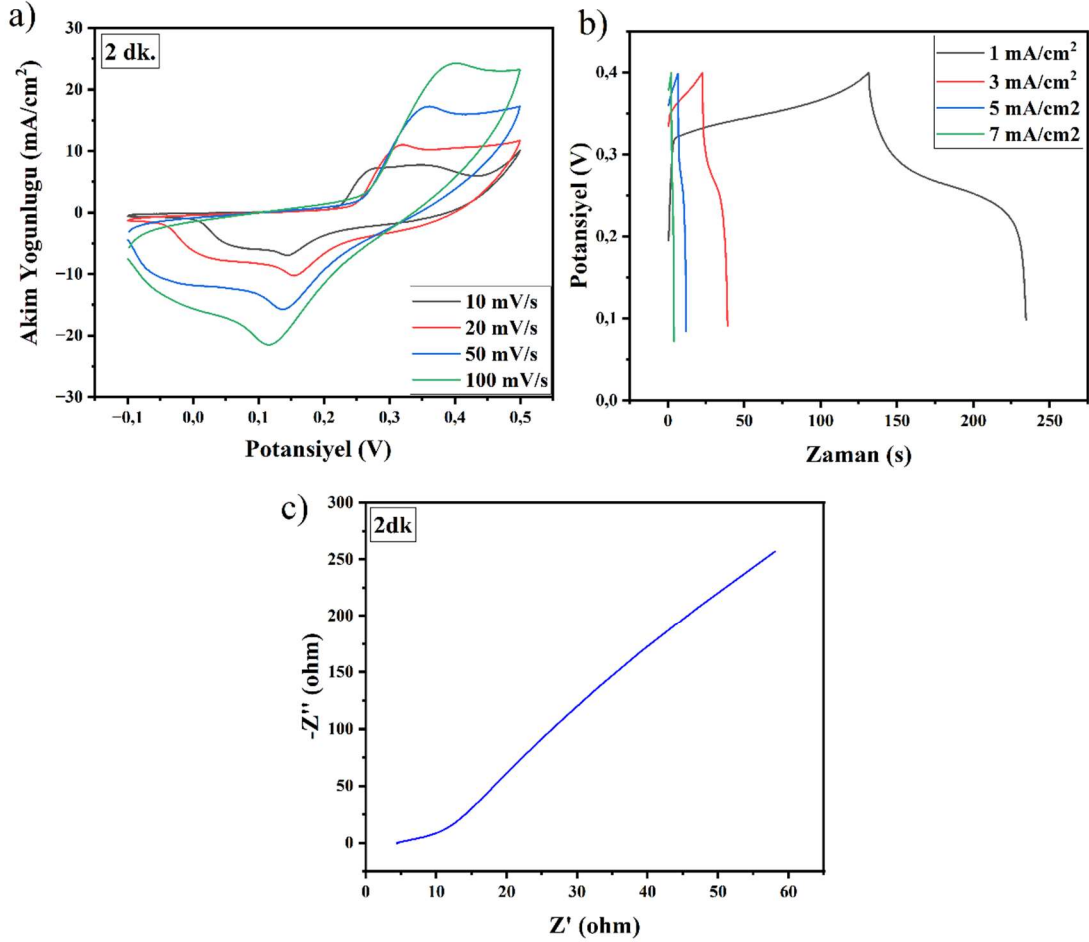
Farklı büyütme sürelerinde (2, 5, 9 ve 10 dakika) hazırlanan nano duvar yapılı MoSe₂ elektrotlarının elektrokimyasal davranışları, 100 mV/s tarama hızında gerçekleştirilen çevrimli CV ölçümleri ile incelenmiştir (Şekil 42). CV eğrileri, ayrıca 10, 20, 50 ve 100 mV/s olmak üzere farklı tarama hızlarında da kaydedilmiş ve her bir hızda belirgin redoks piklerinin gözlemlendiği rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, literatürde bildirilen MoSe₂ temelli süperkapasitör elektrotları ile uyumludur (Krivenko et al., 2015). Redoks piklerinin varlığı, elektrot malzemesinin yüzeyinde gerçekleşen faradaik reaksiyonlara işaret etmekte ve MoSe₂’nin psödokapasitif karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Tarama hızı arttıkça akım yoğunluğunda belirgin bir artış gözlemlenmiş, bununla birlikte CV eğrileri yüksek tarama hızlarında dahi karakteristik şeklini koruyarak iyi elektrokimyasal kararlılık sergilemiştir.

Malzemenin nano duvarlı morfolojiye sahip olması, iyon difüzyonu ve yük transferini kolaylaştırmakta; böylece hızlı şarj-deşarj kapasitesini desteklemektedir. Bu yapısal özellik, özellikle 9 ve 10 dakikalık büyütme süresine sahip elektrotlarda daha belirgin bir şekilde gözlemlenen yüksek özgül kapasitans performansına katkı sağlamaktadır. CV verileri kullanılarak hesaplanan spesifik kapasite değerleri Tablo 9’da verilmiştir.



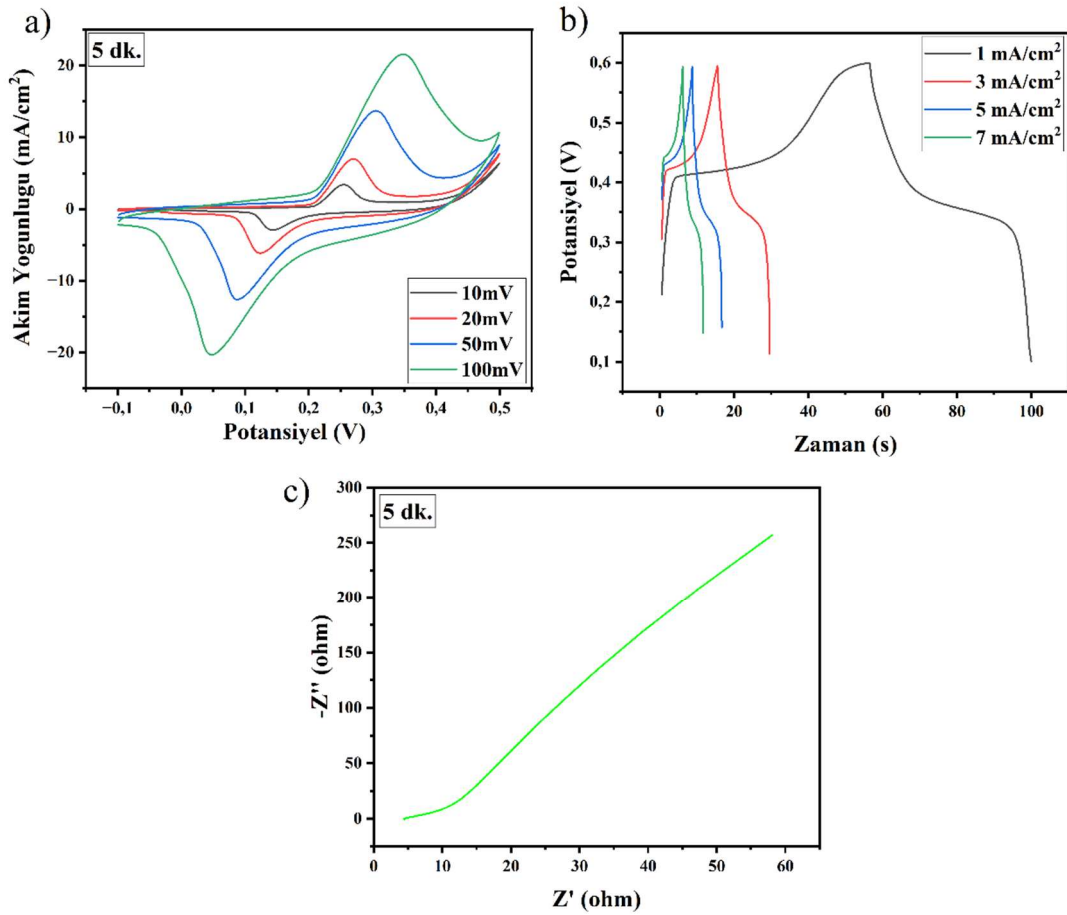
Şekil 42. Farklı büyütme sürelerine sahip MoSe₂ elektrotlarının nikel köpük üzerindeki 100 mV/s tarama hızında kaydedilen CV eğrileri.

