



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**OKSİJEN VE SICAKLIĞIN REAKTİF
MAGNETİK ALAN SIÇRATMA
YÖNTEMİYLE BÜYÜTÜLEN ÇİNKO OKSİT
İNCE FİMLERE ETKİSİ**

Ayşegül SEZGİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı

**Haziran-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ayşegül SEZGİN tarafından hazırlanan “Oksijen ve Sıcaklığın Reaktif Magnetik Alan Sıçratma Yöntemiyle Büyütülen Çinko Oksit İnce Filmlere Etkisi” adlı tez çalışması 22/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Teoman ÖZTÜRK

.....

Danışman

Doç. Dr. Mücahit Yılmaz

.....

Üye

Doç. Dr. Seçkin AKIN

.....

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

Prof. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Ayşegül SEZGİN

Tarih: 22/06/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OKSİJEN VE SICAKLIĞIN REAKTİF MAGNETİK ALAN SİÇRATMA YÖNTEMİYLE BÜYÜTÜLEN ÇİNKO OKSİT İNCE FİLMLERE ETKİSİ

Ayşegül SEZGİN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mücahit YILMAZ

2023, 94 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Mücahit YILMAZ

Doç. Dr. Teoman ÖZTÜRK

Doç. Dr. Seçkin AKIN

Çinko oksit (ZnO), yarı iletken endüstrisinde gösterdiği saydam iletken oksit (SiO) özelliği ile hızla gelişmekte olan optoelektronik teknolojisinde sıklıkla kullanılan bir malzemedir. Bu tez çalışmasında, reaktif radyo frekans magnetik alan sıçratma yöntemi ile büyütülen ZnO ince filmlerin büyütme esnasında ortamda bulunan oksijen ve altta sıcaklığına bağlılığı yapısal ve optik özellikleri açısından değerlendirilmiştir. Yapılan X-ışınları kırınım deseni analizleri sonucunda elde edilen bulgular incelendiğinde bütün filmlerin yüksek yönelime sahip hegzagonal wurtzite yapısında olduğu ve bunun O₂ miktarına bağlı olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, Raman spektrumları da wurtzite yapısının varlığını doğrulamaktadır. Aynı zamanda tüm örneklerin yüksek geçirgenliğe sahip olduğu ve film kalınlıklarının sıcaklık artışı ile azaldığı tespit edilmiştir. Alan etkili taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) sonuçları ise filmlerdeki taneciklerin oda sıcaklığında, 100 °C'de ve 200 °C'de çok değişmediği ancak 300 °C sıcaklıkta büyütülen filmlerin homojen olmayan tanecik büyümesi sergilediği tespit edilmiştir. Ancak, bu durum O₂ arttıkça azalmaktadır. Bütün filmler için optik bant boşluğu ~3.25 eV olarak tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışma, optoelektronikte oldukça sık kullanılan ince film çinko oksit yapılarına ilişkin kapsamlı bir optimizasyon sunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çinko oksit, ince film, magnetik alan sıçratma, saydam iletken oksit.

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF OXYGEN AND TEMPERATURE ON ZINC OXIDE THIN FILMS GROWN BY REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING METHOD

Ayşegül SEZGİN

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

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mücahit YILMAZ
2023, 94 pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Mücahit YILMAZ
Assoc. Prof. Dr. Teoman ÖZTÜRK
Assoc. Prof. Dr. Seçkin AKIN

Zinc oxide (ZnO) is a material that is frequently used in optoelectronic technology, which is rapidly developing with its transparent conductive oxide (TCO) feature in the semiconductor industry. In this thesis, the dependence of ZnO thin films grown by reactive radio frequency magnetic field sputtering to the oxygen and substrate temperature in the environment during growth was evaluated in terms of their structural and optical properties. When the findings obtained as a result of the X-ray diffraction pattern analyzes were examined, it was concluded that all the films were in the hexagonal wurtzite structure with high orientation and this was not dependent on the amount of O₂. In addition, Raman spectra confirm the existence of wurtzite structure. At the same time, it was determined that all samples had high permeability and the film thicknesses decreased with the increase in temperature. Field-effect scanning electron microscopy (FE-SEM) and atomic force microscopy (AFM) results showed that the particles in the films did not change much at room temperature, 100 °C and 200 °C, but the films grown at 300 °C showed inhomogeneous particle growth. However, this situation decreases as O₂ increases. The optical band gap for all films was determined as ~3.25 eV. This study presented a comprehensive optimization of thin-film zinc oxide structures, which are widely used in optoelectronics.

Keywords: Rf magnetron sputtering, zinc oxide, thin films, transparent conductive oxide.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince yardımlarını, deneyim ve bilgi birikimlerini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren danışmanım Doç. Dr. Mücahit YILMAZ'a ve ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Veysel ÜNSÜR'e,

Tecrübelerini ve yardımlarını bizden esirgemeyen başta Prof. Dr. Oğuz DOĞAN olmak üzere Doç. Dr. Seçkin AKIN'a ve tüm hocalarıma,

Tez çalışmasına desteklerinden dolayı çalışma arkadaşlarım Zeynep MAVİLİ, Mustafa BÜYÜKHARMAN, Muhittin ÜNAL, Bülent ALKAN, Faranak SADEGH, Ayşe KARATAŞ ve diğer tüm çalışma arkadaşlarıma ve her zaman yanımda olan sevgili dostlarım Merve GÖKÇE, Elif YILDIZ, Narin KANAÇ, Nurdan ERKOYUNCU, Sümeyye ÖZGENELLER ve Aycan KAKAN'a sonsuz teşekkürler.

Ölçüm sürecinde laboratuvar olanakları için Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne teşekkürlerimi sunarım.

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

Ayşegül SEZGİN
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çinko Oksit'in (ZnO) Özellikleri	2
1.1.1. ZnO'nun yapısal özellikleri	2
1.1.2. ZnO'nun optik özellikleri	4
1.1.3. ZnO'nun elektriksel özellikleri	5
1.2. İnce Film Büyütme Yöntemleri	6
1.2.1. ZnO büyütme yöntemleri.....	7
1.2.1.1. Darbeli lazer biriktirme (PLD)	7
1.2.1.2. Kimyasal buhar biriktirme (CVD).....	8
1.2.1.3. Sol-Jel	9
1.2.1.4. Magnetik alan sıçratma	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1. Alttaş Temizliği	16
3.2. ZnO İnce Filmlerin Büyütülmesi	16
3.3. ZnO İnce Filmlerin Analizleri	20
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	24
4.1. ZnO İnce Filmlerin Yapısal Analizi	24
4.2. ZnO İnce Filmlerin Optik Analizi	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
KAYNAKLAR	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

”	: İnç (1 inç = 2,54 cm)
m	: SI birimde mikro (10^{-6} m)
cm	: Santimetre (10^{-2} m)
μ m	: Mikrometre (10^{-6} m)
nm	: Nanometre (10^{-9} m)
2θ	: Kırınım açısı
K	: Kelvin
°	: Derece
°C	: Santigrad derece
e	: Elektron
eV	: Elektron volt
K	: Kelvin
Ω	: Ohm
I	: Akım
I_m	: Işık şiddeti
λ	: Dalga boyu
E_p	: Fonon enerjisi
m_e	: Etkin elektron kütlesi
m_b	: Etkin boşluk kütlesi
α	: Soğurma katsayısı
A	: Soğurma
t	: İnce film kalınlığı
T	: Geçirgenlik
W	: X-Işını ile ince film arasındaki açı
W	: Watt

Kısaltmalar

AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
ALD	: Atomik tabaka biriktirme
Ar	: Argon
AZO	: Alüminyum katkılı çinko oksit
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
DC	: Doğru akım
DFT	: Yoğunluk fonksiyon teorisi
DI	: Deiyonize
E_g	: Bant boşluğu
FE-SEM	: Alan etkili taramalı elektron mikroskobu
GaN	: Galyum nitrid
GIXRD	: Küçük açı X-ışınları kırınımı
IPA	: İzopropil alkol
ITO	: Kalay katkılı indiyum oksit
k.b.	: Keyfi birim

KrF	: Kripton flor
kX	: 10^3 kat büyütme
LED	: Işık yayan diyot
LDA	: Local Density Approximation
MBE	: Moleküler ışın epitaksisi
N ₂	: Nitrojen
O ₂	: Oksijen
PL	: Fotolüminesans
PLD	: Darbeli lazer biriktirme
PSPD	: Konuma duyarlı foto diyot
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
R _a	: Ortalama pürüzlülük değeri
RF	: Radyo frekansı
sccm	: Dakikada geçen standart cm ³
SIC-PP	: Self-interaction corrected pseudopotential
Si ₃ N ₄	: Silikon nitrür
TCO	: Saydam iletken oksit
TCO ₂	: Silisyum dioksit
SLG	: Soda lime cam
TE	: Termal buharlaştırma
TFT	: İnce film transistör
YBCO	: İtiryum baryum bakır oksit
UV	: Ultraviyole
UV-Vis	: Morötesi – görünür bölge

1. GİRİŞ

Son yıllarda teknoloji hızlı bir gelişim içindedir. Bilim insanları tarafından verilerin işlenmesi ve depolanması, çok yüksek hızdaki iletişim, yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek verim ile kullanımı ve depolanması gibi alanlarda her geçen gün yeni araştırmalar yayınlanmaktadır. Durmadan devam eden bu gelişim ve değişimlerin beraberinde getirdiği sonuçlar ve etkiler yaşadığımız çağda daha hızlı ve daha küresel hale gelmektedir. Bu gelişmelerin arkasındaki itici güç malzeme bilimidir. 20. yüzyılın ortalarından itibaren ise yarı iletkenlerin malzeme biliminde önemli bir konuma sahip olduğu görülmektedir.

Son dönemlerde optoelektronik aygıt teknolojisinde yarı iletken şeffaf tabakalar sergilediği avantajlardan dolayı büyük önem kazanmıştır (Wager, 2003). Değiştirilebilir optik bant aralığına sahip olması ve sahip olduğu kısa dalga boyları, yarı iletken malzemeleri bilim alanında yaygın olarak tercih edilen malzeme haline getirmektedir (Khan & Faruque Ahmed, 2021). Çeşitli yarı iletken malzemeler arasında çinko oksit'in (ZnO) saydam iletken oksit (SİO) malzeme olması çok sayıda araştırmacının bu malzemeye odaklanmasına sebep olmuştur (Hafdallah vd., 2018). SİO malzemelerin en ilgi çekicilerinden olan ZnO, (II-VI) bileşiklerine dahil n-tipi yarı iletken olup 3.37 eV geniş yasak enerji bant aralığı (E_g) ve 60 meV gibi yüksek eksiton bağlanma enerjisi özelliklerini göstermektedir (Sajjad vd., 2018; Yusof vd., 2018).

ZnO ince filmler, yarı iletken olmasının yanında düşük maliyeti, rezerv sıkıntısının olmaması, toksik olmaması, lüminesans özelliği, yüksek sıcaklıklara karşı direnci, oda sıcaklığındaki yüksek elektron hareketliliği, şeffaflığı ve kimyasal kararlılığı nedeniyle araştırmacılar için çok önemli ve temel bir malzeme konumuna gelmiştir (Imran vd., 2019; Nanto vd., 1986; Sajjad vd., 2018).

Doğada bol miktarda bulunan Zn bileşiklerinin tarih öncesi zamanlarda da kesin omamakla birlikte tıp alanında merhem olarak açık yaralar için kullanıldığı düşünülmektedir. 12 ile 16. yüzyıl arasındaki süreçte Zn ve çinko ZnO'nun ilkel bir form olarak Hindistan'da tanındığı ve üretildiği, ardından bu üretim sürecinin 17. yüzyılda Çin tarafından devam ettirildiği bilinmektedir. Günümüze kadar ZnO sağlık alanında, boyalarda katkı maddesi olarak ve çeşitli endüstri sınıflarında kullanılmıştır. ZnO ince filmler ile ilgili araştırmalarsa teknolojinin gelişimi ve bu gelişmelerden ortaya çıkan ihtiyaçlar ile 1930'lu yıllarda başlamış olup 1970'lerin sonlarına gelindiğinde artan bir ivme kazanmıştır. Malzeme bilimindeki gelişmelerle ve keşiflerle, ZnO ince filmler şu anki önemli konumuna gelmiştir. ZnO'nun yüksek enerjili

elektromagnetik radyasyona karşı en dirençli yarı iletken olması da ZnO'nun uzay uygulamaları için en çok tercih edilen yarı iletkenlerden biri olmasında önemli rol oynamaktadır (Look vd., 1999).

ZnO ince filmleri saf halde büyütebilmek için çok sayıda farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunların içerisinde kimyasal buhar biriktirme (CVD) (J.-Y. Zhang vd., 2008), fiziksel buhar biriktirme (PVD) (Arnold vd., 2003; Wang, 2004), darbeli lazer biriktirme (PLD) (Klingshirn, 2007), moleküler ışın epitaksisi (MBE) (Norton vd., 2004), sol-jel, hidrotermal, sıçratma, sprej piroliz, fotokimyasal biriktirme yöntemleri öne çıkanlardır.

Bu tez çalışmasında, yüksek saflıkta Zn hedef (%99.9) kullanılarak, reaktif magnetik alan sıçratma yöntemi ile büyütülen ZnO ince filmlerin O₂ ve altta sıcaklıklarına bağlı değişimleri yapısal ve optiksel olarak incelenmiştir. Soda-lime glass (SLG) altlık üzerine büyütülen ZnO ince filmlerin çeşitli uygulamalar için geniş kapsamlı bir optimizasyonu yapılmıştır. Bu sonuçlardan yola çıkarak büyütülen ZnO ince filmlerin çeşitli uygulamalar için büyütme parametreleri ayrıntılandırılmıştır.

1.1. Çinko Oksit'in (ZnO) Özellikleri

1.1.1. ZnO'nun yapısal özellikleri

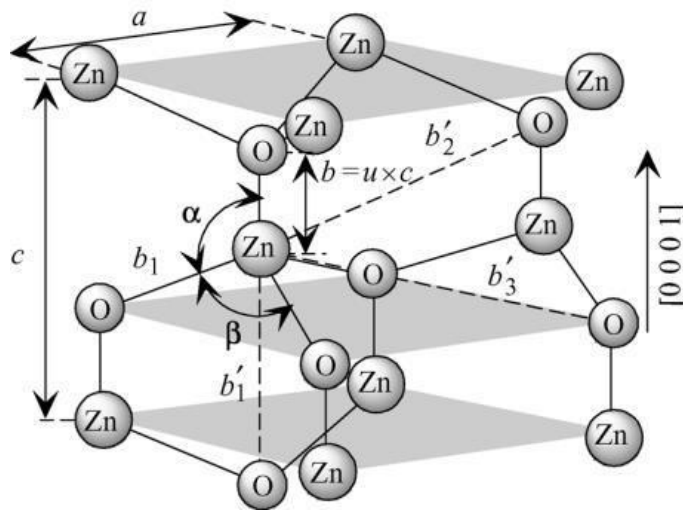
ZnO, inorganik karakterli, beyaz renkli ve suda çözünmeyen bir bileşiktir. Tetrahedral bağ durumu, sp³ kovalent bağının bir örneğidir ve yaklaşık %62 gibi yüksek değerde bir iyoniklik sergilemektedir. Bu değer, ZnO bağ yapısının çok güçlü olduğunu ve bu malzemenin yüksek güce ihtiyaç duyan elektronik uygulamalar için kullanılabileceğini göstermektedir. Çizelge 1.1'de sıkı paketlenmiş hegzagonal (hcp) yapıda bulunan ZnO'nun fiziksel özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 1.1. Hekzagonal yapıya sahip ZnO'nun temel fiziksel özellikleri (Steiner, 2004)

Örgü sabitleri a_0, c_0 (T = 300 K)	0,32469 nm, 0,52069 nm
Yoğunluğu	5,606 g/cm ³
Ergime noktası	2248 K
Dielektrik sabiti	8,66 ϵ
Bant aralığı	3,37 eV, direkt
Yük taşıyıcı konsantrasyonu	$<10^6$ cm ⁻³
Eksiton bağlanma enerjisi	60 meV
Elektron etkin kütlesi	0,24 m_e
Elektron mobilitesi (T = 300 K)	200 cm ² /V.s
Hol etkin kütlesi	0,59 m_b
Hol mobilitesi (T = 300 K)	5 – 50 cm ² /V.s

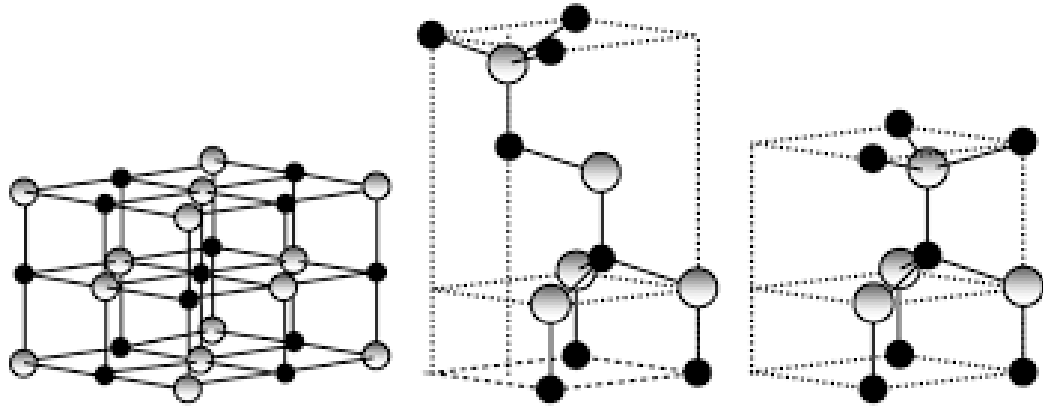
ZnO'nun doğada 2 formu bulunur. Bunlardan en çok görüleni sıkı paketli hegzagonal (hcp) yapıda bulunanı wurtzite ve diğeri Zinc-blend olarak isimlendirilen kübik yapısıdır.

Wurtzite kristal yapısının birim hücresi dört atom içerir ve bunların ikisi anyon, diğeri ikisi ise katyondur. Wurtzite yapı, hegzagonal birim hücre içerir. ZnO yarı iletkenine ait kristal yapı ve örgü sabitleri Şekil 1.1'de gösterilmiştir



Şekil 1.1. Wurtzite ZnO kristal yapısının gösterimi ve örgü sabitleri (Taktakoğlu & Kavak, 2016)

Şekil 1.2'de ZnO'ya ait kristal yapılar gösterilmiştir.



Şekil 1.2. ZnO'nun kristal yapısı (a) kübik kaya tuzu, (b) kübik çinko sülfite yapı ve (c) hekzagonal wurtzite yapı (Özgür vd., 2005)

Kübik kaya tuzu yapısı ZnO'nun yüksek basınç etkisinde bulunduğu yapıdır. ZnO'nun birim hücresinin Şekil 1.2'de şematik gösteriminde siyah renkli küreler O^{2-} atomlarını, beyaz küreler ise Zn^{+2} atomlarını temsil etmektedir.

ZnO'nun wurtzite yapısında 300 K'deki örgü parametrelerine ait değerler şu şekildedir; $a = 0,32495$ nm ve $c = 0,52069$ nm. ZnO'nun a/c oranı incelendiğinde ise 1,602'lik orana sahip ideal sıkı paket halindeki hekzagonal yapısına (1,633) yakın olduğu görülmektedir.

1.1.2. ZnO'nun optik özellikleri

Işık-madde etkileşmesi sonucunda, fotonların malzeme ile etkileşime girmesiyle soğrulma, yansıma, kırılma, saçılma gibi pek çok optik olay meydana gelmektedir. ZnO ince filmlerin görünür ışık dalga boyu aralığında saydam halde bulunması sebebiyle TCO malzeme olarak oldukça büyük bir ilgi görmektedir. ZnO bileşiği görünür bölge içerisinde yaklaşık olarak %80 ile %90 arasında optik geçirgenlik ve $10^{-3} - 10^{+2}$ Ω cm aralığında bir elektriksel direnç sunmaktadır (Demirci, 2006).

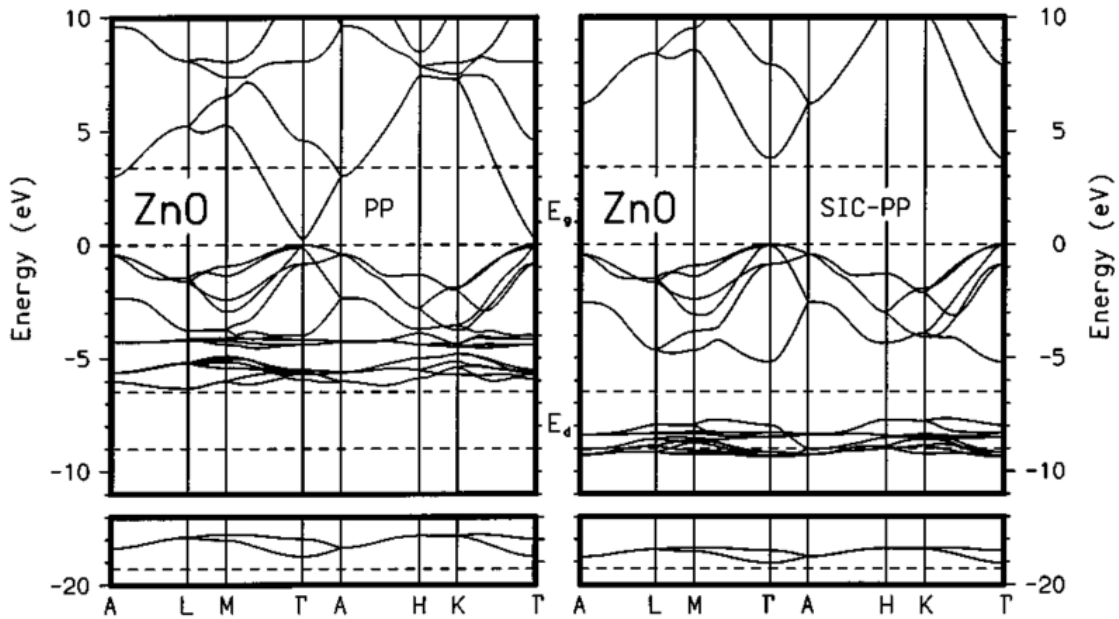
ZnO'nun 3.37 eV'lik bir bant aralığı ile yüksek aktivasyon enerjisine sahip olduğu bilinmektedir (Laks vd., 1993). Bu nedenle ZnO, düşük güç tüketimi ile fotonik malzemelerin arasında son derece önemli bir konumda bulunmaktadır. Sahip olduğu bant aralığı aynı zamanda onu güneşin ultraviyole radyasyonunu soğurması için en uygun malzemelerden biri haline getirmektedir. Bunun yanı sıra yüksek kırınım indisi

(n) (yaklaşık 2.0), ZnO'nun gösterdiği diğer bir optik özelliğidir. Elmasın yaklaşık 2,41 kırınım indisine sahip olduğu bilinmektedir. Yarı iletkenler içerisinde de ZnO'nun sergilediği yüksek kırılma indisi değeri yalnızca UV koruması için değil, aynı zamanda pigment beyazlatma ve kozmetik uygulamalarda da etkili kılmaktadır (Wang, 2004).

1.1.3. ZnO'nun elektriksel özellikleri

Durmadan ilerleyen teknoloji çağında yeni uygulamaların keşfi ve mevcut sistemlerin performansını artırmak için yarı iletken bant yapısı bilgisine sahip olmak çok önemli bir noktadır. ZnO, optoelektronik alandaki cihaz uygulamaları açısından ilginç bir yarı iletken olduğundan, optik ve elektriksel özelliklerini açıklamak için bant yapısının net bir şekilde anlaşılması önemlidir. ZnO yapılarının sahip olduğu elektriksel özellikler, önümüzdeki yıllarda nanoelektronik uygulamalar için büyük önem taşıyacaktır. Elektriksel geçirgenlik (permitivite), ZnO'nun ince film, nanoçubuk, nanopartikül, nanotel yapılarında olup olmadığına bağlı olarak farklılık sergilemektedir. Kısaca ZnO, elektriksel yalıtmadan iletkenliğe kadar çeşitli özellikler gösterebilen bir kimyasal malzemedir.

Doğrusal olmayan akım-voltaj (I-V) özelliği, gerilim değerindeki bir değişiklik için akım değerindeki ve malzemenin direncindeki farklılık olarak tanımlanmaktadır. Varistör etkisi adı verilen bu ayrıcalıklı özelliğin keşfedilmesiyle günümüz elektronik devreleri ZnO varistörler ile voltaj değişimlerinden korunmaktadır (Fan & Lu, 2005).



Şekil 1.3. Standart bir PP (sol panel) veya SİC-PP (sağ panel) kullanılarak hesaplanan ZnO'nun LDA toplu bant yapısı (Vogel vd., 1995)

Şekil 1.3'te gösterilen yatay kesikli çizgiler, boşluk enerjisini ve d-bant genişliğini göstermektedir. ZnO'nun bant yapısı Local Density Approximation (LDA) ve self-interaction corrected pseudopotential (SIC-PP) isimli teorik hesaplamalar kullanılarak hesaplanmıştır.

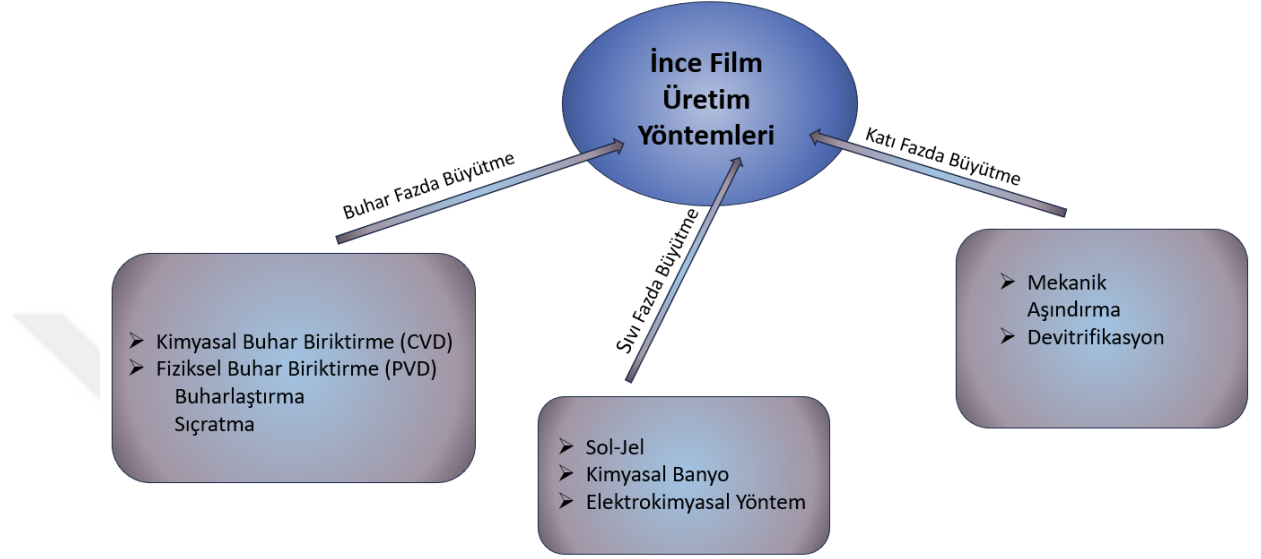
Şekil 1.3'te gösterilen SIC-PP tekniği ile iletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu arasındaki bölgede kalan E_g değeri 3,77 eV olarak tespit edilmiştir. İletkenlik bandının minimum seviyesi ile valans bandının maksimum seviyesi aynı "k" (momentum) uzayında olduğundan dolayı ZnO direkt bant aralığına sahiptir (Janotti & Van de Walle, 2009).

Düşük direncin elektron mobilite yoğunluğuna göre değişmesiyle maksimum taşıyıcı yoğunluğu dengesini sağlayabilmek için O_2 katkı oranı önemli bir faktördür. Büyütme ortamının sıcaklığı ve O_2 miktarıyla yoğunluk artırılabilir. O_2 yoğunluğunun artması ZnO ince filmlerinin direncini doğru orantıda etkileyen bir faktördür.

1.2. İnce Film Büyütme Yöntemleri

İnce film büyütme yöntemleri, malzeme teknolojisinde önemli bir yer tutmaktadır. Sahip olduğu performans da sentez yöntemleriyle doğrudan bir ilişki içindedir. İnce filmler, çok farklı üretim yöntemleri ve koşulları nedeniyle bulk

malzemelerin sahip olmadığı özellikler sergilemektedir. Bulk malzemelere kıyasla gösterdiği üstün özellikler gelişen teknolojiye yapılan çalışmalara fayda sağlamaktadır. Şekil 1.4'te ince filmin sentezleme yöntemleri şema üzerinde gösterilmektedir.



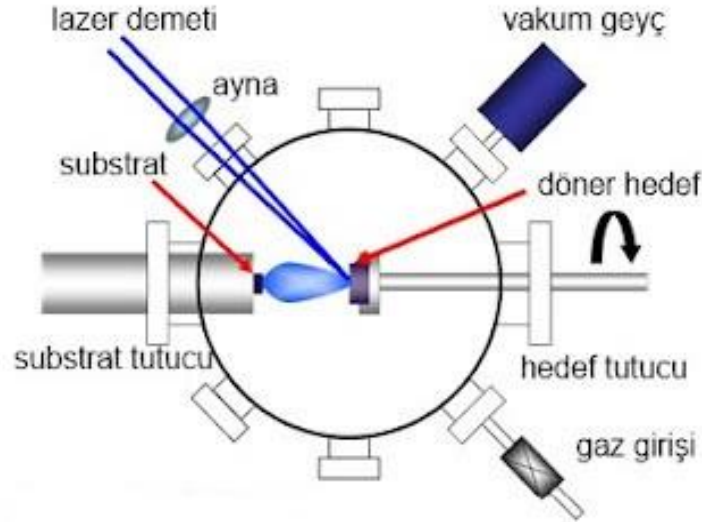
Şekil 1.4. İnce Film Biriktirme Yöntemleri

1.2.1. ZnO büyütme yöntemleri

ZnO ince filmleri saf halde büyütebilmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında CVD, PVD, PLD, MBE, sol-jel, hidrotermal, magnetik alan sıçratma (magnetron sputtering) sprej piroliz ve fotokimyasal buhar biriktirme öne çıkan yöntemlerdir (Alkhayatt & Hussian, 2017; Papari vd., 2017).

1.2.1.1. Darbeli lazer biriktirme (PLD)

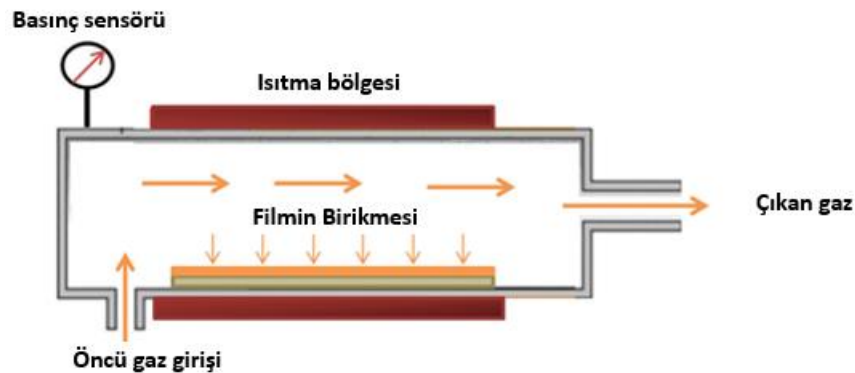
PLD sistemi, birden fazla hedefi ve altlığı bir arada tutabilen, yüksek vakum odasına sahip bir sistemdir. 248 nm dalga boylu Kripton Flor (KrF) lazer ile hedefin vurulması ve malzemenin saçtırılmasını temel alır. Saçılan malzemeler altlığa yönelirken lazer ışığı tarafından 1 ile 20 Hz aralığında, 1,1 J/cm² kadar yüksek akıcılık değerinde atım yapılır. PLD cihazı, altlık üzerinde İtiryum baryum bakır oksit (YBCO) süper iletken vb. hedef malzemeler ile aynı bileşime sahip ince filmlerin biriktirilmesi için kullanılmaktadır. Şekil 1.5'te PLD sisteminin şematik gösterimi sunulmaktadır.



Şekil 1.5. PLD sisteminin şematik görünümü (Beşergil, t.y.).

1.2.1.2. Kimyasal buhar biriktirme (CVD)

CVD, yarı iletken endüstrisinde tercih edilen üretim yöntemlerinin en ön plana çıkanlarından biridir. Bu yöntem günümüz teknolojisinde alttaş üzerine 2 boyutlu (2D) ince film kaplama işlemi için de sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemle yüksek vakum veya atmosferik ortamda ve ısıtılabilen bir oda içerisinde elde edilmesi beklenen malzeme, alttaş yüzey üzerine kimyasal buhar fazında biriktirilir. CVD sistemini özel kılan özelliklerinin başında 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda ve vakumlu veya inert ortamda bu işlemi gerçekleştirilebilmesi gelmektedir. Alttaş yüzey üzerindeki kimyasal buharın reaktif olarak parçalanması ile yüzeyde istenilen tabaka elde edilir. Bu süreçte sistem üzerinde devam eden bir gaz akışıyla beraber istenmeyen ürünler yine buhar fazında sistemden uzaklaştırılır. Şekil 1.6'da CVD'nin şematik gösterimi verilmektedir.

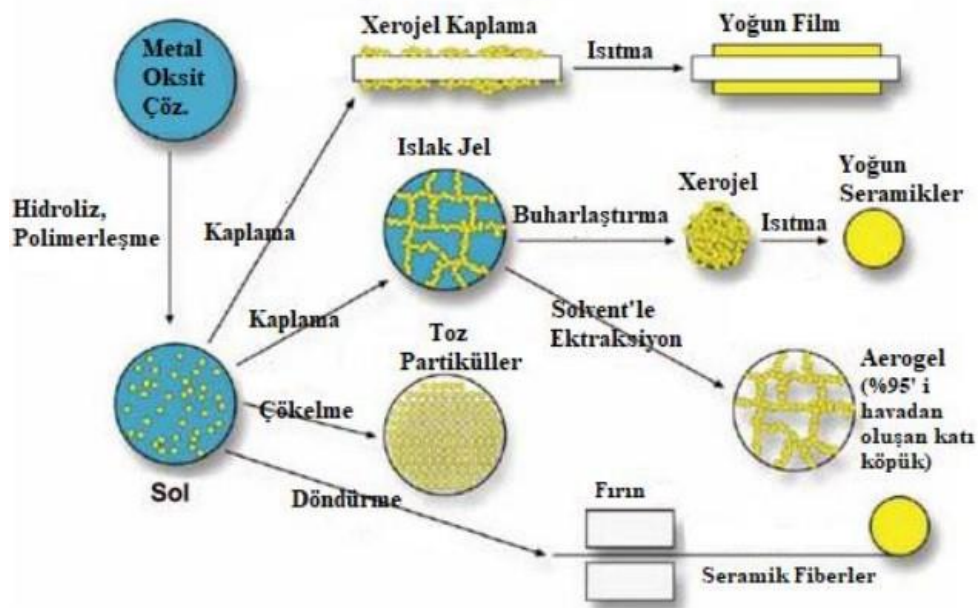


Şekil 1.6. CVD'nin şematik gösterimi (Q. Zhang vd., 2016).

