

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**



**AlGaN İNCE FİLMİNDE SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN YÜZEY  
YAPISINA ETKİSİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AHMET AYAZ**

**BALIKESİR, OCAK - 2015**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**



**AIGaN İNCE FİLMİNDE SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN YÜZEY  
YAPISINA ETKİSİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AHMET AYAZ**

**BALIKESİR, OCAK - 2015**

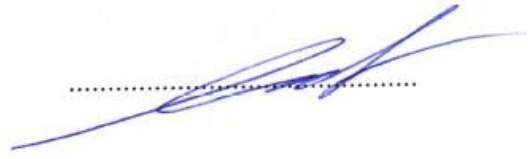
## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Ahmet AYAZ** tarafından hazırlanan “**AIGaN İNCE FİLMİNDE SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN YÜZEY YAPISINA ETKİSİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 07/01/2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

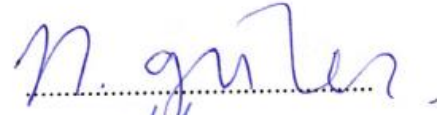
Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Doç. Dr. Orhan ZEYBEK



Üye  
Prof. Dr. Halil GÜLER



Üye  
Yrd. Doç. Dr. Remziye TÜLEK



Üye  
Doç. Dr. Orhan ZEYBEK



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Cihan ÖZGÜR

.....

## ÖZET

# AIGaN İNCE FİLMİNDE SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN YÜZEY YAPISINA ETKİSİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**AHMET AYAZ**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ORHAN ZEYBEK)**

**BALIKESİR, OCAK - 2015**

Bu tez çalışmasında metal organik kimyasal buhar birikim tekniğiyle büyütülen AlGa<sub>N</sub> yarıiletken ince filmde sıcaklık değişiminin yüzey yapısına etkisi nümerik olarak incelendi. Atomik kuvvet mikroskobu kullanılarak elde edilen morfolojik görüntüler üzerinde nümerik çalışmalar gerçekleştirildi. Nümerik çalışmalar yani tavlama sıcaklığının tanecik boyutuna, fraktal boyutuna, karekök ortalama (RMS) pürüzlülük değerine, Hurst eksponansiyel değerine ve kaplama oranına etkisi incelendi. Ayrıca bu parametrelerin kendi aralarındaki etkileşimleri de incelendi. Tanecik boyutunun sıcaklıkla değişimi üstel büyüme fonksiyonuna uyan bir davranış gösterdi. 1000 °C üzerindeki sıcaklıklarda tanecik boyutunda büyük bir artış olduğu bulundu. Fraktal boyut değerinin sıcaklığa 3. dereceden bir fonksiyonla bağlıdır. Düzenli ve birbirini tekrarlayan yapı yüksek sıcaklıklarda tamamıyla bozulduğu gözlemlendi. AlGa<sub>N</sub> yarıiletken yüzey pürüzlülüğü 1000 °C'nin altındaki sıcaklık değerlerinde düşük ve 1000 °C'nin üzerine çıktığında ise bu değer yüksek olduğu bulundu. Uzunluk değeri, L, arttıkça RMS pürüzlülük değerinin artış gösterdiği bulundu. Sıcaklık arttıkça Hurst eksponansiyel değerinin, sıcaklığa 2. dereceden bir fonksiyona bağlı olarak arttığı bulundu. Sıcaklık artışı ile yüzeydeki noktaların görüntüyü kaplama oranında bir yükseliş olduğu gözlemlendi. Hurst eksponansiyel değerinin fraktal boyuta üstel bir fonksiyonla bağlı olduğu görüldü. Fraktal boyut değerinin Hurst eksponansiyel değerinin artmasıyla azaldığı bulundu. Hurst eksponansiyel değeri fazla artınca, fraktal boyut değerinde ani bir düşüş gözlemlendi. Tanecik boyutunun fraktal boyut ile değişimi eksponansiyel fonksiyona uymaktadır. Sonuç olarak, sıcaklık artışının, tanecik boyutu değerinde artışa neden olduğu ve buna karşılık fraktal boyut değerinde azalma oluşturduğu görüldü. Tanecik boyutunun RMS pürüzlülük değerine bağlı değişiminde orantılı bir artış görüldü. Sıcaklık arttıkça tanecik yapısı büyüklüğünde artış olduğu bulundu. Tanecik boyutu arttıkça da RMS pürüzlülük değerinde artış olduğu bulundu.

**ANAHTAR KELİMELER:** AlGa<sub>N</sub> ince film, tanecik boyutu, fraktal boyut, pürüzlülük değeri, Hurst eksponansiyel değeri, kaplama oranı

## **ABSTRACT**

### **IN THE AlGa<sub>N</sub> THIN FILM NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TEMPERATURE CHANGE TO SURFACE STRUCTURE**

**MSc THESIS**

**AHMET AYAZ**

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**PHYSICS**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ORHAN ZEYBEK )**

**BALIKESİR, JANUARY 2015**

In this thesis, the temperature influences on the surface structure of the grown AlGa<sub>N</sub> semiconductor thin film using metal organic chemical vapour deposition was investigated numerically. Numerical studies were carried out on the morphological images, which were obtained by atomic force microscopy. Numerical studies, in other words, an effect of the annealing temperature on the particle size, the fractal dimension, the root mean square (RMS), the roughness, the Hurst exponent value and the coverage were examined. It was also investigated any changes between them. The temperature dependence on the particle size was shown a similar behaviour with the exponential growth. It is also found that at above 1000 °C, the particle size was increased sharply. The value of the fractal dimension is depended on the temperature as a function of the temperature in degrees three. It was also observed that the regular and repetitive structure was disrupted on the high temperature. It is found that AlGa<sub>N</sub> semiconductor surface roughness was low below 1000 °C and was high above 1000 °C. When the value of the length, L, was increased, the value of the RMS roughness was increased. It is found that when temperature was increased, the exponent Hurst value was increased as a function of temperature in degrees two. It is observed that the rate of the occupied fraction on the surface point was increased. It is also observed that the value of Hurst exponent was depended on the fractal dimension with an exponent function. It is found that when Hurst exponent value was increased, the fractal dimension value was decreased. Hurst exponent value is more increased, the value of fractal dimension was observed a sudden drop. An exchange with the fractal dimension and the particle size is in good agreement. In a result, increasing temperature value was caused in increasing the value of the particle size. It is observed that the changes with particle size and RMS roughness were in good agreement. Particle size was increased with increasing temperature. In a result, RMS roughness value was increased with increasing temperature.

**KEYWORDS:** AlGa<sub>N</sub> thin film, grain size, fractal dimension, roughness value, Hurst exponent value, occupied fraction