Şekil 43 a'ya bakıldığında 2 dk. boyunca büyütülmüş elektrot malzemesinin CV eğrisi gösterilmektedir. 2 dk. süresince büyütülen filmin yüzeyinde yeterince aktif bölge oluşmadığından dolayı düşük akım yoğunluğu ve aynı zamanda daha keskin olmayan pikler gözlenmektedir. Elektrokimyasal aktivitenin zayıf olmasının başlıca nedeni, tam gelişmemiş nano duvar yapısı ve buna bağlı olarak sınırlı bir yüzey alanının olmasıdır (bkz. Şekil 32).



Şekil 43. 2 dk. büyütülmüş MoSe₂ elektrotuna ait (a) farklı tarama hızlarında CV eğrileri, (b) farklı akım yoğunluklarında GCD eğrileri, (c) EIS Nyquist diyagramı.

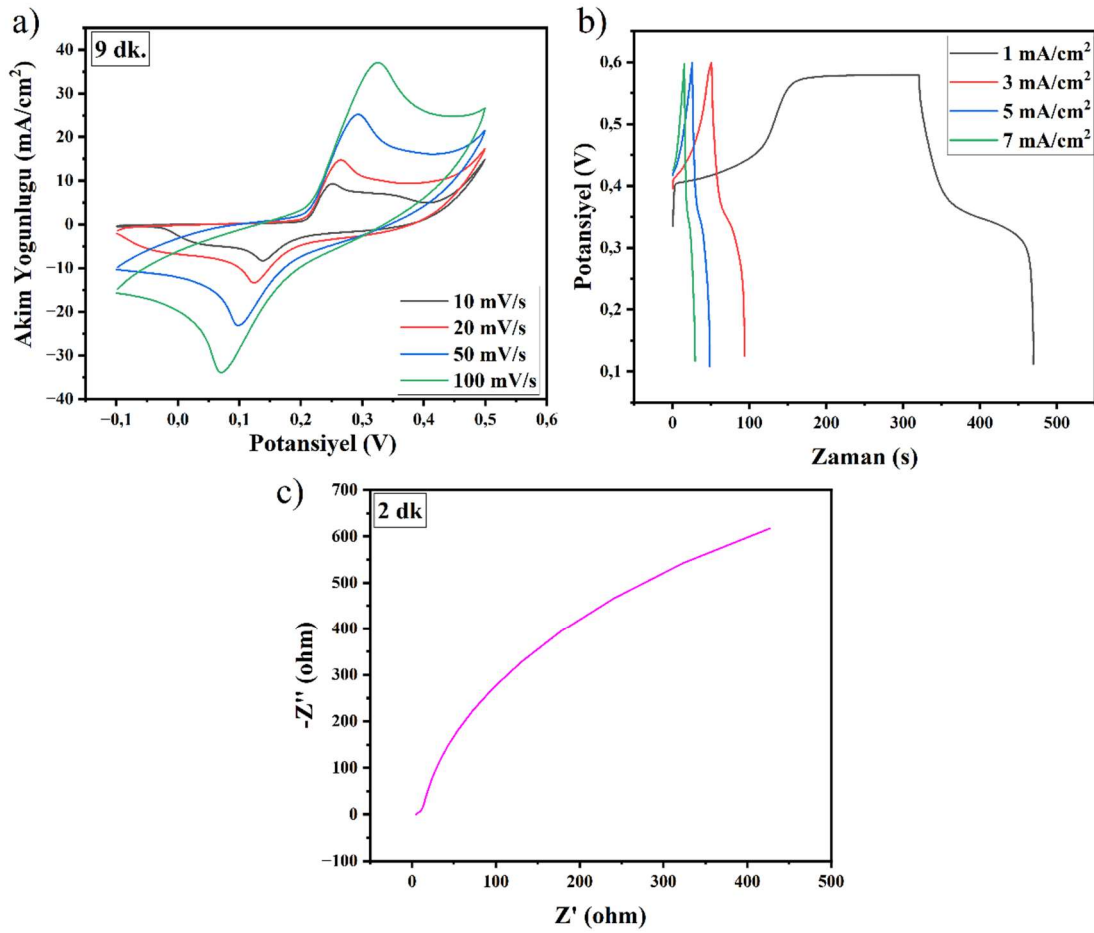
Şekil 44a’da, 5 dk. büyütülen MoSe₂ elektrotuna ait CV eğrileri farklı tarama hızlarında (10, 20, 50 ve 100 mV/s) sunulmuştur. CV eğrileri incelendiğinde, belirgin ve daha keskin redoks pikleri gözlemlenmekte olup, bu durum elektrot yüzeyinde gerçekleşen faradaik reaksiyonların varlığına ve psödokapasitif davranışın daha belirgin hale geldiğine işaret etmektedir. 2 dakikalık büyütmeye kıyasla, bu elektrot yüzeyinde daha yoğun ve organize nano duvar yapılarının oluştuğu, dolayısıyla aktif yüzey alanının arttığı düşünülmektedir (bkz. Şekil 33). Bu morfolojik gelişim, elektrokimyasal tepkimelerde iyon transferini kolaylaştırmakta ve kapasiteyi artırmaktadır. Ayrıca, farklı tarama hızlarında elde edilen CV eğrileri arasındaki şekil benzerliği ve simetrinin korunması, malzemenin elektrokimyasal davranışlarının kararlı hale geldiğini göstermektedir. Bu yönüyle, 2 dakikalık büyütme süresine sahip elektrota göre daha gelişmiş psödokapasitif özellik sergilediği söylenebilir.



Şekil 44. 2 dk. büyütülmüş MoSe₂ elektrotuna ait (a) farklı tarama hızlarında CV eğrileri, (b) farklı akım yoğunluklarında GCD eğrileri, (c) EIS Nyquist diyagramı.

Şekil 45a'da, 9 dk. büyütülen MoSe₂ elektrotunun farklı tarama hızlarında (10, 20, 50, 100 mV/s) kaydedilen CV eğrileri gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, 2 ve 5 dakikalık büyütme sürelerine kıyasla en yüksek akım yoğunluklarının bu numunede elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tarama hızı arttıkça eğriler arasındaki farkların daha belirgin hale gelmesi, yüzey kinetiği ve yük transfer süreçlerinde önemli bir iyileşmeye işaret etmektedir.