1.2.1.3. Sol-Jel

Sol, bir katının sıvı süspansiyon içerisinde gösterdiği duruma verilen isimdir. Eğer sıvı içerisinde katı, bir dağılıma uğrarsa bu sistem sol olarak isimlendirilir. Sistemdeki etkileri belirttiğimizde, yer çekimi kuvvetinde yüksek seviyede Van Der Waals etkileşimi ve elektrik alan itmesinin meydana geldiği ifade edilebilir. Bu sebeple zemini oluşturan yapılar çözelti dibine batmamaktadır. Molekülün boyutu çözelti içerisinde genişleyerek bir değişim yaşarsa bu maddeye jel ismi verilir (Türhan, 2000).

Bu yöntem, silikon tetraklorürün (SiCl_4) ve alkol karışımının atmosfer ortamına maruz bırakıldığında jelleşmesiyle kimyager Jean-Jacques Ebelmen tarafından 1846 yılında keşfedilmiştir. Sonrasında ilerleyen çalışmalarla Geffcken 1939 yılında filmlerin TCO_2 kullanılarak da hazırlanabileceğini ortaya koymuştur. 1953 yılı itibari ile gelişen otomotiv ve optik endüstrinde araba aynalarında kullanılarak popülerlik kazanmıştır. 1964 yılından itibaren ise özellikle yansıtıcı özelliği olmayan yüzeylerin incelenmesinde kullanılmaktadır (Toygun vd., 2013). Şekil 1.7'de sol-jel yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Sol-jel yöntemi şematik gösterimi (Ayturan & Dursun, 2020).

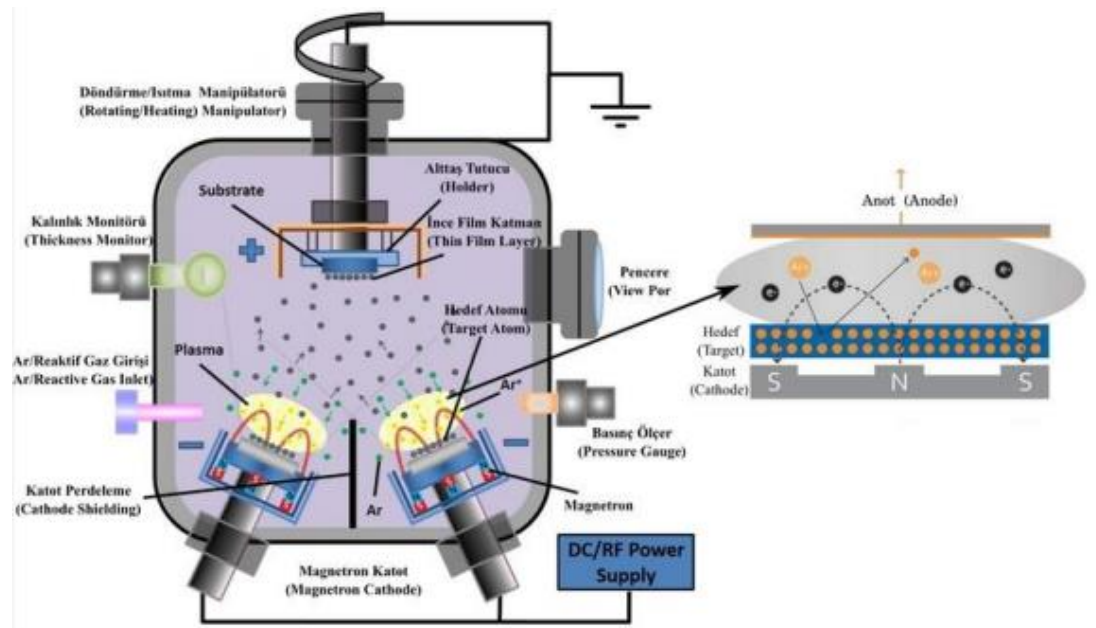
1.2.1.4. Magnetik alan sıçratma

Magnetron alan sıçratma tekniği ince film kaplamalarında çoğunlukla tercih edilen yöntemdir. Katı haldeki hedef malzemeleri pozitif iyonların bombardımanı ile yüzeyden atomları uzaklaştıran bu yöntemin diğer yöntemlere kıyasla avantajları

bulunmaktadır. Bu yöntemde kaplanacak olan alttaş malzemesi üzerinde, hızlandırılmış iyonlar gibi hareketli parçacıkların bombardımanına maruz bırakıldığında, hedeften saçılan atomlar alttaş yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturur. Magnetik alan sıçratma yönteminde güç kaynağı olarak RF (Radio Frequency) ya da DC (Direct Current) kullanılabilir.

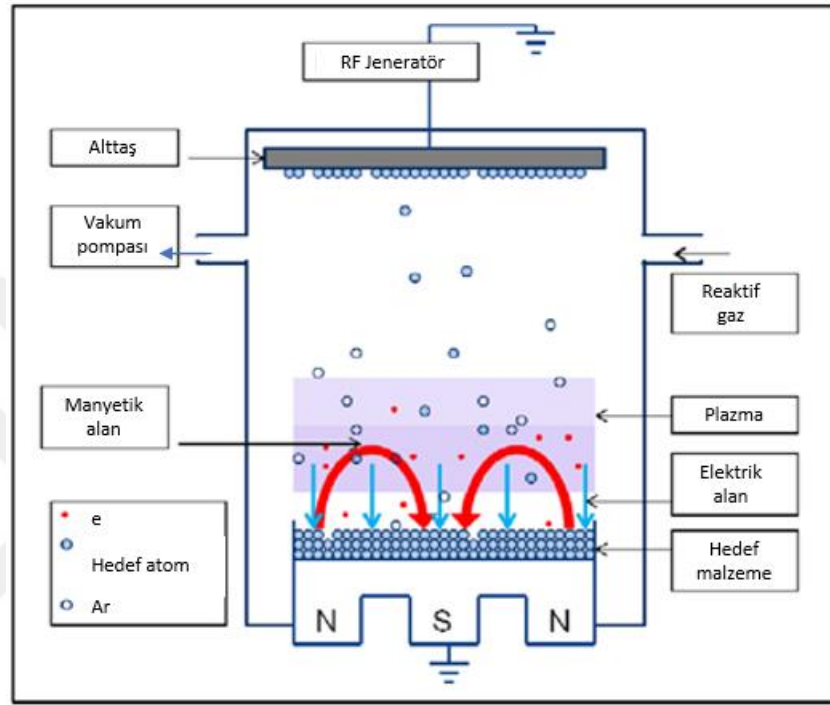
DC magnetik alan sıçratma, sıçratma işleminde en sık karşılaşılan yöntemdir. DC sıçratma yönteminde prensip şu şekildedir; katot ve anot olmak üzere düzlem halinde iki elektrot bulunmaktadır. Katodun ön yüzeyinde hedef malzeme bulunurken alttaşlar ise anot olan örnek tutucu yüzeydedir. Ar (Argon) gaz akışı sağlanan sistemde bu elektrotlar arasında DC gerilimi ile plazma meydana gelir. Ar^+ iyonları DC magnetrondaki hedef malzemeyi sıçratarak alttaş üzerine ince film büyümesini sağlar. Alttaşa olan bu yönelme magnetrondaki dengeli magnetik alan sayesinde meydana gelir. Şekil 1.8'de magnetik alan sıçratma yönteminin şematik gösterimi gösterilmektedir.

DC magnetik alan sıçratmada dikkat edilmesi gereken nokta hedef malzemenin iletkenliğe sahip olmasıdır. Dielektrik malzemelerde hedef malzemenin yüzeyinde yük birikimi meydana geldiği için bu yükün ortadan kalkması için hedefe uygulanan gücün atımlı olması şarttır. Yalıtkan hedef malzemelerde ise plazmanın oluşabilmesi için RF voltaj gereklidir. Bu sisteme RF magnetik alan sıçratma adı verilmektedir.



Şekil 1.8. Magnetik alan sıçratma sisteminin şematik gösterimi (Karataş, 2020).

RF magnetik alan sıçratma yönteminde, RF güç kaynağı için yaygın olarak 13.56 MHz frekansı kullanılır. Sistem içerisine verilen reaktif gazlar (O_2 , N_2 vb.), hedeften kopan atom/ionlarla reaksiyona girerek alttaş üzerinde ince film büyümesini sağlamaktadır. Şekil 1.9'da RF magnetik alan sıçratmaya ilişkin bir şematik gösterilmektedir.



Şekil 1.9. RF magnetron sıçratma sisteminin şematik gösterimi (Bosco vd., 2012).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Sahip olduğu özellik, ZnO'nun çok çeşitli optik ve elektronik uygulamalarda kullanıma uygun olduğu anlamına gelmektedir. ZnO'nun piezoelektrik olması ve yüksek mekanik, termal ve kimyasal kararlılık sergilemesi de dikkate değerdir (Özgür vd., 2005). Ayrıca, ZnO biyouyumlu bir malzeme olup canlılar için tehdit oluşturmamaktadır (Li vd., 2008). Bu sebeple biyolojik uygulamalarda da kullanım alanı bulunmaktadır.

ZnO, buhar-faz işlemleri (Navale vd., 2020), MOCVD (Hao, 2020), kimyasal işlemler (Navale vd., 2020), buhar-sıvı-katı yöntemler (Moumen vd., 2020) gibi farklı reaksiyon koşulları altında farklı morfolojilerde büyütülebilen önemli bir n-tipi yarı iletkenidir. ZnO'nun benzersiz optoelektronik özellikleri arasında ayarlanabilir bant aralığı, su ayrıştırılması (özellikle su oksidasyonu) için termodinamik olarak uygun bant konumları ve diğer çok işlevli fiziksel özellikleri bulunmaktadır (Jin vd., 2018; Xu & Wang, 2011). Çeşitli optoelektronik cihazlarda, sensörlerde ve fotovoltaiik sistemlerde kullanılmaktadır (Qurashi vd., 2015).

2003 yılında Carcia ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada RF magnetik alan sıçratma tekniği kullanılarak oda sıcaklığına yakın seviyedeki Si alttaş üzerine ZnO ince film büyütülmesiyle şeffaf ZnO İnce Film Transistör (TFT) üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda oda sıcaklığında üretilen TFT'lerin, yaklaşık 120°C gibi düşük sıcaklıkta üretilen TFT'ler kadar iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. ZnO TFT'ler, yaklaşık %80 görünür şeffaflık, yüksek sıcaklığa ihtiyaç duymadan işleme kombinasyonu ve sergilediği inanılmaz transistör özellikleriyle, sıcaklık karşısında hassas özellik gösteren alt tabakaların üzerindeki esnek yapıdaki elektronik sistemler için ilgi çekici bir malzeme olarak sunulmaktadır (Carcia vd., 2003).

2004 yılında Gao ve Li tarafından RF ve DC magnetik alan sıçratma tekniği ile yapılan bir çalışmada, DC magnetron için ZnO hedef malzemesi, RF magnetron için de Zn hedef malzemesi kullanarak cam alttaş üzerine biriktirilen ZnO ince filmlerin sıçratma tipinin, magnetrona verilen gücün, ortam basıncının, O₂ oranının, açılmal sapmanın, hedef ile alttaş arasındaki mesafenin ve katkılamanın filmlerin kalitesini nasıl değiştirebileceğini incelemişlerdir. Bu çalışmada DC sıçratmanın ortam basınç seviyesinden etkilendiğini, yüksek basınçta büyük tane boyutuna sahip yüksek kristal kalitede filmler büyütülebileceğini incelemişlerdir. RF sıçratmada daha iyi filmler elde

eden Gao ve Li üretim koşullarının kontrolüyle mikro yapıların ve yüksek iletkenlikteki ince filmlerin elde edilebileceğini öngörmüşlerdir (Gao & Li, 2004).

2005 yılında Fortunato ve ark. tarafından yapılan çalışmada, SLG alttaş üzerine oda sıcaklığından RF magnetik alan sıçratma tekniği ile tamamen şeffaf ZnO TFT'ler büyütme olasılığını göstermişlerdir. Yapılan çalışmada, ZnO'nun amorf camlar, plastikler ve metal folyolar gibi çeşitli alttaşlar üzerine apolikristal ve kompakt-yoğun bir nano-kristal malzeme olarak büyütülebilen birkaç oksitten biri olması, yüksek elektron hareketliliği gösteren verimli ve güvenilir TFT'ler üretme ihtimali ile doğrudan ilişkili olduğu sunulmaktadır (Fortunato vd., 2005).

Gong ve ark. tarafından 2006 yılında yapılan bir çalışmada, RF magnetik alan sıçratma için ZnO hedef ve DC magnetik alan sıçratma için de Cu hedef kullanılarak cam alttaş üzerine CZO ince film büyütülmüştür. Yüksek saflıkta hedefler kullanılarak yapılan bu çalışmada, ZnO'daki Cu'nun, büyütülen ince filmin carbon monoxide (CO) tepkisini artırmada çok önemli bir etkisi olduğu ve bu etkinin CO absorpsiyonundan kaynaklandığı tartışılmıştır (Gong vd., 2006).

Sim ve ark. 2010 yılında sunduğu çalışmada, cam alttaş üzerine, kalay katkılı indiyum oksite (ITO)'ya alternatif olarak düşük maliyeti, toksik olmaması, üretimin görece daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmesi ve ITO'ya kıyasla daha iyi kararlılığa sahip olmasıyla ön plana çıkan (Minami, 2005) ZnO'nun büyütülmesi araştırılmıştır. ITO, yüksek geçirgenliği, geniş optik bant aralığı ve yüksek elektrik iletkenliği gibi sahip olduğu üstün özellikler ile TCO malzemeler arasında en popüler olanı olduğu bilinmektedir (Hamberg & Granqvist, 1986). Bu özelliklerinin yanında indiyum rezervinin kıtlığından ötürü pahalı bir TCO malzemedir (Minami, 2005). ZnO'nun Al, Ga ve In gibi III grubu elementlerden uygun safsızlıklarla katılanmasının, ZnO ince filmlerin elektriksel iletkenliğini ve optik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığı daha önce yapılan çalışmalarda sunulmaktadır (Henley vd., 2004; Hong vd., 2006). RF magnetik alan sıçratma tekniği kullanılarak yapılan bu çalışmada Al, Ga ve In gibi farklı elementlerin katkısıyla ve katkısız bir şekilde ZnO ince filmlerin taneciklerinin, tercih edildiği şekilde c-ekseni üzerinde konumlandığı ve büyütülen ince filmlerin yapısal, morfolojik, optiksel, elektriksel özelliklerinin iyileştirilip geliştirilebileceği tespit edilmiştir. Ga katkılı ZnO (GZO) ince filminin ise optimum kristal kalitesinde, $3,61 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ ile en düşük öz direnç ve 3,75 eV ile en geniş optik bant aralığına sahip olduğunun tespit edilmesiyle Ga'nın bu çalışmada kullanılan diğer katkı

elementlerine görel olarak en etkin katkı elementi olduğu sunulmaktadır (Sim vd., 2010).

2013 yılında İsmail ve Abdullah tarafından yapılan bir çalışmada farklı güçlerde, RF magnetik alan sıçratma yöntemi ile büyütülen ZnO ince filmlerin üzerindeki optik ve yapısal etkiler incelenmiştir. RF magnetronunun gücünün artırılmasının filmdeki çekme gerilimine ters etki yarattığı ve bu gerilimin Raman çizgilerinin de kaymasına sebep olup XRD ile uyumlu sonuçlar verdiği sunulmaktadır. Buradan hareketle RF magnetrona verilen gücün artmasıyla kırılma indisinin doğru orantılı olarak arttığı fakat bant aralığının azaldığı bilgisine ulaşımlardır (İsmail & Abdullah, 2013).

2017 yılında Abdallah ve ark. tarafından oda sıcaklığında SLG ve Si üzerine RF magnetik alan sıçratma yöntemi kullanılarak büyütülen ZnO ince filmlerin optiksel özellikleri incelenmiştir. Büyütmeler 50 dakikalık sabit süreyle ve güç sırayla 150 W, 175 W, 200 W, 225 W ve 250 W olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Büyütme sonucunda XRD desenlerinin, sisteme O₂ akışı olmadan büyütülen ZnO filmlerde en iyi kalitede (002) yönlendirme gösterdiği tespit edilmiştir. O₂ oranının artırılmasıyla birikme hızının, tane boyutunun ve dolayısıyla kristal kalitesinin azaldığı sunulmuştur. Büyütülen ince filmlerin optik bant aralığının, O₂ yüzdesinin bir fonksiyonu olarak 3,24 ile 3,29 eV arasında değiştiği belirtilmiştir (Abdallah vd., 2017).

Gonçalves ve ark. 2018 yılında yaptıkları çalışmada RF magnetik alan sıçratma tekniği ile cam alttaş üzerine farklı sürelerde büyütülen ZnO ince filmlerin morfolojik, yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Büyütülen filmlerin yüksek oryantasyon derecesinde olup kısa biriktirme süresinde düzensiz tane dağılımıyla yüksek basınç gerilimli ve pürüzlülüğe sahip olduğu, biriktirme süresinin ve dolayısıyla kalınlığın artışıyla basınç geriliminde ve pürüzlülükte azalma görüldüğü sunulmaktadır. Uzun biriktirme sürelerinin, tanelerin (002) düzlem boyunca yanlış konumlanmasıyla sütun yapılarında büyümeye sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. 36. dakikadan sonraki biriktirme süresinde höyüğe benzer farklı bir büyüme tipine rastlanmış olup; tüm filmlerin %80'den yüksek geçirgenliğe sahip olduğu görülmüştür. Sürenin artımıyla gerilimin ve c-kafes parametresinin azalışıyla bant aralığında artma tespit edilmiştir (Gonçalves vd., 2018).

Khan ve Ahmed'in 2021 yılında RF magnetik alan sıçratma tekniği kullanarak yaptıkları ZnO büyütmesinde, katot ile alttaş arasındaki mesafeyi değiştirerek optik cihazlarda potansiyel kullanıma sahip olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlara göre hedef ile alttaş arasındaki mesafenin artmasıyla kristalite (002) boyutunun 32

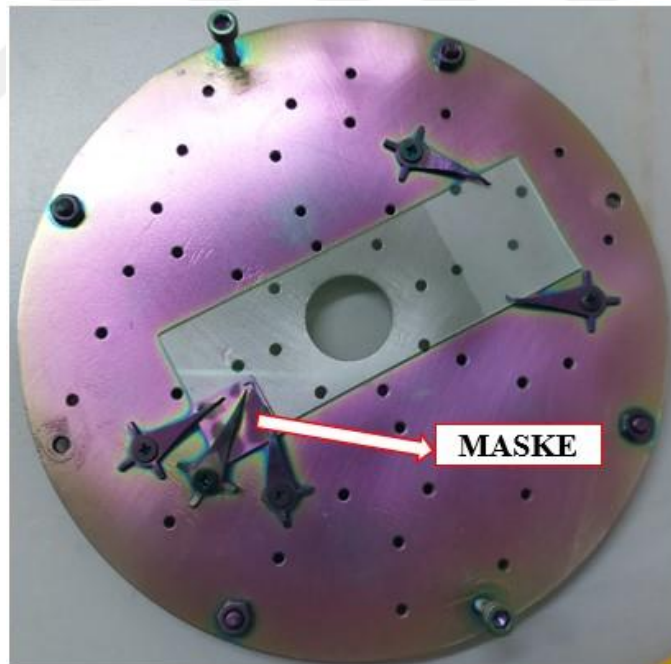
nm'den 17 nm'ye düştüğü, E_g değerinin ise 3.16 eV'den 3.25 eV'ye arttığı görülmüştür (Khan & Faruque Ahmed, 2021).

Zhou ve ark., 2023 yılında yaptığı çalışmada, RF magnetik alan sıçratma tekniği ile kuvars cam üzerine büyütülen Al katkılı ZnO (AZO) ince filmlerinin RF magnetronun değiştirilen gücünün etkisiyle gösterdiği yapısal, morfolojik, elektriksel ve optiksel özellikler incelenmiştir. Sunulan bu çalışmada, büyütülen tüm filmlerin c-ekseni üzerine konumlanmış tipik altıgen wurtzite yapısına sahip olduğu, 120 watt gücünde sıçratılan filmlerin en küçük yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değeri ve en büyük tane boyutuyla en iyi kristal yapı elde edilmiştir. Gücün artmasıyla ulaşılan sonuçlarda, filmin kristalleşme kalitesinin yüksekliğinin iletkenlik ile doğru orantılı belirtilmiştir. Elde edilen ince filmlerin ortalama geçirgenliğinin %80'nin üzerinde olup farklı güc uygulanan ince filmlere nispeten 120 W ile büyütülen ince filmin kristal örgü kalitesinin, elektrik iletkenliğinin ve ışık geçirgenliğinin yapılan analizler sonucunda daha yüksek performans gösterdiği analiz keşfedilmiştir (Zhao vd., 2023).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Alttaş Temizliği

ZnO ince filmlerin büyütüleceği alttaş olarak ticari cam olarak bilinen SLG kullanılmıştır. Başlangıç olarak, cam alttaş, yüksek saflıktaki nitrojen (N_2) gazı püskürtülerek olası toz parçacıklarından arındırılmıştır. Ardından $55^\circ C$ aseton içerisinde 10 dakika bekletilmiştir. Bu aşamadan sonra alttaş yüzeyi olası organik kalıntılardan arındırılmıştır. Devamında deiyonize (DI) su ile yıkanan cam alttaş izopropil alkol (IPA) ile durularak oda sıcaklığında 10 dakika boyunca IPA içerisinde ultrasonik temizleyicide bekletilmiştir. Süre sonunda IPA içerisinden çıkarılan alttaş DI su ile 1 dakika süresince durulanmış ve yüksek saflıkta N_2 gazı ile basınçlı olacak şekilde kurutulmuştur. Tüm alttaşlar için aynı temizlik işlemleri uygulanmıştır. Tamamlanan temizlik işleminin ardından alttaşın uç kısmına, 0.2 mm kalınlığındaki 1.5 cm^2 'lik alana sahip hafif metal bir folyo maske alttaş yüzeyine şekil 3.1'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Her sentez için aynı şartlarda hazırlanan alttaşlar magnetik alan sıçratma sistemine ait örnek tutucuya yerleştirilmiştir.

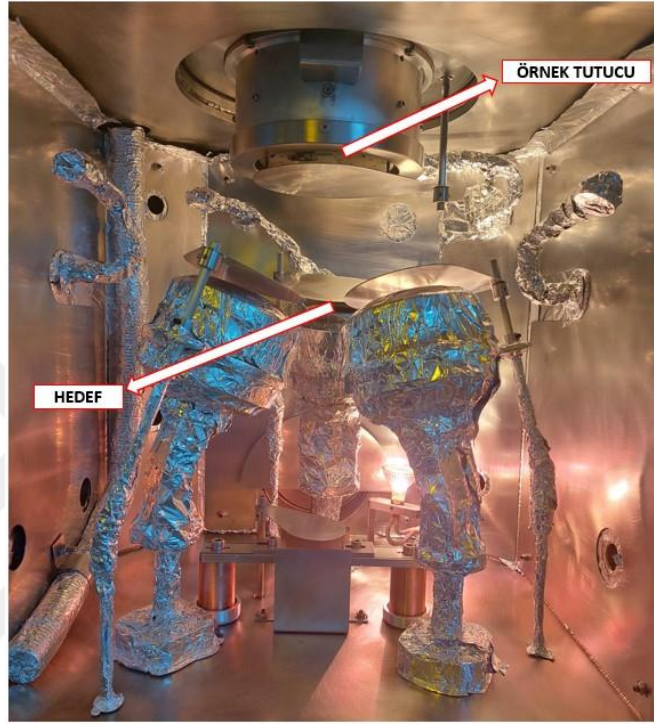


Şekil 3.1. Yerleştirilen maskeye ait gösterim.

3.2. ZnO İnce Filmlerin Büyütülmesi

ZnO İnce filmler, Şekil 3.2'de iç kısmı gösterilen bilgisayar kontrollü VAKSİS MİDAS/PVD 3M1T (Şekil 3.6) magnetik alan sıçratma sisteminde büyütülmüşlerdir.

Dikkatli bir şekilde 4" çaplı örnek tutucuya sabitlenen altta Şekil 3.2'de belirtilen kısma yerleştirilmiştir. ZnO ince filmi büyötmek için Şekil 3.3'te gösterilen %99.9 saflıktaki 3" çaplı 0.125" kalınlıklı metalik Zn hedef malzemesi kullanılmıştır. Hedef malzemenin RF güç kaynağına bağı olan magnetronun üzerine yerleştirilmesinin ardından sistem vakuma alınmaya başlanmıştır.



Şekil 3.2. Magnetik alan sıçratma sisteminin iç kısmının gösterimi.



Şekil 3.3. %99.9 saflıkta, 3" çaplı ve 0.125" kalınlığa sahip Zn hedef malzeme

Oda sıcaklığında büyütülen malzemeler için sistem oda sıcaklığında 2.5×10^{-7} Torr'a ulaştığında vakum kazanının içerisine 50 sccm oranında Ar akışı başlatılmıştır. 100°C, 200°C ve 300°C'lerde yapılan büyütme işlemleri için ise sıcaklık istenilen değere kademeli aralıklarla arttırılmıştır. Sonrasında sıcaklık istenilen seviye çıkarıldığında (100°C, 200°C, 300°C) kazan basıncının 7×10^{-7} Torr seviyesine gelmesi beklenip ardından ortama 50 sccm Ar akışı başlatılmıştır. Kazanın anlık basıncı 5.1×10^{-3} Torr'a ulaştığında Zn hedef malzemesinin bulunduğu RF magnetrona güç verilerek plazmanın oluşması sağlanmıştır. Plazmanın ilk oluşmasından sonra belirli zaman ve artış aralıkları ile RF magnetronun gücü 3 W/cm^2 'ye sabitlenmiştir. İstenilen güce ulaşılmasının ardından vakum kazanının içerisine O_2 akışı başlatılarak toplam geçen gaz miktarı 50 sccm olacak şekilde sırayla Çizelge 3.1'de belirtilen parametrelerdeki O_2/Ar oranlarına ulaşılmıştır. Bu esnada kazan basıncının 5.1×10^{-3} Torr'da sabit kalmasına dikkat edilmiştir. Plazma ve kazan basıncının sabitlenmesi için yaklaşık 4 dakika beklenmiştir. Büyütme öncesinde örnek tutucunun 10 devir/dakika süratle dönüşüne başlanmıştır. Öncelikle RF magnetronun kapama perdesinin açılmasının ardından büyütme işlemine başlamadan 2 dk beklenmiştir. Bu sayede hedef malzeme yüzeyindeki kirliliklerin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Sonrasında örnek tutucunun kapama perdesi açıldığı anda kronometrenin de 120 dakikalık büyütme süresi başlatılmıştır. Büyütme esnasında plazmanın hedeften alttaşa ulaşması Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Zn hedeften kopan atomların O_2 ile reaksiyonu sonucu alttaş üzerine büyütülmesi.



Şekil 3.6. ZnO ince film büyütmesinin gerçekleştiği tamamen bilgisayar kontrollü VAKSİS MİDAS/PVD 3M1T magnetik alan sıçratma sistemi.

Büyütme süresinin bitmesiyle öncelikle örnek tutucunun perdesi, ardından RF magnetronun önündeki kapatma perdesi kapatılmıştır. RF magnetrondaki güç kademeli olarak ve daha uzun süre aralıklarıyla azaltılmış ve sonlandırılmıştır. Ortamdaki O_2 ve sonrasında Ar akışı kesilmiştir. Vakum kazanının basıncının sabitlemesi sağlanıp sistemin oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Oda sıcaklığına ulaşan sistemin vakumu N_2 gazı ile kırılıp büyütülen ZnO ince filmler, atmosfer ortamına çıkarılmış ve karakterizasyonları yapılmıştır.

ZnO ince filmler, farklı sıcaklık ve farklı O_2/Ar oranlarında büyütüldükleri için isimlendirmeleri örneğin “5/45@RT (O_2 oranı/Ar oranı@sıcaklık)” şeklinde yapılmıştır. ZnO ince film büyütme parametreleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Farklı "O₂ / Ar" oranlarında büyütülen ZnO ince filmlerin parametreleri.

Malzeme İsmi	Vakum (Torr)	Sıcaklık (°C)	Zaman (dk)	Güç (W/cm ²)	O ₂ /Ar Oranı (sccm)
5/45@RT	5.1x10 ⁻³	RT	120	3	5 O ₂ /45 Ar
5/45@100C	5.1x10 ⁻³	100	120	3	5 O ₂ /45 Ar
5/45@200C	5.1x10 ⁻³	200	120	3	5 O ₂ /45 Ar
5/45@300C	5.1x10 ⁻³	300	120	3	5 O ₂ /45 Ar
7.5/42.5@RT	5.1x10 ⁻³	RT	120	3	7.5 O ₂ /42.55 Ar
7.5/42.5@100C	5.1x10 ⁻³	100	120	3	7.5 O ₂ /42.55 Ar
7.5/42.5@200C	5.1x10 ⁻³	200	120	3	7.5 O ₂ /42.55 Ar
7.5/42.5@300C	5.1x10 ⁻³	300	120	3	7.5 O ₂ /42.55 Ar
10/40@RT	5.1x10 ⁻³	RT	120	3	10 O ₂ /40 Ar
10/40@100C	5.1x10 ⁻³	100	120	3	10 O ₂ /40 Ar
10/40@200C	5.1x10 ⁻³	200	120	3	10 O ₂ /40 Ar
10/40@300C	5.1x10 ⁻³	300	120	3	10 O ₂ /40 Ar
12.5/37.5@RT	5.1x10 ⁻³	RT	120	3	12.5 O ₂ /37.5 Ar
12.5/37.5@100C	5.1x10 ⁻³	100	120	3	12.5 O ₂ /37.5 Ar
12.5/37.5@200C	5.1x10 ⁻³	200	120	3	12.5 O ₂ /37.5 Ar
12.5/37.5@300C	5.1x10 ⁻³	300	120	3	12.5 O ₂ /37.5 Ar
15/35@RT	5.1x10 ⁻³	RT	120	3	15 O ₂ /35 Ar
15/35@100C	5.1x10 ⁻³	100	120	3	15 O ₂ /35 Ar
15/35@200C	5.1x10 ⁻³	200	120	3	15 O ₂ /35 Ar
15/35@300C	5.1x10 ⁻³	300	120	3	15 O ₂ /35 Ar
17.5/32.5@RT	5.1x10 ⁻³	RT	120	3	17.5 O ₂ /32.5 Ar
17.5/32.5@100C	5.1x10 ⁻³	100	120	3	17.5 O ₂ /32.5 Ar
17.5/32.5@200C	5.1x10 ⁻³	200	120	3	17.5 O ₂ /32.5 Ar
17.5/32.5@300C	5.1x10 ⁻³	300	120	3	17.5 O ₂ /32.5 Ar
20/30@RT	5.1x10 ⁻³	RT	120	3	20 O ₂ /30 Ar
20/30@100C	5.1x10 ⁻³	100	120	3	20 O ₂ /30 Ar
20/30@200C	5.1x10 ⁻³	200	120	3	20 O ₂ /30 Ar
20/30@300C	5.1x10 ⁻³	300	120	3	20 O ₂ /30 Ar
22.5/27.5@RT	5.1x10 ⁻³	RT	120	3	22.5 O ₂ /27.5 Ar
22.5/27.5@100C	5.1x10 ⁻³	100	120	3	22.5 O ₂ /27.5 Ar
22.5/27.5@200C	5.1x10 ⁻³	200	120	3	22.5 O ₂ /27.5 Ar
22.5/27.5@300C	5.1x10 ⁻³	300	120	3	22.5 O ₂ /27.5 Ar
25/25@RT	5.1x10 ⁻³	RT	120	3	25 O ₂ /25 Ar
25/25@100C	5.1x10 ⁻³	100	120	3	25 O ₂ /25 Ar
25/25@200C	5.1x10 ⁻³	200	120	3	25 O ₂ /25 Ar
25/25@300C	5.1x10 ⁻³	300	120	3	25 O ₂ /25 Ar

3.3. ZnO İnce Filmlerin Analizleri

Bilgisayar kontrollü VAKSİS marka MİDAS/PVD 3M1T magnetik alan sıçratma sisteminde, RF magnetron ile büyütülen ZnO ince filmlerin yüzey topolojileri hakkında bilgi edinebilmek için SLG alttaşların 1x1 µm²'lik yüzeyi, Park System marka ve XE7 model atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile incelenmiştir. AFM sisteminde,

numunenin yüzeyini taramak için genellikle Silikon (Si) ya da Si_3N_4 'den yapılan kalınlığı 0.2 nm ile 10 nm arasında değişen bir tip kullanılır. Tip numunenin yüzeyine yaklaştırıldığında tip ile yüzey arasında meydana gelen elektrostatik etkileşimle yüzey ile tip birbirini hem çekerek hem de iterek bir çizgi hattında sabitlenir ve hat boyunca bu şekilde ilerler. Bu etkileşim, tip çizgi hattında devam ederken yüzeydeki çukur veya çıkıntılardan geçerken tip ile numune arasındaki mesafenin sabit kalmasını sağlar. Tipin yüzey üzerindeki hareketlerinin görüntüye dönüştürülmesi tip üzerinden yansıyan lazer ışını yardımıyla gerçekleşir. Tipin her hareketinde yansıyan ışının açısındaki değişikliklerin tespiti için bir konuma duyarlı foto diyot (PSPD) kullanılır. Bu şekilde, tip çizgi hattında gidip gelerek taramayı tamamlar ve yüzeyin topografisi elde edilir. Tez çalışması kapsamında elde edilen yüzey topografisi görüntülerinden tanecik boyutu hesaplamaları da yapılmıştır.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) malzeme yüzeyine odaklanan elektron demetinin yüzeyi taramasını ve o yüzeyden de görüntü elde edilmesini sağlamaktadır. Örnek atomlarıyla etkileşen elektronların ürettiği farklı sinyaller dedektörle algılanıp yüzey kompozisyonu hakkında bilgi sağlamaktadır. Tez çalışması kapsamında SLG üzerine büyütülen ZnO ince filmler ZEISS markasına ait GeminiSEM 500 model FE-SEM (Field Effect – Scanning Electron Microscope) cihazı ile 400000 büyütmede incelenmiştir.