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ.....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KATILARIN YAPISAL VE YÜZEYSEL ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>3</b>
2.1 Giriş .....	3
2.2 Pürüzlülük (Roughness).....	3
2.3 Genlik parametresi.....	5
2.4 RMS Pürüzlülük Değeri.....	5
2.5 Fraktal Boyut (Fractal Dimension) .....	6
2.6 Tanecik Boyutu (Grain Size).....	10
2.7 Ölçekleme Teorisi.....	11
2.8 Hurst Eksponansiyel Değeri.....	12
2.9 Kaplama Oranı (Occupied Fraction).....	13
<b>3. YÖNTEM .....</b>	<b>15</b>
3.1 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	16
3.2 Numunenin Tavlama Oranı .....	17
3.3 Yüzey Morfolojisi Parametreleri Üzerine Nümerik Hesaplamalar .....	22
3.3.1 Karekök Ortalama Pürüzlülük Değerinin (RMS) Bulunması.....	22
3.3.2 Fraktal Boyut (Fractal Dimension) Değerinin Hesaplanması.....	23
3.3.3 Tanecik Boyutu (Grain Size) Değerinin Bulunması .....	23
3.3.4 Hurst Eksponansiyel Değerinin Hesaplanması.....	23
3.3.5 Kaplama Oranı (Occupied Fraction) .....	24
3.3.6 Ölçekleme Teorisi (Scaling Theory) .....	28
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>29</b>
4.1 Tanecik Boyutunun Sıcaklığa Bağlı Değişimi .....	30
4.2 Fraktal Boyutun Sıcaklığa Bağlı Değişimi .....	31
4.3 RMS Pürüzlülük Değerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi .....	33
4.4 Hurst Eksponansiyel Değerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi .....	34
4.5 Kaplama Oranının Sıcaklığa Bağlı Değişimi .....	36
4.6 Hurst Eksponansiyel Değerinin Fraktal Boyuta Bağlı Değişimi.....	37
4.7 Tanecik Boyutunun Fraktal Boyuta Bağlı Değişimi .....	38
4.8 Tanecik Boyutunun RMS Pürüzlülük Değerine Bağlı Değişimi .....	39
<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>41</b>
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>43</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1:</b> Buz kristali doğada en yaygın bulunan fraktallardan biridir .....	7
<b>Şekil 2.2:</b> Sierpinski üçgeni. ....	9
<b>Şekil 3.1:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin şematik gösterimi. ....	15
<b>Şekil 3.2:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 200 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu m^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri. ....	18
<b>Şekil 3.3:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 300 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu m^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri. ....	18
<b>Şekil 3.4:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 500 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu m^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri. ....	18
<b>Şekil 3.5:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 600 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu m^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri. ....	19
<b>Şekil 3.6:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 700 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu m^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri. ....	19
<b>Şekil 3.7:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 800 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu m^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri. ....	19
<b>Şekil 3.8:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 900 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu m^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri. ....	20
<b>Şekil 3.9:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 1000 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu m^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri. ....	20
<b>Şekil 3.10:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 1150 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu m^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri. ....	21
<b>Şekil 3.11:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 1200 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu m^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri. ....	21
<b>Şekil 3.12:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 200 °C’de binary formatına alınmış fotoğrafı. ....	25
<b>Şekil 3.13:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 500 °C’de binary formatına alınmış fotoğrafı. ....	25
<b>Şekil 3.14:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 900 °C’de binary formatına alınmış fotoğrafı. ....	26
<b>Şekil 3.15:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 1000 °C’de binary formatına alınmış fotoğrafı. ....	26
<b>Şekil 3.16:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 1150 °C’de binary formatına alınmış fotoğrafı. ....	27
<b>Şekil 3.17:</b> $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ yarıiletken ince filminin 1200 °C’de binary formatına alınmış fotoğrafı. ....	27

<b>Şekil 4.1:</b> Tanecik boyutunun sıcaklığa bağlı değişimi. ....	31
<b>Şekil 4.2:</b> Fraktal boyutun sıcaklığa bağlı değişimi. ....	32
<b>Şekil 4.3:</b> Pürüzlülük değeri RMS'in sıcaklığa bağlı değişim grafiği. ....	34
<b>Şekil 4.4:</b> Hurst eksponansiyel değerinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği. ....	35
<b>Şekil 4.5:</b> Kaplama oranının sıcaklığa bağlı değişim grafiği. ....	36
<b>Şekil 4.6:</b> Fraktal boyut değerinin Hurst eksponansiyel değerine bağlı değişim grafiği. ....	38
<b>Şekil 4.7:</b> Fraktal boyut değerinin tanecik boyutuna bağlı değişim grafiği. ....	39
<b>Şekil 4.8:</b> Tanecik boyutunun karekök ortalama pürüzlülük değerine (RMS) göre değişim grafiği. ....	40



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 4.1:</b> AlGaIn ince filminde sıcaklığa bağlı değişimleri incelenen parametre değerleri.....	29
<b>Tablo 4.2:</b> Tanecik boyutunun sıcaklığa bağlı matematiksel modelindeki sabit parametrelerin değerleri.....	30
<b>Tablo 4.3:</b> Fraktal boyutun sıcaklığa bağlı matematiksel modelindeki sabit parametrelerin değerleri.....	32
<b>Tablo 4.4:</b> Karekök ortalama pürüzlülük değerinin (RMS) sıcaklığa bağlı matematiksel modelindeki sabit parametrelerin değerleri.....	33
<b>Tablo 4.5:</b> Hurst eksponansiyel değerinin sıcaklığa bağlı matematiksel modelindeki sabit parametrelerin değerleri.....	35
<b>Tablo 4.6:</b> Kaplama oranının sıcaklığa bağlı matematiksel modelindeki sabit parametrelerin değerleri.....	36
<b>Tablo 4.7:</b> Hurst eksponansiyel değerinin fraktal boyuta bağlı matematiksel modelindeki sabit parametrelerin değerleri.....	37
<b>Tablo 4.8:</b> Tanecik boyutunun fraktal boyuta bağlı matematiksel modelindeki sabit parametrelerin değerleri.....	38
<b>Tablo 4.9:</b> Tanecik boyutunun karekök ortalama pürüzlülük değerine (RMS) bağlı matematiksel modelindeki sabit parametrelerin değerleri.....	40

## ÖNSÖZ

İlk olarak bana her zaman inanan, güvenen, beni her zaman destekleyen, benim için bir hocadan çok fazlası olan, bana çok şey öğreten, hocam ve danışmanım olduğu için kendimi her zaman şanslı olarak gördüğüm, bana her zaman örnek bir insan ve hoca olan, saygıdeğer fizikçi değerli hocam Sayın Doç. Dr. Orhan ZEYBEK'e en derin sevgilerim, saygılarım ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tezin ortaya çıkmasında öncelik eden Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi müdürü Prof. Dr. S. ÖZÇELİK'e ve laboratuvar çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez sürecinde değerli bilgilerini benimle paylaşan, bana vaktini ayıran değerli hocam Doç. Dr. Mehmet BAYIRLI'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisansım boyunca verdiği derslerle; her zaman olumlu, destekleyici cesaretlendirici tutumuyla; kişiliği ve fizik bilgisiyle bana kattıkları için Doç. Dr. Koray KÖKSAL'a teşekkür ederim.

Beni her zaman sevdiğini bildiğim, bana desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, gölgesinde olmaktan her zaman mutlu olduğum annem Sülbiye AYZAZ ve babam Mehmet Emin AYZAZ'a sonsuz teşekkür etsem yine de azdır. Ve onlara ömür boyu beni ben yaptıkları için müteşekkir kalacağım.

Ayrıca bu süreçte ve her zaman bana sahip çıkan, bana çalışabilmem için ortam sağlayan, beni destekleyen annemden ayırmadığım teyzem Kevser GÜREL ve eniştem Ramazan GÜREL; varlıkları bana mutluluk veren abim Mehmet AYZAZ, yengem Özlem AYZAZ ve biricik yeğenim Yiğit Efe AYZAZ iyi ki varsınız.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin gelişmesinin en önemli sebeplerinden biri çok küçük yapıların incelenebilir hale gelmesidir. Bu konuda fizik son derece fazla aşama kaydetmiştir. 20. yüzyılın son çeyreğinden günümüze kadar elektronik endüstrisi çok hızlı gelişmekte özellikle yarıiletkenlerin atomik düzeyde (2 ile 10 nanometre ya da 10 ile 50 atom çapında) kullanılması ile teknolojiye ilerleme kaydedilmiştir [1 - 3].

Yarıiletken fiziği hızlı gelişmekte, bunun nedeni ise dünyadaki katıların %80'nin yarı iletken özelliklerine sahip olması ve bu özelliklerin kontrol edilebilir ve ayarlanabilir olmasının yanında yarı iletkenlerin üstün özelliklere sahip olmaları ve elektronik yapıların hepsinde kullanılmalarıdır. Yarıiletkenlerin çok fazla çeşitleri ve özellikleri vardır. Bunların kullanım alanları çok yaygındır. Isı enerjisini direkt elektrik enerjisine dönüştürme ve elektrik enerjisini direkt soğutmaya çevirme gibi alanlarda yarı iletkenlerin özelliklerinden yararlanılmaktadır. Yarıiletken teknolojisinde elektriksel ve karakteristik özellikleri farklı olan birçok element kullanılmakta ve yenileri için araştırmalar yapılmaktadır [4, 5].