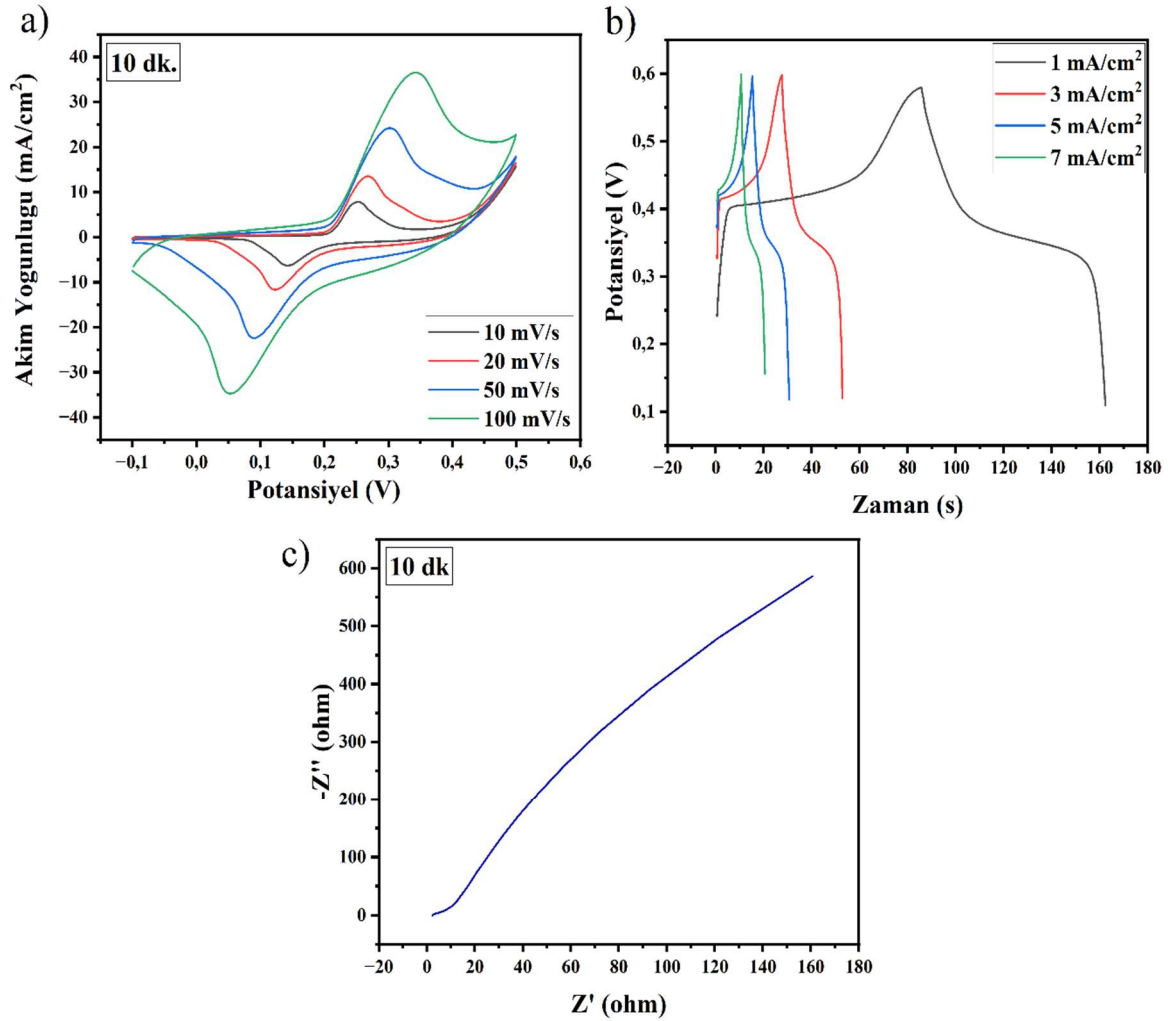
Bu performans artışı, nano duvar yapılarının tamamen gelişmiş olması ve buna bağlı olarak yüzeydeki elektrokimyasal etkileşim bölgelerinin maksimum seviyeye ulaşmasıyla açıklanabilir (bkz. Şekil 34).



Şekil 45. 9 dk. büyütülmüş MoSe₂ elektrotuna ait (a) farklı tarama hızlarında CV eğrileri, (b) farklı akım yoğunluklarında GCD eğrileri, (c) EIS Nyquist diyagramı.

Şekil 46'te, 10 dk. süreyle büyütülen MoSe₂ ince film elektrotunun elektrokimyasal karakterizasyonuna ilişkin CV, GCD ve EIS sonuçları sunulmaktadır. Şekil 46a'da, CV eğrileri incelendiğinde, 9 dakikalık örneğe kıyasla akım yoğunluğunda hafif bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu durum, büyütme süresinin uzamasıyla birlikte nano duvar yapılarının aşırı büyümesi, kıvrılması ve birbirine iç içe geçmesiyle ilişkilidir (bkz. Şekil 35). Bu morfolojik karmaşıklık, yüzey aktif alanının efektif kullanımını sınırlayarak iyonların yüzeyle etkileşimini kısmen engellemekte ve yük transferi dinamiklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Sonuç olarak, akım yoğunluğunda azalma ve elektrokimyasal performansta düşüş meydana gelmektedir. Bu analiz, optimum büyütme süresinin aşılması durumunda yapısal düzensizliklerin elektrokimyasal verimlilik üzerinde negatif etkiler yaratabileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla 10 dakikalık büyütme süresi, morfolojik doygunluk noktasının aşıldığını ve bu nedenle kapasite kayıplarının başladığını göstermektedir.



Şekil 46. 10 dk. büyütülmüş MoSe₂ elektrotuna ait (a) farklı tarama hızlarında CV eğrileri, (b) farklı akım yoğunluklarında GCD eğrileri, (c) EIS Nyquist diyagramı.

Tablo 9. MoSe₂ Filmlerinin 20 mV/s Tarama Hızında CV Eğrilerinden Hesaplanan Özgül Kapasitans Değerleri

Süre	Tarama Hızı (mV/s)	Özgül Kapasite mF/cm ²
2dk	20	374,09
5dk	20	126,69
9dk	20	421,84
10dk	20	256,38

SEM analizlerine göre, 2 dakikalık büyütmedeki MoSe₂ tabakası, belirgin bir nano yapı göstermemektedir. Malzeme yüzeyi, görece daha homojen ve düzensiz bir film yapısına sahiptir ve dikey nano duvar yapıları henüz gelişmemiştir. Buna karşın, yapılan elektrokimyasal ölçümlerde, bu elektrodun 5 dk. numuneye göre daha yüksek özgül kapasitans verdiği görülmüştür. Bu durum nanoyapı–performans ilişkisiyle çelişiyor görünmektedir. Fakat bu durum birkaç önemli nedenden dolayı açıklanabilir. 5 dk. büyüme süresi, SEM görüntülerine bakıldığında nano duvar yapılarının oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu nano duvarlar elektrodun yüzey alanını artırsa da duvarlar aralarındaki boşlukların dar olması iyonların iç katmanlara nüfuzunu zorlaştırabilir. Kalın hale gelen film, yüzeyin aksine alt katmanlar daha az reaktif olabilir. Böylece film kalınlaştıkça, iyon difüzyonu zorlaşır ve aktif yüzey alanı azalarak kapasitansın düşmesine neden olabilir. Ayrıca 5 dakikalık numunenin XRD analizinde (002) düzleminin olmaması da kapasiteye etki etki ettiği düşünülmektedir. 10 dk. süresince büyütülen ince filmde ise aşırı büyümenin olumsuz etkileri gözlemlenmiştir. Burada 9 dk. büyütülen ince filmin optimal bir büyüme süresi olarak görülmektedir. 10 dk. sonrası kapasitenin düşmesi sebebiyle daha fazla sürede büyütme yapılmamıştır.

Galvanostatik şarj/deşarj (GCD) analizleri

Şekil 42 (b)’de 2 dk. boyunca büyütülmüş filmin GCD eğrileri görülmektedir ve farklı akım yoğunluklarında (1, 3, 5 ve 7 mA/cm²) ölçüm alınmıştır. Eğrilere bakıldığında faradaik sürecin ve pil karakteristik özelliği olan farklı potansiyel plato bölgeleri ile doğrusal olmayan tepkiler görülmektedir. Eğriler en fazla 0,4 V seviyelerine çıkabilmiş ve çalışma aralığı dardır. 2 dk. filmin kaplama süresinin yetersiz olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 32 (c)). Akım yoğunluğunun artması ile birlikte eğrilerin bozulmaması, MoSe₂ elektrodunun iyi bir dayanıklılığa sahip olduğu ve hızlı performans gösterdiği fark edilmiştir.

Şekil 44 b’de 5 dk. süresince büyütülmüş filmin GCD eğrisi görülmektedir. Bu eğrilerde de 2 dk. filmde olduğu gibi faradaik sürecin etkin olduğu ve doğrusal olmayan tepkiler görülmektedir. Eğrilere bakıldığında, 0,1~0,6 V aralığında bir çalışma penceresi görülmektedir. 2 dk. numuneye göre çalışma penceresi gelişmiştir. Ayrıca GCD eğrileri daha simetrik ve düzgündür. Bu da kaplamanın kalınlığının artması ve homojen dağılması ile birlikte elektrokimyasal tepkimeye girecek yüzey alanın artmış olduğunu göstermektedir.