Profilometre, malzeme yüzeyinin topografisi hakkında bilgi almak için kullanılan başka bir tekniktir. Özellikle malzeme yüzeyinde bir aşınmaya sebep olmadan elde edilen malzemenin yüksekliğini ve yüzey pürüzlülüğünü hassas bir biçimde sunabilmektedir. Şekil 3.1'de gösterilen maskenin büyütme yüzeyini ayırt edici bir şekilde kestiği 1 mm x 1mm boyutlarındaki bir alan taranarak, büyütülen ZnO ince filmlerin kalınlık ölçümleri alınmıştır. ZnO ince filmlerin kalınlık ölçümleri, Fimmetrics Profilm 3D modelli cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Kristal düzlemlerden kırınıma uğrayarak gelen ve saçılan X-ışınlarından, incelenecek malzemenin kristal yapısı hakkında bilgi edinilebilmektedir. Malzemenin kristal yapısındaki fazlar tespit edilebilmektedir. SLG üzerine büyütülen ZnO ince filmler, $\text{CuK}_\alpha = 0.1541874$ nm dalga boylu karakteristik X-ışınına $10-90^\circ$ arasında ve 0.01° adamlarla, $5^\circ/\text{dakika}$ tarama hızına maruz bırakılarak ölçüm alınmıştır. Yüzey ile X-ışını arasındaki açı (w), 1° 'de sabit bırakılmıştır. İnce filmin yapısı hakkında bu şartlarda PANalytical marka ve EMPYREAN XRD model cihazda ölçümler yapılmıştır.

ZnO ince filmlerin şiddetli bir monokromatik ışık ile uyarılmasıyla saçılan ışık büyütülen ince filmlerin moleküler yapısının titreşim enerji düzeyleri hakkında bilgi vermektedir. Bu elastik saçılma olayına Rayleigh Saçılması ismi verilmektedir. Saçınımına uğrayan ışığın küçük miktarı ise elastik olmayan saçılmalardan elde edilir. Bu saçılma ise Raman Saçılması olarak isimlendirilir. ZnO ince filmler Renishaw inVia Confocal Raman Spektrometresi'nde 532 nm dalga boylu lazer ile 120-1200 cm^{-1} dalga sayısı arasında incelenen ince filmlerin ölçümü, 30 mW güç uyarımı altında 2 tekrar ile alınmıştır.

Üretilen filmlerin optik karakterizasyonları ise Shimadzu markasının UV-3600 Plus modeli UV-Vis-NIR spektrofotometresinde gerçekleştirilmiştir. ZnO ince filmlerin soğurma spektrumu 300-1100 nm dalga boyu aralığında alınmıştır. UV spektrumları ince filmlerin optik davranışları hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Bant aralıklarını hesaplamak içinse her ZnO ince film için soğurma spektrumu ve optik profilometreden elde edilen kalınlık değeri ile soğurma katsayısı hesaplanmış ve Tauc çizim kullanılmıştır. Bir yarı iletkende yasak bant aralığı hesabı, gönderilen ışının enerjisinin soğurma katsayısına etkisi ölçülerek elde edilebilmektedir. Gönderilen ışının sahip olduğu enerji malzemenin yasak bant aralığı enerjisinden büyükse ışın soğrulur küçük ise soğrulmadan geçer. t kalınlığındaki bir filme gönderilen ışığın şiddeti I_0 ve dalga boyu λ olarak tanımlandığında, geçen ışığın şiddeti gelen fotonun dalga boyuna ve filmin kalınlığına bağlı olarak değişir.

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

Bu denklemden α , soğurma katsayısı olarak isimlendirilir ve Denklem 3.2 ile elde edilir.

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

Denklem 3.2 ve UV-Vis ölçümlerinden yararlanılarak α soğurma katsayısı

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

denklemleri ile hesaplanır. Bu denklemden t film kalınlığını, T geçen ışığın geçirgenlik yüzdesini ifade eder. Soğurma bölgesinde yasak enerji bant aralığı Tauc denklemleri ile hesaplanmaktadır

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

Bu denklemden A, 10^{-7} ve 10^{-8} m^{-1} arasında değişen enerjiden bağımsız bir sabit, $h\nu$ foton enerjisi, E_g yasak bant boşluğu ve γ bir sabittir. İzinli direkt geçişler için $\gamma = 1/2$, yasak direkt geçişler için $\gamma = 3/2$ ve endirekt geçişler için ise $\gamma = 2$ 'dir. $(ah\nu)^2 - h\nu$

grafiginde oluşan eğrinin üst kısmından $h\nu$ eksenine çizilen doğrunun eksenini kestiği nokta E_g yasak bant boşluğu olarak alınmaktadır (Tauc vd., 1966).

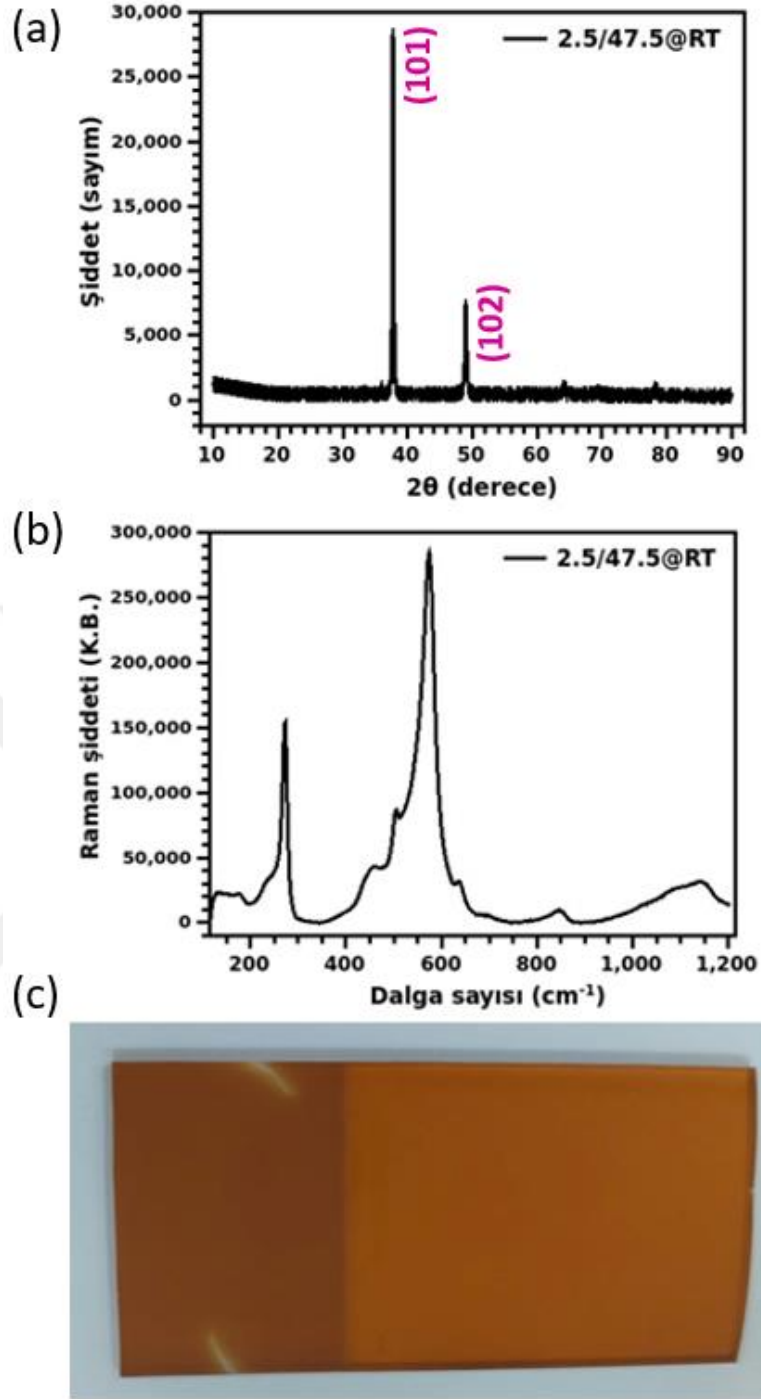


4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında reaktif magnetik alan sıçratma ile büyütülen ZnO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve topolojik özellikleri ile optik özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda sabit magnetron gücü ve büyütme basıncı altında 4 farklı sıcaklıkta ve 9 farklı O₂/Ar oranı ile toplam 36 adet malzemenin XRD, Raman, FESEM, AFM, UV-Vis ve optik profilometre ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler ile büyütme esnasında O₂/Ar oranının ve sıcaklığın ZnO filmin büyüme mekanizmasına etkisi incelenmeye çalışılmıştır.

4.1. ZnO İnce Filmlerin Yapısal Analizi

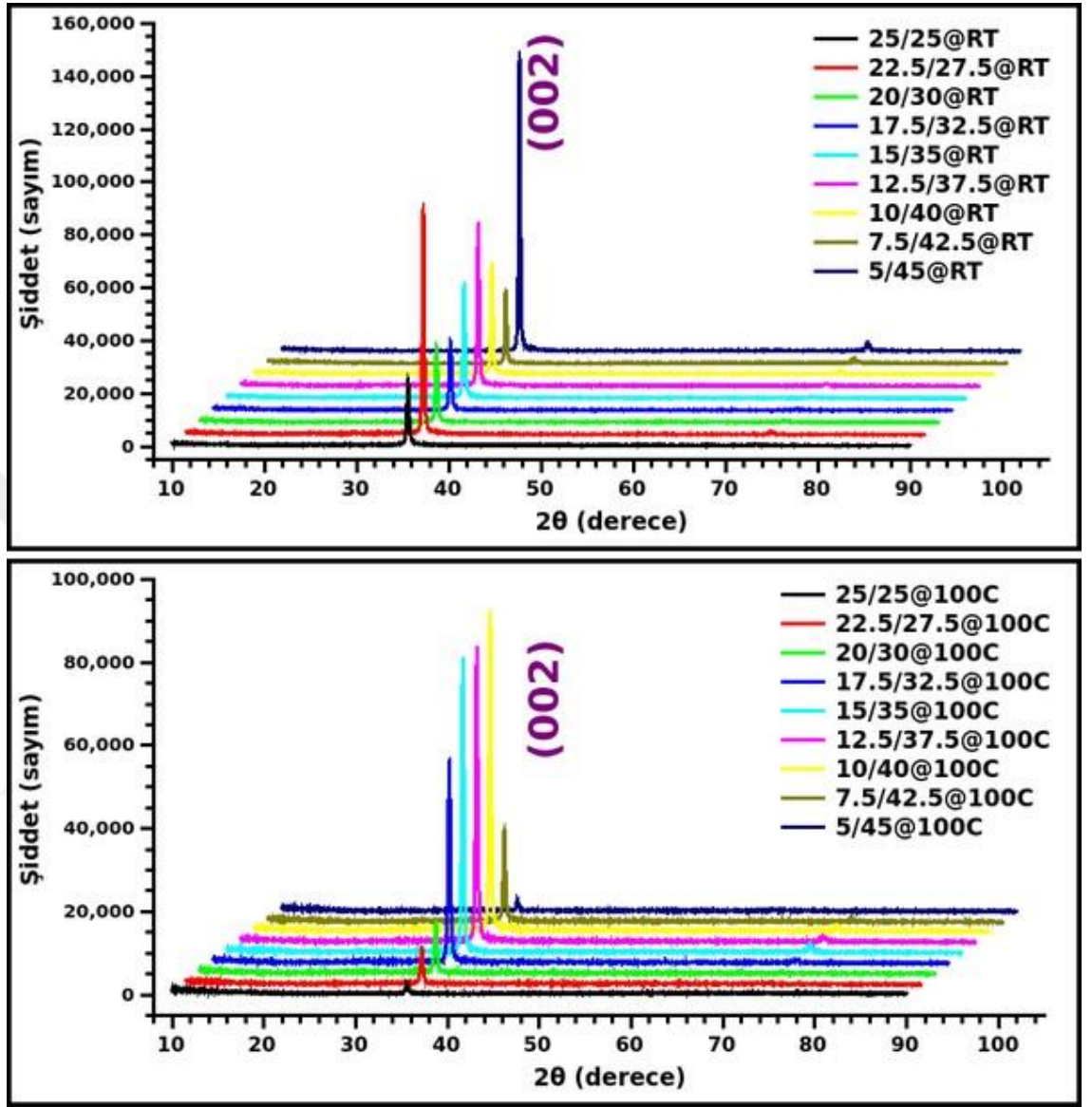
Büyütme esnasında metalik Zn hedef malzeme kullanılmıştır. İlk aşama büyütme süresince vakum kazanı içerisine 2.5 sccm akış miktarınca oksijen ve 47.5 sccm akış miktarınca argon verilerek büyütme gerçekleştirilmiştir. Oluşan ince filmin optik geçirgenliğinin çok düşük olduğu tespit edilmiştir. XRD ve Raman spektroskopisi ile yapılan yapısal analizler sonucunda ZnO yapısının tam oluşmadığı tespit edilmiştir. ZnO yapısına ait ~35°'de gözlemlenen (002) piki (Vijayaprasath vd., 2016) XRD deseninde gözlemlenmemiş olup yine Raman spektroskopisinde ZnO yapısının beklenen piklerinden olan ~435 cm⁻¹'deki pik gözlemlenmemiştir. Bu kapsamda bu O₂/Ar oranında büyütme yapılmaması uygun görülmüş ve O₂ miktarı artırılarak üretimler gerçekleştirilmiştir. 2.5/47.5@RT örneğine ilişkin XRD ve Raman spektrumları ile cam üzerinde büyütülen filmin resmi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



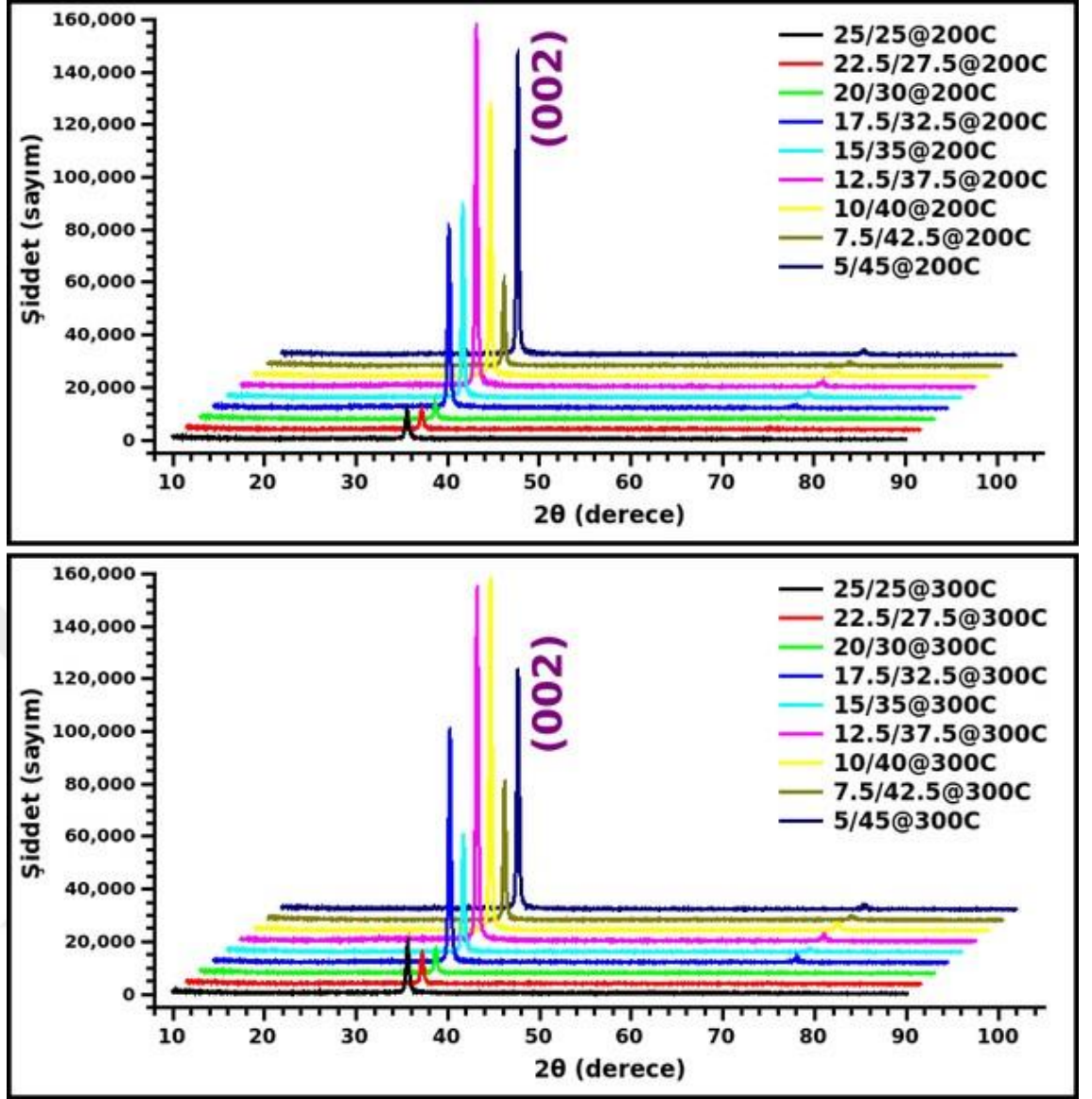
Şekil 4.1. 2.5 sccm O₂ ve 47.5 sccm Ar ile büyütülen ZnO ince filmin XRD (a) ve Raman spektrumu (b) ile cam üzerindeki görüntüsü (c).

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sırasıyla oda sıcaklığında (RT), 100 °C, 200°C ve 300 °C alttaş sıcaklıklarında farklı O₂/Ar oranlarında büyütülen filmlerin XRD desenleri gösterilmektedir. Bütün filmlerde (002) baskın olup filmlerin hekzagonal wurtzite yapıya ait p63mc (186) uzay grubuna ait olduğu (JCPDS data kart no: 89-1397) tespit edilmiştir (Aydın, 2020) XRD desenleri, ZnO ince filminin cam alt tabakaya c-ekseni

boyunca büyüdüğünü göstermektedir. Filmlerde tek bir pikin görünmesi yönelimin tek yönde olduğu ve yüksek yönelime sahip filmlerin olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

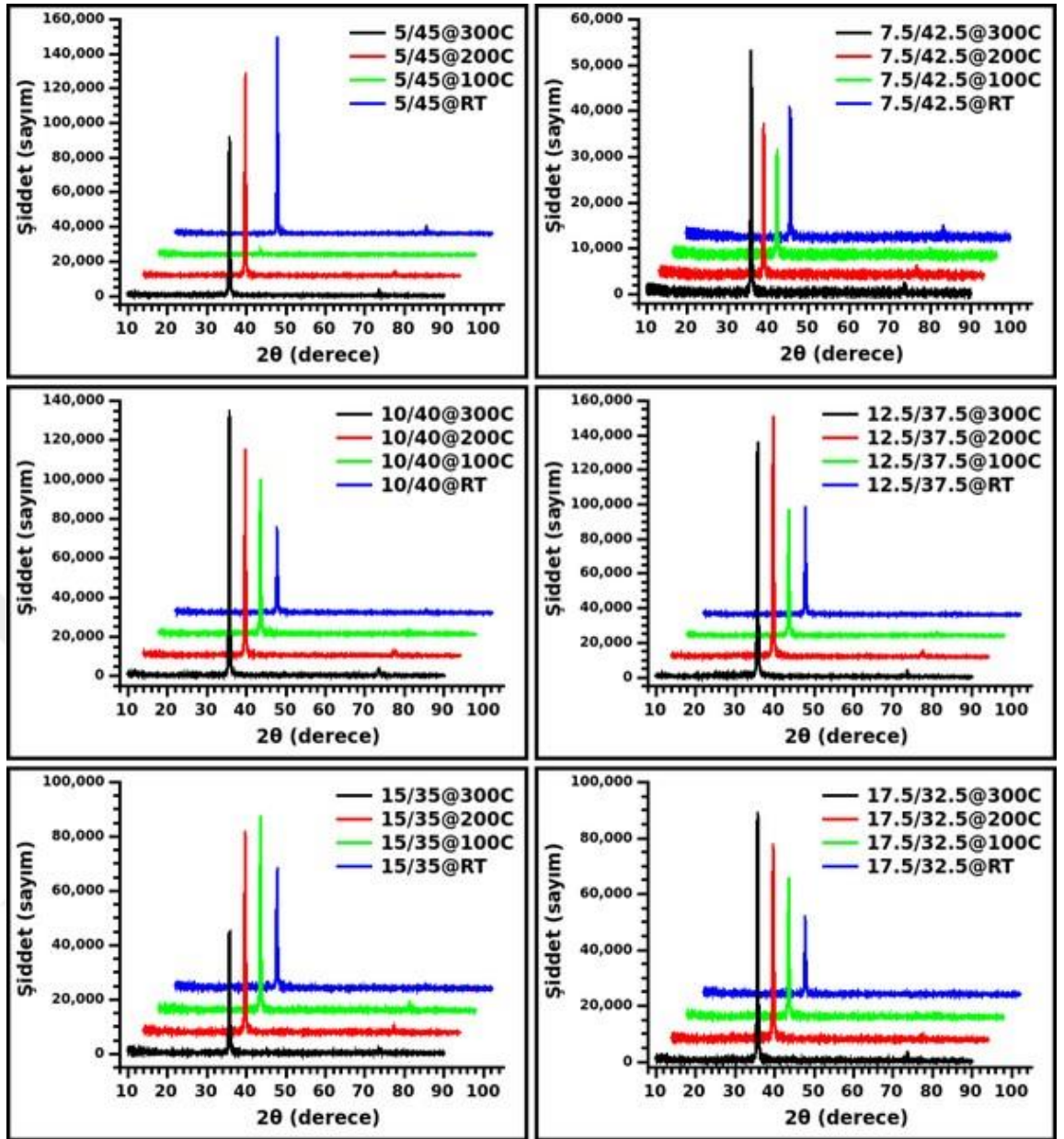


Şekil 4.2. Oda sıcaklığında ve 100 °C alttaş sıcaklığında farklı O₂/Ar oranlarında büyütülen filmlerin XRD desenleri.

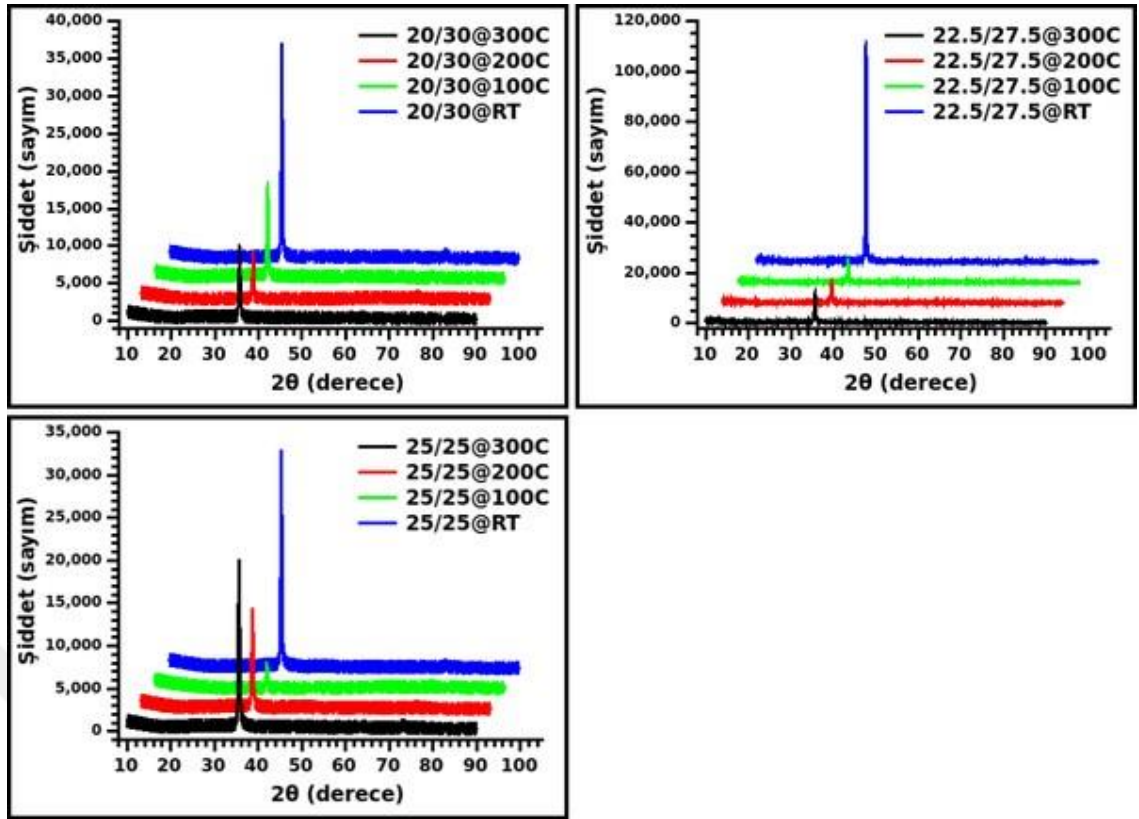


Şekil 4.3. 200 °C ve 300 °C alttaş sıcaklığında farklı O₂/Ar oranlarında büyütülen filmlerin XRD desenleri.

Aynı O₂/Ar oranında farklı sıcaklıklarda büyütülen filmlerin XRD desenlerinin karşılaştırılması ise Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te yapılmıştır. Bu grafiklerden, genel olarak düşük O₂/Ar oranlarında yüksek sıcaklıklarda daha iyi yönelime sahip filmler büyürken yüksek O₂/Ar oranlarında (20/30 ve üzeri) düşük sıcaklıklarda daha iyi yönelime sahip filmlerin olduğu sonucu çıkarılabilmektedir.



Şekil 4.4. 5/45, 7.5/42.5, 10/40, 12.5/37.5, 15/35 ve 17.5/32.5 O₂/Ar oranlarında oda sıcaklığı, 100 °C, 200 °C ve 300 °C alttaş sıcaklıklarında büyütülen filmlerin XRD desenleri.

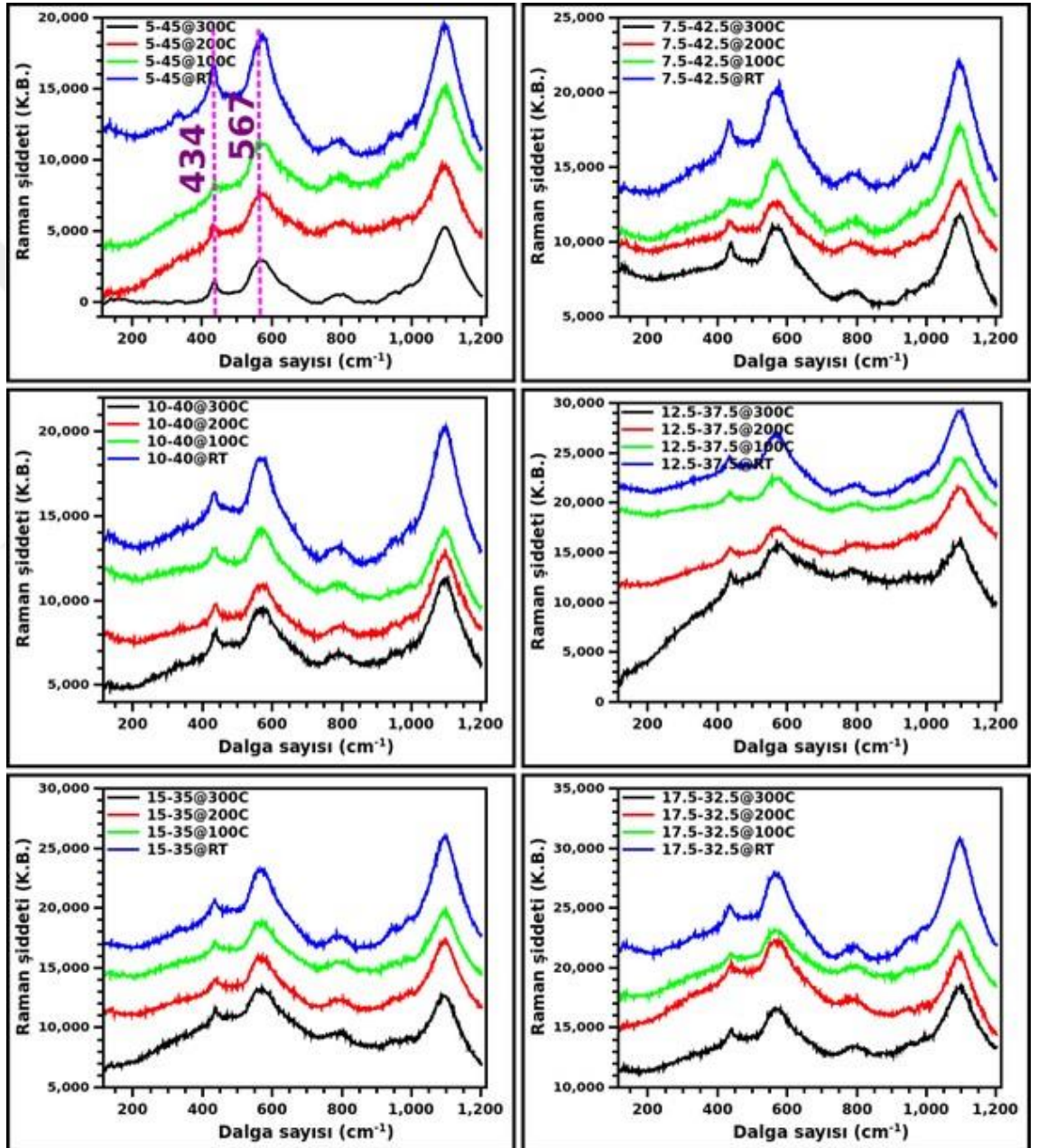


Şekil 4.5. Şekil 20/30, 22.5/27.5 ve 25/25 O₂/Ar oranlarında oda sıcaklığı, 100 °C, 200 °C ve 300 °C alttaş sıcaklıklarında büyütülen filmlerin XRD desenleri.

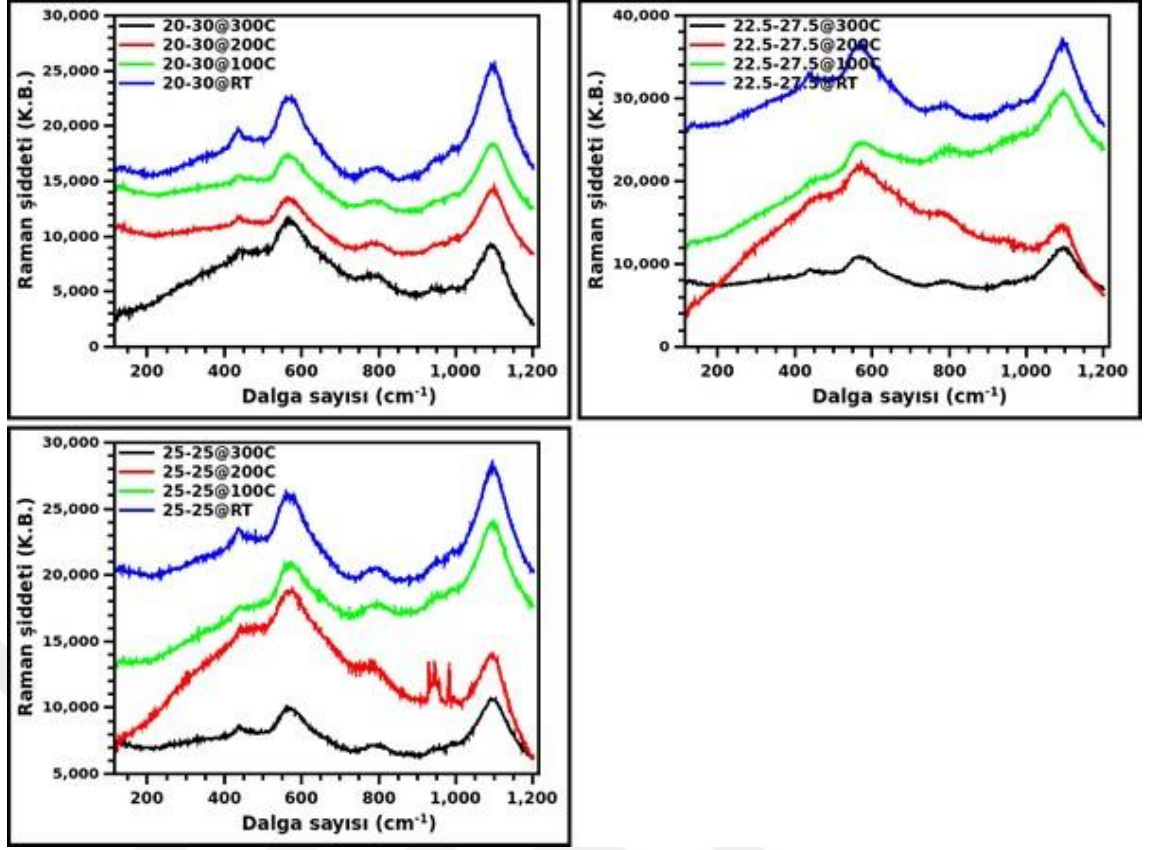
Raman spektrumları bir yapıda atomlar arası bağların titreşimi (fonon saçılması) sonucunda ortaya çıkan spektrumlar olarak tanımlanabilir. Bu spektrumlarla yapıda hangi atomlar arasında hangi titreşim modları olduğunu ve bunun hangi yapı ile ilişkilendirilebildiği belirlenebilmektedir. ZnO ince filmde ~ 153 , ~ 278 ve ~ 434 cm^{-1} 'de yer alan Raman pikleri beklenir. 153 cm^{-1} (E2L) ve 434 cm^{-1} (E2H)'deki pikler, wurtzite yapısındaki ZnO'da Zn ve O örgüsünün polar olmayan E2 titreşimine bağlanır. 278 cm^{-1} 'deki bant, çoklu fonon işlemine atfedilir. 572 cm^{-1} 'deki bant, ZnO ince filmlerin E1L modunu göstermektedir. E2L ve E2H iyi kristallığe sahip wurtzite yapısını temsil ederken (Aydın, 2020) nanotel yapılarında düşük dalga sayılarındaki E2L ve E2H Raman pikleri tamamen kaybolmaktadır (Rajesh vd., 2020).