Yarıiletken yapıların önemli özellikleri vardır. Performansı ve üretimi daha iyi hale getirmek için bazı parametreler ölçülür. Yüzey yapısının ve pürüzlülüğünün ölçülmesi için iki nedeni vardır. Bunun amacı ilk olarak, kontrol etmektir, ikincisi ise üretim ve ürünlere iyi performans sağlamak için yardımcı olmaktır. Geometrik özellikler dikkate alındığında, pürüzlü yüzey iki temel geometrik özellik gösterir:

(1) Rastgele açı: Pürüzlü yüzey uzayda önemli ölçüde değişiklik gösterebilir ve geometrik formunu tanımlayabilmek için hiçbir özel fonksiyon yoktur.

(2) Yapısal açı: Pürüz değişiklikleri üç boyutlu uzaydan tamamen bağımsız değildir, ancak korelasyon uzaklığa bağlıdır. Özellikle yüzey dalgalanmaları tekrarlanan örneklerle hemen hemen karakterize edilebilir ve bu nedenle periyodiklik sık sık tanımlanır [6].

Yarı iletken teknolojisinde AlGaN, diğer yarı iletkenler kadar incelenmemiş ve kullanılmamış ancak yoğun bir şekilde bu yarıiletken üzerinde dünyada araştırmalar yapılmaktadır. Bu yarıiletkeni tercih etmemizin diğer sebepleri bu yarı iletkenin direkt olarak geniş enerji band aralığına sahip olduğundan, enerji band aralığının kontrol edilebilir olmasından ve alaşım bileşimlerindeki örgü sabitlerinden dolayı optoelektronik aygıtlarda çok geniş uygulama alanları olmasından kaynaklanmaktadır.

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde, yüzey yapısı ile ilgili genel bir giriş yapıldı. İkinci bölümde ise yüzey yapısıyla ilgili parametrelerin teorik bilgileri sunuldu. Üçüncü bölümde ise incelenen yüzeyle ilgili deneysel bilgiler sunuldu. Dördüncü bölümde ise yapılan nümerik hesaplama sonuçları ve bulgular incelendi. Beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar özet olarak sunuldu.

## 2. KATILARIN YAPISAL VE YÜZEYSEL ÖZELLİKLERİ

### 2.1 Giriş

Günümüzde ince filmlerin mikro yapılarının dizaynı ve değişiklik yapılarak üretim yapılması çeşitli uygulamalı alanlarda büyük ilgi çekmektedir. Filmlerin yüzey morfolojisi ve fonksiyonelliği arasındaki bağlantı, özellikle optik uygulamalarda önemlidir.

Bir alaşımın mikro yapısı; yapısındaki dağılım, büyüklüğü, materyalde var olan çizgisel, yüzeysel, hacimsel kusurlar ile tanımlanabilir. Bu kusurlar ve yapının özellikleri bir dizi parametre ile tanımlanabilir. Örneğin taneciklerin ortalama büyüklüğü bu niteliklerden biridir.

Bilinen elementlerin mikro yapılarının genel karakteristiği düzensizdir. Alaşımlardaki metallerin mikro yapılarının tekrarlayan yapılar şeklinde devam ettiği düşünülür. Doğada oluşan düzensiz yapıların analizinde fraktal boyutların kullanımının farklı alanlarda bilgi kazanılması konusunda büyük desteği olmaktadır. Bir metalin mikro yapısındaki fraktal analizin görünümü herhangi bir yerinde de aynıdır [7].

### 2.2 Pürüzlülük (Roughness)

Genellikle pürüzlülük yüzey dokusunun bir ölçüsü olarak tanımlanır. Bu değer ideal yüzeydeki dikey sapma ile ölçülür. Bu sapmalar büyükse yüzey pürüzlü; sapmalar küçükse yüzey düzgün olarak tanımlanır. Pürüzlülük ölçülürken genelde yüksek frekans, kısa dalga boyu kullanılır.

Gerçek nesnelerin çevre ile etkileşimlerinde pürüzlülük büyük rol oynar. Örneğin pürüzlü yüzeylerde daha yüksek aşınma olur ve bu yüzeyler daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptirler. Ayrıca pürüzlü yüzeylere sıvı yapışması daha

fazladır. Bileşikler için pürüzlülük iyi bir belirleyicidir, çünkü yüzeydeki düzensizlikler atomik boyutlarda küçük çatlaklar oluşmasına neden olabilirler.

İnce katı filmlerin üretilmesi sürecinde mikro yapıları ve yüzey pürüzlülüklerinin değişen sıcaklık ve film materyalinin tabanı olan maddeyle büyük bağılılığı vardır. Araştırmalarda görülür ki sıcaklık değiştikçe pürüzlülük değerleri farklı sonuçlar verir [8].

Literatürdeki daha önce yapılmış olan çalışmalara göre filmlerin yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre azaldığı belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen bu değişim örneğin termal dayanıklılığı ve yüzey kusurlarının azaldığını belirtir. Pürüzlülüğün azalma seyri göstermesi ise önceki araştırmalardan da bilindiği üzere daha iyi elektriksel özelliklere (elektronik aletlerin duyarlılığının artırılması, yüksek iletim hızı vb.) yol açmaktadır. Elektriksel özelliklerin iyileşmesi ise elektronik aletlerin performansının artmasını sağlamaktadır [4].

Pürüzlülük genel anlamda bir çizgi ya da bir yüzey için tanımlanabilir ve farklı parametreleri vardır. Bütün pürüzlülük parametreleri yüzeyi tanımlamak için bir formül ile tanımlanır. Bu formüller yüzeyleri ayrıntılarıyla tanımlayabilirler.

Şu an kullanılmakta olan birçok pürüzlülük parametresi vardır. Bunlardan bir kısmı endüstride, bir kısmı belli bölgelerde, belli madenlerin yüzeylerini araştırmada kullanılmaktadır. Bu parametreler dikkate alındığında bütün bilgiyi tek bir sayıyla alabilmeyi sağladığı görülmektedir. Ham verideki küçük yüzey değişiklikleri, parametreye görülür bir etki yapar. Bu ölçümler arasındaki farkı görebilmek için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeyleri karşılaştırmak yararlı olur.

Aritmetik pürüzlülük, örnek yüzeyi için yazılabilen kullanışlı ve basit bir diğer istatistiksel ölçüdür. Aritmetik pürüzlülük bulunurken aşağıdaki formül kullanılabilir.

$$R_A = [(L^{-d}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |h_{i,j} - \bar{h}|] \quad (2.1)$$

### 2.3 Genlik parametresi

Genlik parametreleri ortalama hat boyunca profilin dikey sapmalarına göre yüzeyi karakterize eder. Genlik parametreleri için farklı sahalarda kullanılan birden fazla formül ifade edilebilir. Yüzey pürüzlülüğü açısından genlik parametrelerinden incelenmesi gereken değer karekök ortalama değeridir (RMS).

$$R_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2} \quad (2.2)$$

### 2.4 RMS Pürüzlülük Değeri

Özel gereksinimlerle ince filmlerin yüzey morfolojilerinin yeniden dizayn edilmesi ve ince filmler üzerinde mühendislik çalışmalarının yapılması birçok uygulamalı alanın ilgisini çekmektedir. Özellikle optik uygulamalarda ince filmlerin yüzey morfolojisi ile fonksiyonellikleri arasında güçlü bir bağ vardır.

Yüzey üzerinde önemli bir değer olan RMS değeri, ince filmin yüzey morfolojisinin karakterize edilmesinde en kullanışlı değerdir ve RMS pürüzlülük değeri ( $\sigma$ ) olarak adlandırılır. Ancak bu istatistiksel tanımlama grafiklerde oluşan pikler ve düzlükler arasında bir bağlantı kuramaz [9].

Pürüzlülüğün önemli bir göstergesi de step genişliğidir. Yüzey üzerindeki dar stepler yüzeyin daha pürüzlü, geniş stepler ise yüzeyin daha düz ve kusursuz olduğu anlamına gelir.