Şekil 45 b’de 9 dk. süresince büyütülmüş filmin GCD eğrisi görülmektedir. Bu eğrilerde de 2 dk. ve 5 dk. filmlerde olduğu gibi faradaik bir sürecin gerçekleştiği görülmektedir. Fakat 9 dk. boyunca büyütülen malzemenin CV analizinde bahsedilen optimum şartlara sahip olmasından dolayı daha baskın psödokapasitif etki göstermektedir. Şekil 45 b GCD eğrilerine bakıldığında, diğer filmlere göre en uzun deşarj süresine sahip elektrottur. Ayrıca yüksek tarama hızlarında bile eğrilerin bozulmadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 46 b’de 10 dk. süresince büyütülmüş filmin GCD eğrisi görülmektedir. Bu eğrilerde diğer sürelerde büyütülen filmlerde olduğu gibi faradaik süreç etkindir. 9 dk. filmle benzer olarak potansiyel penceresi 0,1~0,6 V aralığındadır. Eğrilerdeki simetrinin korunduğu fakat deşarj süresinde bir azalmanın olduğu görülmektedir. 10 dk. büyütmenin, süreye bağlı olarak nano duvarların daha sık oluşması ve nano duvar yapısının kıvrılmaya başlaması yüzey alanının azalmaya başladığını göstermektedir (bkz. Şekil 35). 10 dk. süresince büyütülen elektrodun 2 ve 5 dk. ‘ya göre daha yüksek performansa sahip olmasına rağmen, morfolojik dezavantajları sebebiyle elektrot performansı 9 dk. numuneye göre daha düşüktür.

Sonuç olarak, büyütme süresi MoSe₂ elektrotlarının elektrokimyasal performansını doğrudan etkilemektedir. En iyi sonuçlar 9 dk. büyütme süresiyle elde edilmiştir.

Özgül kapasite değerleri GCD eğrileri kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 10’da verilmiştir. Tabloda da görüldüğü üzere aynı numune içerisinde tarama hızları artırıldığında kapasitenin azaldığı görülmektedir. Bu elektrokimyasal davranış literatürle de uyusmaktadır(Orhan, 2023). GCD verileri üzerinden kapasite hesabı yaparken deşarj süreleri kullanılmaktadır. Artan büyütme süresi kapasiteyi olumlu etkilese de 10 dakikalık büyütmede kapasitenin azaldığı görülmektedir. Bu duruma, büyüyen filmin kalınlaşarak aktif yüzey alanının azalması neden olmaktadır.

Tablo 10. MoSe₂ filminin farklı akım yoğunluklarında GCD grafikleri üzerinden hesaplanmış özgül kapasitans değerleri

Elektrot	Özgül Kapasite (mF/cm ²)			
	1 mA/cm ²	3 mA/cm ²	5 mA/cm ²	7 mA/cm ²
2 dk.	353	172	96,33	47,83
5 dk.	143,35	140,90	137,8	132,53
9 dk.	497,86	429,50	377,33	323,16
10 dk.	254,43	252	243,66	231,23

Büyütülen filmlerin empedans analizleri

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) analizleriyle Şekil 47’de verilmiş olan empedans eğrilerinden yararlanılarak yapılmıştır. EIS analizinden elde edilen R₁, R₂ ve R₃ değerleri Tablo 11’de verilmiştir. R₁ elektrot ile elektrolit arasındaki direnci, R₂ elektrot yüzeyindeki yük transfer direncini ve R₃ ikincil katlardaki yük transfer direncini ifade etmektedir. Psödokapsitif malzemelerin EIS verileri 45° ile 80° arası değişmektedir. Bu bilgi ışığında ölçülen EIS verileri, bu malzemenin psödokapsitif davranış gösterdiğini desteklemektedir.

Tablo 11. MoSe₂ filmlerinin Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi Değerleri

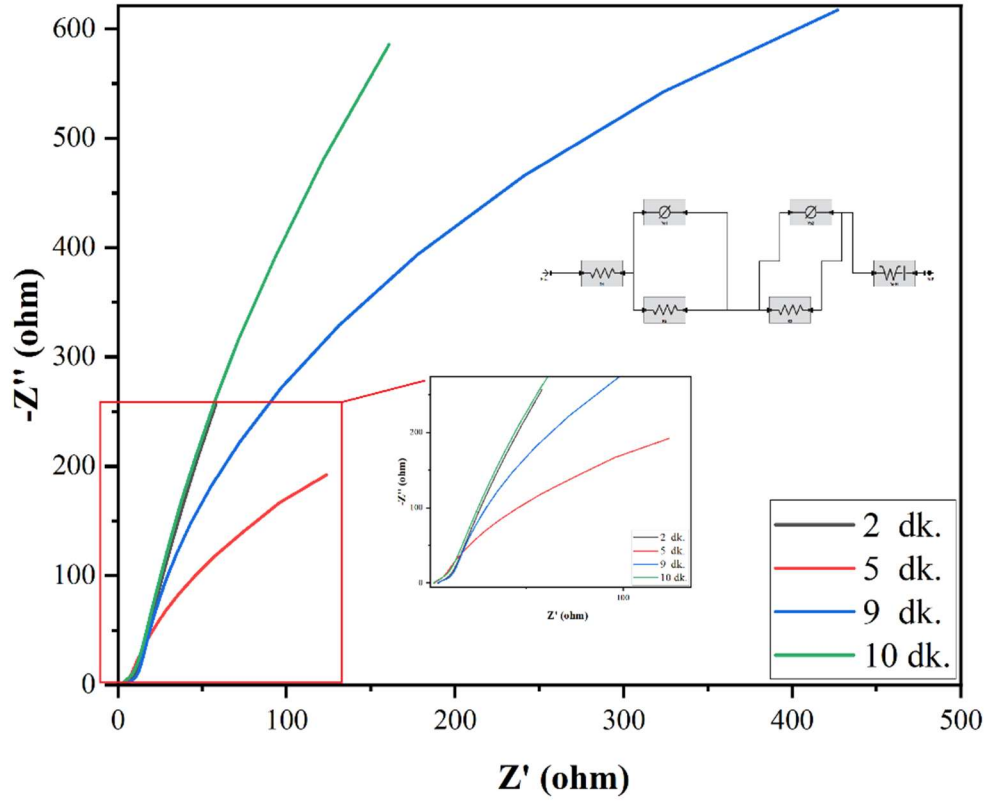
Süre	R ₁ (Ω)	R ₂ (Ω)	R ₃ (Ω)
2 dk.	4,41	2771,18	8,29
5 dk.	2,60	550,88	4,57
9 dk.	4,49	583,88	1,74
10 dk.	2,33	4009,39	7,28

Tablo 11’de 2 dakikalık numunenin diğer numunelere kıyasla orta seviyeli R_1 direnci görülmektedir. Bu da elektrolit ve elektrot arasındaki iletkenliğinin diğer numunelere kıyasla kabul edilebilir seviyededir. R_1 direncinin orta seviyeli olmasına karşılık R_2 direnci çok yüksek değere sahiptir. Bu da yüzeydeki redoks tepkimesinin yavaş olduğuna yorumlanabilir. Düşük tarama hızlarında yüksek kapasite gösterse de hızlı şarj deşarj durumlarında gerilim düşümüne neden olmaktadır (Tablo 10). R_3 direncine baktığımızda alt katmanlara difüzyonun kısıtlı olduğuna yorumlanabilir.

5 dakikalık büyütmeye bakıldığında düşük R_1 direnci elektrot ile elektrolit arasında daha iyi iyon iletimi sağlamaktadır. Düşük R_2 direnci ise elektrolit ile yüzey arasındaki reaksiyonların hızlı olduğunu gösterir. Yüksek tarama hızlarında kapasitesinde büyük bir değişiklik olmamaktadır (Tablo 10). Fakat XRD analizinde (002) düzleminin bulunmaması özgül kapasitesinin düşük olmasına neden olduğu düşünülmektedir. R_3 direncinin değerinin azalması ise ara katmanlara difüzyonun iyileştiğini düşündürmektedir.