Büyütülen ZnO ince filmlerin $120 - 1200$ cm^{-1} aralığında alınan Raman spektrumları Şekil 4.6 ve 4.7'de gösterilmektedir. Herhangi bir arka plan düzeltmesi yapılmadan elde edilen spektrumlar incelendiğinde ZnO'nun wurtzite yapısına ait olan ~ 434 cm^{-1} pik net bir şekilde gözlemlenmektedir. ~ 567 cm^{-1} 'de pikin varlığı yapıda oksijen eksikliğinin olmadığı şeklinde yorumlanabilir. Bununla birlikte düşük dalga sayılarında beklenen bazı piklerin gözlemlenmemesi yapıların nanotellerin yan yana

gelerek yığılması (stacking) olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte yüksek sıcaklıklarda yüksek O_2/Ar oranlarında $\sim 434\text{ cm}^{-1}$ 'de yer alan pikin kaybolduğu görülmektedir. Bu wurtzite yapısının kaybolduğu olarak değil wurtzite yapısına ait kristallığın azaldığı şeklinde yorumlanabilir. Bu sonuçlar XRD sonuçlarında da gözlemlenen yüksek sıcaklıklarda ve yüksek O_2/Ar oranlarındaki pik şiddetindeki düşüşü açıklamaktadır.

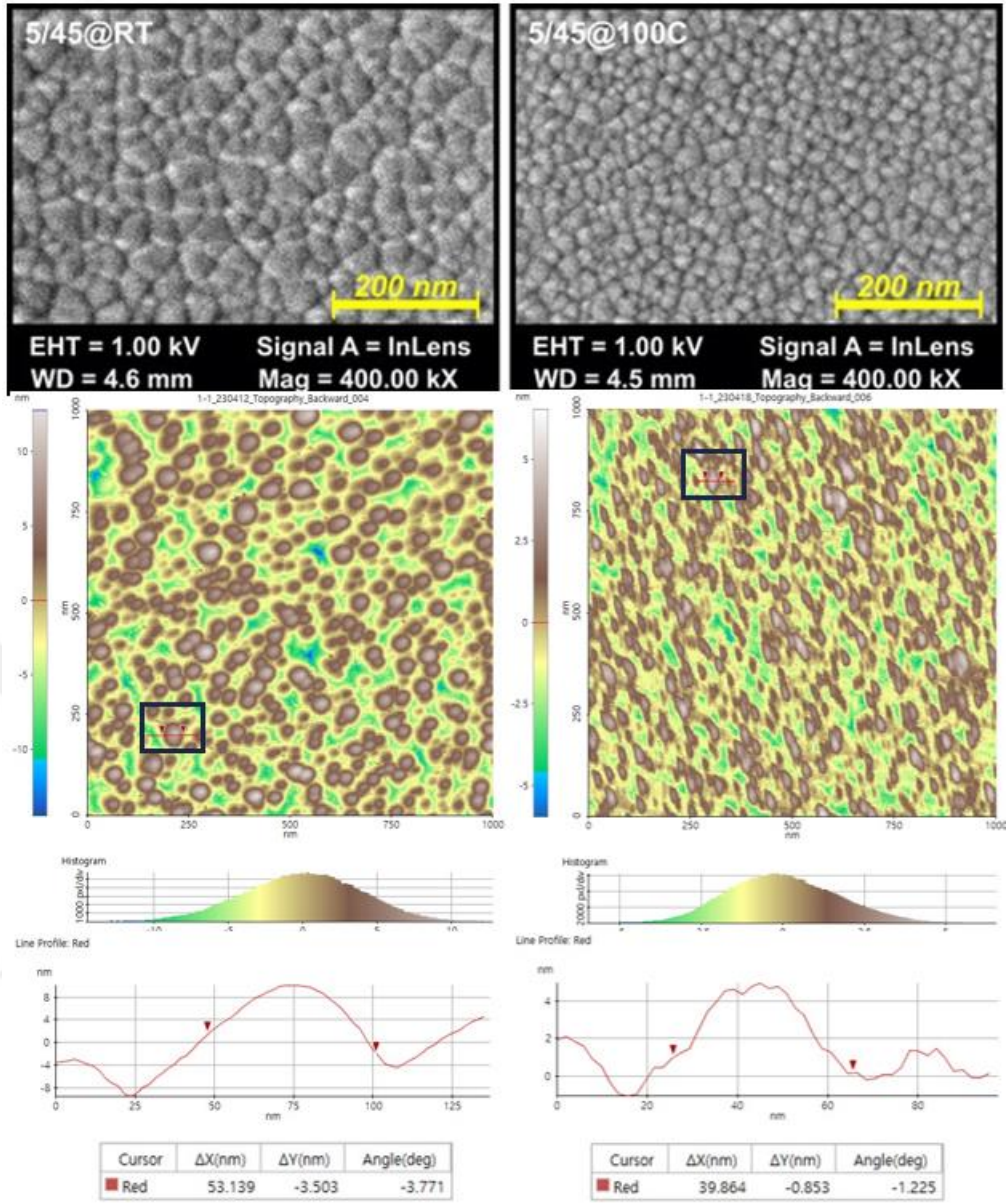


Şekil 4.6. 5/45, 7.5/42.5, 10/40, 12.5/37.5, 15/35 ve 17.5/32.5 O_2/Ar oranlarında oda sıcaklığı, 100 °C, 200 °C ve 300 °C alttaş sıcaklıklarında büyütülen filmlerin Raman spektrumları.



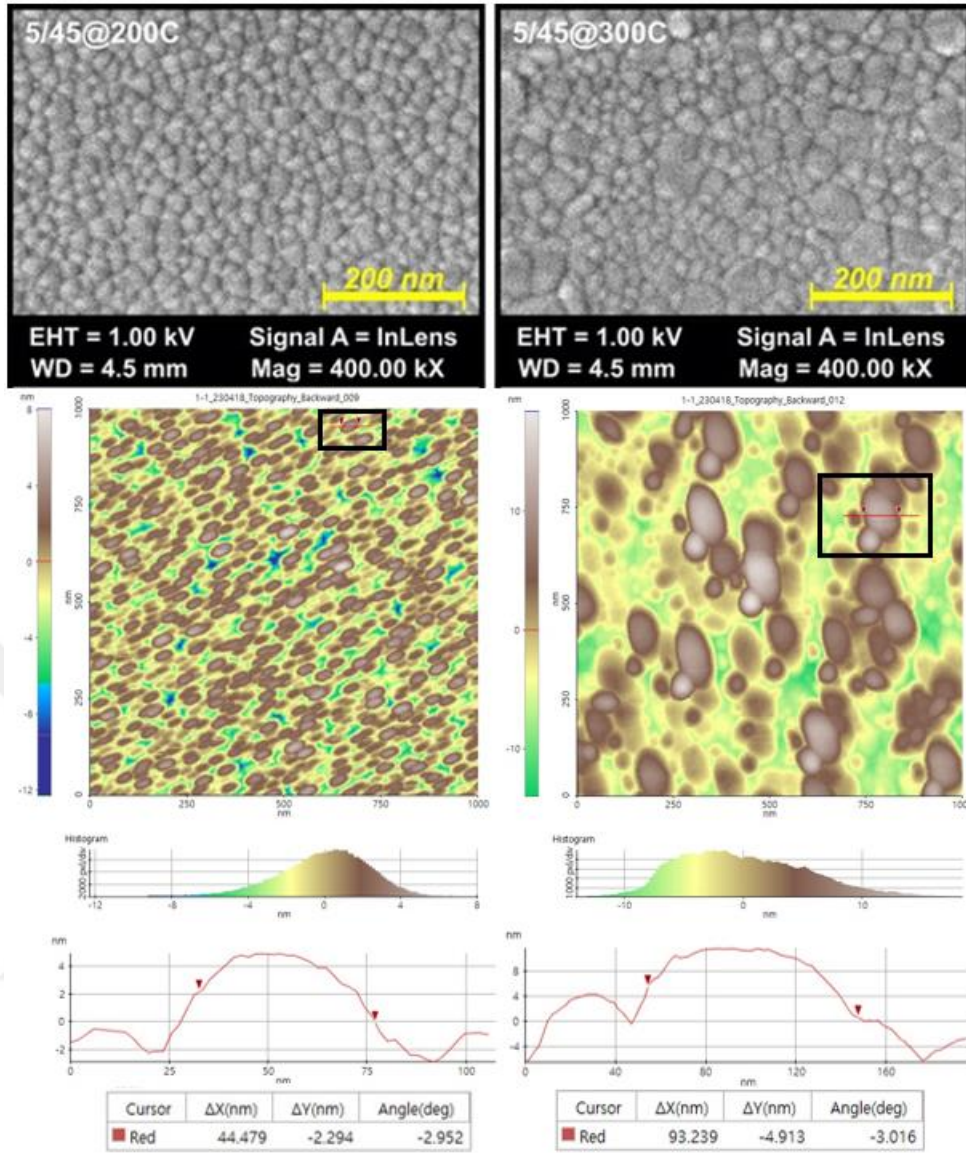
Şekil 4.7. Şekil 20/30, 22.5/27.5 ve 25/25 O₂/Ar oranlarında oda sıcaklığı, 100 °C, 200 °C ve 300 °C alttaş sıcaklıklarında büyütülen filmlerin Raman spektrumları.

Büyütülen ZnO filmlerin morfolojik yapısı ve topolojik yapıları FE-SEM ile 400000 büyütme altında ve AFM ile 1µm x 1µm alanlarda incelenmiştir. SLG üzerinde büyütülen ZnO ince filmlerin yüzey morfolojileri ve topografileri Şekil 4.8–25’de gösterilmiştir.



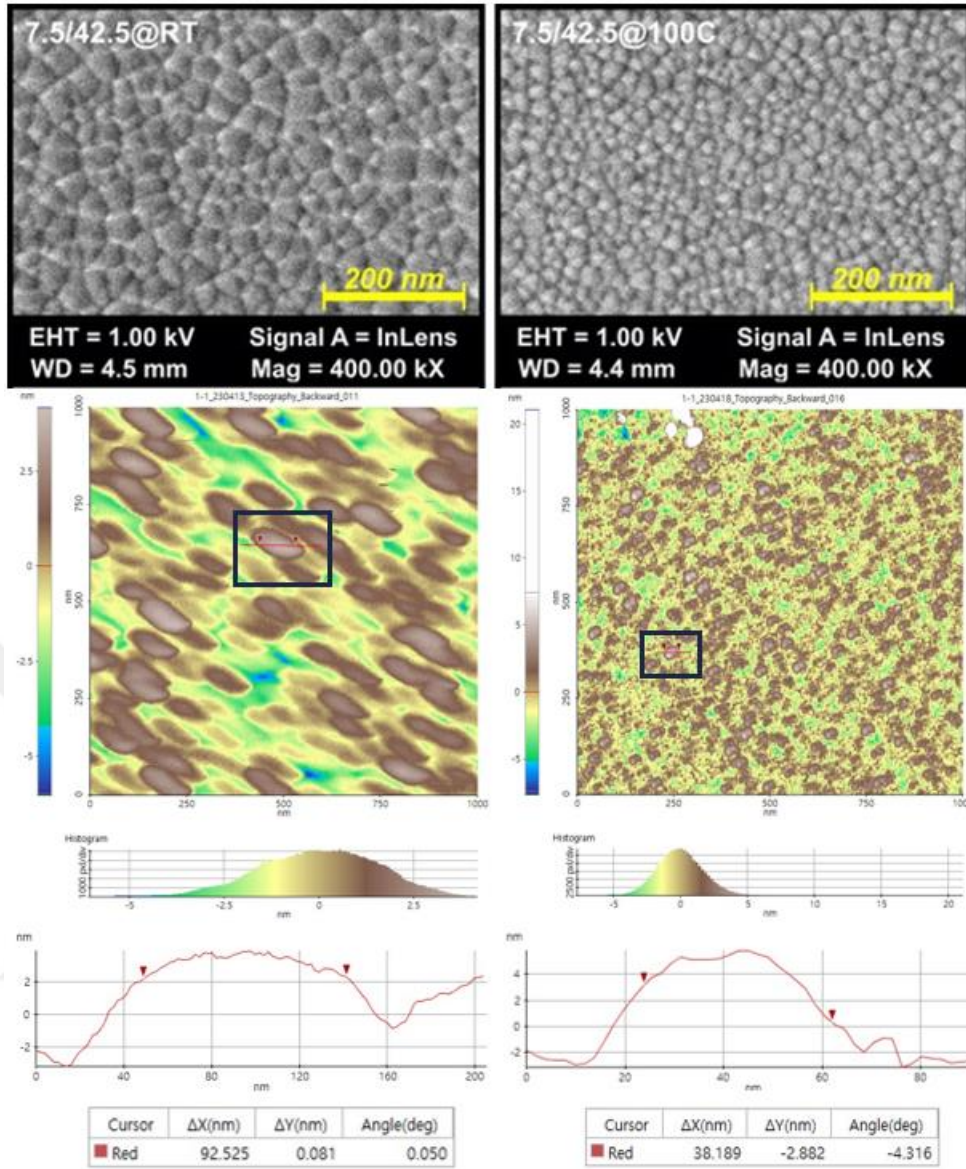
Şekil 4.8. 5/45@RT ve 5/45@100C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.8'de gösterilen 5/45@RT ve 5/45@100C örneklerinde oda sıcaklığından 100 °C sıcaklığa çıkıldığında tanecik boyutlarında küçülme olduğu görülmektedir.



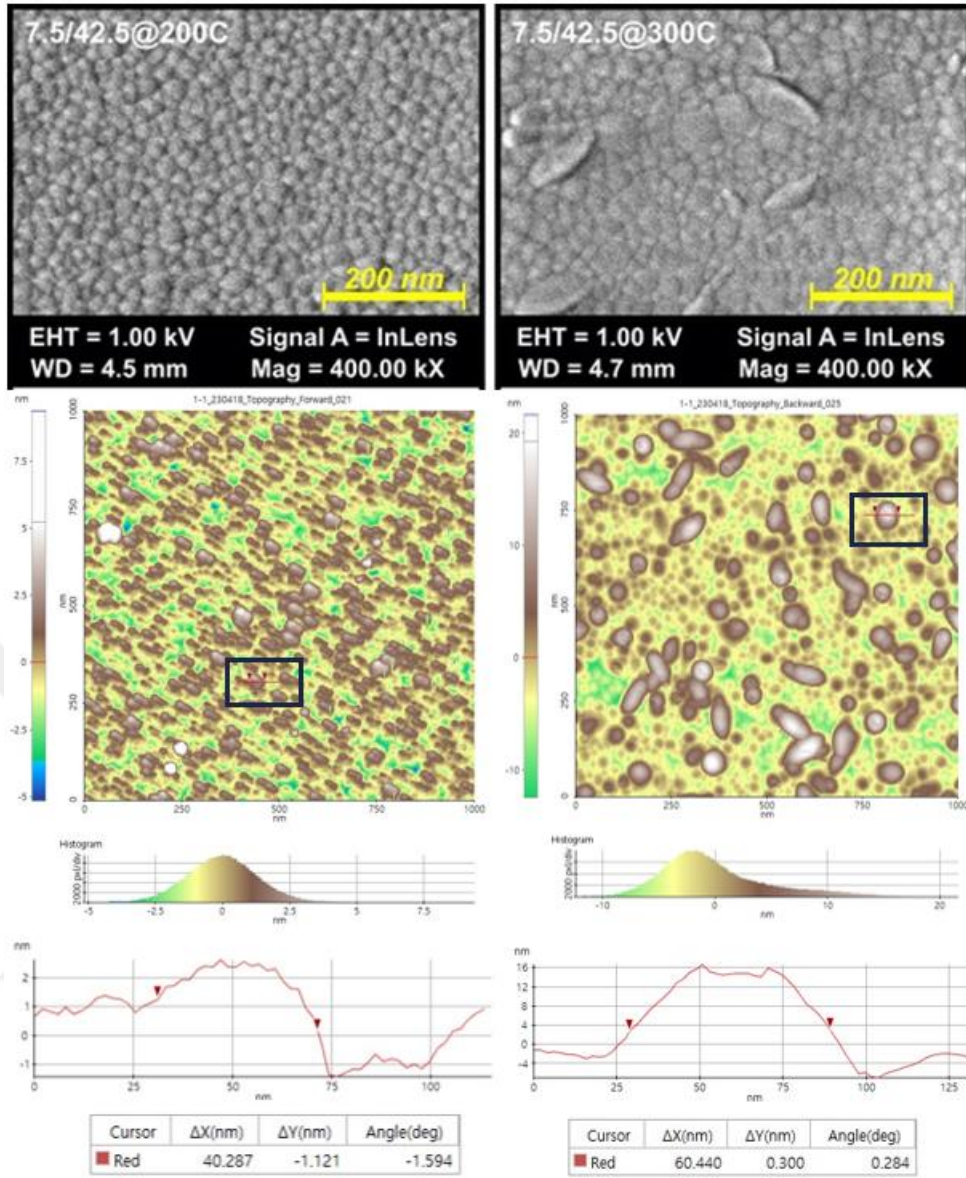
Şekil 4.9. 5/45@200C ve 5/45@300C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.9’da gösterilen 5/45@200C ve 5/45@300C örneklerinde 200 °C sıcaklıktan 300 °C’ye çıktığında tanecik boyutlarında artış olduğu saptanmıştır. Bununla beraber morfolojik olarak incelediğimizde yüzey, homojen yapısını korumuştur.



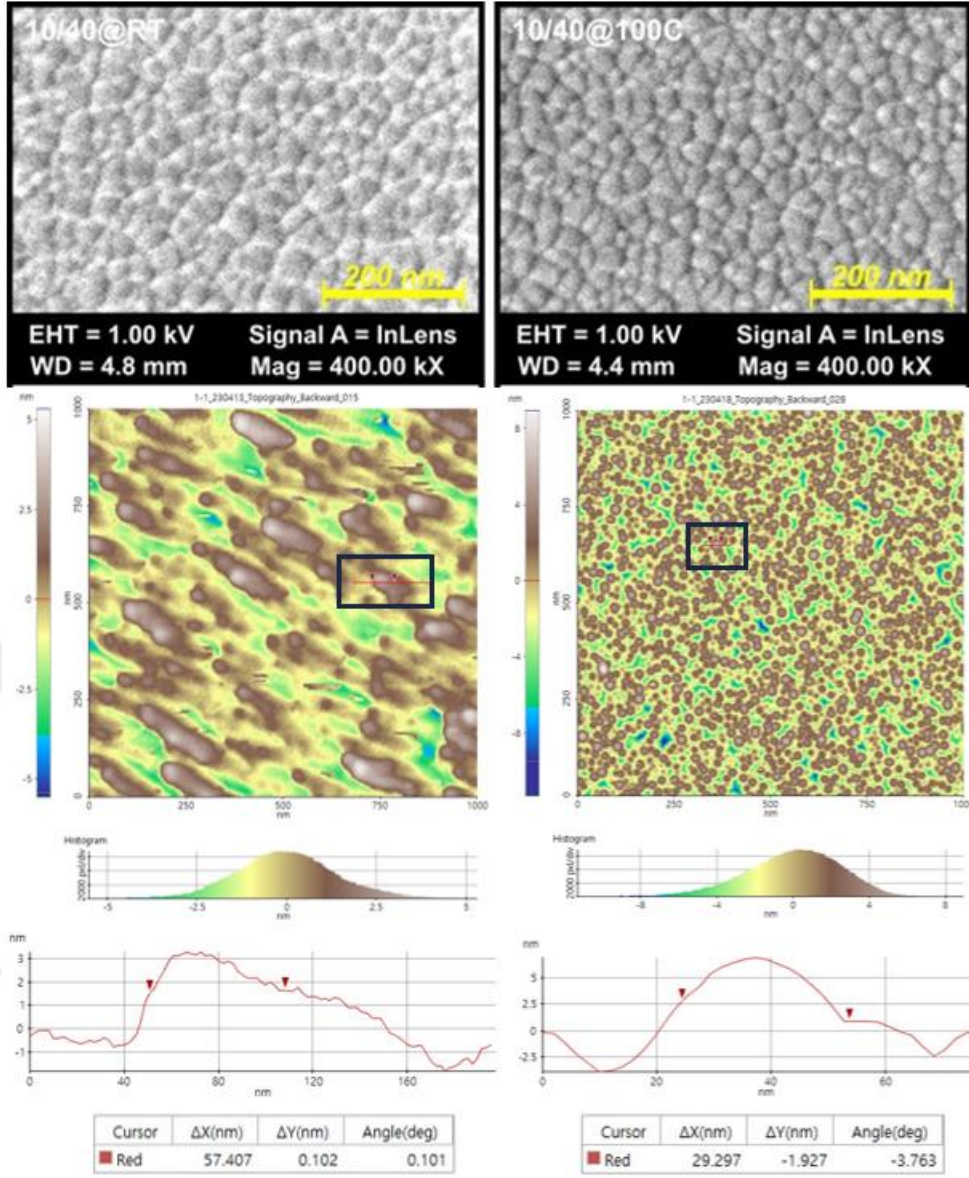
Şekil 4.10. 7.5/42.5@RT ve 7.5/42.5@100C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.10'da gösterilen 7.5/42.5@RT ve 7.5/42.5@100C örneklerinde oda sıcaklığından 100 °C sıcaklığa çıkıldığında tanecik boyutlarının küçüldüğü tespit edilmiştir. Tanecik boyutlarında homojenlik gözlemlenmiştir.



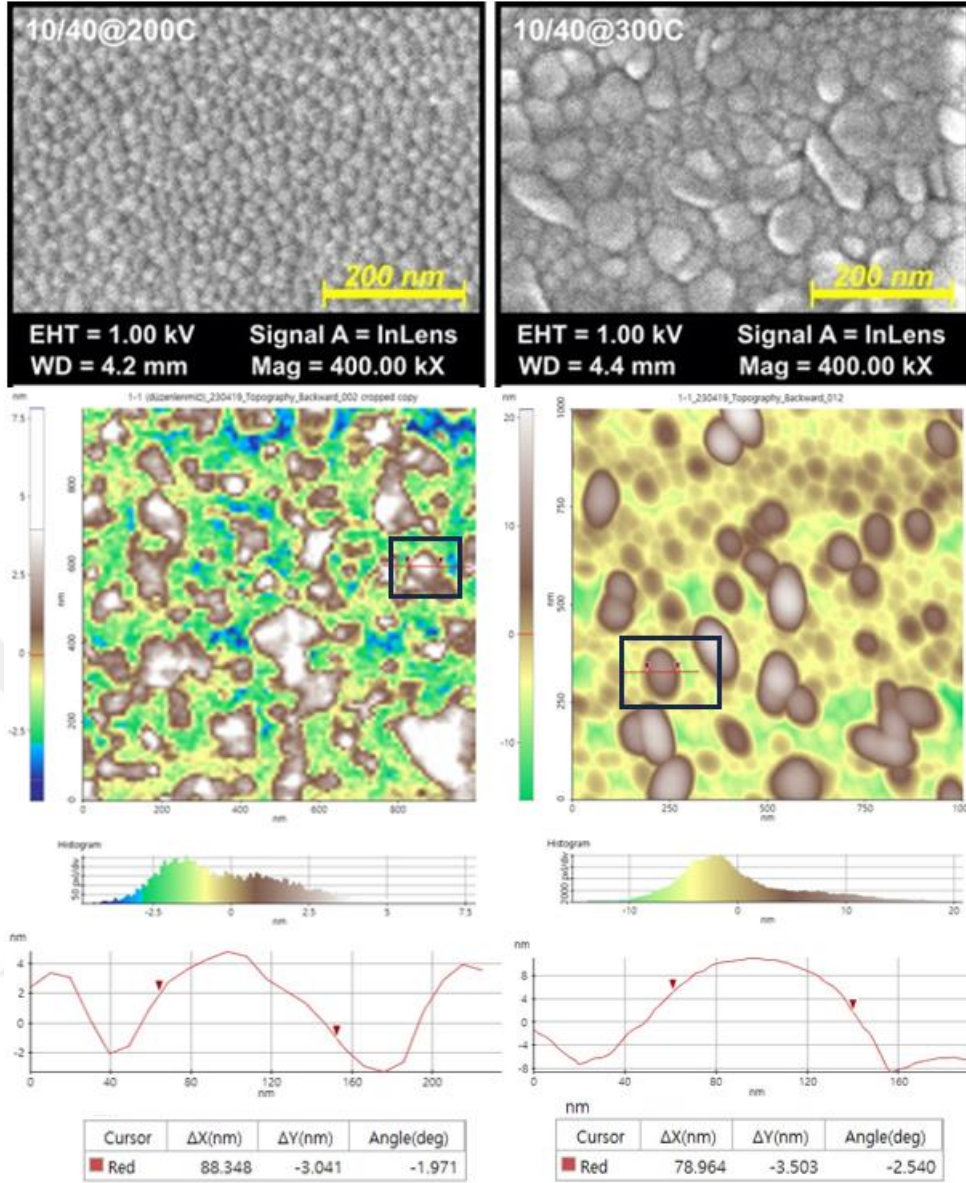
Şekil 4.11. 7.5/42.5@200C ve 7.5/42.5@300C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.11’de gösterilen 7.5/42.5@200C ve 7.5/42.5@300C örneklerinde 200 °C’den 300 °C’ye çıktığında tanecik boyutlarında büyüme görülmektedir. Yine sıcaklık artışı ile yüzey, morfolojik olarak heterojen hale gelmiştir.



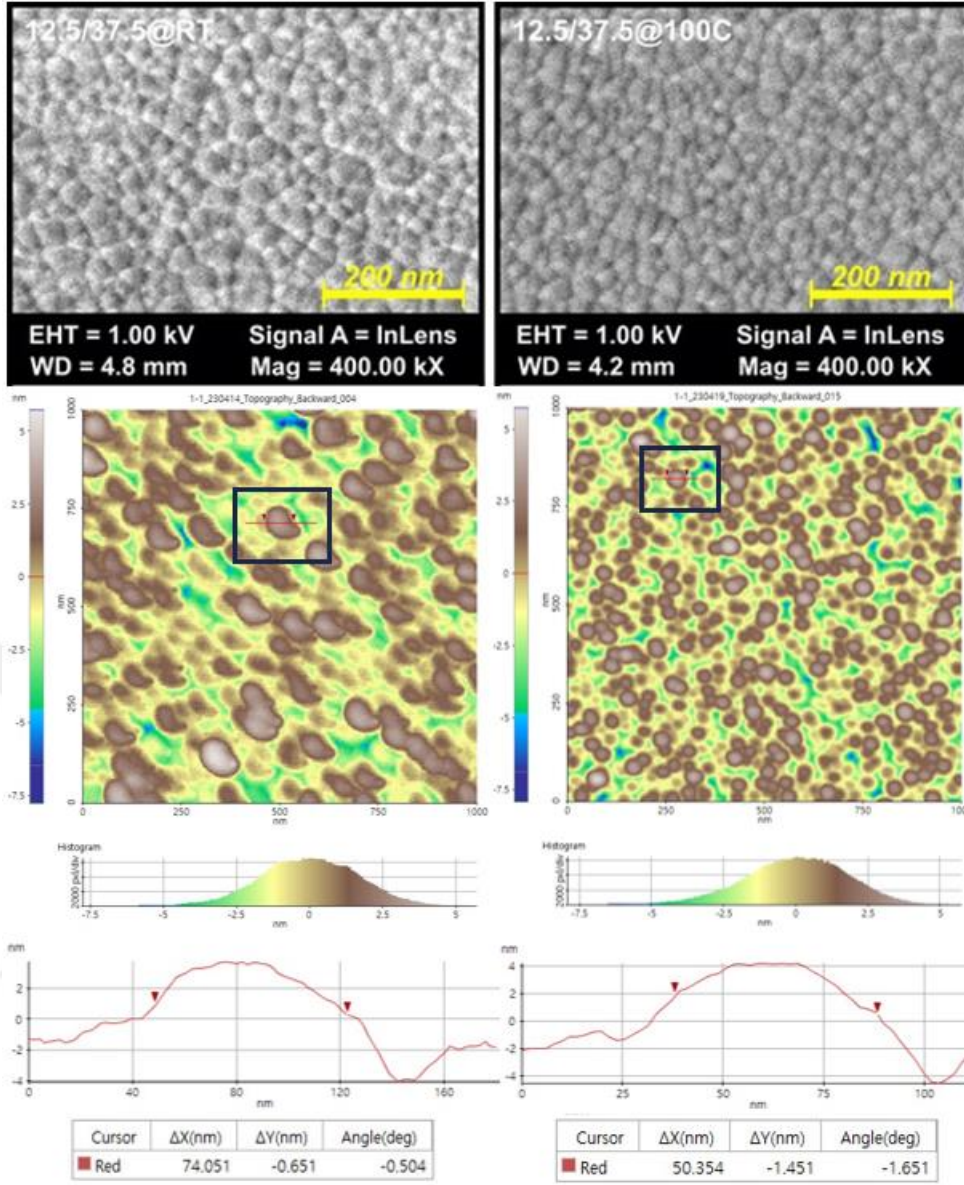
Şekil 4.12. 10/40@RT ve 10/40@100C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.12’de gösterilen 10/40@RT ve 10/40@100C örneklerinde oda sıcaklığından 100 °C sıcaklığa çıktığında tanecik boyutlarındaki küçülmenin yanında yüzey homojenliğini korumuştur.



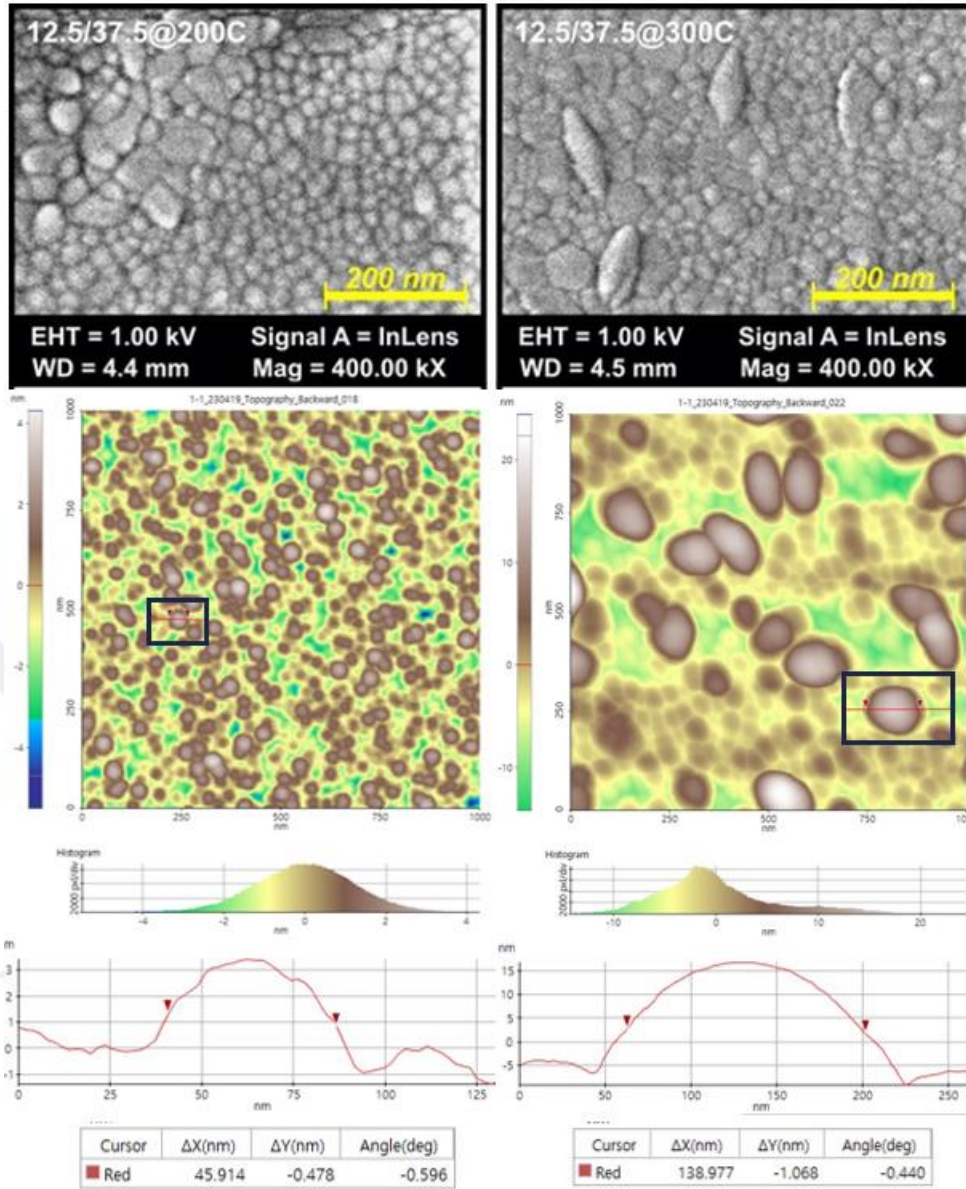
Şekil 4.13. 10/40@200C ve 10/40@300C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.13'te gösterilen 10/40@200C ve 10/40@300C örneklerinde 200 °C'den 300 C'ye çıkıldığında tanecik boyutlarında artış görülmektedir. Yüzey ise sıcaklığın artışıyla heterojen özellik sergilemektedir.