Morfolojik yüzey pürüzlülüğü hesaplamalarda RMS pürüzlülük değeri ( $\sigma$ ) kullanılır. RMS pürüzlülük değeri, hem örnek sayısı n hem de belirli bir ölçekte yüzeyin pürüzlülüğü belirleyen uzunluk L'ye bağımlı olan bir ölçek parametre olarak nitelendirilebilir.

T(h), morfolojik yapının tanımlanmasında piksel büyüklüğü biriminde olup RMS olarak ifade edilir. Herhangi bir morfolojik oluşuma ait RMS değeri:

$$T(h) = ((x_i - \langle x_i \rangle)^2)^{1/2} \quad (2.3)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada  $T(h)$ ,  $h$  kalınlığında oluşan piksel sayıları üzerinden bir ortalama değeri gösterir. Toplam piksel sayısı  $N(h)$  ile  $T(h)$  arasındaki ilişki

$$T(h) \sim N(h)^\beta \quad (2.4)$$

bağıntısı ile verilir. Burada  $\beta$ , RMS kalınlık değerine ait kritik bir üs değeridir.

Gerek simülasyon sonuçlarından elde edilen parametreler için gerek ölçekleme yöntemi kullanılarak elde edilen reel küme parametrelerinin karşılaştırılması mümkündür. Aynı yöntem farklı görüntüler üzerinde uygulanabilir [10].

## 2.5 Fraktal Boyut (Fractal Dimension)

Doğada düzensiz desenler giderek küçülen ölçeklerde tekrarlanır. Öyle ki bütünün her bir parçası büyütüldüğünde yine cismin bütününe benzer. İşte fraktal geometri, simetrik olmayan karmaşık sistemleri inceleyen ve parçaları bütünü ile benzerlik gösteren yapılarla ilgilenir. Dolayısıyla fraktal boyut kendine benzerliğin bir ölçüsüdür.

Fraktallar, kendini sonsuza dek tekrar eden, son derece karmaşık bir yapılanmaya sahip, fakat temelinde çok basit matematiksel formüller yatan biçimlerdir. Etrafımızda gördüğümüz her şey aslında fraktallık özelliği gösterir. Fraktallığın en önemli göstergesi Şekil 2.1'de görüldüğü gibi kendine benzer parçalardır.





**Şekil 2.1:** Buz kristali doğada en yaygın bulunan fraktallardan biridir.

Katı madde yapılarında yüzey karakterizasyonu yapılmak istenildiğinde, fraktal boyutlar sadece pürüzlülüğü verdiği için değil, aynı zamanda fonksiyonel olduğu için de tercih edilir. Dolayısıyla yüzey teknolojisiyle fonksiyonel karakteristiğinin daha iyi anlaşılması demek, süreçlerin daha kontrollü olabilmesi ve sahip olunan performansın artırılması adına çok önemlidir [11 - 13].

Fraktal boyutlar, kompleks analiz ve düzensiz yapıların yüzey morfolojisi hakkında daha kompleks analiz yapabilmemiz için kullanışı bir araçtır. Fraktal analiz yüzey görüntülerine dayanır. Bu görüntülerin alınabilmesi de atomik kuvvet mikroskobu (AFM) gibi deneysel aletler ile olur [11 - 13].

Öklid geometrisindeki tam sayılı boyutlardan farklı olarak, sınır karmaşıklığı arttıkça “kesirli” boyutlar ortaya çıkar. Bu tip kesirli boyutlara, Öklid boyutlarından ayırmak için fraktal boyutlar denir. Doğal nesnelerin birçoğunda karmaşık yüzey/sınır yapısı, boyutların fraktal kurallarla ifade edilmesini zorunlu kılmaktadır [14, 15].

Bir fraktal boyut ölçeği ayrıntılı olarak bir değişim oranı olarak karmaşıklığı ölçerek fraktal desen ya da kümeleri karakterize etmek için kullanılan istatistiksel bir

parametredir. Ayrıca fraktal boyut desenin boşluk doldurma kapasitesini de verir. Fraktal boyutun çeşitli tipleri teorik ve deneysel olarak ölçülebilir. Çok geniş bir alanda değişen nesnelere geniş bir yelpazede karakterize etmek için kullanılır; kentsel büyüme, insan fizyolojisi, tıp, pazar eğilimleri vb. [14, 15].

Doğadaki maddelere atomik düzeyde bakıldığında genellikle var olan geometrik görüntüleri fraktal boyuta sahip olduğu gerçeği ile dikkat çekiyorlar. Fraktal boyutun çeşitli anlamları vardır ve uzun bir matematiksel geçmişe sahiptir. İlk olarak 1975'te Polonya asıllı matematikçi Benoît B. Mandelbrot [12] tarafından ortaya atılan fraktal kavramı, yalnızca matematik değil fizikokimya, fizyoloji ve akışkanlar mekaniği gibi değişik alanlar üzerinde önemli etkiler meydana getiren yeni bir geometri sisteminin doğmasına yol açmıştır.

Fraktal kavramına çeşitli nedenlerden dolayı doğa bilimleri tarafından başvurulmuştur. Kendine benzerlik ve kendini tekrarlama; fraktallar, kuvvet yasaları, kaos gibi alanları birleştiren kavramlardır. Kendine benzerlik evreni yöneten temel simetrilere biridir. Aynı şekilde, kendiyle benzeşme (self-affinity) veya anizotropik ölçekte veya boyutu değişiklikleri altında değişmezliği, birçok yüzey ve ara yüzeylerin ve bazı doğal ve ekonomik olayların bir niteliğidir. Fraktal boyut yapısal özellikler ile ilgili bir parametredir ve ara yüzeylerin büyümesinde uygulanabilir, aynı zamanda bu parametrenin ara yüzeylerin pürüzlülüğünün ölçümü ile ilişkili olduğu da bilinen bir durumdur [14, 15].

Fraktal boyutları açıklamak için boyutun ne anlama geldiği açıklanmalıdır. Bir çizginin boyutu 1, bir düzlemin boyutu 2, bir kübün boyutunun 3 olduğu bilinir. Bir çizgi üzerinde hareket etmek için bir yol vardır. Benzer şekilde düzlemde iki lineer bağımsız yön bulunur. Lineer bağımsızlık kavramını ifade etmek ne kadar zor olsa da uzunluk ve genişlik iki boyutu oluşturur. Uzunluk, genişlik ve yükseklik ise kübün üç boyutunu oluşturur.

Aslında hem 1 boyutta bir çizgi, hem de 2 boyutta bir düzlem kendine benzer. Bir çizgiyi 4 parçaya ayırırsak, birbirine eş ve ilk çizgiyle benzer 4 eş parça elde edebiliriz. Aynı şekilde genel anlamda bir çizgiyi kaç parçaya ayırırsak (N), büyüme faktörü diye adlandırılan birbirine eş o kadar parça elde ederiz.

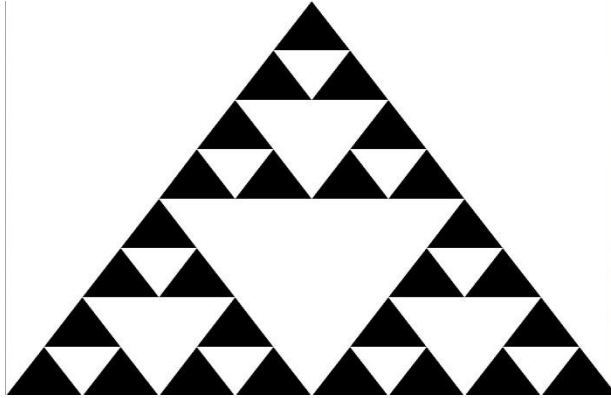
Ancak bir düzlem farklıdır. Örneğin bir kareyi birbirine eş 4 parçaya ayırırsak büyütme faktörü 2'dir.  $N^2$  tanecik birbirine eş kendine benzer parça elde etmek için büyütme faktörü N olması gerekir. Sonuç olarak benzer şekilde küp için de bu defa  $N^3$  tanecik kendine benzer parça için küpün büyütme faktörü N'dir. Kendine benzer şekillerin boyutlarını belirlemek için, formül (2.5)'de görüldüğü gibi kendine benzer parçaların logaritmalarının, büyütme faktörüne oranı boyutları verir.

$$\text{Fraktal boyut} = \log(\text{benzer parçaların sayısı}) / \log(\text{büyütme faktörü}) \quad (2.5)$$

Dolayısıyla çizgi için 1 boyut, yüzey için 2 boyut, kübik cisimler için 3 boyut vardır. Ancak bu fraktal setleri için değiştirilir. Bir dizi teorik fraktal boyut olarak morfolojik boyutu aşarsa, set fraktal geometriye sahip olduğu kabul edilir. Dolayısıyla bilinen bu üç boyuttan farklı değerler alır.