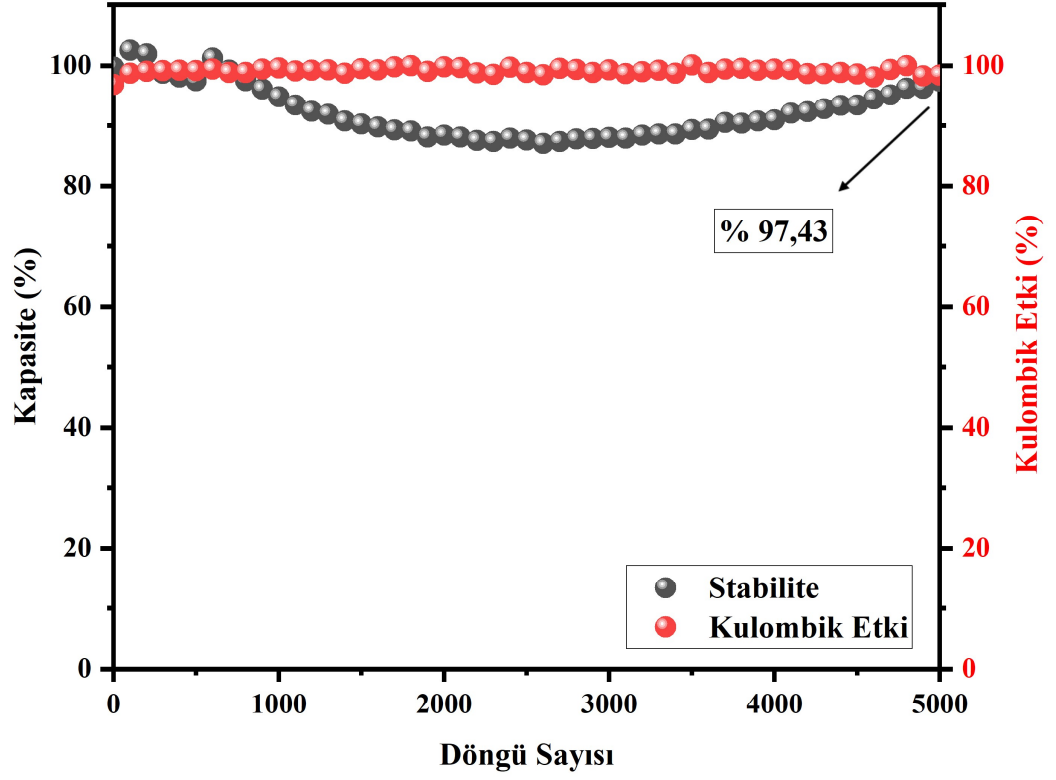
9 dakikalık büyütmede R_1 direnci diğer numunelere göre yüksek bir değer göstermiş ve iletkenlik bir miktar düşmüştür. Bu da elektrot ile elektrolit arasındaki iletimin diğer numunelere göre biraz daha yavaş olduğu anlamına gelmektedir. R_2 direncine baktığımızda direnç değerinde artma gözlemlenmektedir. Bu değer 5 dakikalık numune ile hemen hemen aynı olmakla birlikte diğer numunelere göre düşük bir değerdedir. Bu da elektrolit ile yüzey alanı arasındaki direncin diğer numunelere kıyasla daha iyi olduğu görülmektedir. Bu sebeple yüzey reaksiyonlarının hızlı olmaktadır. R_3 direncine bakıldığında çok küçük bir değer görülmektedir. Bu değer çok küçük olması ara katman difüzyonunu çok iyi olduğunu göstermektedir. Düşük R_2 ve R_3 direnç değerleri sayesinde elektron iletimi ve iyon difüzyonu optimal seviyeye gelmiş ve yüksek kapasite göstermiştir.

10 dakikalık büyütmeye bakıldığında R_1 değeri en düşüktür ve bu elektrolit içerisinde yük iletiminin diğer numunelere göre daha kolay olduğunu gösterir. Fakat R_2 değerinin yüksek olması elektrot ile elektrolit arasında bir direnç olduğunu göstermektedir. Bu da ara yüzey reaksiyonlarının ciddi oranda yavaş olduğunu gösterir. Bu yavaş reaksiyonlar kapasiteye de etki etmiştir. R_3 direncimizin değerinin büyümesi iyon difüzyonun kısıtlandığını göstermektedir.



Şekil 47. MoSe_2 filminin farklı büyütme zamanlarına göre alınmış EIS eğrileri

Süperkapasitörlerde kapasite, akım yoğunluğu gibi parametrelerin yanında elektrokimyasal dayanıklılıkta önemli bir parametredir. 9 dk. boyunca büyütülen ince filmin çevrim performansını analiz etmek için 1 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 5000 döngü boyunca test edilmiştir. Şekil 48’de görüldüğü üzere 5000 döngü sonunda kapasitesinin %97,43 oranında koruduğu görülmüştür.



Şekil 48. 9 dk. büyütülmüş filmin kararlılık testi.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında RF Magnetron Saçtırma yöntemi ile cam ve nikel köpük üzerine farklı büyüme zamanlarında MoSe₂ filmleri dikey yönlü nano duvarlar şeklinde büyütüldü. Bu deneysel çalışmada süperkapasitörün kapasitesini artıran asıl sebebin üretim aşamasında büyüyen dikey nano duvarların malzemenin yüzey alanını artırmasıdır. Filmlerin SEM görüntülerinde cam üzerine büyüyen MoSe₂ nano yapılarının yüzey alanını artırdığı gözlenmiştir. Dikey yönlü nano duvar yapılarının oluşumu, SEM, XPS, XRD, BET ve Raman analizleri ile doğrulanmıştır.

XRD analizleriyle, kristal yapıya sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Magnetron saçtırma yöntemi ile büyütülen numunelerdeki elementlerin kimyasal durumları XPS ölçümü ile belirlenmiştir. MoSe₂ yapısında mevcut olan Mo3d ve Se3d orbitallerine ait bağlanma enerjileri MoSe₂ yapısını doğrulamıştır. SEM görüntüleri ile nano duvar yapısı görülmüştür.

Farklı büyüme zamanına bağlı olarak üretilen MoSe₂ filmlerinin elektrokimyasal analizleri yapıp kapasite özellikleri incelenmiştir. MoSe₂ filmlerinin büyüme zamanına bağlı olarak 1 mA/cm² akım yoğunluğundaki spesifik kapasitansları 2 dk.- 353 mF/cm², 5 dk.-143,25 mF/cm², 9 dk.-497,86 mF/cm² ve 10 dk.-254,43 mF/cm² olarak bulunmuştur. 5000 döngü sonunda 9 dakikalık süperkapasitör aygıtının kapasitansını %97,43 oranında muhafaza ettiği görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Abun, A., Huang, B.-R., Saravanan, A., Kathiravan, D., & Hong, P.-D. (2020). Exfoliated MoSe₂ nanosheets doped on the surface of ZnO nanorods for hydrogen sensing applications. *ACS Applied Nano Materials*, 3(12), 12139-12147.
- Acar, M. (2020). *İki Boyutlu Malzemelerden Nanoaygıt Tasarımı ve Fabrikasyonu* [Doktora, Atatürk Üniversitesi]. Yöktez.
- Afif, A., Rahman, S. M., Azad, A. T., Zaini, J., Islan, M. A., & Azad, A. K. (2019). Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage—A review. *Journal of Energy Storage*, 25, 100852.
- Arora, S. K. (2022). MoSe₂ nanosheets as an efficient electrode material for supercapacitors. *Materials Today: Proceedings*, 54, 728-732.
- Arulkumar, C., Gandhi, R., & Vadivel, S. (2023). Ultra-thin nanosheets of Ti₃C₂T_x MXene/MoSe₂ nanocomposite electrode for asymmetric supercapacitor and electrocatalytic water splitting. *Electrochimica acta*, 462, 142742.
- Asghar, A., Rashid, M. S., Javed, Y., Hussain, S., Shad, N. A., Hamza, M., & Chen, Z. (2023). Facile hydrothermal synthesis of MoS₂ nano-worms-based aggregate as electrode material for high energy density asymmetric supercapacitor. *Electrochimica acta*, 465, 143011.
- Backes, C. (2019). Ten Years of Liquid-phase Exfoliation of Layered Crystals—A Bright Future ahead? *Chimia*, 73(6), 498-502.
- Baek, S., Kim, S., Han, S. A., Kim, Y. H., Kim, S., & Kim, J. H. (2023). Synthesis Strategies and Nanoarchitectonics for High-Performance Transition Metal Dichalcogenide Thin Film Field-effect Transistors. *ChemNanoMat*, 9(7), e202300104.
- Bay, M. (2019). *Two-dimensional transition metal dichalcogenide (TMDC) alloys and devices* [Phd, Eskişehir Teknik Üniversitesi]. Yöktez.
- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberg, A., & Rosehart, W. (2014). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources. *Energy Storage Smart Grids Plan. Oper. Renew. Var. Energy Resour*, 14(4), 1-33.
- Benoy, S. M., Pandey, M., Bhattacharjya, D., & Saikia, B. K. (2022). Recent trends in supercapacitor-battery hybrid energy storage devices based on carbon materials. *Journal of Energy Storage*, 52, 104938.
- Bharti, S., Tripathi, S., & Singh, K. (2023). Recent progress in MoS₂ nanostructures for biomedical applications: Experimental and computational approach. *Analytical Biochemistry*, 115404.
- Boddolla, S., & Thodeti, S. (2018). A review on characterization techniques of nanomaterials. *International Journal of Engineering, Science and Mathematics*, 7(1), 169-175.
- Bostan, Y. K. (2023). *İki boyutlu yarıiletken TMDC malzemelerin katkılanması ve optik/elektriksel özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi].
- Butanovs, E. (2020). *Synthesis and properties of transition metal dichalcogenide based core-shell nanowires* [PhD University of Latvia].
- Chaharganeh Kalangestani, F., Aghaei, F., Shahidani, H. S., & Nourmohammadian, M. (2025). Hydrothermal Synthesis of MSe₂ (M= Mn, Ni) on the MoSe₂@ MWCNT Composite: Advancing Supercapacitor Electrode Efficiency. *ACS Applied Electronic Materials*, 7(10), 4649-4661.
- Chanarsa, S., Semakul, N., Jakmunee, J., Iamprasertkun, P., Aubert, P.-H., & Ounnunkad, K. (2024). A strategy of forming sandwich electrodes based on graphene and two-dimensional transition metal dichalcogenides as supercapacitors to avoid gas evolution. *Journal of Energy Storage*, 98, 113083.
- Chen, L., Guo, M., Deng, R., & Zhang, Q. (2021). Recent progress of Ni₃S₂-based nanomaterials in different dimensions for pseudocapacitor application: synthesis, optimization, and challenge. *Ionics*, 27, 4573-4618.