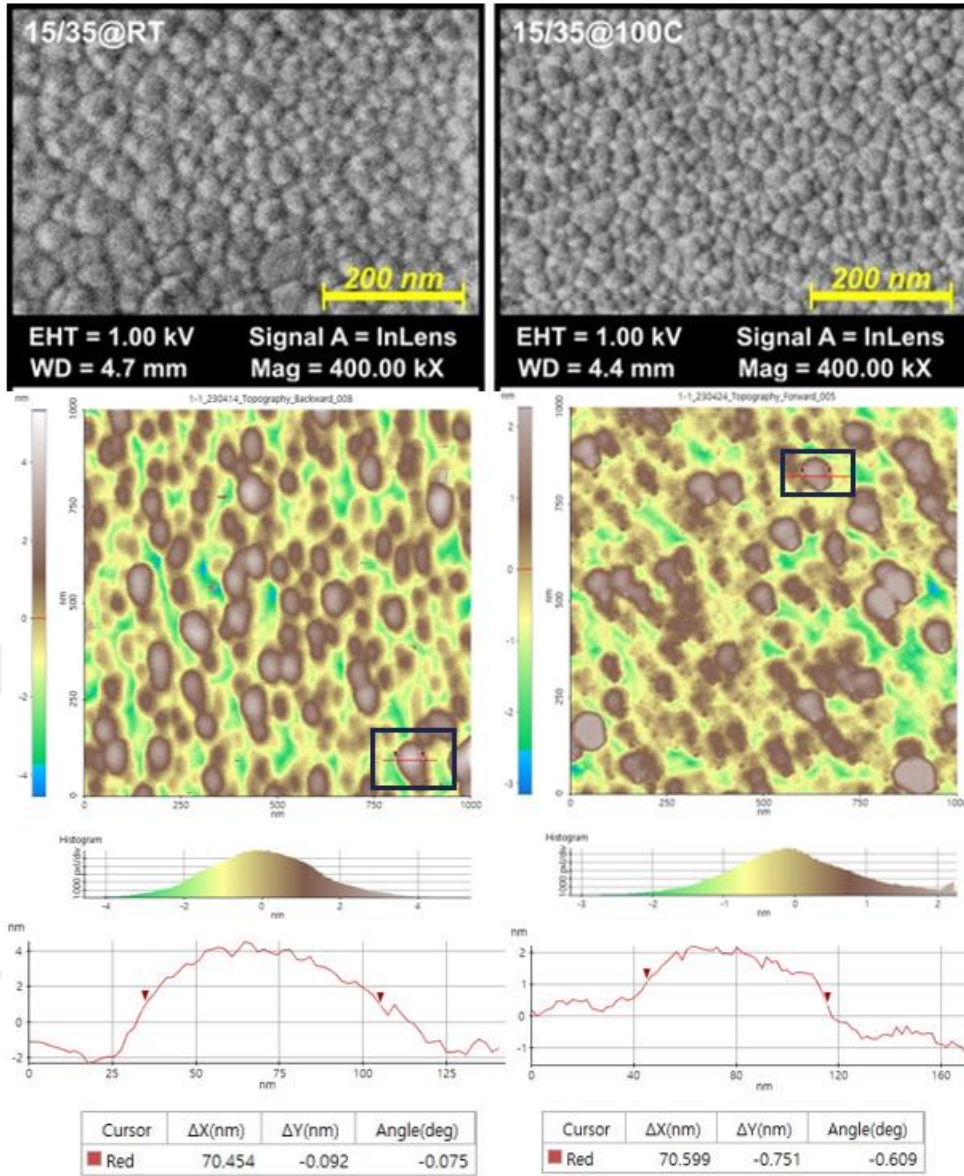
Şekil 4.14. 12.5/37.5@RT ve 12.5/37.5@100C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.14'te gösterilen 12.5/37.5@RT ve 12.5/37.5@100C örneklerinde oda sıcaklığından 100 °C sıcaklığa çıkıldığında tanecik boyutlarında küçülmeye birlikte yüzey morfolojisinde değişme olmayıp homojen olduğu görülmektedir.



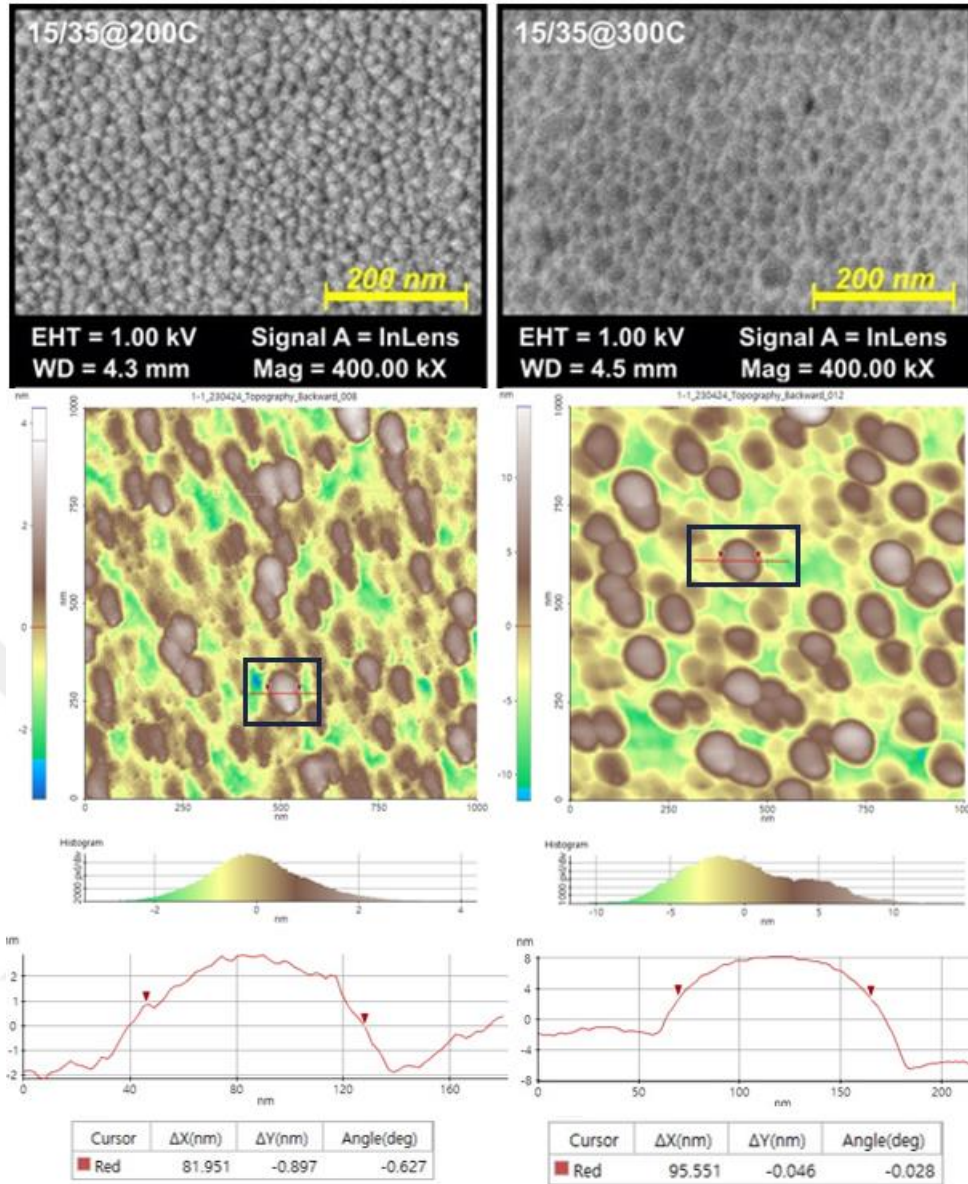
Şekil 4.15. 12.5/37.5@200C ve 12.5/37.5@300C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.15'te gösterilen 12.5/37.5@200C ve 12.5/37.5@300C örneklerinde 200 °C sıcaklıkta hem küçük hem de büyük tanecikler mevcut iken sıcaklık artışı ile birlikte düzensiz şekle sahip tanecikler ile tanecik boyutlarında artış gözlemlenmiştir. Yüzey morfolojisi heterojen özellik sergilemektedir.



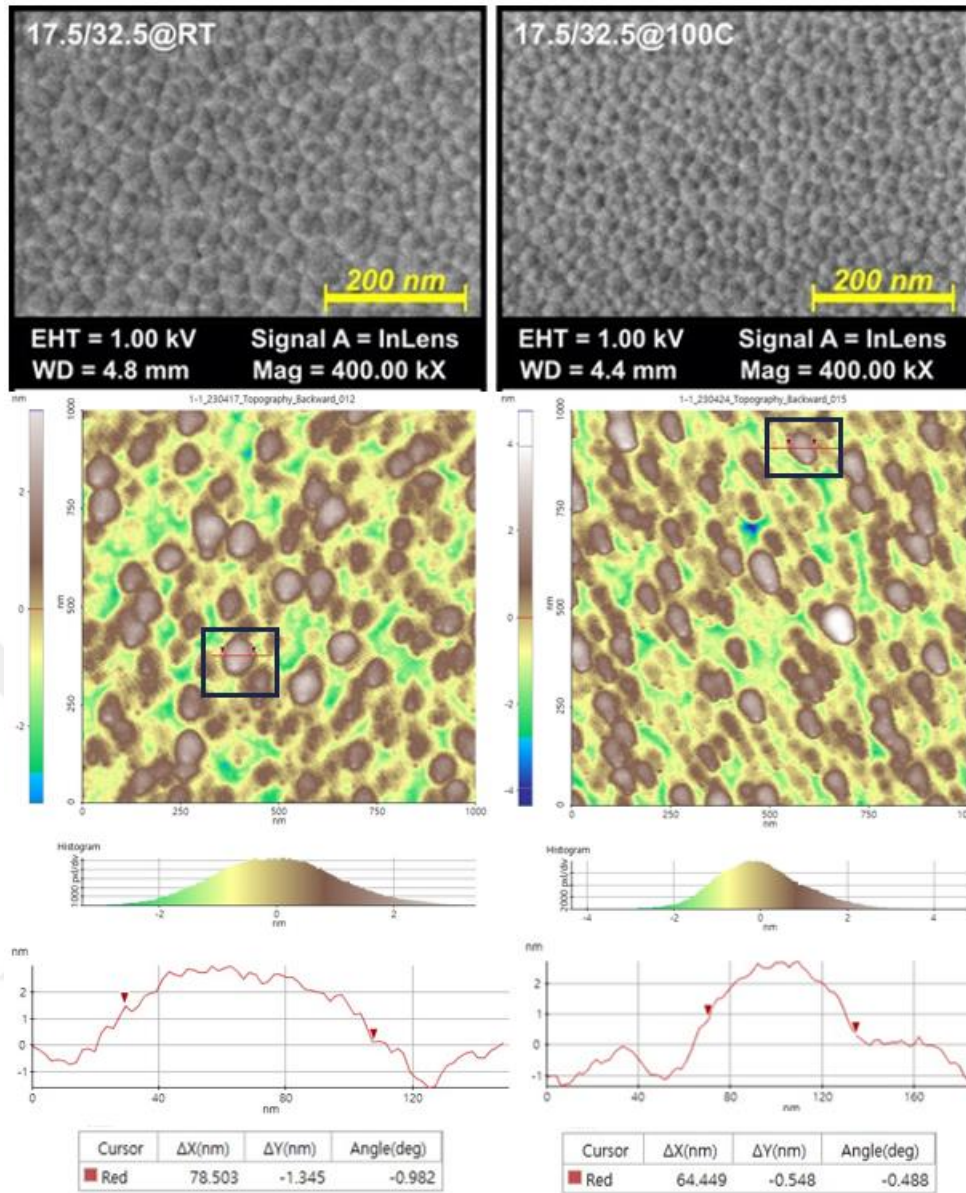
Şekil 4.16. 15/35@RT ve 15/35@100C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.16’da gösterilen 15/35@RT ve 15/35@100C örneklerinde oda sıcaklığından 100 °C sıcaklığa çıkıldığında tanecik boyutlarında küçülmeye birlikte yüzey morfolojisinde değişim meydana gelmemiştir.



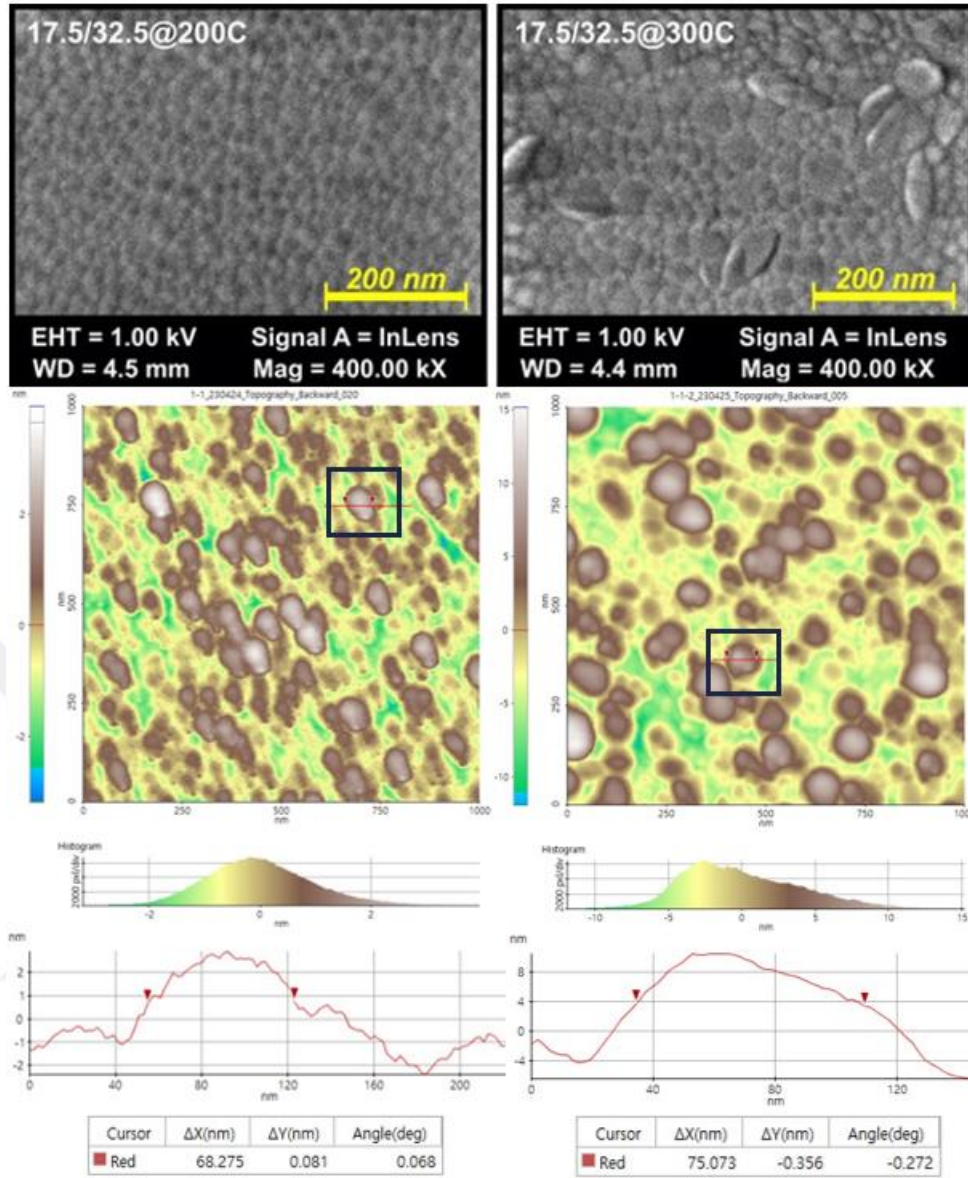
Şekil 4.17. 15/35@200C ve 15/35@300C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.17’de gösterilen 15/35@200C ve 15/35@300C örneklerinde 200 °C sıcaklıkta tanecik boyutları küçük ve dağılım homojen iken 300 °C’de tanecik boyutlarında artış görülmektedir. Yüzey morfolojisi homojendir.



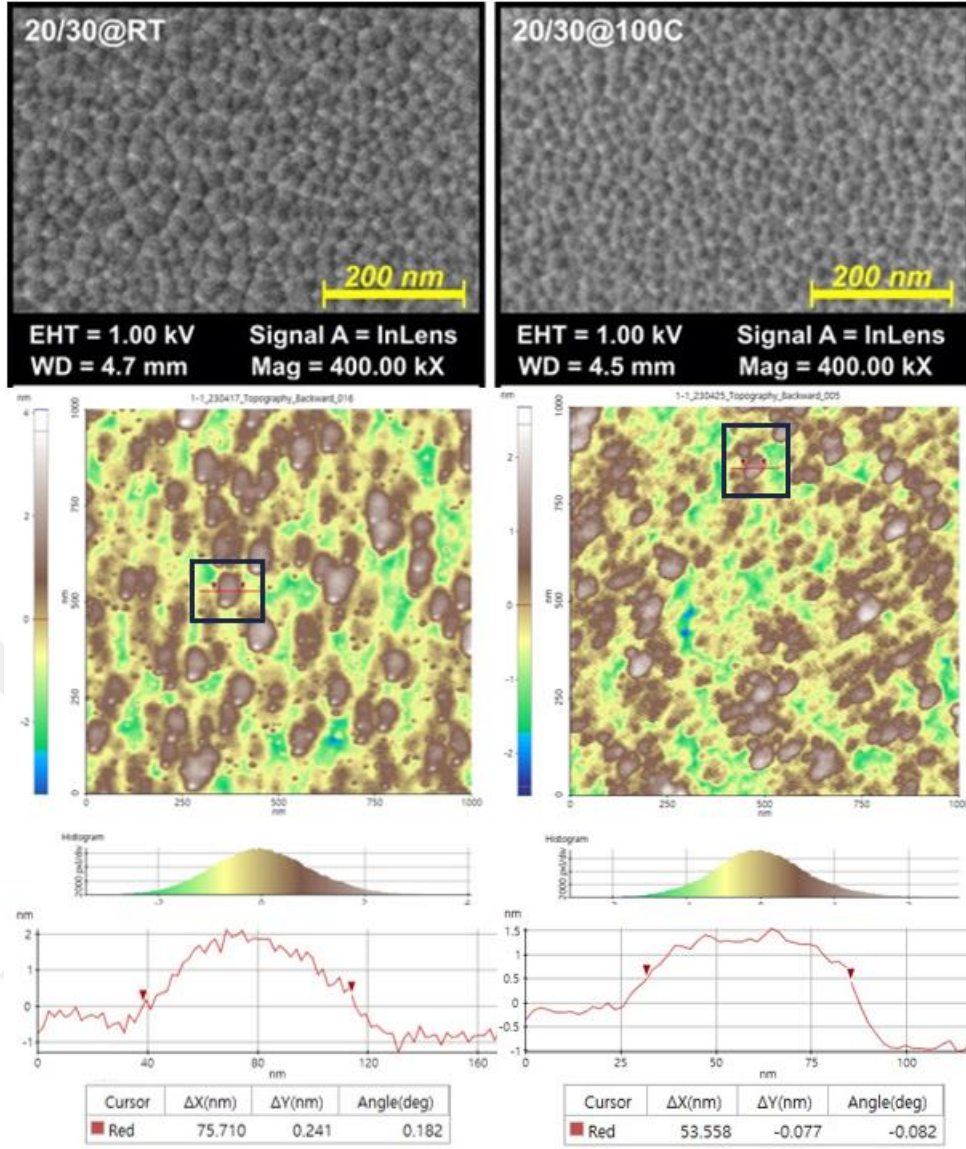
Şekil 4.18. 17.5/32.5@RT ve 17.5/32.5@100C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.18’de gösterilen 17.5/32.5@RT ve 17.5/32.5@100C örneklerinde oda sıcaklığından 100 °C sıcaklığa çıkıldığında tanecik boyutlarında ve yüzey morfolojisinde bir değişim meydana gelmemiştir.



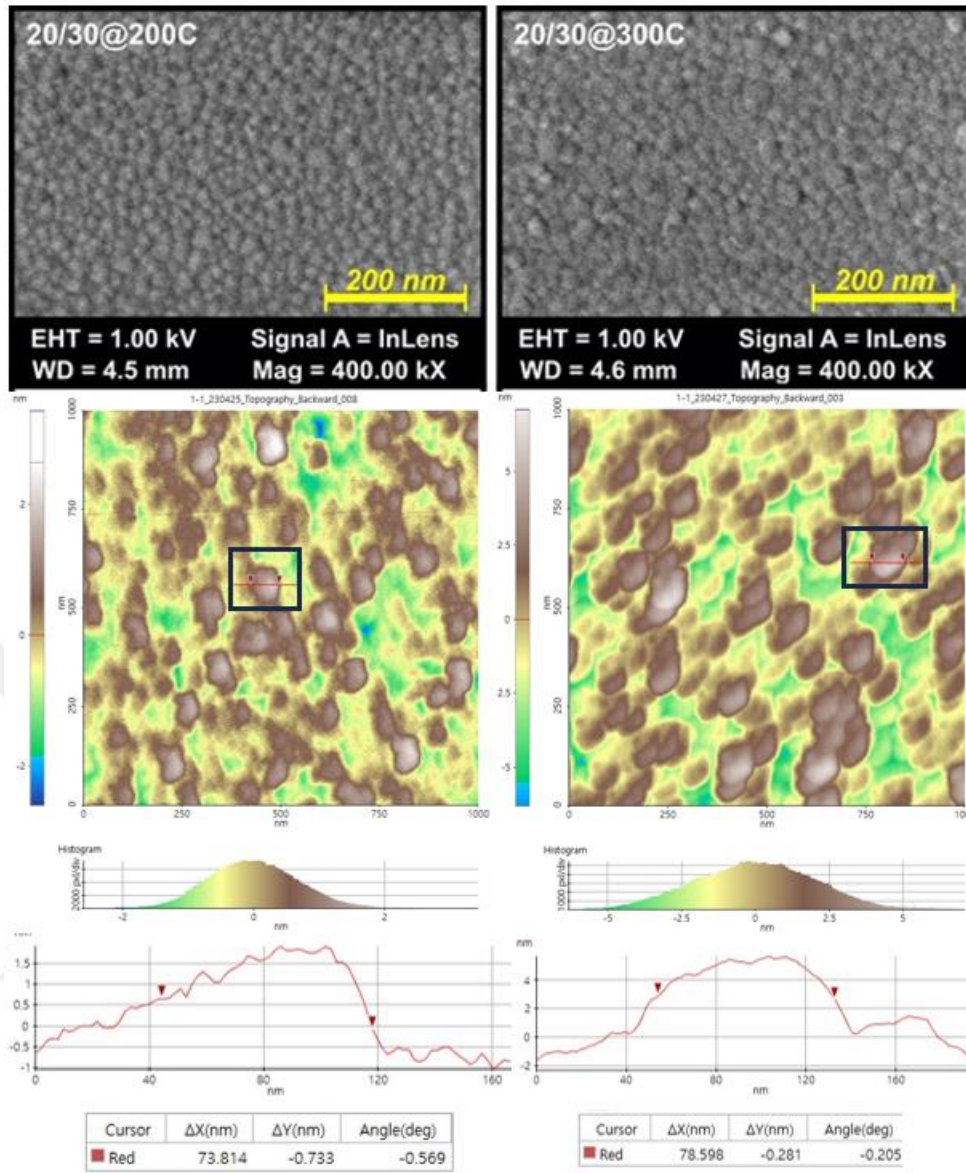
Şekil 4.19. 17.5/32.5@200C ve 17.5/32.5 5@300C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.19’da gösterilen 17.5/32.5@200C ve 17.5/32.5 5@300C örneklerinde 200 °C sıcaklıkta tanecik boyutları küçük ve dağılım homojen iken 300 °C’de tanecik boyutlarında artış ve homojen olmayan iri tanecikler görülmektedir.



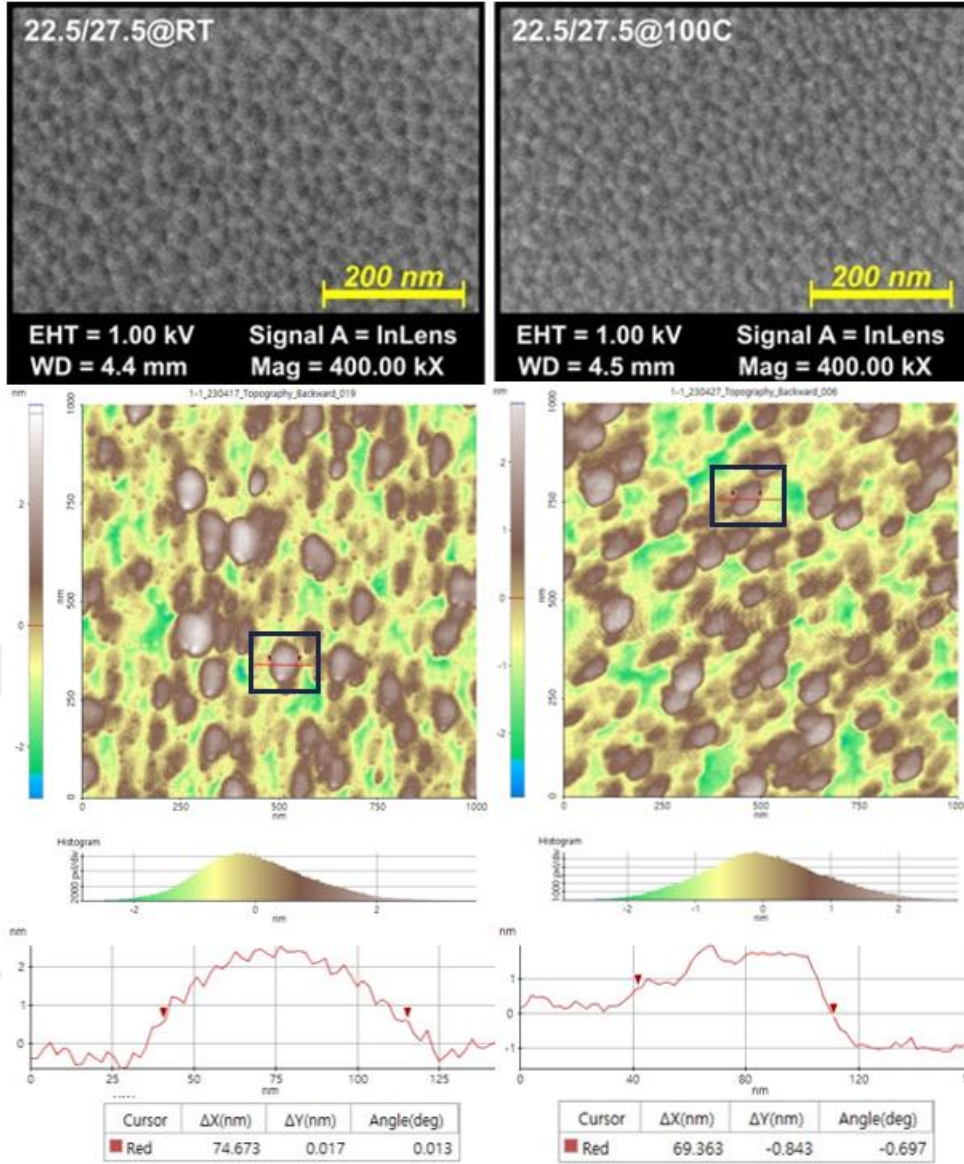
Şekil 4.20. 20/30@RT ve 20/30@100C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.20'de gösterilen 20/30@RT ve 20/30@100C örneklerinde oda sıcaklığından 100 °C sıcaklığa çıkıldığında tanecik boyutlarında ve yüzey morfolojisinde bir değişim meydana gelmemiştir.



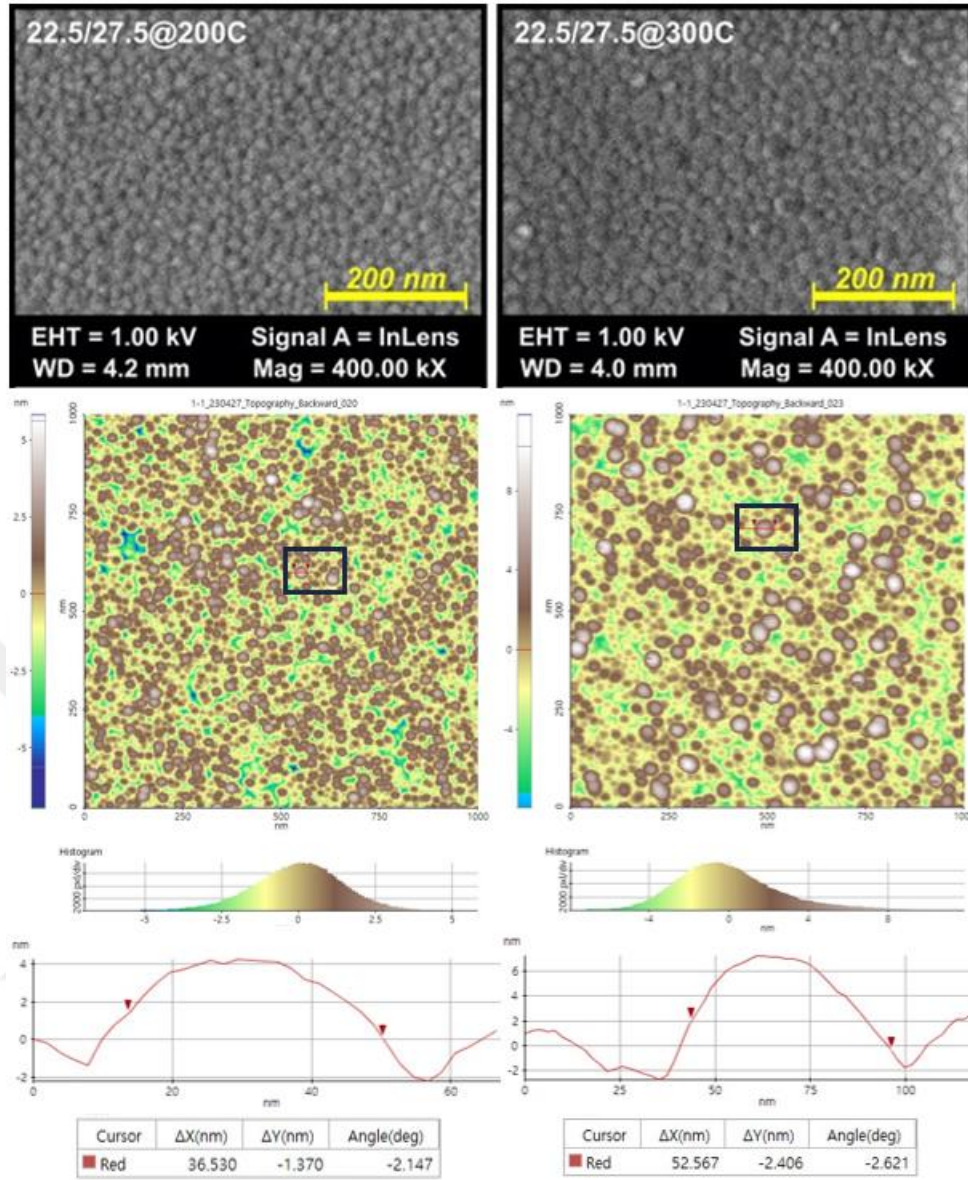
Şekil 4.21. 20/30@200C ve 20/30@300C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.21’de gösterilen 20/30@200C ve 20/30@300C örneklerinde 200 °C sıcaklıkta tanecik boyutları küçük ve dağılım homojen iken 300 °C’de tanecik boyutlarında artış görülmektedir. Yüzey morfolojisi homojenlik sergilemektedir.



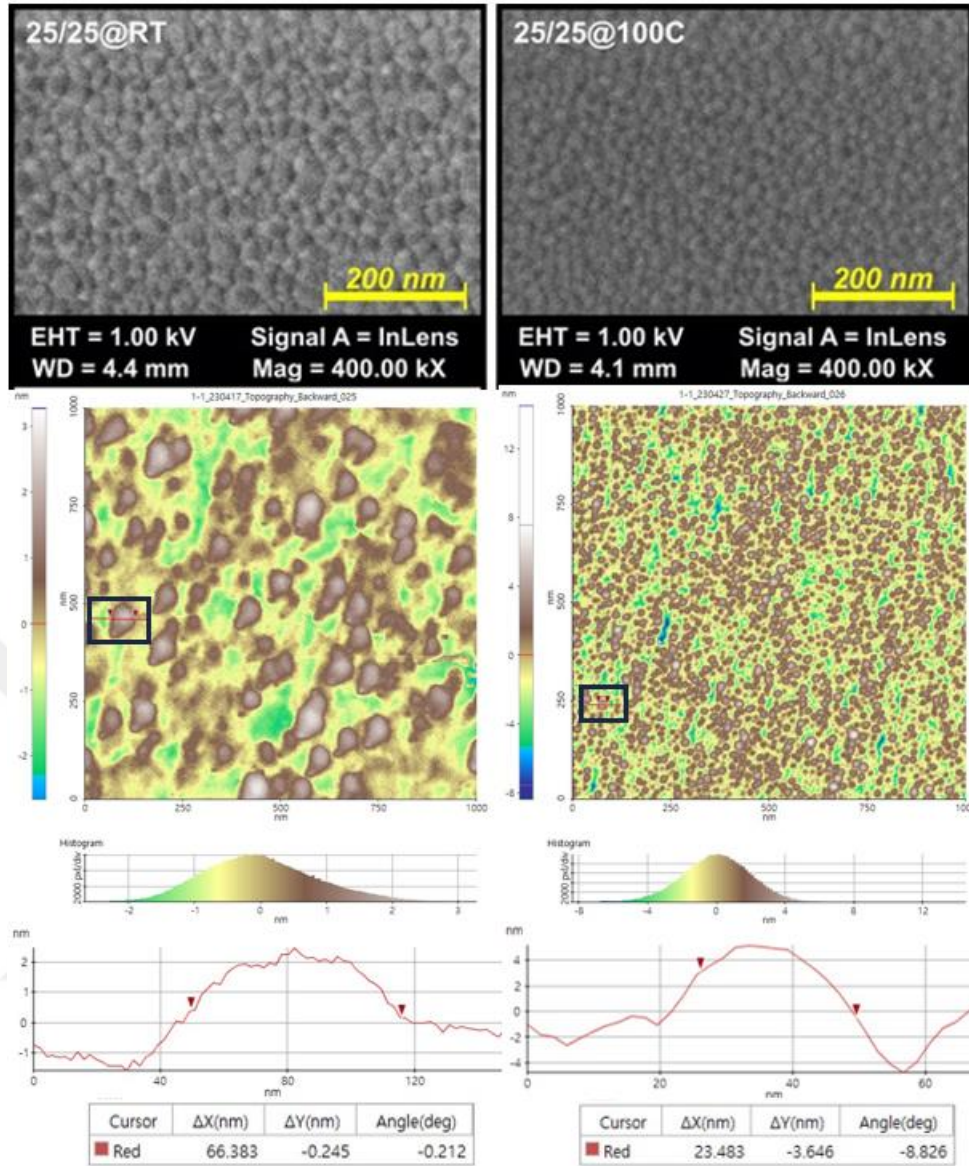
Şekil 4.22. 22.5/27.5@RT ve 22.5/27.5@100C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.22’de gösterilen 22.5/27.5@RT ve 22.5/27.5@100C örneklerinde oda sıcaklığından 100 °C sıcaklığa çıkıldığında tanecik boyutlarında küçülme tespit edilmiş ve yüzey 200 °C ve 300 °C için de homojen özellik göstermektedir.