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi Sierpinski üçgeni fraktallığı anlamamızda ve bunu açıklamada bize kolaylık sağlar. Formül (2.5)'e benzer şekilde Sierpinski üçgeni için de hesaplama yapılabilir. Bu üçgende birbirine benzer 3 üçgen bulunur ve büyütme faktörü 2 dir. Formül (2.6)'ya göre hesaplama yapılabilir.

$$FD = \frac{\log 3}{\log 2} = 1.58 \quad (2.6)$$



**Şekil 2.2:** Sierpinski üçgeni.

Aynı şekilde Sierpinski üçgeni 9 eş üçgen ve 4 büyütme faktöründende oluşabilir. Burada da çıkan sonuç aynı olur.

Fraktal boyut değeri arttıkça, dokunun saçaklı yapısı artmaktadır. Az kompleks bir fraktal çizgi yaklaşık 1,1 değeri alırken çizgi kompleksliği arttıkça fraktallık değeri 1,9 değerine ulaşabilir. Böylece yapı düzlem yapıların değerine yaklaşmış olur. Benzer şekilde değeri 2,1 olan bir yüzey uzayda çok normal bir yüzey gibi boşluk doldurur, fakat 2,9 değeri olan bir fraktal yüzey hacim gibi boşluk doldurur.

Fraktal boyut değeriyle boşluk doldurma ilişkisi aslında yoğunluğu veren bir ifade oluşturur. Fraktal boyut ise fraktalların bazı özellikleri ile ilgili kavramlar olan öz-benzerlik, detay veya düzensizliği ölçer; bir çizginin ya da yapının uzunluğunu ölçemez. Ancak uzayı doldurma, düzenli olma ve benzeri açılardan karşılaştırma yapma imkânı tanır.

Fraktal boyutlar bilgisayar programları için genel olarak kutu sayma yöntemiyle hesaplanır. Fraktal boyutların kutu sayma yöntemiyle ilişkisi formül (2.7)'de verilmiştir.

$$f_D = \lim_{\Delta\delta \rightarrow 0} \frac{\log N(\delta)}{-\log(1/\delta)} \quad (2.7)$$

Burada N örneğin deseninin aynı olan yerlerini içeren sayı ve  $\delta$  kutu boyutunu gösteren niceliktir [15 - 17].

## 2.6 Tanecik Boyutu (Grain Size)

Tanecik boyutu, parçacık boyutu olarak da adlandırılan, tek tanecikler veya moleküler parçacıkların büyüklüğünü ifade eder. Metaller doğada birkaç istisna dışında genelde kristalize halde bulunurlar. Bu kristaller tanecik sınırları olarak bilinen iç sınırları içerirler. Tavlama gibi işlemler sırasında bu çekirdekli yapılar atomik halde tane tane büyümeye başlarlar. Bu büyüme ile her bir tanecik sonunda diğerine çarpar ve atom yönelimleri farklı olan bir ara yüzey oluşur.

1900'lerin başlarında bile tanecik boyutlarının azalması gibi çoğu mekaniksel özellikler biliniyordu. Eğer iri taneli tanecik boyutu isteniyorsa, bileşimi ve istenen boyutu kontrol edilmelidir.

Tanecik boyutu ölçümü bir dizi faktöre göre karmaşıktır. İlk olarak, taneciklerin üç boyutlu boyutu sabit değildir ve kesit düzlemi rastgele tanecikleri ele alır. Tanecik yapısı özellikle tanecik boyutunun bir fonksiyonu olarak değişir. Bunların temel şekilleri aynı olmasına rağmen tanecik boyutu ölçümü, metal içinde mevcut olan taneciklerin farklı olmasıyla karmaşık hale gelir. Örneğin Fe, Mo, Cr gibi hacim merkezli kübik metal tanecikleri, Al, Ni, Cu, ve bazı paslanmaz çelik gibi yüzey merkezli kübik metaller vardır.

## 2.7 Ölçekleme Teorisi

Adından da anlaşılacağı gibi ölçekleme teorisi uzunluk ölçeğinin değişimine bağlı olarak farklı niceliklerden oluşur. Boyutlu bir niceliğin değeri standart değiştiğinde değeri değişecek şekilde, standart bir birim uzunluğa bağlı olarak ifade edilebilir.

Ölçekleme ile evrendeki kütle dağılımı, manyetizma, yerçekimi, zaman gibi kavramlar hakkında Müller fraktalı yardımıyla kapsamlı çalışmalar bulmak ve sonuçlara ulaşmak mümkündür.

Ölçekleme yöntemiyle hesaplama yapmak istersek, numune yüzeyinin morfolojik yapısının istatistiksel niceliklerini belirlemek için AFM ile görüntüler alınır. Bu bilgiler bilgisayar ortamına aktarılır [10].

Görüntü resimleri, BMP (bitmap) formatına dönüştürülerek kapalı kare örgü içine yerleştirilir. Görüntülerde siyah ve beyaz oluşumların bulunduğu gözlemlenir. Beyaz bölgeler boş olup siyah bölgeler atomların toplandığı yerlerdir.

Görüntülerde siyah ve beyaz nokta birimli (piksel) sayıları ayrı ayrı 1. 2. 3. 4...n. tane gruplanıp hesaplanmaktadır.  $N(h)$ , toplam piksel sayısı olmak üzere, siyah veya beyaz piksel grup sayısı ile arasındaki ilişki formül (2.8)'de gösterilmiştir.

$$N(h) = \sum_{i \leq h} \rho(x_i) \quad (2.8)$$

Burada  $x_i$ ,  $i$ . pikselin parçacık yoğunluğu olup dolu ve boş gözler için:  $\rho$ , eğer piksel siyah ise 1; eğer piksel beyaz ise 0 olur.  $\rho(x_i)$  formül (2.9)'da gösterilmiştir.

$$\rho(x_i) = \begin{cases} 1. \text{ eğer } x_i \text{deki piksel siyah ise} \\ 0. \text{ eğer } x_i \text{deki piksel beyaz ise} \end{cases} \quad (2.9)$$

Burada  $x_i$  piksel biriminde 0'dan  $n$ 'ye kadar değişen  $h$  kalınlığının üzerinden toplam piksellerin sayısı formül (2.10)'da gösterilmiştir.

$$N(h) \sim h^\alpha \quad (2.10)$$

Burada  $\alpha$ , kritik üs değeridir. Kritik üs  $\alpha$  değeri artarken küme grupları da daha yoğun bir yapı özelliği göstermektedir [10].

## 2.8 Hurst Eksponansiyel Değeri

Hurst eksponansiyel değeri yaygın olarak rastgele süreçleri tanımlamak için kullanılır. Bu değer genelde uzun süreli belleği olan bir korelasyonu vardır. Finans alanında da kullanılan Hurst eksponansiyel değeri  $\frac{1}{2}$  değerini aldığı zaman verimliliğin bir ölçüsü olarak kullanılabilir.  $\frac{1}{2}$ 'den farklı olduğu zamanlarda ise Markov süreçlerini [18] izler ve hiçbir uzun dönemli hafızaya sahip olmaz. Bu nedenle şunu görüyoruz ki Hurst eksponansiyel değeri uzun dönemli hafızaya sahip olması gereken parametreleri ve oto korelasyonları belirlemede kullanılamaz. Hurst eksponansiyel değeri bulunmasında birçok matematiksel denklem kullanılabilir. Markov süreçleri ise bunlardan bazılarının izlediği yolları ifade eder.