- Chen, X., Liu, C., & Mao, S. (2020). Environmental analysis with 2D transition-metal dichalcogenide-based field-effect transistors. *Nano-micro letters*, 12, 1-24.
- Chhowalla, M., Shin, H. S., Eda, G., Li, L.-J., Loh, K. P., & Zhang, H. (2013). The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nature chemistry*, 5(4), 263-275.
- Chouki, T., Donkova, B., Aktarla, B., Stefanov, P., & Emin, S. (2021). Growth of MoSe₂ electrocatalyst from metallic molybdenum nanoparticles for efficient hydrogen evolution. *Materials Today Communications*, 26, 101976.
- Cook, J. B., Kim, H. S., Yan, Y., Ko, J. S., Robbenolt, S., Dunn, B., & Tolbert, S. H. (2016). Mesoporous MoS₂ as a transition metal dichalcogenide exhibiting pseudocapacitive Li and Na-ion charge storage. *Advanced Energy Materials*, 6(9), 1501937.
- Dai, C., Liu, Y., & Wei, D. (2022). Two-dimensional field-effect transistor sensors: the road toward commercialization. *Chemical Reviews*, 122(11), 10319-10392.
- Dybała, F., Polak, M., Kopaczek, J., Scharoch, P., Wu, K., Tongay, S., & Kudrawiec, R. (2016). Pressure coefficients for direct optical transitions in MoS₂, MoSe₂, WS₂, and WSe₂ crystals and semiconductor to metal transitions. *Scientific reports*, 6(1), 26663.
- Erdoğan, E. E. (2022). *Development of cathode materials for li-ion batteries by sputter deposition* [Yüksek Lisans, Middle East Technical University].
- Faisal, F., Alotaibi, B., Gassoumi, A., Alyousef, H. A., Alrowaily, A. W., Al-Harbi, N., Khan, M. J., & Ahmad, K. (2024). Facile fabrication of Mn doped WSe₂ as an electrode material for supercapacitor application. *Electrochimica acta*, 505, 144876.
- Gong, Y., Lin, J., Wang, X., Shi, G., Lei, S., Lin, Z., Zou, X., Ye, G., Vajtai, R., & Yakobson, B. I. (2014). Vertical and in-plane heterostructures from WS₂/MoS₂ monolayers. *Nature materials*, 13(12), 1135-1142.
- González, A., Goikolea, E., Barrena, J. A., & Mysyk, R. (2016). Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renewable and sustainable energy reviews*, 58, 1189-1206.
- Gowrisankar, A., Sherryn, A. L., & Selvaraju, T. (2021). In situ integrated 2D reduced graphene oxide nanosheets with MoSSe for hydrogen evolution reaction and supercapacitor application. *Applied Surface Science Advances*, 3, 100054.
- Gu, H., Wang, Z., & Hu, Y. (2012). Hydrogen gas sensors based on semiconductor oxide nanostructures. *Sensors*, 12(5), 5517-5550.
- Gudmundsson, J. T. (2020). Physics and technology of magnetron sputtering discharges. *Plasma Sources Science and Technology*, 29(11), 113001.
- Guo, H., Ning, J., Wang, B., Feng, X., Xia, M., Wang, D., Jia, Y., Zhang, J., & Hao, Y. (2021). Sodium ion-intercalated nanoflower 1T-2H MoSe₂-graphene nanocomposites as electrodes for all-solid-state supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 853, 157116.
- Gupta, S. P., Sanap, P. P., Deore, M. K., Gunjekar, J. L., Sankapal, B. R., Lokhande, C. D., Said, Z., Bhalerao, A. B., Bulakhe, R. N., & Kim, J. M. (2023). Molybdenum chalcogenides for supercapacitor applications: A critical review. *Journal of Energy Storage*, 73, 109065.
- Habib, M., Muhammad, Z., Haleem, Y. A., Farooq, S., Nawaz, R., Khalil, A., Shaheen, F., Naeem, H., Ullah, S., & Khan, R. (2024). Bridging the gap: an in-depth comparison of CVT-grown layered transition metal dichalcogenides for supercapacitor applications. *Materials Advances*, 5(3), 1088-1098.
- Habib, M., Ullah, S., Khan, F., Rafiq, M. I., Balobaid, A. S., Alshahrani, T., & Muhammad, Z. (2023). Supercapacitor electrodes based on single crystal layered ZrX₂ (X= S, Se) using chemical vapor transport method. *Materials Science and Engineering: B*, 298, 116904.
- Han, S. A., Bhatia, R., & Kim, S.-W. (2015). Synthesis, properties and potential applications of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nano Convergence*, 2, 1-14.
- Hantanasirisakul, K., & Gogotsi, Y. (2023). Electronic and optical properties of 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes). *MXenes*, 135-205.