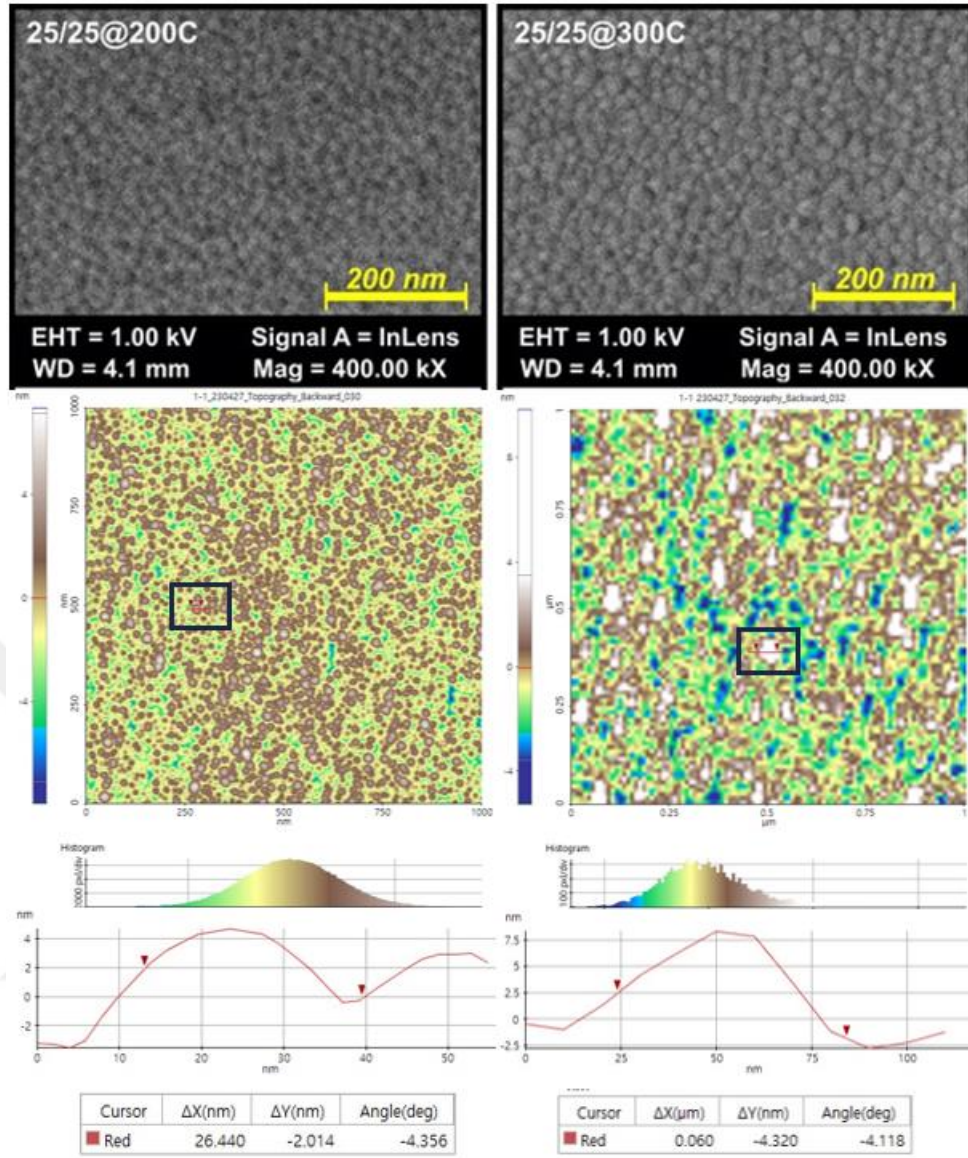
Şekil 4.23. 22.5/27.5@200C ve 22.5/27.5@300C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.23'te gösterilen 22.5/27.5@200C ve 22.5/27.5@300C örneklerinde 100 °C'den 200 °C'ye çıkıldığında tanecik boyutlarında artış gözlemlenmektedir.



Şekil 4.24. 25/25@RT ve 25/25@100C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

Şekil 4.24'te gösterilen 25/25@RT ve 25/25@100C örneklerinde oda sıcaklığından 100 °C sıcaklığa çıkıldığında tanecik boyutlarında küçülme tespit edilmiştir.

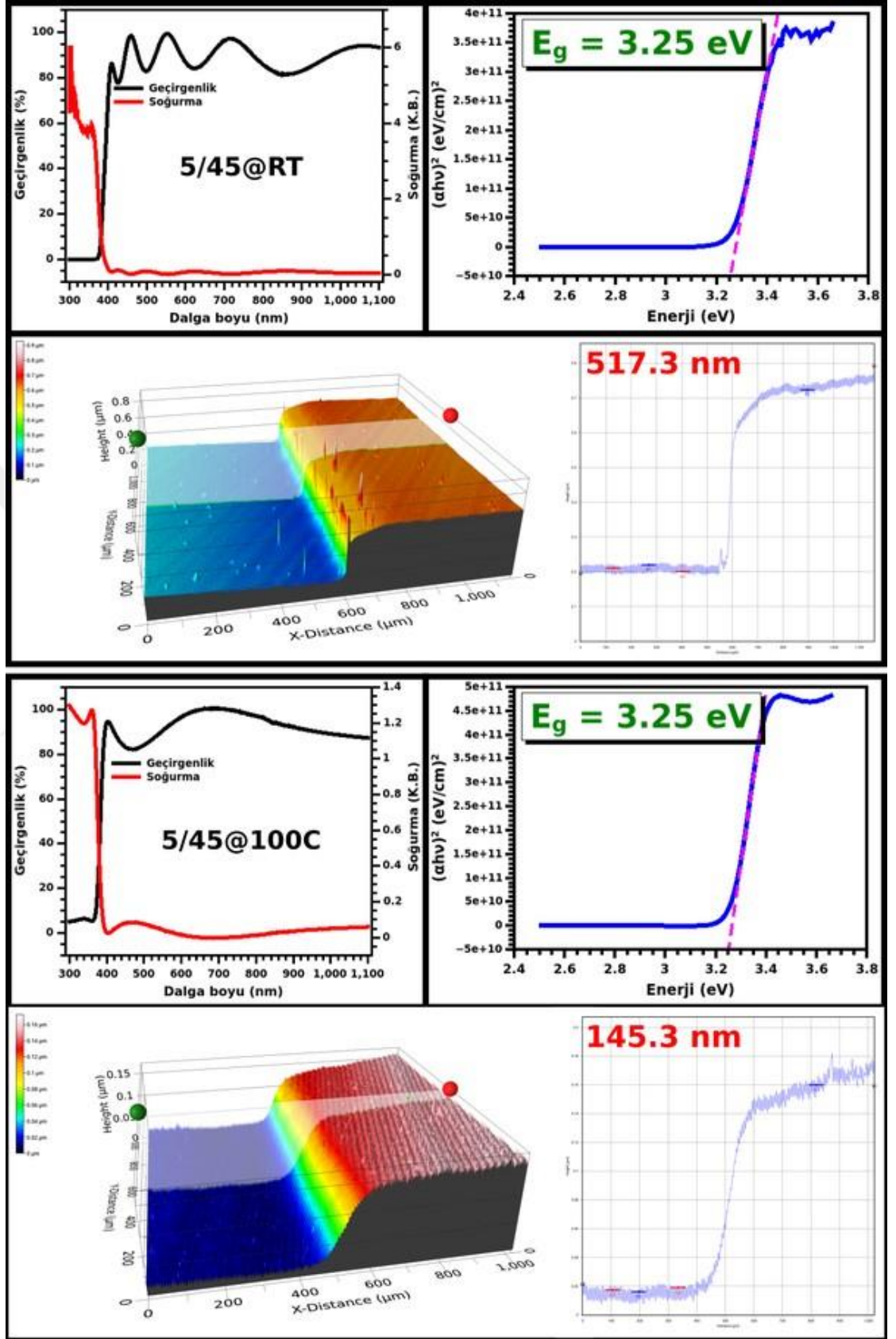


Şekil 4.25. 25/25@200C ve 25/25@300C örneklerinin FE-SEM ve AFM görüntüleri ile ortalama parçacık boyutu.

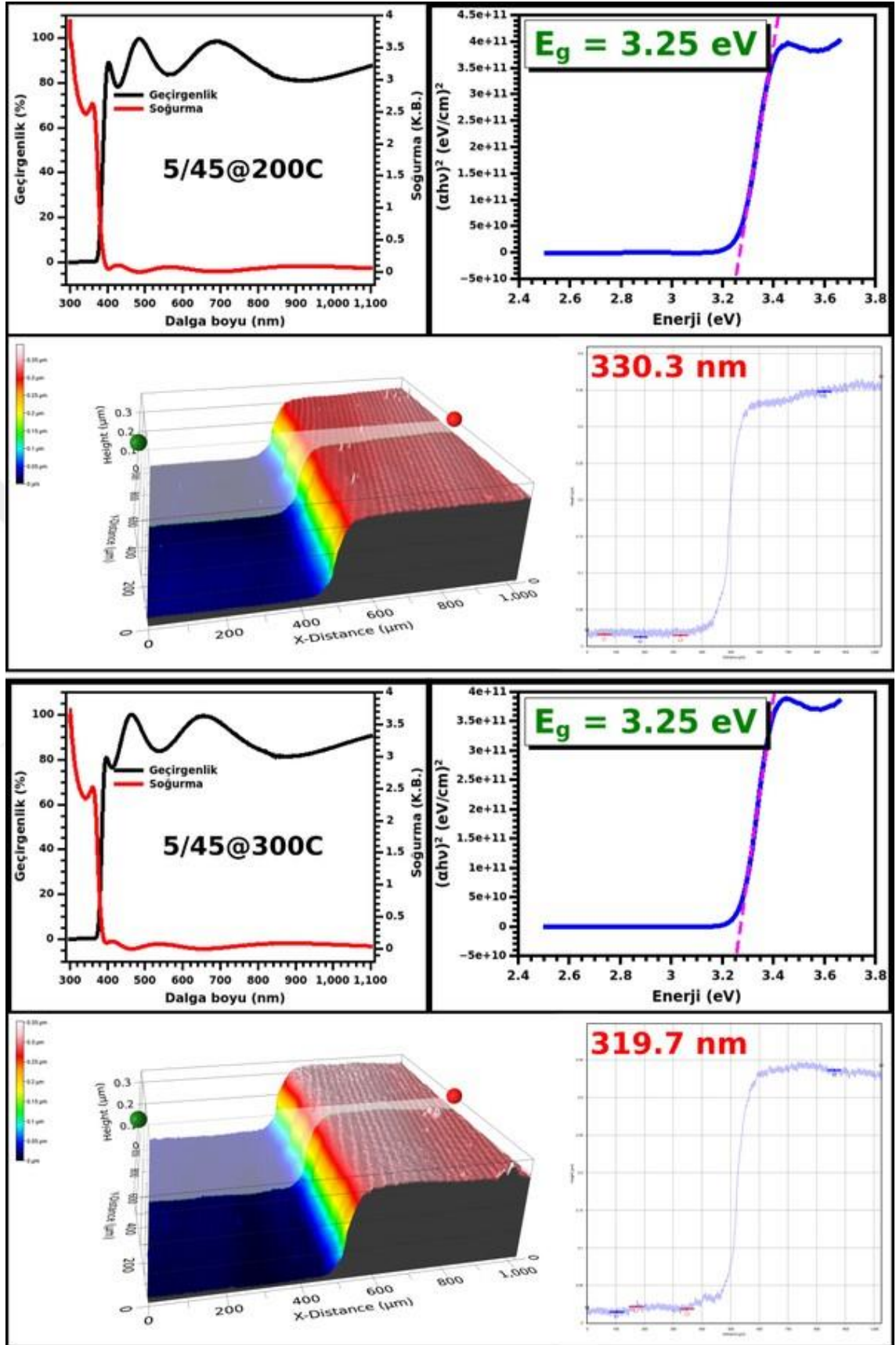
Şekil 4.25'te gösterilen 25/25@200C ve 25/25@300C örneklerinde 100 °C'den 200 °C'ye çıkıldığında tanecik boyutlarında ve yüzey morfolojisinde bir değişim meydana gelmemiştir.

Genel olarak oda sıcaklığında itibaren sıcaklık artışı ile taneciklerde büyüme gözlemlenmiştir. 300 °C'de ise bazı durumlarda orantısız iri tanecikler tespit edilmiştir. Genel olarak en yoğun taneciğe sahip yapıların 100 °C ve 200 °C sıcaklıklarda büyüdüğü AFM sonuçlarından görülmektedir.

4.2. ZnO İnce Filmlerin Optik Analizi



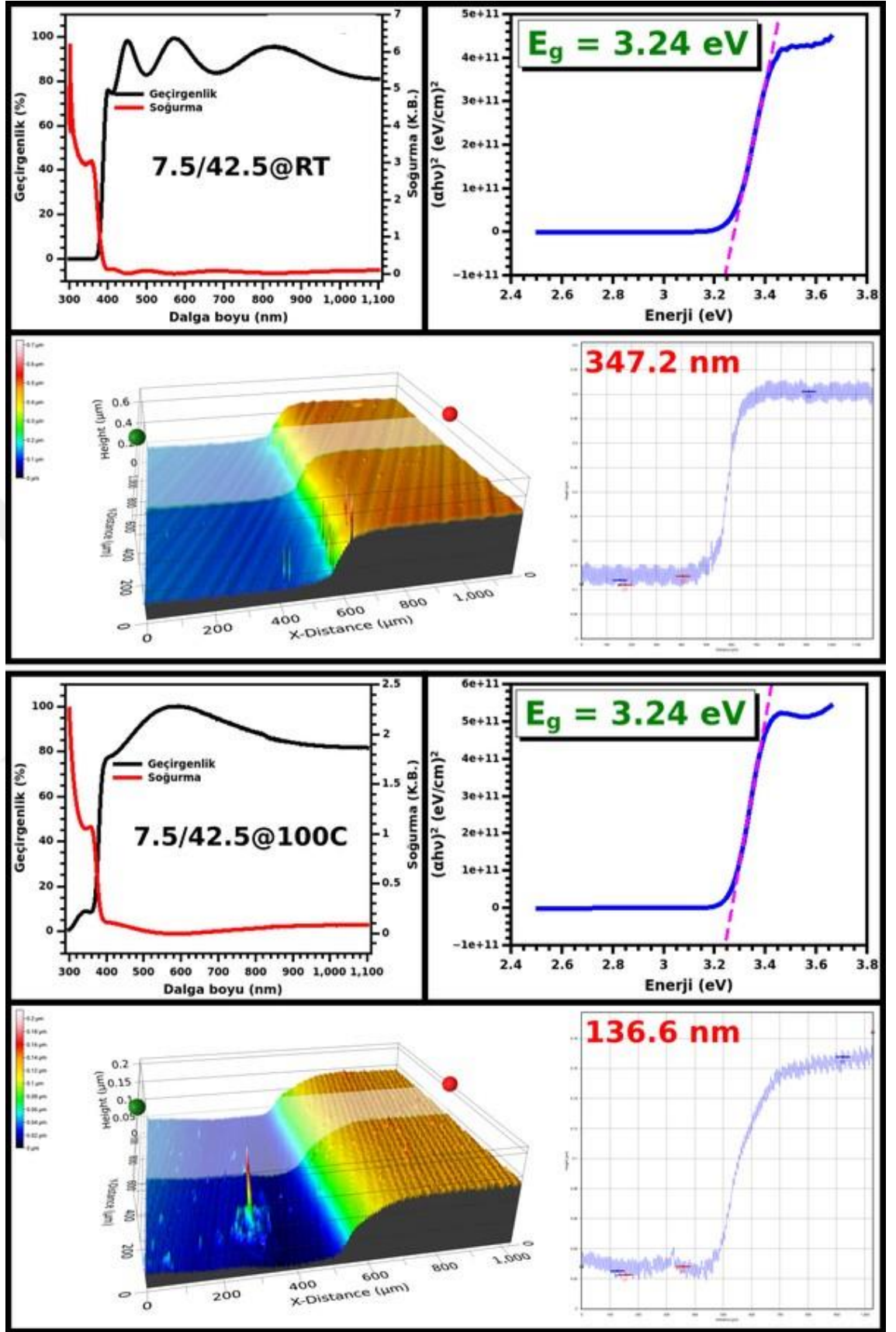
Şekil 4.26. 5/45@RT ve 5/45@100C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.



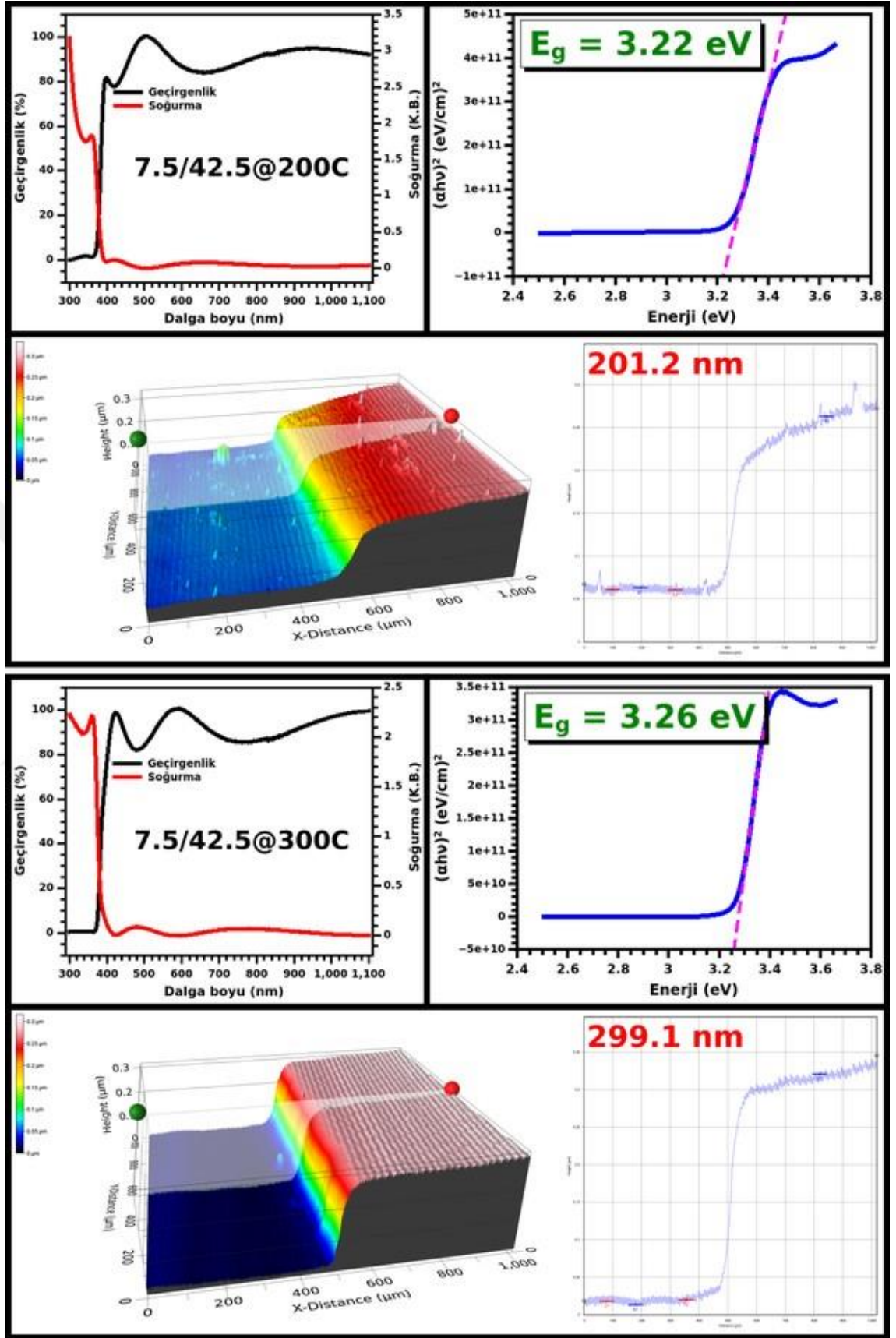
Şekil 4.27. 5/45@200C ve 5/45@300C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.

Şekil 4.26'da ve 4.27'de farklı sıcaklıklarda büyüyen 5/45 örneklerine ilişkin optik özellikler gösterilmektedir. Bütün örnekler ~ 400 nm ve üzerindeki dalga boylarında yüksek geçirgenliğe sahipken büyütülen filmler içinde en kalın olanı oda sıcaklığında büyüyen örnek olduğu hem optik profilometre hem de geçirgenlik spektrumunun saçaklarından tespit edilmiştir. 100 °C'de büyüyen ZnO film ise en ince film kalınlığına sahip örnek olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen ortalama kalınlıklardan hesaplanan soğurma katsayısı ve bu katsayı kullanılarak elde edilen Tauc çizim ile optik bant aralığı tespit edilmiştir. Bütün örnekler için optik bant aralığı ~ 3.25 eV olarak tespit edilmiş olup bu değer literatürdeki verilerle uyumludur.





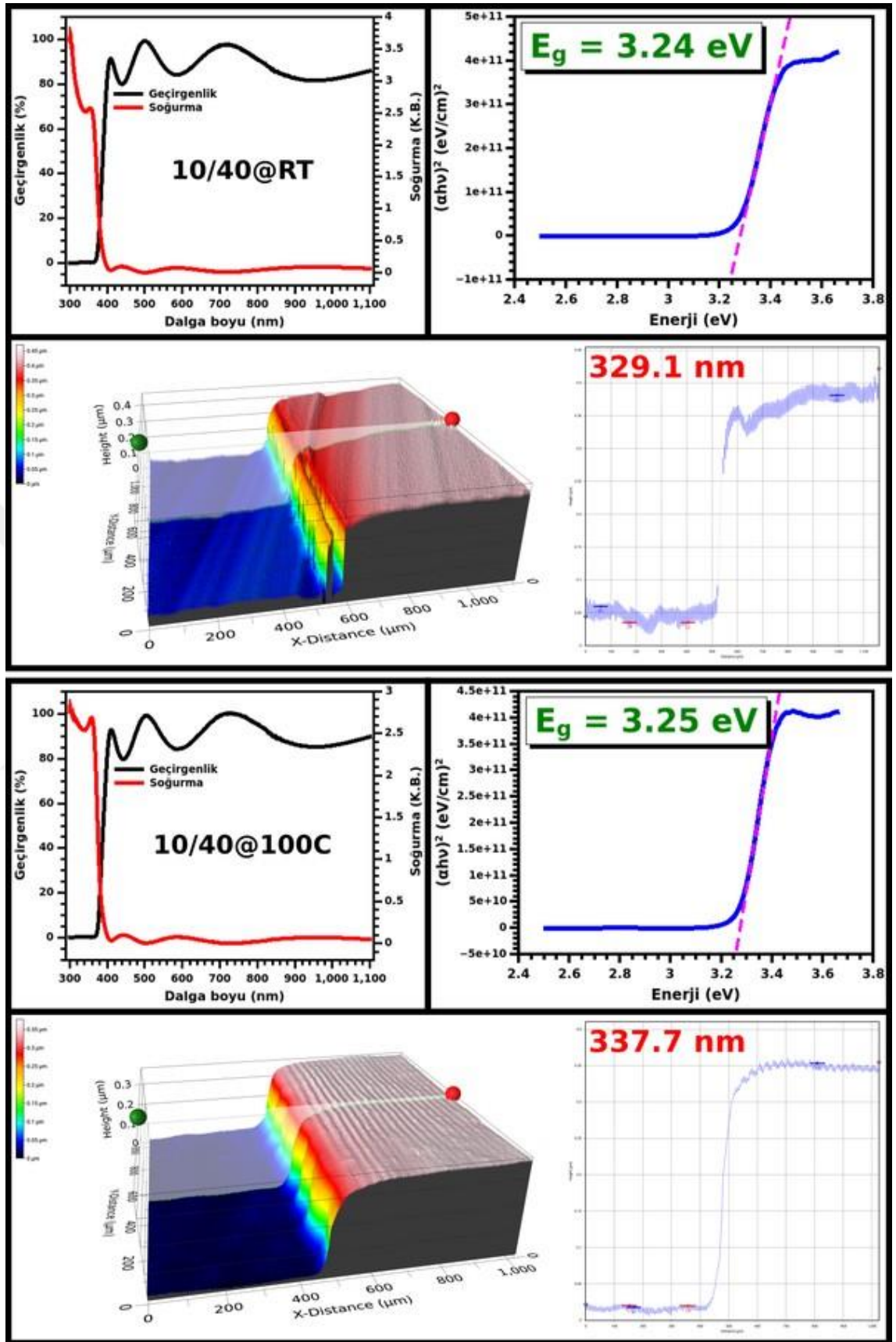
Şekil 4.28. 7.5/42.5@RT ve 7.5/42.5@100C örneklerinin söğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.



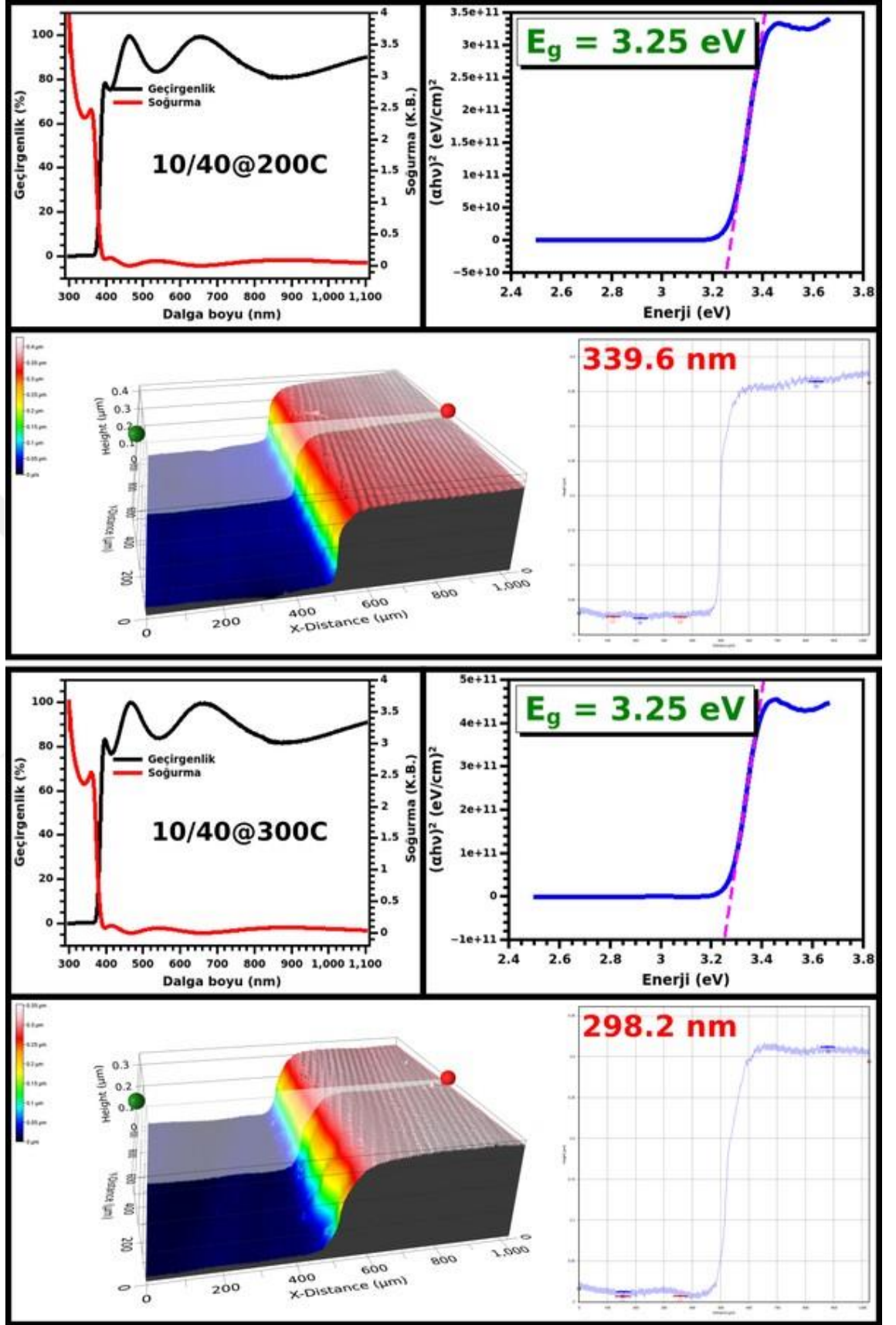
Şekil 4.29. 7.5/42.5@200C ve 7.5/42.5@300C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.

Şekil 4.28’de ve 4.29’da farklı sıcaklıklarda büyüyen 7.5/42.5 örneklerine ilişkin optik özellikler gösterilmektedir. Bütün örnekler ~ 400 nm ve üzerindeki dalga boylarında yüksek geçirgenliğe sahipken büyütülen filmler içinde en kalın olanın oda sıcaklığında büyüyen örnek olduğu hem optik profilometre hem de geçirgenlik spektrumunun saçaklarından tespit edilmiştir. 100 °C’de büyüyen ZnO film ise en ince film kalınlığına sahip örnek olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen ortalama kalınlıklardan hesaplanan soğurma katsayısı ve bu katsayı kullanılarak elde edilen Tauc çizim ile optik bant aralığı tespit edilmiştir. Bütün örnekler için optik bant aralığı ~ 3.22 ile ~ 3.26 eV arasında değiştiği tespit edilmiş olup bu değerler literatürdeki verilerle uyumludur.





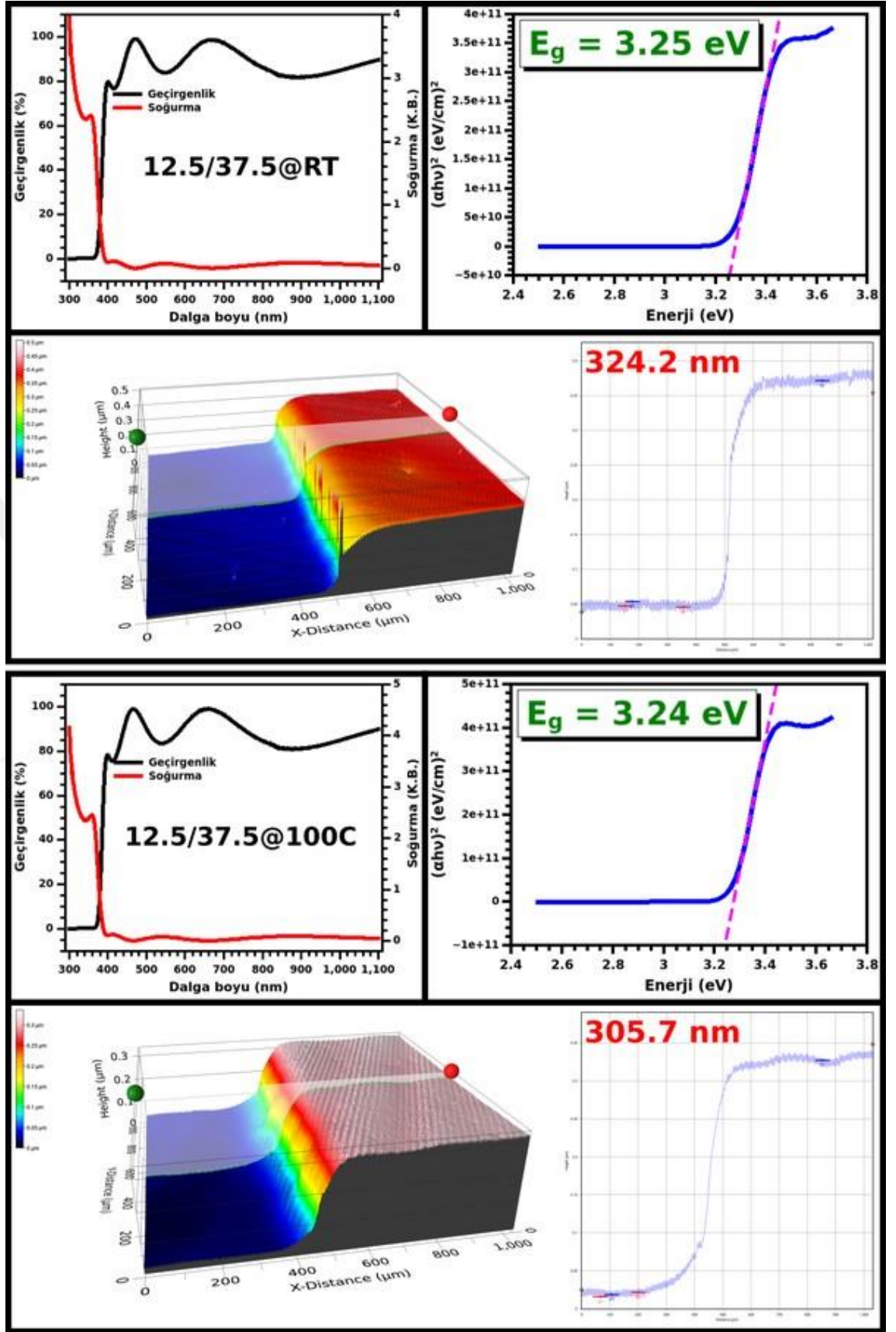
Şekil 4.30. 10/40@RT ve 10/40@100C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.