Hurst eksponansiyel değeri pürüzlülüğün önemli bir ölçüsüdür. Önceki ve sonraki oluşan iki olay arasındaki bağlantıyı veren en uygun ölçüttür. Fraktal boyuttaki değişim Hurst eksponansiyel değeri yardımı ile hesaplanabilir.

Yüzeyinde asimetri bulunan cisimlerle, bulunmayan cisimler birbirinden ayrılır. Kendine benzerlik bu noktada ortaya çıkar. Burada RMS pürüzlülük değeri  $\sigma$ , yüzeylerin pürüzlülüğünü belirlemede en çok kullanılan değerdir. Bu parametrede bulunan  $h$  değeri (büyüklük fonksiyonu ya da ortalama büyüklük) yüzey dokusundaki kendine benzerliğin azalışıyla üstel olarak artış gösterir ( $0 \leq H \leq 1$ ). Bu değer sadece sıcaklığa değil yüzey pürüzlülüğü, kendine benzerlik fraktal davranışı gibi değerlere bağlıdır [8].

Hurst üstel katsayısı 0 ve 1 aralığında değerler almaktadır. Hurst üstel katsayısına dayalı olarak serilerin üç kategoride sınıflandırılabilir. Hurst üstel katsayısı,  $H = 0,5$  durumunda (1), serinin rastgele bir yol izlediği, başka bir ifadeyle normal bir dağılım sergilediği söylenebilir.  $0 < H < 0,5$  durumu (2), serinin uzun dönem hafıza etkisine sahip olmadığı anlamına gelmektedir.  $0,5 < H < 1$  durumunda ise (3), uzun dönem hafıza etkisine sahip bir seriden söz edilebilir.

Dönüştürülmüş genişlik değerleri (R/S) ile gözlem sayısı (t) arasında regresyon denklemi kurulur. Regresyondan elde edilen doğru denkleminin eğimi, Hurst üstel katsayısının eğimidir.

Gözlem sayısının 10'dan az olması ( $t < 10$ ), Hurst üstel katsayısının değerine ilişkin kesin sonuçlar vermez. Bu nedenle çalışmada 10 adet dönüştürülmüş genişlik değeri hesaplanmıştır.

## 2.9 Kaplama Oranı (Occupied Fraction)

Kaplama oranı sıcaklıkla değişebilen bir niceliktir. Bunun sebebi maddelerin atomlar ve moleküllerden oluşmasıdır. Bir madde atomlar, moleküller ve aralarındaki boşluk bölgelerden oluşur. Atomların kaplamış olduğu o bölgelerin toplam hacmi hesaplanıp maddenin tamamının toplam hacmine oranlandığında bu kaplama oranını ifade eder.

Isı alan ve sıcaklığı artış gösteren atom ve moleküller farklı sıcaklıklarda hacimsel olarak artış ve azalış gösterirler. Fakat bu artış ve azalış değişik element atomları için farklı olur, farklı sıcaklıklarda gerçekleşir. Örneğin bir element atomunun sıcaklığı 0 dan 1400 °C'ye çıkarıldığında iki katına çıkarken, bir diğeri dört katına çıkabilmektedir.

Bir tanecik kümesinin morfolojik boyutunu hesaplamada kullanılan metotlardan biri kutu sayma yöntemidir. Kümeye ait nesnelere ait bulunduğu r yarıçaplı bölge içinde  $N(r)$  deki gözler sayılır.  $N(r)$  denklem (2.11)'de tanımlanmıştır.

$$\emptyset(N(r), L) = N(r)L^{-d_f} \quad (2.11)$$

$N(r)$ , BMP resim formatına göre parçacıkların toplam sayısıdır.

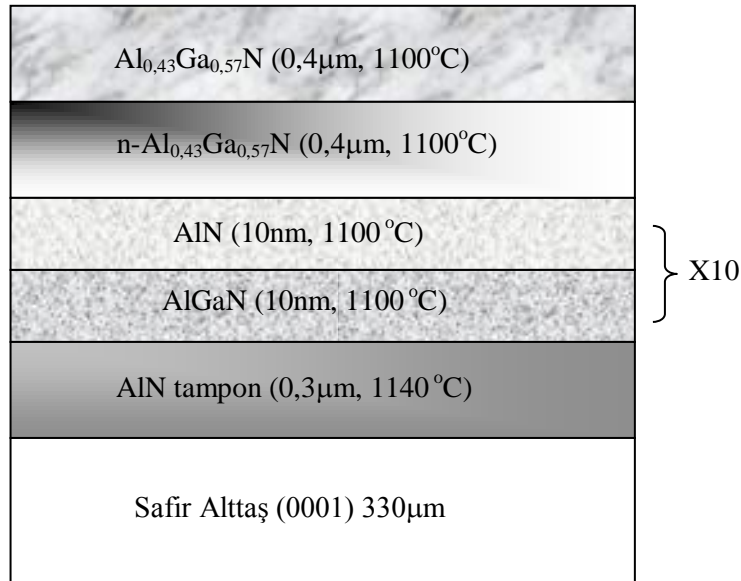
Formül (2.11) bağıntısının log - log grafiğinin doğruya karşılık (log N nin log 1/r'ye bağlı değişim grafiği) eğimi topolojik boyutu verir.

Bu yöntemde yüzeyde bulunan kümelerin tarayıcı ile görüntüsü elde edilir. Bilgisayar ortamına taşınan ve seçilen herhangi bir kümenin etrafındaki kümeye ait olmayan oluşumlar temizlenir. Kümeye ait tüm alan belirlendikten sonra kapalı kare örgü içerisine taşınır. Küme kapalı kare örgüde haritalandırılır. Yazılım yardımı ile kapalı kare örgüdeki her gözün doluluk oranı belirlenir. Örgü gözünün herhangi biri dolu ise tanecik yoğunluğu 1, eğer boş ise 0 alınır. Daha sonra örgü içindeki toplam dolu gözler saydırılır. Dolu gözlerin sayısı kümeyi meydana getiren toplam tanecik sayısı olarak atanır. Kutu sayma yöntemi kullanılarak formüldeki r yarıçaplı bölgede tanecik miktarı  $N(r)$  alınarak logaritmaların değişiminin oluşturduğu doğrunun limit değerindeki eğimi ( $d_f$ ) hesaplanır [10].



### 3. YÖNTEM

Çalışmamızda önce ince safir yapı üzerine katmanlar halinde Metal Organik Kimyasal Buhar Birikim (MOCVD) tekniğiyle büyütülen  $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$  yarı iletken ince filminin üzerinde topolojik yapısına sıcaklık etkisinin nasıl olacağını inceleyebilmek için sıcaklık uygulandı [19]. Şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilen  $Al_{0,43}Ga_{0,57}N$  yarıiletken ince filmi, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi’nde büyütüldü. MOCVD sisteminde büyütme sırasında Al, Ga ve N kaynakları olarak Trimethyl Gallium, Trimethyl Aluminum ve Ammonia kullanıldı. Yarıiletken ince film (0001) yönelimli ( $330\mu m$ ) safir ( $Al_2O_3$ ) alttaş üzerine büyütüldü. Epitaksiyel büyüme başlamadan önce safir alt taş, yüzey kirliliklerini kaldırmak için 10’ar dakika  $1100\text{ }^\circ C$ ’de tavlandı [19].



**Şekil 3.1:**  $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$  yarıiletken ince filminin şematik gösterimi [19].

Şekil 3.1’de  $Al_{0,43}Ga_{0,57}N$  yarıiletken ince filmin büyütme şartları ve tabaka kalınlıkları verildi. Büyütme yüksek sıcaklıkta ( $1140\text{ }^\circ C$ )  $0,3\text{ }\mu m$  kalınlıkta AIN tampon (buffer) tabaka ile başlatıldı. AIN tampon tabaka üzerine  $1100\text{ }^\circ C$ ’de 10’ar nm kalınlıklarda 10 periyot AlGaN ve AIN tabakalar büyütüldü. Son adımda aynı sıcaklıkta ( $1100\text{ }^\circ C$ ) sırayla  $400\text{ nm}$  kalınlıkta  $Al_{0,43}Ga_{0,57}N$  tabaka büyütüldü [19].