- Hong, S., Zagni, N., Choo, S., Liu, N., Baek, S., Bala, A., Yoo, H., Kang, B. H., Kim, H. J., & Yun, H. J. (2021). Highly sensitive active pixel image sensor array driven by large-area bilayer MoS₂ transistor circuitry. *Nature communications*, 12(1), 3559.
- Huang, K., Li, Z., Lin, J., Han, G., & Huang, P. (2018). Two-dimensional transition metal carbides and nitrides (MXenes) for biomedical applications. *Chemical Society Reviews*, 47(14), 5109-5124.
- Huang, T., Jiang, Y., Shen, G., & Chen, D. (2020). Recent advances of two-dimensional nanomaterials for electrochemical capacitors. *ChemSusChem*, 13(6), 1093-1113.
- Hwang, N., & Barron, A. R. (2011). BET surface area analysis of nanoparticles. *The connexions project*, 1.
- Ibukun, O., & Jeong, H. K. (2019). Effects of aqueous electrolytes in supercapacitors. *New Phys. Sae Mulli*, 69(2), 154-158.
- İnal, İ. I. G. (2016). *Biyokütle temelli aktif karbonların elektrokimyasal çift tabaka kapasitörlerde elektrot malzemesi olarak kullanımı* Ankara Üniversitesi (Turkey)].
- Iqbal, M. Z., Zakir, A., Javed, M., Badi, N., Ali, R., Hegazy, H., & Alahmari, A. (2025). Elucidating the synergy of layer-by-layer TMDC-TMN deposition for superior electrochemical performance in supercapattery devices. *Materials Today Sustainability*, 29, 101063.
- Jana, B., Nath, R., SenGupta, J., Singha, A., & Das, K. (2025). Development of three-dimensional MoSe₂/graphene-flake composite toward high-performance symmetric supercapacitor: An experimental and theoretical study. *Journal of Energy Storage*, 120, 116354.
- Jiang, M., Zhang, J., Wu, M., Jian, W., Xue, H., Ng, T.-W., Lee, C.-S., & Xu, J. (2016). Synthesis of 1T-MoSe₂ ultrathin nanosheets with an expanded interlayer spacing of 1.17 nm for efficient hydrogen evolution reaction. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(39), 14949-14953.
- Jin, C., Ma, E. Y., Karni, O., Regan, E. C., Wang, F., & Heinz, T. F. (2018). Ultrafast dynamics in van der Waals heterostructures. *Nature nanotechnology*, 13(11), 994-1003.
- Joseph, S., Mohan, J., Lakshmy, S., Thomas, S., Chakraborty, B., Thomas, S., & Kalarikkal, N. (2023). A review of the synthesis, properties, and applications of 2D transition metal dichalcogenides and their heterostructures. *Materials Chemistry and Physics*, 297, 127332.
- Karahan, Ö. (2008). *Yeni bir izolatör ve kondansatör tasarımı ve yapımı* Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Krivenko, A., Komarova, N., Stenina, E., Sviridova, L., Mironovich, K., Shul'ga, Y. M., Manzhos, R., Doronin, S., & Krivchenko, V. (2015). Electrochemical modification of electrodes based on highly oriented carbon nanowalls. *Russian Journal of Electrochemistry*, 51, 963-975.
- Kumar, P., Gupta, M., Singh, K., & Kumar, N. (2023). Analysis of transition metal dichalcogenides materials based gas sensor using non-equilibrium green's function. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 36(1), e3036.
- Layek, R., Mondal, K., Karmakar, S., Sarkar, R., Chattopadhyay, D., & Kumbhakar, P. (2024). Synergistic effect in chemically synthesized noble metal nanoparticles and 2D MoSe₂ nanocomposite for enhanced electrochemical performance. *Materials Today Communications*, 38, 108342.
- Lazanas, A. C., & Prodromidis, M. I. (2023). Electrochemical impedance spectroscopy— a tutorial. *ACS measurement science au*, 3(3), 162-193.
- Lei, C., Markoulidis, F., Ashitaka, Z., & Lekakou, C. (2013). Reduction of porous carbon/Al contact resistance for an electric double-layer capacitor (EDLC). *Electrochimica acta*, 92, 183-187.

- Li, C., Zhou, Y., Huo, P., & Wang, X. (2020). Fabricated high performance ultrathin MoSe₂ nanosheets grow on MWCNT hybrid materials for asymmetric supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 826, 154175.
- Li, J., Jia, H., Ma, S., Xie, L., Wei, X.-X., Dai, L., Wang, H., Su, F., & Chen, C.-M. (2022). Separator design for high-performance supercapacitors: requirements, challenges, strategies, and prospects. *ACS Energy Letters*, 8(1), 56-78.
- Liu, B., Abbas, A., & Zhou, C. (2017). Two-dimensional semiconductors: from materials preparation to electronic applications. *Advanced Electronic Materials*, 3(7), 1700045.
- Liu, Y., Liu, S., Li, H., Yu, L., Sun, L., Xue, J., Xu, R., & Chen, G. (2022). In-situ phase conversion of composited 1T@ 2H-MoSe₂ nanosheets with enhanced HER performance. *Materials Chemistry and Physics*, 278, 125657.
- Mathis, T. S., Kurra, N., Wang, X., Pinto, D., Simon, P., & Gogotsi, Y. (2019). Energy storage data reporting in perspective—guidelines for interpreting the performance of electrochemical energy storage systems. *Advanced Energy Materials*, 9(39), 1902007.
- Memiş, S. K. (2025). *İletken polimer esash süperkapasitörlere elektrolit etkisi* Namık Kemal Üniversitesi]. YÖKTEZ.
- Mokkapati, S., Jaiswal, N., Gupta, M., & Kranti, A. (2019). Gate-all-around nanowire junctionless transistor-based hydrogen gas sensor. *IEEE Sensors Journal*, 19(13), 4758-4764.
- Muller, G. A., Cook, J. B., Kim, H.-S., Tolbert, S. H., & Dunn, B. (2015). High performance pseudocapacitor based on 2D layered metal chalcogenide nanocrystals. *Nano letters*, 15(3), 1911-1917.
- Nadar, A., Arora, Y., Thakur, P., Narayanan, T., Bhattacharya, A., & Khushalani, D. (2022). ReS₂ vs MoS₂: Viable electrodes for batteries and capacitors. *Electrochemistry Communications*, 139, 107313.
- Novoselov, K. S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T., Khotkevich, V., Morozov, S., & Geim, A. K. (2005). Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), 10451-10453.
- Orhan, Z. (2023). *Hidrotermal Yöntem ile Elde Edilen Co₂O₄, Cr₂O₃ ve CoCr₂O₄ Modifiye Elektrotların Süperkapasitör Performansının İncelenmesi* [Doktora, Atatürk Üniversitesi].
- Önyılmaz, E. (2024). *Yağı alınmış kayısı iç çekirdeği atıklarından elde edilmiş aktif karbonun süper kapasitör olarak kullanımı / Use of activated carbon from oiled apricot seed waste as a super capacitor* [Yüksek Lisans, İnönü Üniversitesi].
- Özküçük, G. U. (2019). *Transition metal dichalcogenide monolayers for gas sensor applications* [Yüksek Lisans, Eskişehir Teknik Üniversitesi].
- Öztürk, O., & Gür, E. (2024). Layered transition metal sulfides for supercapacitor applications. *ChemElectroChem*, e202300575.
- Pandolfo, A. G., & Hollenkamp, A. F. (2006). Carbon properties and their role in supercapacitors. *Journal of power sources*, 157(1), 11-27.
- Patel, A. B., Vaghasiya, J. V., Chauhan, P., Sumesh, C., Patel, V., Soni, S. S., Patel, K. D., Garg, P., Solanki, G. K., & Pathak, V. M. (2022). Synergistic 2D MoSe₂@ WSe₂ nanohybrid heterostructure toward superior hydrogen evolution and flexible supercapacitor. *Nanoscale*, 14(17), 6636-6647.
- Patra, A., & Rout, C. S. (2023). Architecturally robust MoWS₂ and Ti₃C₂T_x MXene nanosheets hybrid for high-performance energy storage and conversion applications. *Energy Storage*, 5(3), e411.
- Perişanoğlu, U. (2023). *Geçiş Metal Dikalkojenitlerin Süperkapasitör Aygıtlarda Elektrot Olarak Kullanılması* [Phd, Atatürk Üniversitesi].
- Radisavljevic, B., Radenovic, A., Brivio, J., Giacometti, V., & Kis, A. (2011). Single-layer MoS₂ transistors. *Nature nanotechnology*, 6(3), 147-150.
- Rostron, P., Gaber, S., & Gaber, D. (2016). Raman spectroscopy, review. *laser*, 21, 24.