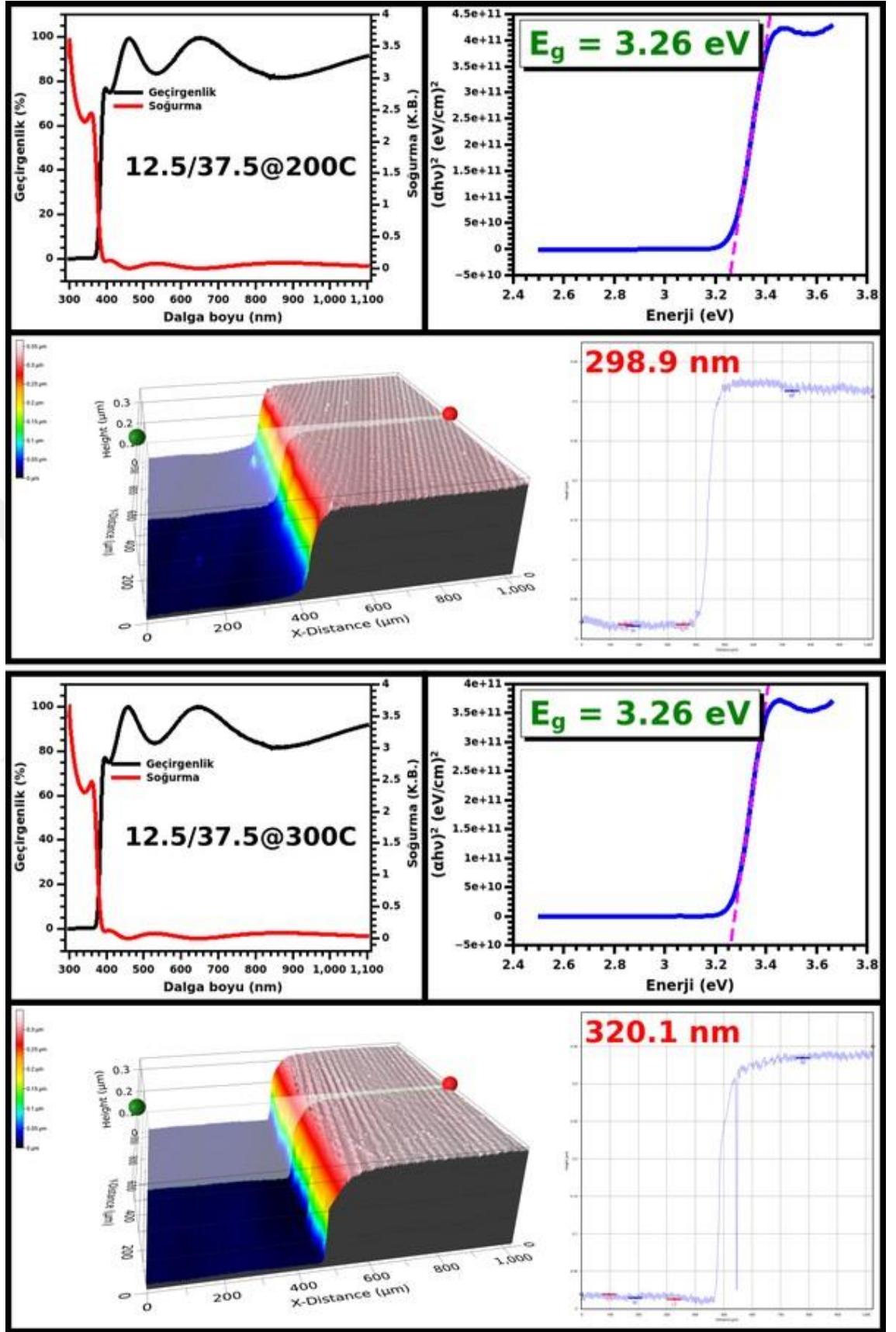
Şekil 4.31. 10/40@200C ve 10/40@300C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.

Şekil 4.30'da ve 4.31'de farklı sıcaklıklarda büyüyen 10/40 örneklerine ilişkin optik özellikler gösterilmektedir. Bütün örnekler ~ 400 nm ve üzerindeki dalga boylarında yüksek geçirgenliğe sahiptir. Büyütülen filmlerin kalınlıkları birbirine yakın değerlerde olup ~ 300 - ~ 340 nm aralıklarındadır. Tespit edilen ortalama kalınlıklardan hesaplanan soğurma katsayısı ve bu katsayı kullanılarak elde edilen Tauc çizim ile optik bant aralığı tespit edilmiştir. Bütün örnekler için optik bant aralığı ~ 3.25 eV olup bu değer literatürdeki verilerle uyumludur.





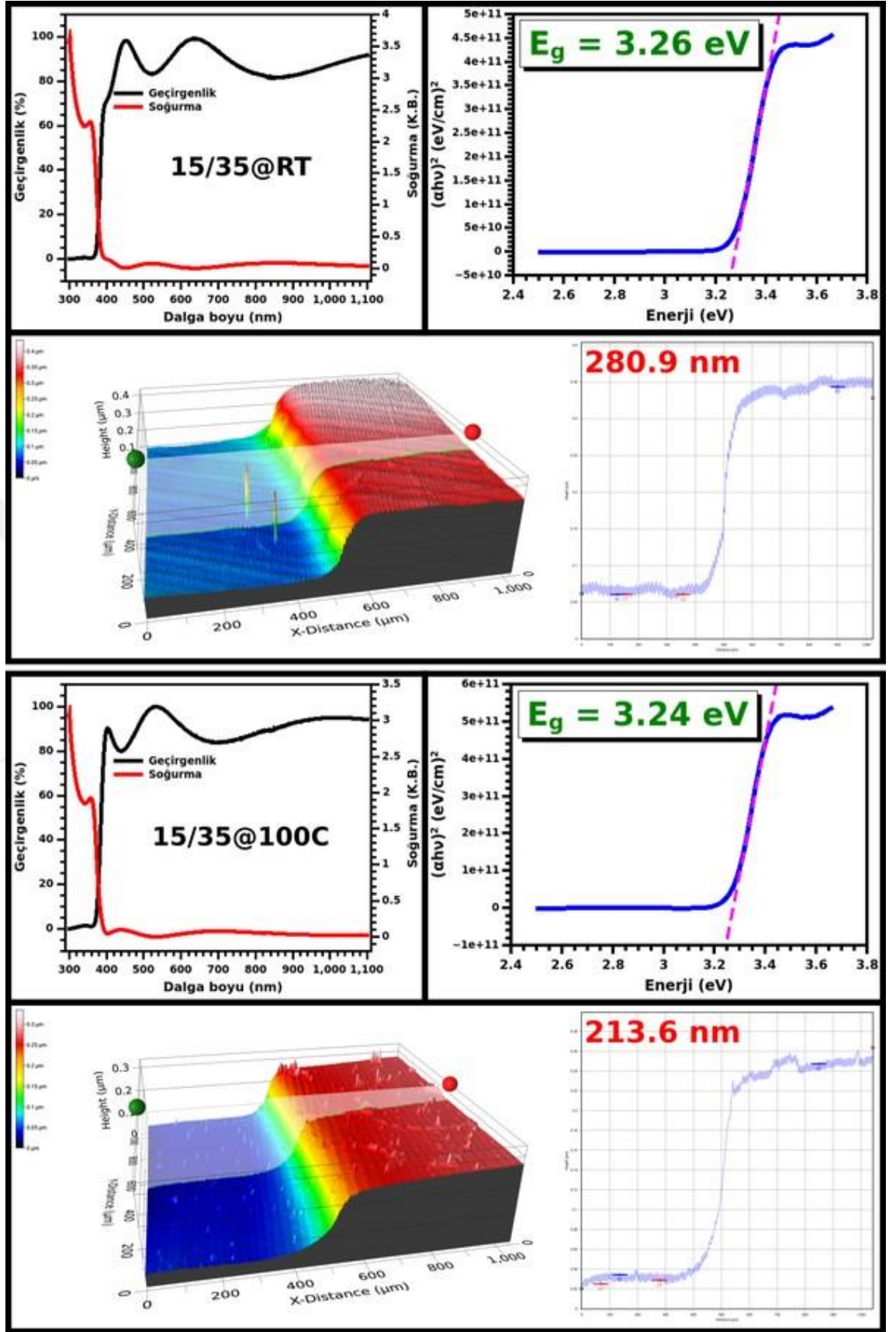
Şekil 4.32. 12.5/37.5@RT ve 12.5/37.5@100C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.



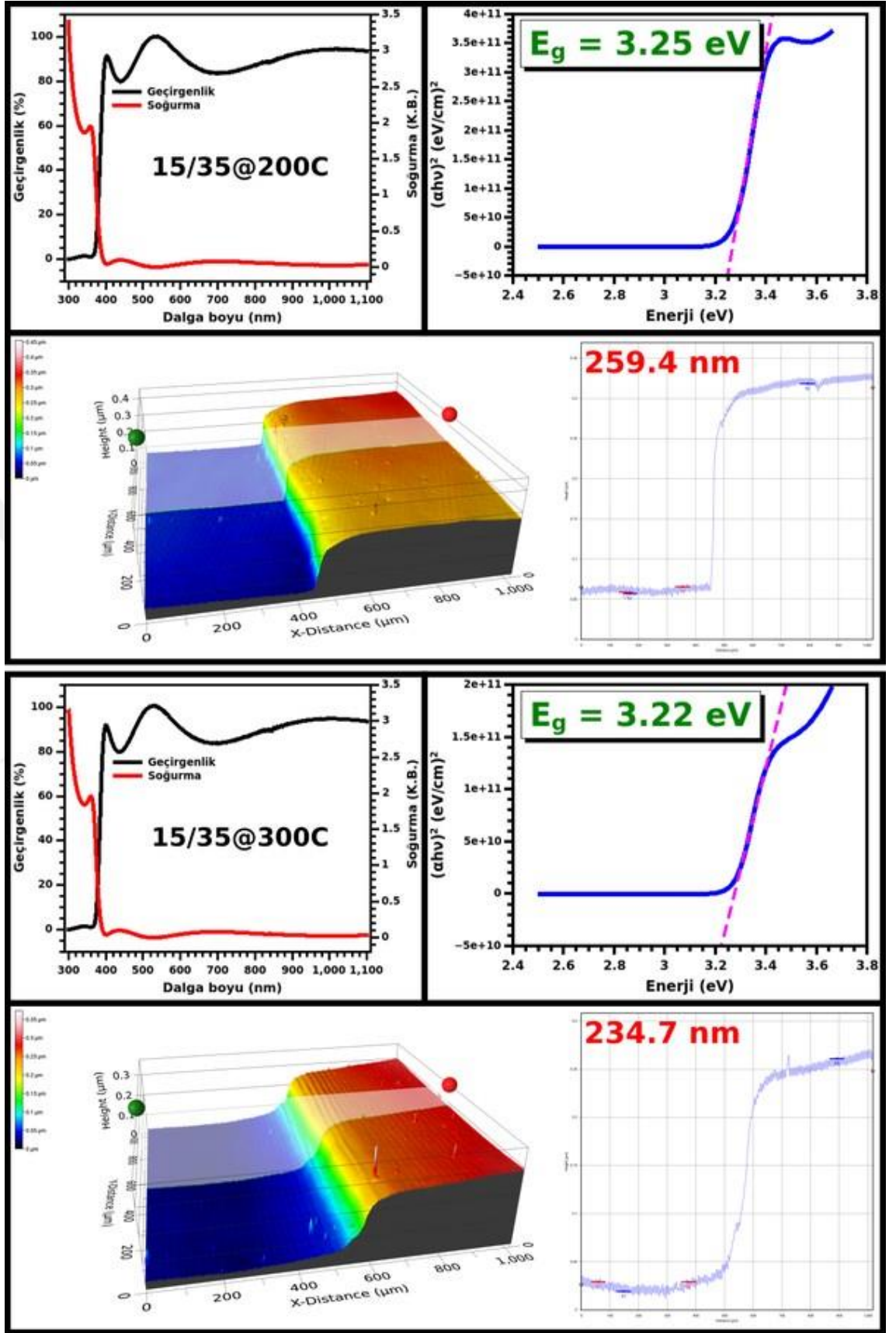
Şekil 4.33. 12.5/37.5@200C ve 12.5/37.5@300C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.

Şekil 4.32’de ve 4.33’te farklı sıcaklıklarda büyüyen 12.5/37.5 örneklerine ilişkin optik özellikler gösterilmektedir. Bütün örnekler ~ 400 nm ve üzerindeki dalga boylarında yüksek geçirgenliğe sahiptir. Büyütülen filmlerin kalınlıkları birbirine yakın değerlerde olup ~ 300 - ~ 340 nm aralıklarındadır. Tespit edilen ortalama kalınlıklardan hesaplanan soğurma katsayısı ve bu katsayı kullanılarak elde edilen Tauc çizim ile optik bant aralığı tespit edilmiştir. Bütün örnekler için optik bant aralığı ~ 3.25 eV olup bu değer literatürdeki verilerle uyumludur.





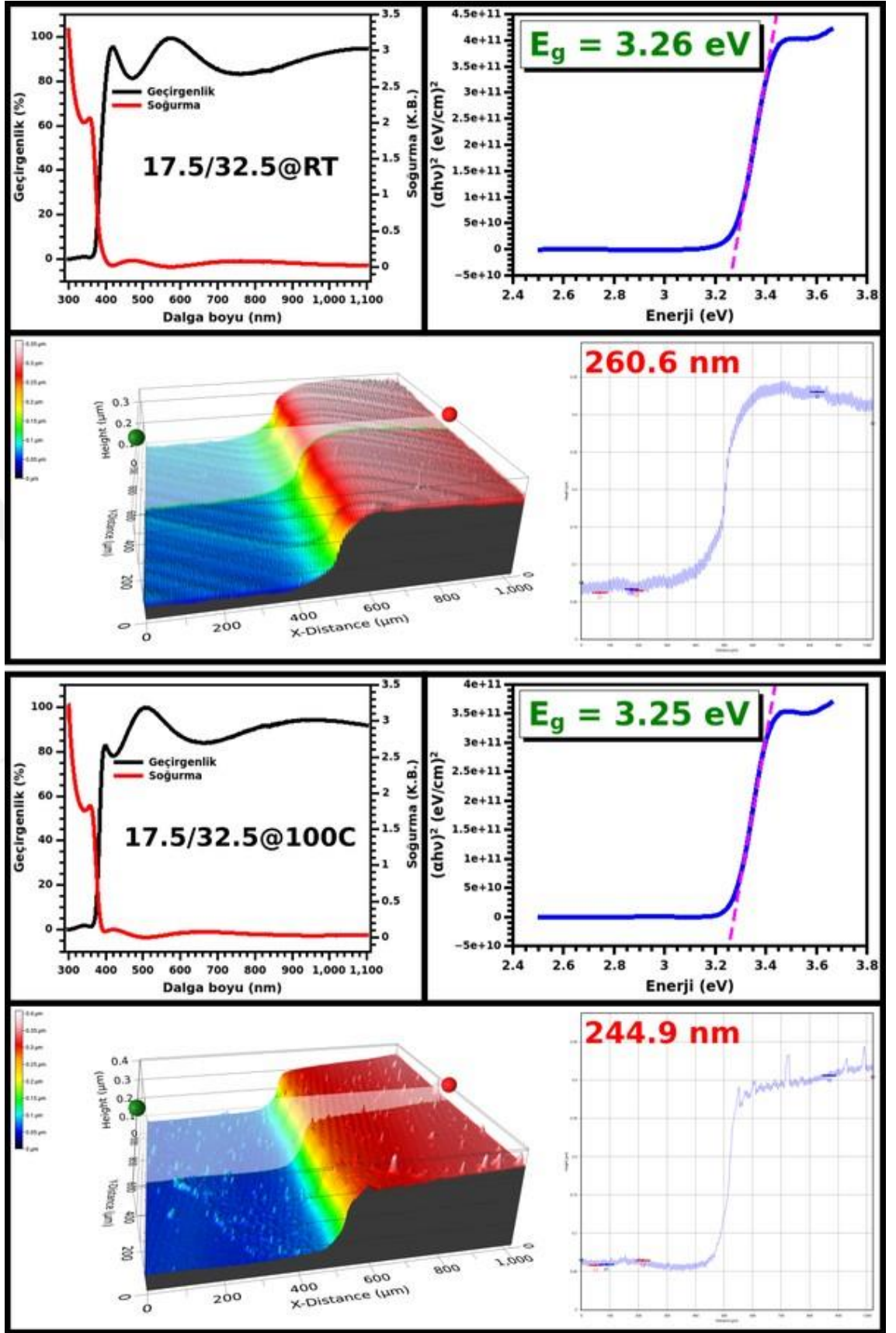
Şekil 4.34. 15/35@RT ve 15/35@100C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.



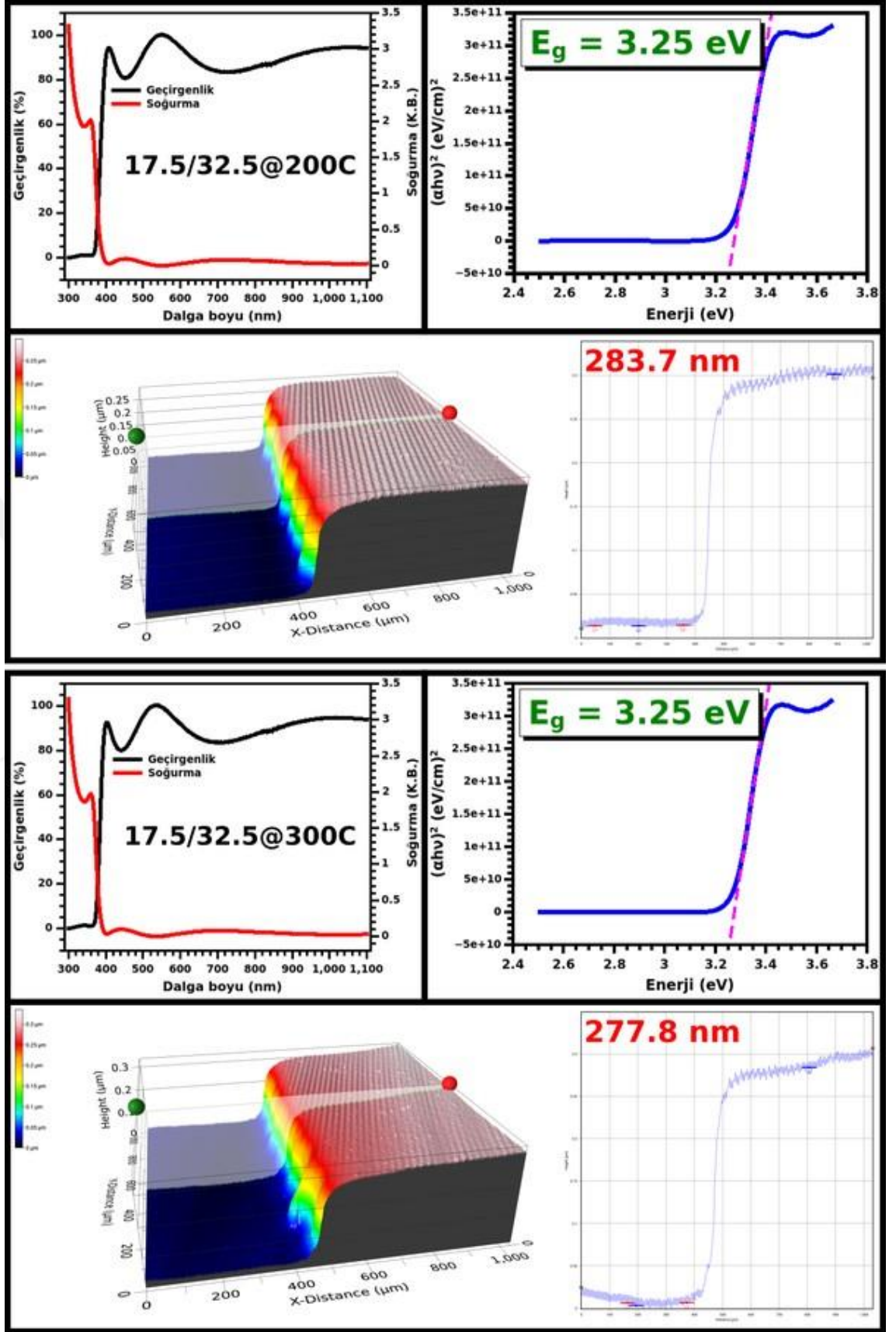
Şekil 4.35. 15/35@200C ve 15/35@300C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.

Şekil 4.34'te ve 4.35'de farklı sıcaklıklarda büyüyen 15/35 örneklerine ilişkin optik özellikler gösterilmektedir. Bütün örnekler ~ 400 nm ve üzerindeki dalga boylarında yüksek geçirgenliğe sahiptir. Büyütülen filmler içinde en kalın olanı oda sıcaklığında büyüyen örnektir. Ancak bu örnek daha düşük O_2/Ar oranlarında büyüyen örneklerle kıyasla daha incedir. Sıcaklık artışı ile genel olarak film kalınlığının azaldığı söylenebilir. Bu noktada O_2 miktarındaki artış film kalınlığını etkilemeye başlamıştır. Tespit edilen ortalama kalınlıklardan hesaplanan soğurma katsayısı ve bu katsayı kullanılarak elde edilen Tauc çizim ile optik bant aralığı tespit edilmiştir. Bütün örnekler için optik bant aralığı ~ 3.22 ile ~ 3.26 eV arasında değiştiği tespit edilmiş olup bu değerler literatürdeki verilerle uyumludur.





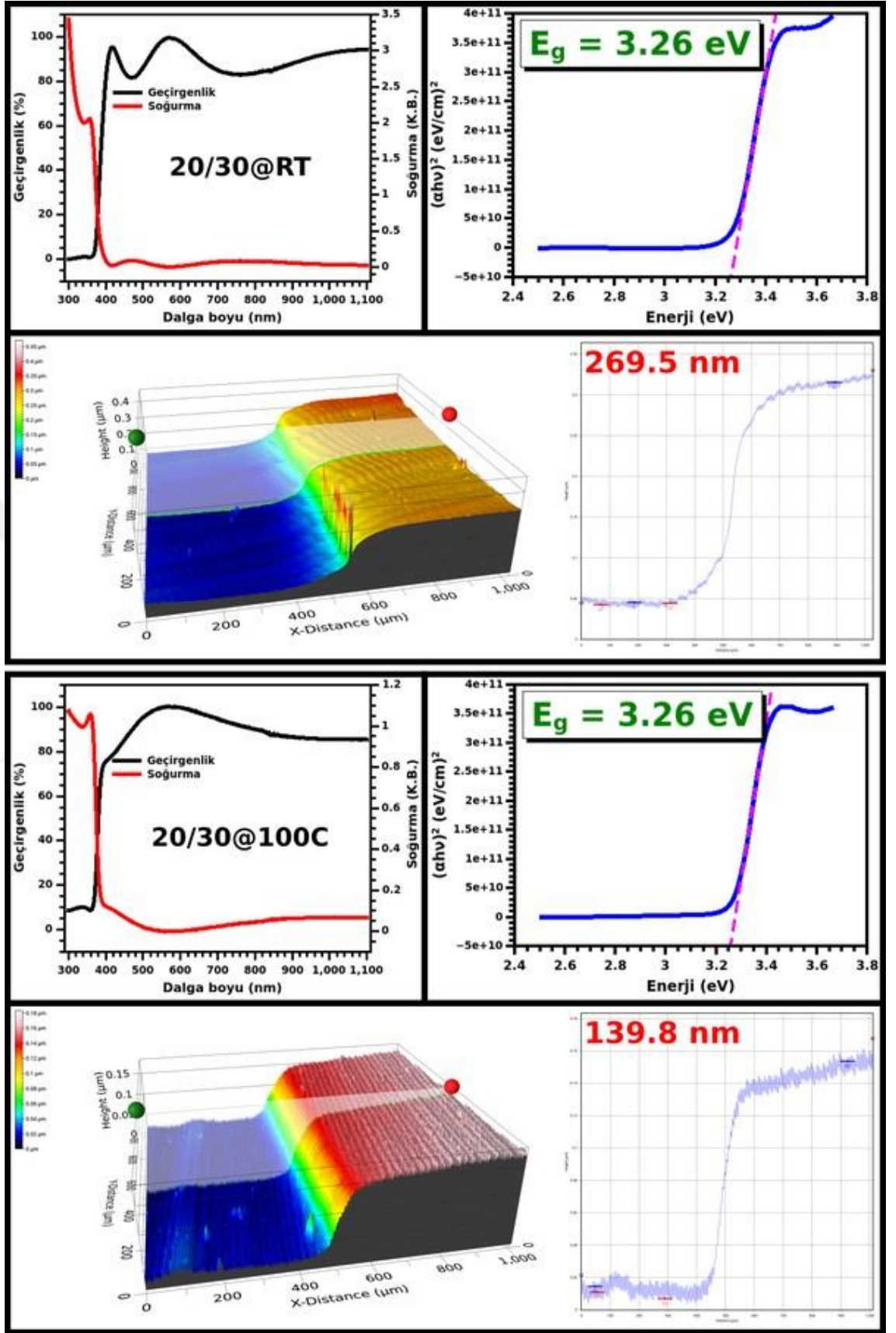
Şekil 4.36. 17.5/32.5@RT ve 17.5/32.5@100C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.



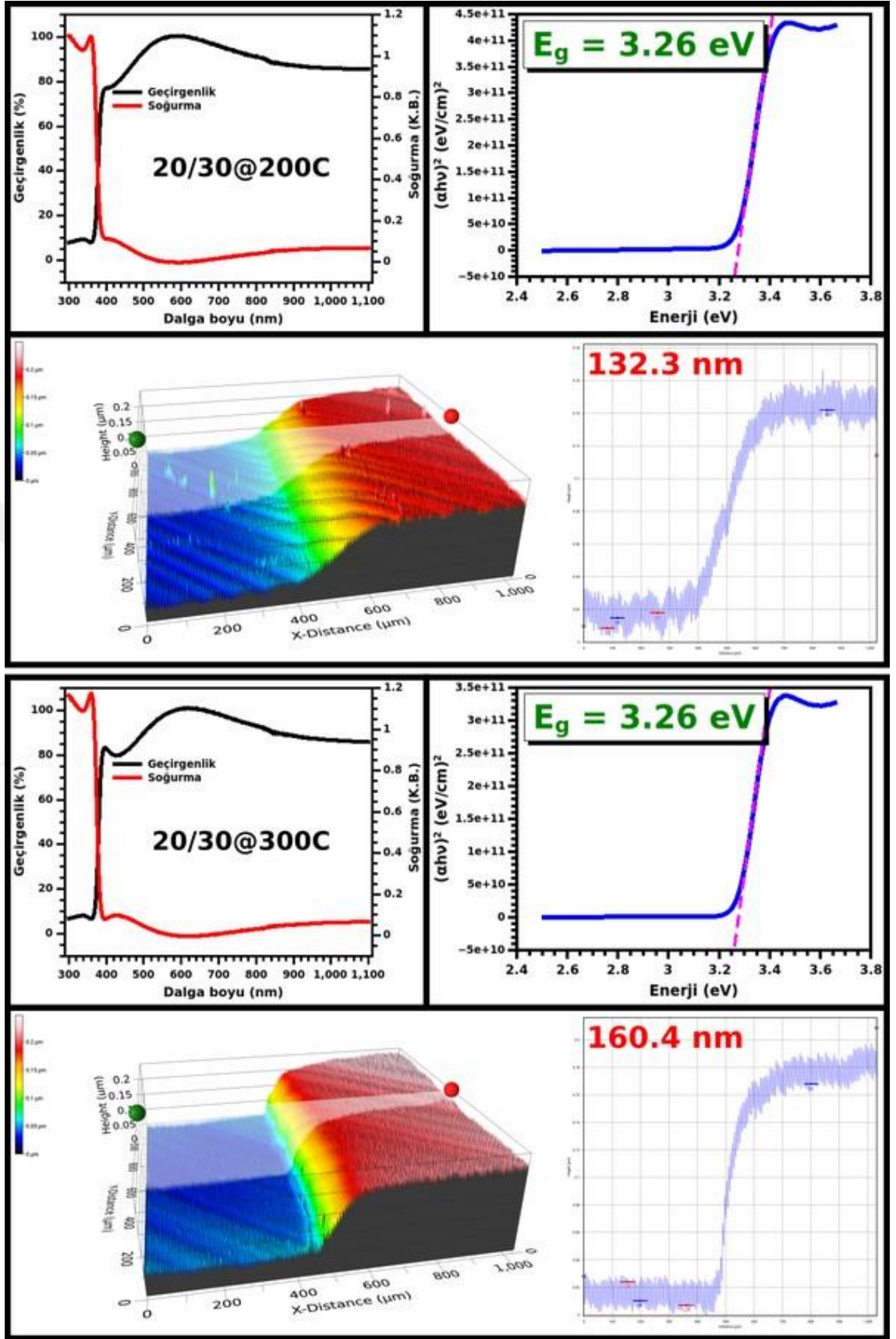
Şekil 4.37. 17.5/32.5@200C ve 7.5/32.5@300C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.

Şekil 4.36'te ve 4.37'de farklı sıcaklıklarda büyüyen 17.5/32.5 örneklerine ilişkin optik özellikler gösterilmektedir. Bütün örnekler ~ 400 nm ve üzerindeki dalga boylarında yüksek geçirgenliğe sahiptir. Bu seride de oksijen miktarının artışının filmin kalınlığındaki etkisi gözlemlenmekte olup film kalınlıkları ~ 283 nm ve altında tespit edilmiştir. Tespit edilen ortalama kalınlıklardan hesaplanan soğurma katsayısı ve bu katsayı kullanılarak elde edilen Tauc çizim ile optik bant aralığı tespit edilmiştir. Bütün örnekler için optik bant aralığı ~ 3.25 eV olarak tespit edilmiş olup bu değer literatürdeki verilerle uyumludur.





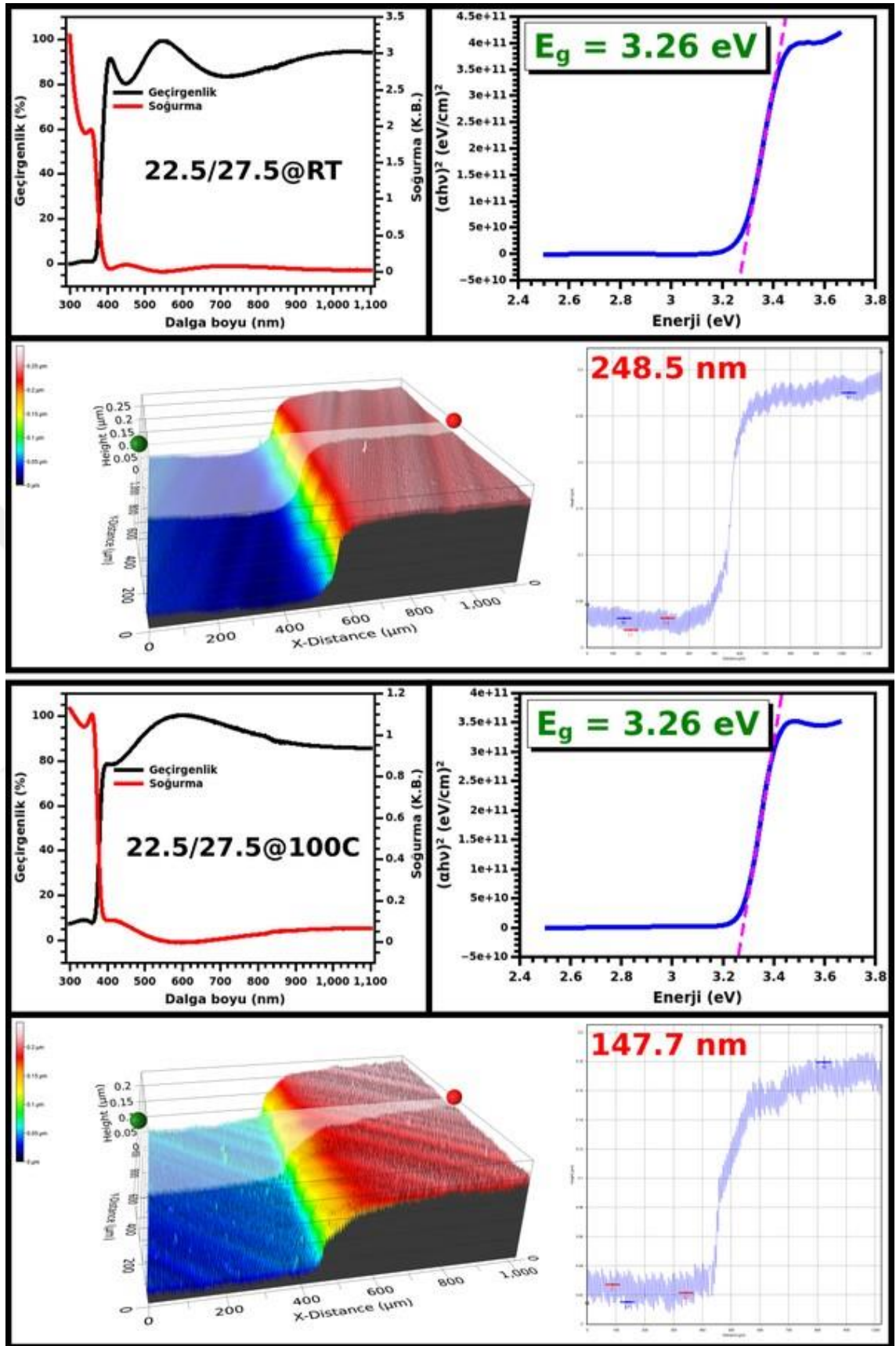
Şekil 4.38. 20/30@RT ve 20/30@100C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.