Tavlama sıcaklığının fraktal boyutlarda ve yüzey morfolojisindeki etkisinin incelenebilmesi için ince film sıcaklığı 200 °C'den 1200 °C'ye 50 dakikada artırıldı, her bir zaman aralığında ise periyodik olarak yüzeyin AFM görüntüleri alındı.

İnce filmlerin yüzey morfolojileri farklı sıcaklıklarda, X-ışını difraksiyonu ve atomik kuvvet mikroskobu kullanılarak karakterize edildi. Atomik kuvvet mikroskobu kullanılarak elde edilmiş olan bu morfolojik görüntüleri üzerinde nümerik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yüzey morfolojisi, pürüzlülük ve fraktal boyutlara dair olan bu parametrelerin hesaplanmaları bilgisayar programlarıyla gerçekleştirildi.

Mikroyapıların yüzey morfolojilerinin karakterize edilmesinde; X ışını yansıtma, AFM, adsorpsiyon gibi birçok teknik kullanılır. AFM ölçümlerde nanometre mertebesinde topografik doğru bilgi sağlar ve bu çalışmalarda kendine benzerliğin doğası ile yapıların topografileri hakkında bilgi edinmek için kullanılır [8, 20].

### **3.1 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)**

AFM yüksek çözünürlüklü bir taramalı kuvvet mikroskobudur. Bu mikroskopta ulaşılmış çözünürlük nanometre ölçeğinde olup optik tekniklerden binlerce kat fazladır. AFM'nin ilk halleri olan taramalı tünelleme mikroskop 1980'li yıllarda ortaya çıkmıştır. AFM özellikle nano boyuttaki yapıları görüntüleme, ölçme ve üzerlerinde işlem yapmaya yarar. AFM de kısa menzilde en çok kullanılan kuvvet Van der Waals etkileşmeleridir. Ancak uzak mesafeli etkileşmelerde daha çok manyetik ve elektrostatik etkileşmeler öne çıkar.

AFM ile çok çeşitli numuneler üzerine çalışılabilir (metal, cam, yarıiletken, hücre duvarı vs). Burada atomik düzeyde sonuçlar alınabilir. AFM ile alınan görüntüler ideal derecede keskin değildir ve AFM ideal topografik sonucu vermez [21].

Deneysel analiz AFM ile yapılır. Bu teknik üç boyutlu yüzey morfolojisi haritalarının çıkarılabilmesini ve nanometre boyutlarında çözünürlük sağlar. Dijital görüntüler sayısal veriler haline getirilebilir ve bu yolla birçok örnek ve parametre

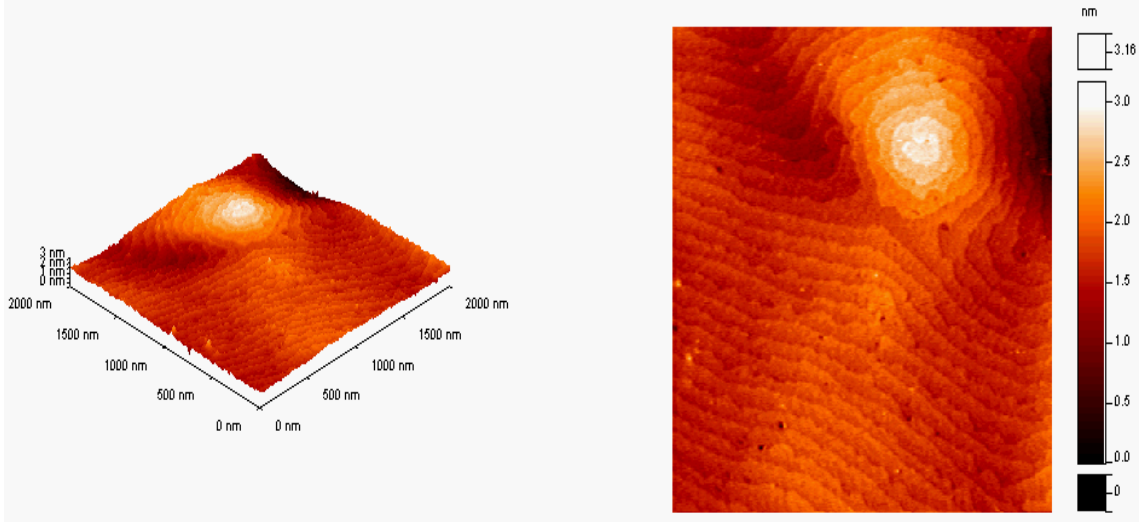
arası parametrik fonksiyonlar yazılabilir. Fourier dönüşümlerinin hesaplama dayalı sayısal yöntem, yüzey durumunu tanımlamayı ve farklı örneklerin yüzey morfolojisini, diğer parametrelerle yüzey morfolojisi arasında korelasyon belirlemeyi, ve ısınma ile oluşacak değişmeyi karşılaştırmayı amaçlıyor. AFM direk olarak yüzeylerin üç boyutlu profillerinin ölçümünde kullanılır [22].

Atomik kuvvet mikroskobu fraktal analizi için özellikle uygun bir araçtır. Çünkü bu araç birkaç yüz mikron mertebesinde kantitatif yüzey ölçümleri verir. Yüzey pürüzlülüğünü belirlemede çok kullanışlı olan AFM yüzeyin 2D profilini verebilir, yüzey kusurlarını ve büyüklüklerini belirlemek için de kullanılır. Atomik kuvvet mikroskobu yüzeyi taramak, yüzey pürüzlülüğünü analiz etmek ve film yüzeylerindeki fraktal boyutları belirlemek için kullanılabilir [23].

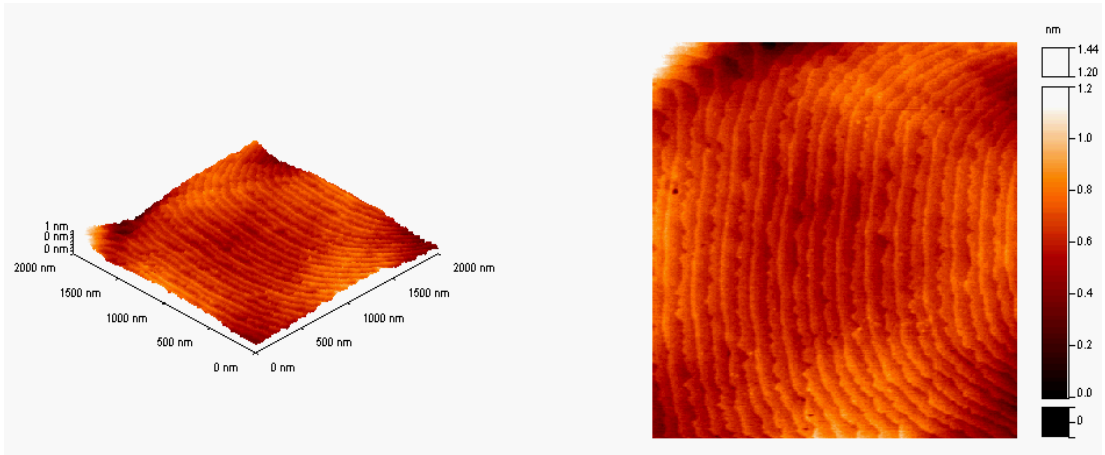
### 3.2 Numunenin Tavllanması

AFM ölçümleri için 4 ve 25  $\mu\text{m}^2$  tarama alanları tercih edildi. Bunun nedeni AFM ölçümlerinden, küçük tarama alanlarında (4  $\mu\text{m}^2$ ) yüzey üzerindeki kusur çeşitlerinin ve morfolojinin daha iyi belirlenebilmesi, büyük tarama alanlarının da (25  $\mu\text{m}^2$ ) ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerinin numuneyi daha iyi temsil etmesidir. Numunelerin AFM görüntülerinde açık renk yükseltiyi, koyu renk ise derinliği göstermektedir.