- Saraç, S. G. (2024). *Şarj edilebilir Li-iyon piller için karbon esaslı Li₂CuP₂O₇ katot elektrotlarının geliştirilmesi ve elektrokimyasal performanslarının incelenmesi* [Yüksek Lisans, Hacettepe Üniversitesi]. Yöktez.
- Sarker, S., Peters, J., Chen, X., Li, B., Chen, G., Yan, L., Richins, S. K., Das, S., Zhou, M., & Luo, H. (2018). Engineering molybdenum diselenide and its reduced graphene oxide hybrids for efficient electrocatalytic hydrogen evolution. *ACS Applied Nano Materials*, 1(5), 2143-2152.
- Sharma, M., & Deb, P. (2024). WS₂ nanosheets with enhanced performances for supercapacitors. *AIP Conference Proceedings*,
- Sharma, S., & Chand, P. (2023). Supercapacitor and electrochemical techniques: A brief review. *Results in Chemistry*, 5, 100885.
- Simon, P., & Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature materials*, 7(11), 845-854.
- Stevie, F. A., & Donley, C. L. (2020). Introduction to x-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 38(6).
- Strauß, F., Zeng, Z., Braun, K., & Scheele, M. (2024). Toward Gigahertz Photodetection with Transition Metal Dichalcogenides. *Accounts of Chemical Research*, 57(10), 1488-1499.
- Su, H., Niu, C., Zhang, R., Huang, M., & Li, Z. (2025). Construction of a Ni₂P/NiSe₂/MoSe₂ hybrid for advanced supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 1010, 178074.
- Sung, J., & Shin, C. (2020). Recent studies on supercapacitors with next-generation structures. *Micromachines*, 11(12), 1125.
- Süleymanoğlu, T. (2023). *LaxSr_{1-x}FeyM_{1-y}(M: Mn,Co,Ni,Cu)O₃ gözenekli perovskitin incelenmesi ve süper kapasitör uygulama yaklaşımı ile kristal yapı, elektrik ve iyon taşıma özelliklerinin araştırılması / LaxSr_{1-x}FeyM_{1-y}(M: Mn,Co,Ni,Cu)O₃ porous perovskites investigation and investigation of crystal structure, electrical and ion transport properties with supercapacitor application approach* [Yüksek Lisans, Sakarya Üniversitesi].
- Tomar, A., Issar, S., Choudhary, N., Kodan, S., & Chandra, R. (2024). Design of High-Performance Symmetric Supercapacitor Based on WSe₂ Nanoflakes for Energy Storage Applications. *Energy & Fuels*, 38(14), 13425-13435.
- Tümkaya, S. (2023). *Süper kapasitör uygulamaları için nano bor karbür (B₄C) sentezi / Synthesis of nano boron carbide (B₄C) for supercapasitor applications* [Yüksek Lisans, Yıldız Teknik Üniversitesi].
- Upadhyay, S., & Pandey, O. (2021). Synthesis of layered 2H-MoSe₂ nanosheets for the high-performance supercapacitor electrode material. *Journal of Alloys and Compounds*, 857, 157522.
- Vattikuti, S. P., Devarayapalli, K., Nagajyothi, P., & Shim, J. (2020). Microwave synthesized dry leaf-like mesoporous MoSe₂ nanostructure as an efficient catalyst for enhanced hydrogen evolution and supercapacitor applications. *Microchemical Journal*, 153, 104446.
- Vikraman, D., Hussain, S., Karuppasamy, K., Santhoshkumar, P., Alfantazi, A., Jung, J., & Kim, H.-S. (2024). Facile fabrication of MoS₂ and MoSe₂ layered structures on Mo foil for the efficient photocatalytic dye degradation and electrocatalytic hydrogen evolution reaction. *Journal of Water Process Engineering*, 60, 105127.
- Wang, C., Long, Y., Deng, Y., Han, Y., Tishkevich, D., Ha, M. N., & Weng, Q. (2024). Hexagonal boron nitride nanomaterials for biomedical applications. *BMEMat*, e12068.
- Wang, J., Li, T., Wang, Q., Wang, W., Shi, R., Wang, N., Amini, A., & Cheng, C. (2020). Controlled growth of atomically thin transition metal dichalcogenides via chemical vapor deposition method. *Materials Today Advances*, 8, 100098.
- Wei, Y.-M., Kumar, D., Zhang, L., & Li, J.-F. (2025). Pseudocapacitive materials for energy storage: properties, mechanisms, and applications in supercapacitors and batteries. *Frontiers in Chemistry*, 13, 1636683.

- Xia, J., Huang, X., Liu, L.-Z., Wang, M., Wang, L., Huang, B., Zhu, D.-D., Li, J.-J., Gu, C.-Z., & Meng, X.-M. (2014). CVD synthesis of large-area, highly crystalline MoSe₂ atomic layers on diverse substrates and application to photodetectors. *Nanoscale*, 6(15), 8949-8955.
- Xiao, X., Shen, S., Zhang, L., Lin, Z., Wang, Z., Zhang, Q., Zhong, W., & Zhan, B. (2023). Construction of Cobalt Molybdenum Diselenide Three-phase Heterojunctions for Electrocatalytic Hydrogen Evolution in Acid Medium. *Chemistry—An Asian Journal*, 18(2), e202201182.
- Xu, Y., Wang, Y., Qiu, J., Wang, Y., Cheng, J., & Shi, Y. (2025). Electrode materials in focus: Advancements in pseudocapacitors for AC line filtering. *Journal of Energy Storage*, 132, 117708.
- Yamamoto, M., Wang, S. T., Ni, M., Lin, Y.-F., Li, S.-L., Aikawa, S., Jian, W.-B., Ueno, K., Wakabayashi, K., & Tsukagoshi, K. (2014). Strong enhancement of Raman scattering from a bulk-inactive vibrational mode in few-layer MoTe₂. *ACS nano*, 8(4), 3895-3903.
- Yang, Y., Li, Y., Ning, H., Lu, K., Luo, D., Fu, X., Su, G., Zhu, Z., Yao, R., & Peng, J. (2024). Research on correlation between metal oxide semiconductor target and magnetron sputtered film based on TFT application. *Journal of Alloys and Compounds*, 984, 173942.
- Yin, Y., Zhang, Y., Gao, T., Yao, T., Zhang, X., Han, J., Wang, X., Zhang, Z., Xu, P., & Zhang, P. (2017). Synergistic phase and disorder engineering in 1T-MoSe₂ nanosheets for enhanced hydrogen-evolution reaction. *Advanced materials*, 29(28), 1700311.
- Yuwen, L., Zhou, J., Zhang, Y., Zhang, Q., Shan, J., Luo, Z., Weng, L., Teng, Z., & Wang, L. (2016). Aqueous phase preparation of ultrasmall MoSe₂ nanodots for efficient photothermal therapy of cancer cells. *Nanoscale*, 8(5), 2720-2726.
- Zang, X., Shen, C., Kao, E., Warren, R., Zhang, R., Teh, K. S., Zhong, J., Wei, M., Li, B., & Chu, Y. (2018). Titanium disulfide coated carbon nanotube hybrid electrodes enable high energy density symmetric pseudocapacitors. *Advanced materials*, 30(5), 1704754.
- Zhang, J., Wang, T., Liu, P., Liu, Y., Ma, J., & Gao, D. (2016). Enhanced catalytic activities of metal-phase-assisted 1T@ 2H-MoSe₂ nanosheets for hydrogen evolution. *Electrochimica acta*, 217, 181-186.
- Zhang, W., Liang, Y., Yue, D., & Feng, Y. (2024). Hexagonal boron nitride nanosheets: Fabrication, thermal properties and application in polymers. *High Performance Polymers*, 36(4), 211-229.
- Zhong, C., Deng, Y., Hu, W., Qiao, J., Zhang, L., & Zhang, J. (2015). A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, 44(21), 7484-7539.
- Zhou, X., Tian, Z., Kim, H. J., Wang, Y., Xu, B., Pan, R., Chang, Y. J., Di, Z., Zhou, P., & Mei, Y. (2019). Rolling up MoSe₂ nanomembranes as a sensitive tubular photodetector. *Small*, 15(42), 1902528.
- Zhou, Y., Xiao, H., Zhang, S., Li, Y., Wang, S., Wang, Z., An, C., & Zhang, J. (2017). Interlayer expanded lamellar CoSe₂ on carbon paper as highly efficient and stable overall water splitting electrodes. *Electrochimica acta*, 241, 106-115.
- Zhu, X. (2022). Recent advances of transition metal oxides and chalcogenides in pseudocapacitors and hybrid capacitors: A review of structures, synthetic strategies, and mechanism studies. *Journal of Energy Storage*, 49, 104148.
- Zhu, Z., Bu, Y., Gu, C., & Wang, X. (2025). Advances in advanced ceramic super pseudocapacitors: Principles, techniques and applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 117423.

ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler
Adı Soyadı: Halil İbrahim TEBER Doğum Tarihi: Uyruğu:
Eğitim Bilgileri
Lise: Ön Lisans: Lisans: Yüksek Lisans:
Yabancı Dil
İngilizce:
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar
Tezden Üretilmiş Yayınlar
Bildiri : Makale :