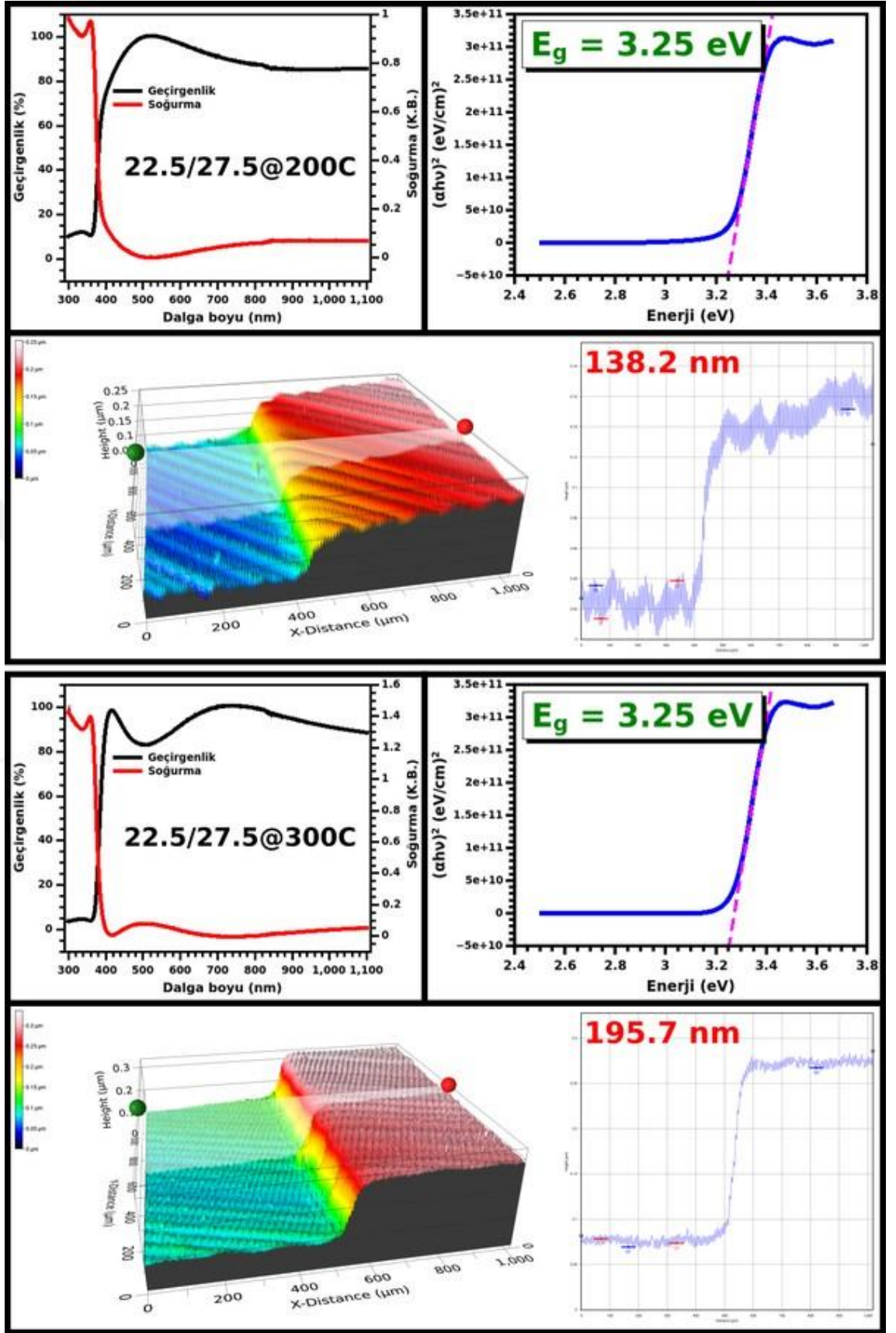
Şekil 4.39. 20/30@200C ve 20/30@300C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.

Şekil 4.38'te ve 4.39'de farklı sıcaklıklarda büyüyen 20/30 örneklerine ilişkin optik özellikler gösterilmektedir. Bütün örnekler ~ 400 nm ve üzerindeki dalga boylarında yüksek geçirgenliğe sahiptir. Büyütülen filmler içinde en kalın olanı oda sıcaklığında büyüyen örnektir. Ancak bu örnek daha düşük O_2/Ar oranlarında büyüyen örneklerle kıyasla oldukça incedir. Sıcaklık artışı ile genel olarak film kalınlığının ciddi miktarda azaldığı ve 200 nm'nin altına indiği söylenebilir. Bu seviyede O_2 tekrar kalınlıkta manidar bir düşüş meydana getiren ikinci bir basamak olarak düşünülebilir. Tespit edilen ortalama kalınlıklardan hesaplanan soğurma katsayısı ve bu katsayı kullanılarak elde edilen Tauc çizim ile optik bant aralığı tespit edilmiştir. Bütün örnekler için optik bant aralığı ~ 3.26 eV olarak tespit edilmiş olup bu değer literatürdeki verilerle uyumludur.





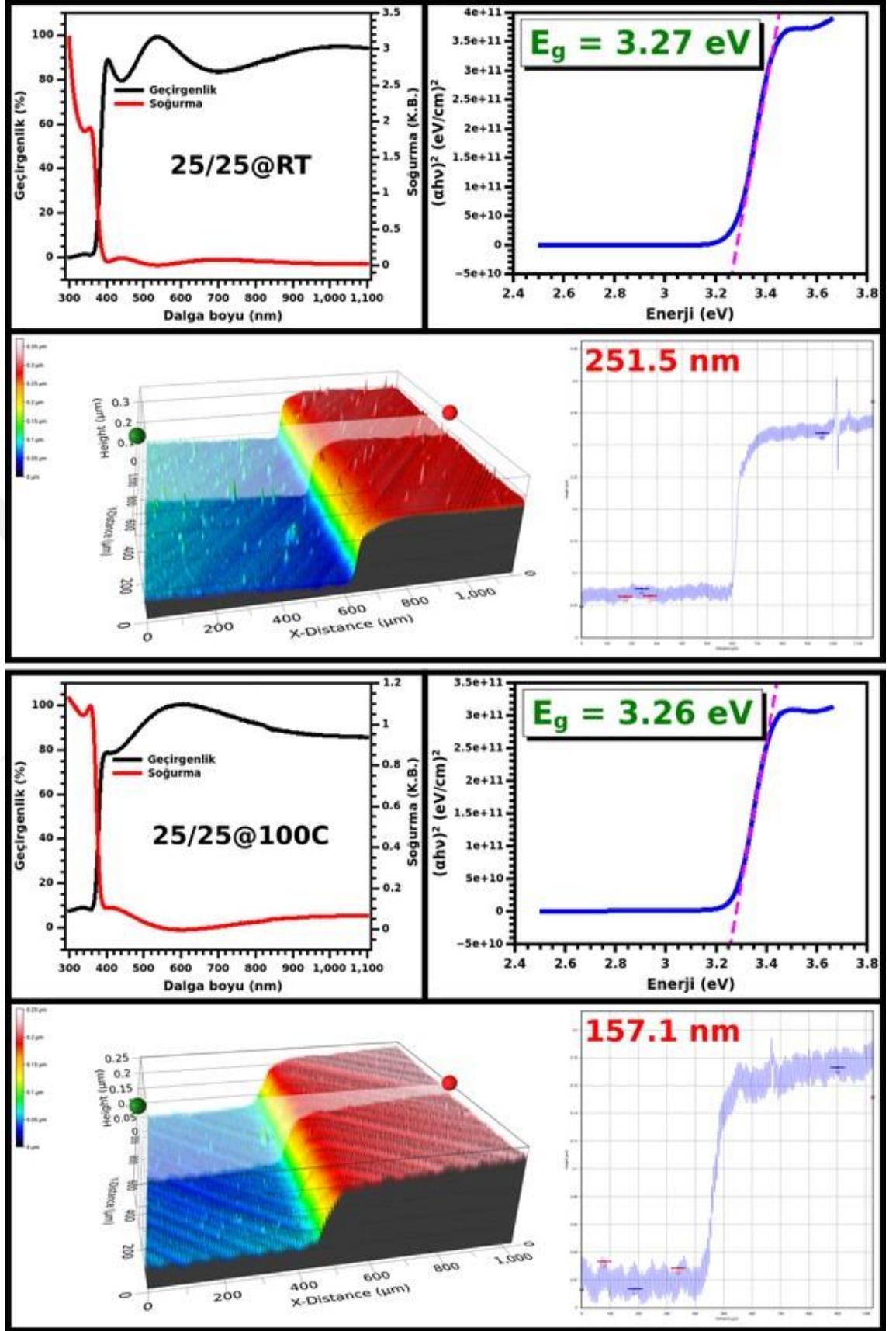
Şekil 4.40. 22.5/27.5@RT ve 22.5/27.5@100C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.



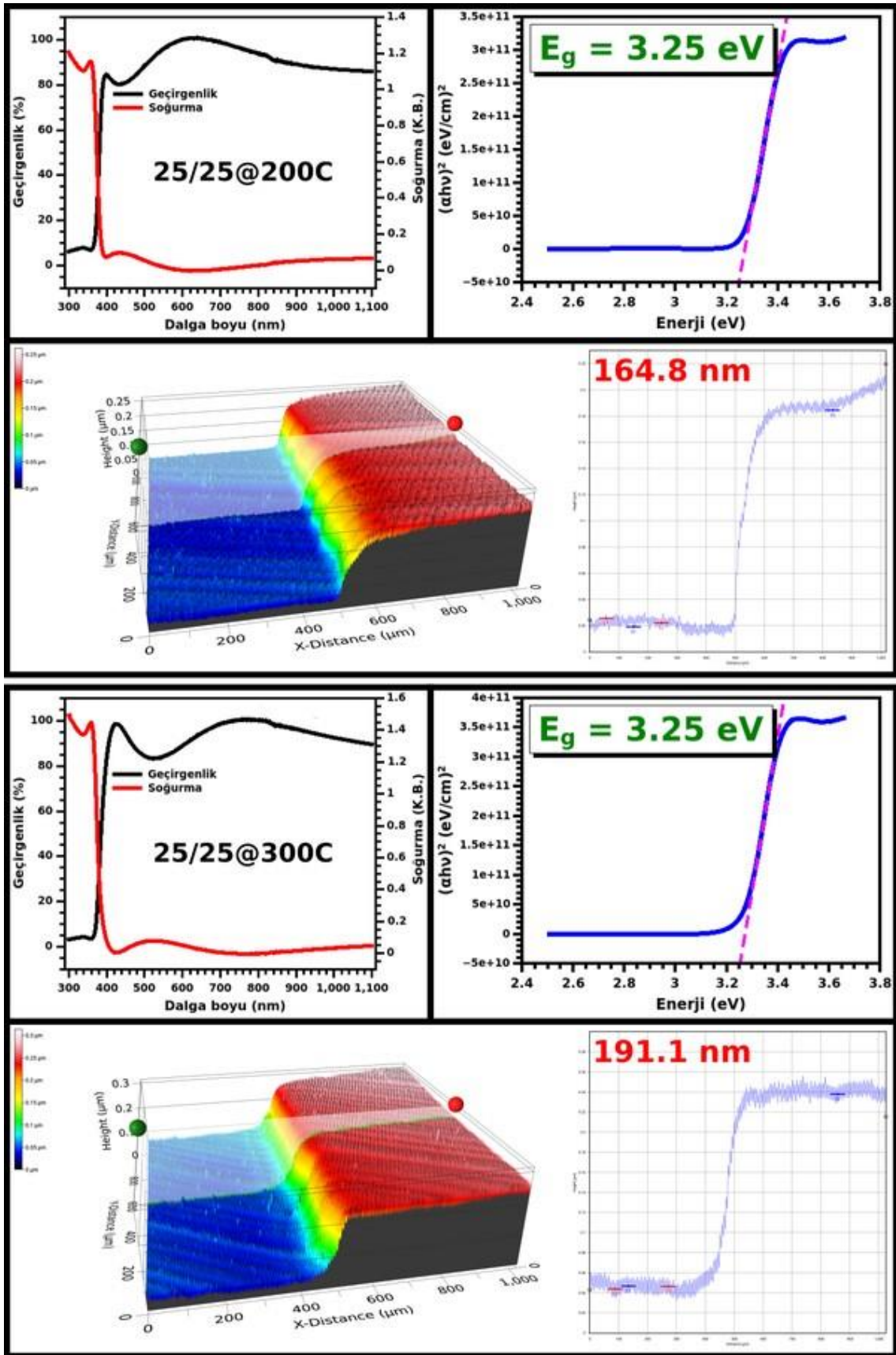
Şekil 4.41. 22.5/27.5@200C ve 22.5/27.5@300C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.

Şekil 4.40'ta ve 4.41'de farklı sıcaklıklarda büyüyen 22.5/27.5 örneklerine ilişkin optik özellikler gösterilmektedir. Bütün örnekler ~ 400 nm ve üzerindeki dalga boylarında yüksek geçirgenliğe sahiptir. Büyütülen filmler içinde en kalın olanı oda sıcaklığında büyüyen örnektir. Sıcaklık artışı ile genel olarak film kalınlığının ciddi miktarda azaldığı ve 140 nm seviyelerine kadar indiği söylenebilir. Tespit edilen ortalama kalınlıklardan hesaplanan soğurma katsayısı ve bu katsayı kullanılarak elde edilen Tauc çizim ile optik bant aralığı tespit edilmiştir. Bütün örnekler için optik bant aralığı ~ 3.26 eV olarak tespit edilmiş olup bu değer literatürdeki verilerle uyumludur.



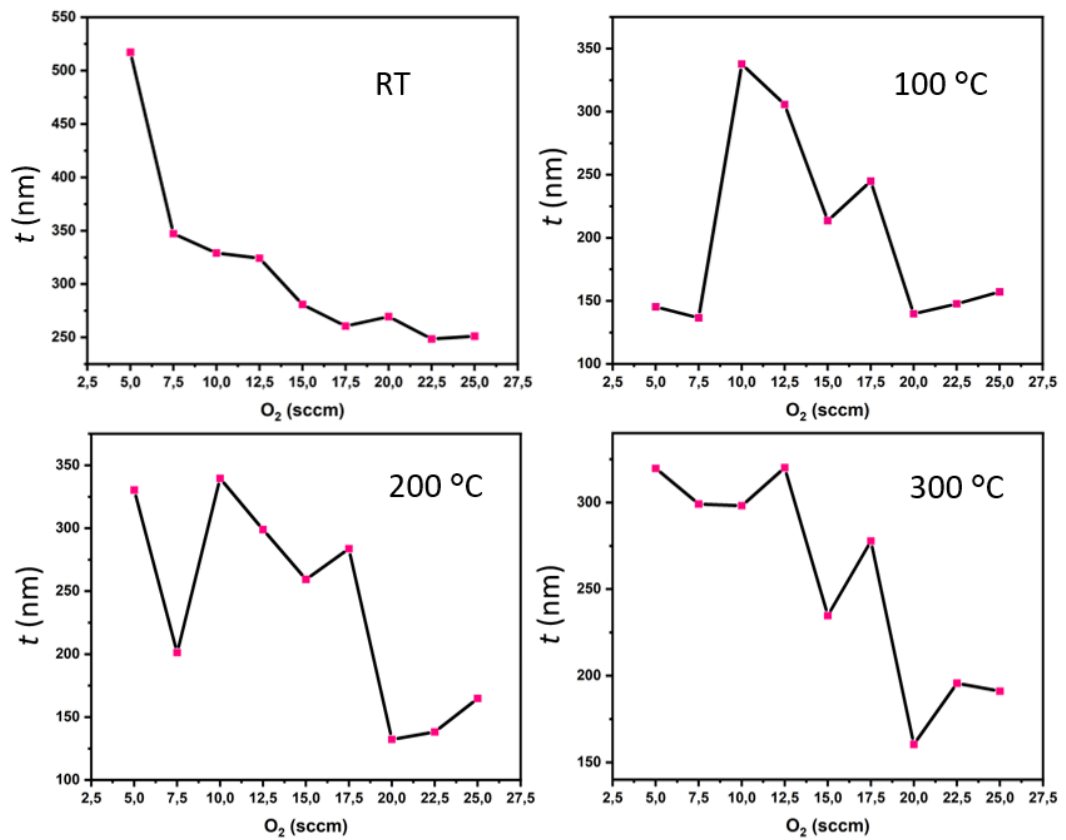


Şekil 4.42. 25/25@RT ve 25/25@100C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.



Şekil 4.43. 25/25 @200C ve 25/25@300C örneklerinin soğurma, geçirgenlik ve Tauc çizim grafikleri ile optik profilometre görüntüsü ve kalınlık ölçümü.

Şekil 4.42’de ve 4.43’te farklı sıcaklıklarda büyüyen 22.5/27.5 örneklerine ilişkin optik özellikler gösterilmektedir. Bütün örnekler ~ 400 nm ve üzerindeki dalga boylarında yüksek geçirgenliğe sahiptir. Büyütülen filmler içinde en kalın olanı oda sıcaklığında büyüyen örnektir. Sıcaklık artışı ile genel olarak film kalınlığının ciddi miktarda azaldığı ve 157 nm seviyelerine kadar indiği söylenebilir. Tespit edilen ortalama kalınlıklardan hesaplanan soğurma katsayısı ve bu katsayı kullanılarak elde edilen Tauc çizim ile optik bant aralığı tespit edilmiştir. Bütün örnekler için optik bant aralığı ~ 3.26 eV olarak tespit edilmiş olup bu değer literatürdeki verilerle uyumludur.



Şekil 4.43. Aynı O₂/Ar oranlarında oda sıcaklığı, 100 °C, 200 °C ve 300 °C alttaş sıcaklıklarında büyütilen filmlerin kalınlık yorumlama grafikleri.

Genel olarak optik özelliklerin incelenmesi sonucunda tüm örneklerin yüksek geçirgenliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.43’ te görüldüğü üzere film kalınlıkları sıcaklık artışı ile azalmakla birlikte seriler içinde genel olarak en ince örnekler 100 °C sıcaklıkta büyüyen örnekler olarak tespit edilmiştir. Özellikle O₂/Ar oranı 15/35 olduğunda kalınlıklarda hızlı bir azalma olduğu söylenebilir. Yine 20/30 O₂/Ar oranında da manidar bir azalma olduğu söylenebilir. Bu değerden sonra O₂

miktarının artışı ile filmin kalınlığının anlamlı bir şekilde değişmediği söylenebilir. Elde edilen kalınlıklardan hareketle hesaplanan soğurma katsayıları ve bant aralığı hesaplamalarında bant aralığının yaklaşık $\sim 3.22 - 3.26$ eV aralığında olduğu ve genel olarak 3.25 eV civarında seyrettiği tespit edilmiştir. O₂ miktarı bant aralığı ve optik özellikleri değiştirmezken filmin büyüme hızını değiştirmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çinko oksit (ZnO) ince filmler, sensörler, fotodetektörler, LED'ler, transistörler gibi birçok önemli uygulamada ve ayrıca güneş pillerinde iletken bir tabaka olarak yaygın olarak kullanılan II-IV yarı iletkenidir. ZnO, vakumlu ve vakumsuz proseslerle üretilebilir ve her iki yöntem de kendine göre avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, homojen yüksek kristalliğe sahip bir ZnO ince filmi üretmek için vakumlu işlem daha çok tercih edilir.

Tez çalışmasında reaktif magnetik alan sıçratma tekniği ile farklı oksijen miktarları ile metalik Zn hedeften ZnO ince filmler cam üzerine büyütülmüştür. Büyütme esnasında her bir O₂ miktarı için oda sıcaklığı ile birlikte 100, 200 ve 300 °C alttaş sıcaklıklarında büyütme yapılmış böylece hem O₂'nin hem de sıcaklığın filmin büyüme mekanizmasına etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Bütün filmler $\sim 5.1 \times 10^{-3}$ Torr biriktirme basıncında büyütülmüştür. Büyütme esnasında hedef malzemeye uygulanan güç 3 W/cm² olarak belirlenmiş ve bu sabit değer tutulmuştur.

Büyütme işlemine en düşük O₂ miktarı olarak 2.5 sccm O₂ ve 47.5 sccm Ar gazı ile başlanmıştır. Bu büyütme sonucu elde edilen filmin XRD analizinden Zn miktarının fazla olduğu tespit edilmiştir. Yine filmin saydamlığının düşük olması ZnO oluşumunun tam olarak gerçekleşmediği olarak yorumlanmıştır. Bundan dolayı bu O₂ miktarında büyütme farklı sıcaklıklarda büyütme gerçekleştirilmemiştir.

Daha sonra filmler büyütme boyunca vakum kazanı içindeki toplam gaz akışı 50 sccm olacak şekilde her defasında 2.5 sccm O₂ artırılması ve 2.5 sccm Ar azaltılması ile farklı O₂/Ar oranlarında gerçekleştirilmiştir. O₂/Ar oranı 1 olduğu zaman (25/25) üretim durdurulmuştur.

Yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular incelendiğinde bütün filmlerin yüksek yönelime sahip hegzagonal wurtzite yapısında olduğu ve bunun O₂ miktarına bağlı olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca Raman spektrumları da wurtzite yapısının varlığını doğrulamaktadır. FE-SEM ve AFM sonuçları ise oluşan filmlerdeki taneciklerin oda sıcaklığı, 100 °C ve 200 °C'de çok değişmediği ancak 300 °C sıcaklıkta büyütülen filmlerin taneciklerinin düzgün olmayan büyümeler gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak bu durum yüksek O₂ miktarlarında daha az gözlemlenmiştir. Yine optik ölçümler sonucunda bütün filmler yüksek saydamlığa sahip olarak tespit edilmiştir. Optik profilometre sonuçları oda sıcaklığında büyütülen filmlerin kalınlığının en yüksek olduğu ve genel olarak 100 °C'de büyüyen filmlerin kalınlığının da en küçük

olduğunu göstermiştir. 200 °C ve 300 °C’de büyüyen filmlerin kalınlıklarında ise tekrar bir artış meydana gelmekte ancak oda sıcaklığında büyütülen filmin kalınlığının altında kalmaktadır. Genel olarak O₂ miktarının artışı ile film kalınlığı azalma eğilimi göstermiştir. Bunun nedeni olarak da plazma gazı olarak kullanılan Ar gazı miktarının film büyütme esnasında içeriye daha az verilmesi ve metal Zn yüzeyinden daha az sayıda Zn atomunun saçılması buna bağlı olarak da oluşan ZnO miktarının azalması düşünülmüştür. Filmlerin kalınlıklarından ve soğurma spektrumundan elde edilen değerler ile her film için soğurma katsayısı hesaplanmış ve Tauc çizimleri yapılmıştır. Bu çizimler yaklaşık olarak filmlerin optik bant aralığını vermektedir. Bütün filmler için bant aralığı ~3.25 eV seviyelerindedir.

Geniş bir skalada optimizasyonu yapılan ZnO ince filmlerden en uygun olanlarına farklı metaller katılarak iletkenlik değerlerinin değiştirilmesi ve grafen gibi farklı yüzeylerdeki büyüme formasyonunun incelenmesi çalışmada önerilmektedir. Bunlara ek olarak farklı alttaşların ve parametrelerin etkisi incelenebilir. Elde edilen bulguların sebeplerinin net olarak belirlenebilmesi için ileri karakterizasyonlar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdallah, B., Jazmati, A. K., & Refaai, R. (2017). Oxygen Effect on Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited by RF Magnetron Sputtering. *Materials Research*, 20, 607-612. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0478>
- Alkhayatt, A., & Hussian, S. K. (2017). Fluorine Dopant Concentration Effect on the Structural and optical Properties of Spray Deposited Nanocrystalline ZnO Thin Films. *Surfaces and interfaces*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.06.003>
- Arnold, M. S., Avouris, P., Pan, Z. W., & Wang, Z. L. (2003). Field-Effect Transistors Based on Single Semiconducting Oxide Nanobelts. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(3), 659-663. <https://doi.org/10.1021/jp0271054>
- Aydın, C. (2020). The Dispersion Energy Parameters, Linear and Nonlinear Optical Properties of Transparent Mn:ZnO Nanolayers. *European Mechanical Science*, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.26701/ems.710165>
- Ayturan, Z. C., & Dursun, Ş. (2020). Cam Yüzeğe Ag ve Ni Nano Parçacıkların Tutunmasına Hazırlama Tekniğinin Etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 765-782. <https://doi.org/10.29130/dubited.560819>
- Beşergil, B. (t.y.). *Pulslu Lazer Depozisyon (pulsed laser deposition)*. Prof. Dr. Bilsen Beşergil. Geliş tarihi 07 Haziran 2023, <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/pulslu-lazer-depozisyon-pulsed-laser.html>
- Bosco, B., van den Beucken, J., Leeuwenburgh, S., & Jansen, J. (2012). Surface Engineering for Bone Implants: A Trend from Passive to Active Surfaces. *Coatings*, 2, 95-119. <https://doi.org/10.3390/coatings2030095>
- Carcia, P. F., McLean, R. S., Reilly, M. H., & Nunes, G., Jr. (2003). Transparent ZnO Thin-Film Transistor Fabricated by RF Magnetron Sputtering. *Applied Physics Letters*, 82(7), 1117-1119. <https://doi.org/10.1063/1.1553997>
- Demirci, B. (2006). *İndiyum Katkılı ZnO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri* [Yüksek Lisans Tezi]. Anadolu Üniversitesi.
- Fan, Z., & Lu, J. G. (2005). Zinc Oxide Nanostructures: Synthesis and Properties. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 5(10), 1561-1573. <https://doi.org/10.1166/jnn.2005.182>
- Fortunato, E. M. C., Barquinha, P. M. C., Pimentel, A. C. M. B. G., Gonçalves, A. M. F., Marques, A. J. S., Pereira, L. M. N., & Martins, R. F. P. (2005). Fully Transparent ZnO Thin-Film Transistor Produced at Room Temperature. *Advanced Materials*, 17(5), 590-594. <https://doi.org/10.1002/adma.200400368>
- Gao, W., & Li, Z. (2004). ZnO thin films produced by magnetron sputtering. *Ceramics International*, 30(7), 1155-1159. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2003.12.197>

- Gonçalves, R. S., Barrozo, P., Brito, G. L., Viana, B. C., & Cunha, F. (2018). The Effect of Thickness on Optical, Structural and Growth Mechanism of ZnO Thin Film Prepared by Magnetron Sputtering. *Thin Solid Films*, 661, 40-45. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.07.008>
- Gong, H., Hu, J. Q., Wang, J. H., Ong, C. H., & Zhu, F. R. (2006). Nano-Crystalline Cu-doped ZnO Thin Film Gas Sensor for CO. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 115(1), 247-251. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.09.008>
- Hafdallah, A., Herissi, L., Aida, M. s, & Attaf, N. (2018). Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Pyrolysis Spray Method: Effect of Al Doping. *Nanotechnology Letters*, 2, 1-3.
- Hamberg, I., & Granqvist, C. G. (1986). Evaporated Sn-Doped In₂O₃ Films: Basic Optical Properties and Applications to Energy-Efficient Windows. *Journal of Applied Physics*, 60(11), R123-R160. <https://doi.org/10.1063/1.337534>
- Hao, Q. (2020). Improved Manufacturing Processes for Better Materials Properties—From Quantum Dots to Bulk Materials. *ES Materials & Manufacturing, Volume 8 (June 2020)(0)*, 1-2.
- Henley, S. J., Ashfold, M. N. R., & Cherns, D. (2004). The Growth of Transparent Conducting ZnO Films by Pulsed Laser Ablation. *Surface and Coatings Technology*, 177-178, 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.09.005>
- Hong, C.-S., Park, H.-H., Moon, J., & Park, H.-H. (2006). Effect of Metal (Al, Ga, and In)-Dopants and/or Ag-Nanoparticles on the Optical and Electrical Properties of ZnO Thin Films. *Thin Solid Films*, 515(3), 957-960. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.055>
- Imran, M., Ahmad, R., Afzal, N., & Rafique, M. (2019). Copper Ion Implantation Effects in ZnO Film Deposited on Flexible Polymer by DC Magnetron Sputtering. *Vacuum*, 165, 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.04.010>
- Ismail, A., & Abdullah, M. J. (2013). The Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Prepared at Different RF Sputtering Power. *Journal of King Saud University - Science*, 25(3), 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2012.12.004>
- Janotti, A., & Van de Walle, C. (2009). Fundamentals of Zinc Oxide As a Semiconductor. *Reports on Progress in Physics*, 72, 126501. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/72/12/126501>
- Jin, T., Han, Q., Wang, Y., & Jiao, L. (2018). 1D Nanomaterials: Design, Synthesis, and Applications in Sodium-Ion Batteries. *Small*, 14(2), 1703086. <https://doi.org/10.1002/smll.201703086>
- Karataş, A. (2020). Çok Fazlı Molibden Oksitten Molibden Disülfür İnce Film Büyütülmesi [Yüksek Lisans Tezi].

- Khan, M., & Faruque Ahmed, Sk. (2021). Effect of The Distance Between Cathode and Substrate on Structural and Optical Properties of Zinc Oxide Thin Films Deposited by RF Sputtering Technique. *Materials Physics and Mechanics*, 872-884. https://doi.org/10.18149/MPM.4762021_7
- Klingshirn, C. (2007). ZnO: From Basics Towards Applications. *Physica Status Solid*, 244(9), 3027-3073. <https://doi.org/10.1002/pssb.200743072>
- Laks, D. B., Van De Walle, C. G., Neumark, G. F., & Pantelides, S. T. (1993). Acceptor Doping in ZnSe Versus ZnTe. *Applied Physics Letters*, 63(10), 1375-1377. <https://doi.org/10.1063/1.109681>
- Li, Z., Yang, R., Yu, M., Bai, F., Li, C., & Wang, Z. L. (2008). Cellular Level Biocompatibility and Biosafety of ZnO Nanowires. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(51), 20114-20117. <https://doi.org/10.1021/jp808878p>
- Look, D. C., Hemsley, J. W., & Sizelove, J. R. (1999). Residual Native Shallow Donor in ZnO. *Physical Review Letters*, 82(12), 2552-2555. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.2552>
- Minami, T. (2005). Transparent Conducting Oxide Semiconductors for Transparent Electrodes. *Semiconductor Science and Technology*, 20(4), S35. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/4/004>
- Moumen, A., Kaur, N., Poli, N., Zappa, D., & Comini, E. (2020). One Dimensional ZnO Nanostructures: Growth and Chemical Sensing Performances. *Nanomaterials*, 10(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/nano10101940>
- Nanto, H., Minami, T., & Takata, S. (1986). Zinc-Oxide Thin-Film Ammonia Gas Sensors with High Sensitivity and Excellent Selectivity. *Journal of Applied Physics*, 60(2), 482-484. Scopus. <https://doi.org/10.1063/1.337435>
- Navale, Y., Ingole, S., Dhanawade, R., Salunkhe, A., & Patil, Dr. V. (2020). NO₂ Gas Sensor Based on ZnO Nanorods Synthesised by Thermal Evaporation Method. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16962-6_32
- Norton, D. P., Heo, Y. W., Ivill, M. P., Ip, K., Pearton, S. J., Chisholm, M. F., & Steiner, T. (2004). ZnO: Growth, Doping & Processing. *Materials Today*, 7(6), 34-40. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(04\)00287-1](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(04)00287-1)
- Özgür, Ü., Alivov, Y., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M., Dogan, S., Avrutin, V., Cho, S.-J., & Morkoç, H. (2005). A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices. *Journal of Applied Physics*, 98, 041301-041301. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
- Papari, G. P., Abdallah, B., Vitiello, G., De Stefano, L., Rea, I., Luciani, G., Aronne, A., & Andreone, A. (2017). On the Morphological, Structural and Charge Transfer Properties of F-Doped ZnO: A Spectroscopic Investigation. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b04821>

- Qurashi, A., Subrahmanyam, K. S., & Kumar, P. (2015). Nanofiller Graphene–ZnO Hybrid Nanoarchitecture: Optical, Electrical and Optoelectronic Investigation. *Journal of Materials Chemistry C*, 3(45), 11959-11964. <https://doi.org/10.1039/C5TC02729B>
- Rajesh, Y., Kumar Padhi, S., & Ghanashyam Krishna, M. (2020). ZnO Thin Film-Nanowire Array Homo-Structures with Tunable Photoluminescence and Optical Band Gap. *RSC Advances*, 10(43), 25721-25729. <https://doi.org/10.1039/D0RA04524A>
- Sajjad, M., Ullah, I., Khan, M. I., Khan, J., Khan, M. Y., & Qureshi, M. T. (2018). Structural and Optical Properties of Pure and Copper Doped Zinc Oxide Nanoparticles. *Results in Physics*, 9, 1301-1309. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.04.010>
- Sim, K. U., Shin, S. W., Moholkar, A. V., Yun, J. H., Moon, J. H., & Kim, J. H. (2010). Effects of Dopant (Al, Ga, and In) on The Characteristics of ZnO Thin Films prepared by RF Magnetron Sputtering System. *Current Applied Physics*, 10(3, Supplement), S463-S467. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.02.028>
- Steiner, T. D. (2004). *Semiconductor Nanostructures for Optoelectronic Applications*. Artech House.
- Taktakoğlu, R., & Kavak, H. (2016). Electrochemically Growth of ZnO Thin Film and Characterization. *Ç.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34-3, 4.
- Tauc, J., Grigorovici, R., & Vancu, A. (1966). Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Germanium. *Physica Status Solid*, 15(2), 627-637. <https://doi.org/10.1002/pssb.19660150224>
- Toygun, Ş., Köneçoğlu, G., & Kalpaklı, Y. (2013). General Principles of Sol – Gel. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 31(4), Article 4.
- Türhan, İ. (2000). *TiO₂ ve Katkılı TiO₂ İnce Filmlerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. <http://hdl.handle.net/11527/22843>
- Vijayaprasath, G., Sakthivel, P., Murugan, R., Mahalingam, T., & Ravi, G. (2016). Deposition and Characterization of ZnO/NiO Thin Films. *AIP Conference Proceedings*, 1731(1), 080033. <https://doi.org/10.1063/1.4947911>
- Vogel, D., Krüger, P., & Pollmann, J. (1995). Ab Initio Electronic-Structure Calculations for II-VI Semiconductors Using Self-Interaction-Corrected Pseudopotentials. *Physical Review B*, 52(20), R14316-R14319. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.R14316>
- Wager, J. F. (2003). Applied physics. Transparent electronics. *Science (New York, N.Y.)*, 300(5623), 1245-1246. <https://doi.org/10.1126/science.1085276>

- Wang, Z. L. (2004). Zinc Oxide Nanostructures: Growth, Properties and Applications. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 16(25), R829. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/16/25/R01>
- Xu, S., & Wang, Z. (2011). One-Dimensional ZnO Nanostructures: Solution Growth and Functional Properties. *Nano Research*, 4, 1013-1098. <https://doi.org/10.1007/s12274-011-0160-7>
- Yusof, A. S., Hassan, Z., & Zainal, N. (2018). Fabrication and Characterization of Copper Doped Zinc Oxide by Using Co-Sputtering Technique. *Materials Research Bulletin*, 97, 314-318. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.09.031>
- Zhang, J.-Y., Li, P.-J., Sun, H., Shen, X., Deng, T.-S., Zhu, K.-T., Zhang, Q.-F., & Wu, J.-L. (2008). Ultraviolet Electroluminescence From Controlled Arsenic-Doped ZnO Nanowire Homo Junctions. *Applied Physics Letters*, 93(2), 021116. <https://doi.org/10.1063/1.2958230>
- Zhang, Q., Sando, D., & Valanoor, N. (2016). Chemical Route derived Bismuth Ferrite Thin films and Nanomaterials. *Journal of Materials Chemistry C*, 4. <https://doi.org/10.1039/C6TC00243A>
- Zhao, Y., Ding, W., Xiao, Y., & Yang, P. (2023). Manipulating the Optoelectronic Characteristic of AZO Films by Magnetron Sputtering Power. *Vacuum*, 210, 111849. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111849>