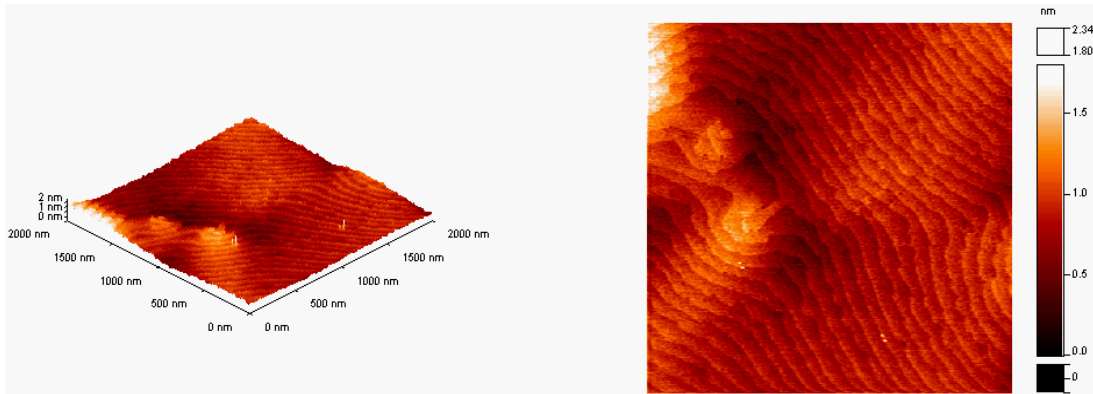
Bu çalışmada incelenen  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin örnekleri 200 °C'den 960 °C'ye 100 °C'lik periyotlarla hızlı termik tavlama sisteminde 20 dakika tavlandı. Kullanılan hızlı termik tavlama sisteminin maksimum sıcaklığı 960 °C olduğu için 1000 °C'den sonraki tavlama Lenton marka fırında gerçekleştirildi.  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filimleri 1000 °C'den 1200 °C'ye 50 °C'lik artışlarla fırın sisteminde 30 dakika tavlandı. Son tavlama sıcaklığı  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin büyütme şartları dikkate alınarak belirlendi. Sıcaklık artışı sağlanırken düzenli olarak numunenin AFM görüntüleri alındı. Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılan çalışmalar grup çalışması olduğundan hem [19] nolu referansta hem de bu tez çalışmasında AFM görüntüleri, bu merkezin müdürü Prof. Dr. S. ÖZÇELİK'in izni ve katkılarıyla kullanılmıştır. Bu tezde çalışılan  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filmin AFM görüntüleri aşağıda verilmiştir [19].



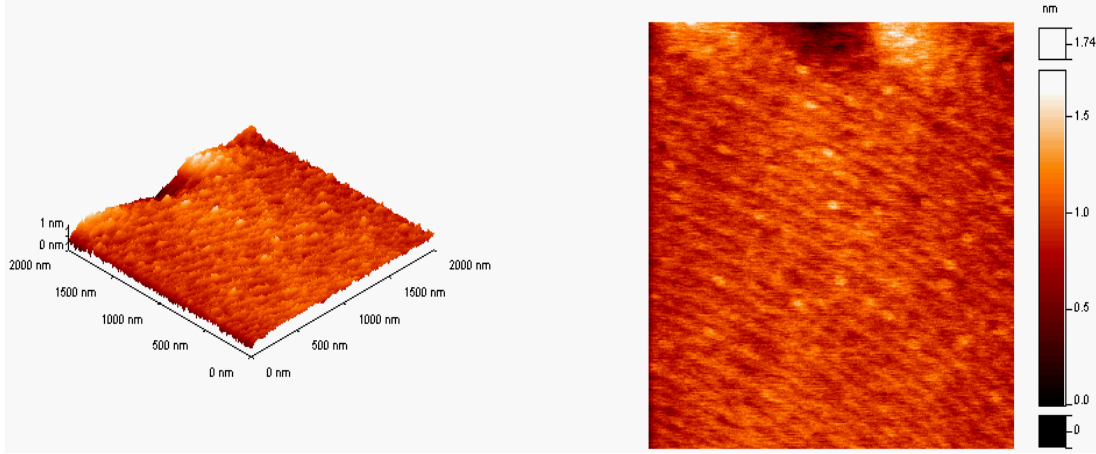
**Şekil 3.2:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin  $200\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlandıktan sonra görüntülenen  $2 \times 2\text{ }\mu\text{m}^2$  tarama alanlı AFM görüntüleri [19].



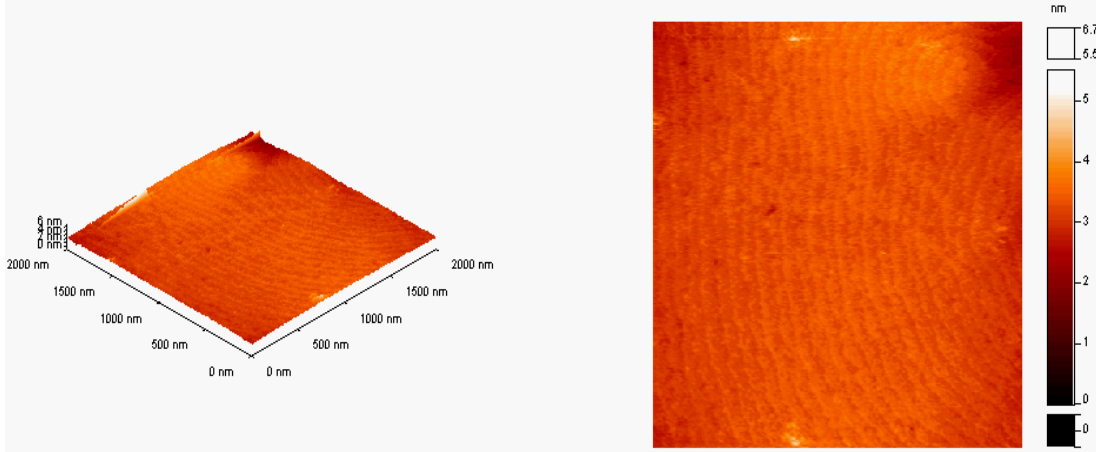
**Şekil 3.3:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin  $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlandıktan sonra görüntülenen  $2 \times 2\text{ }\mu\text{m}^2$  tarama alanlı AFM görüntüleri [19].



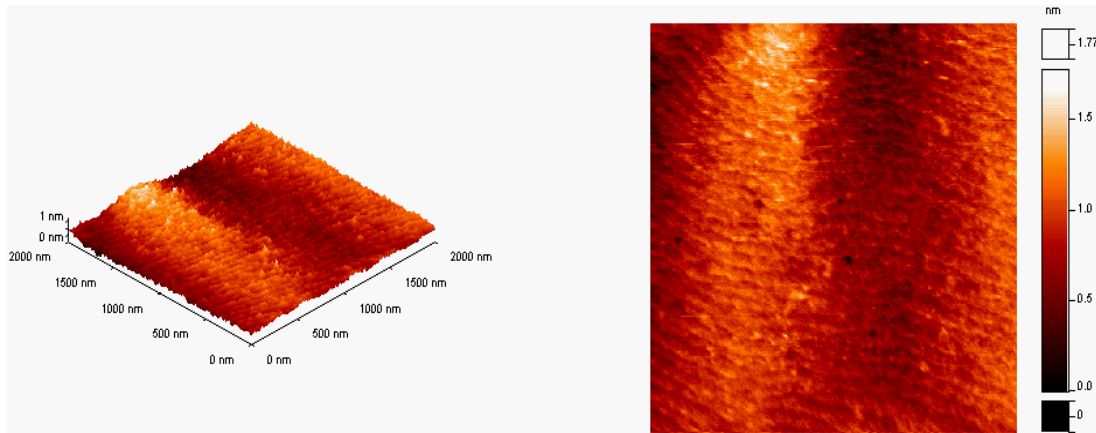
**Şekil 3.4:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin  $500\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlandıktan sonra görüntülenen  $2 \times 2\text{ }\mu\text{m}^2$  tarama alanlı AFM görüntüleri [19].



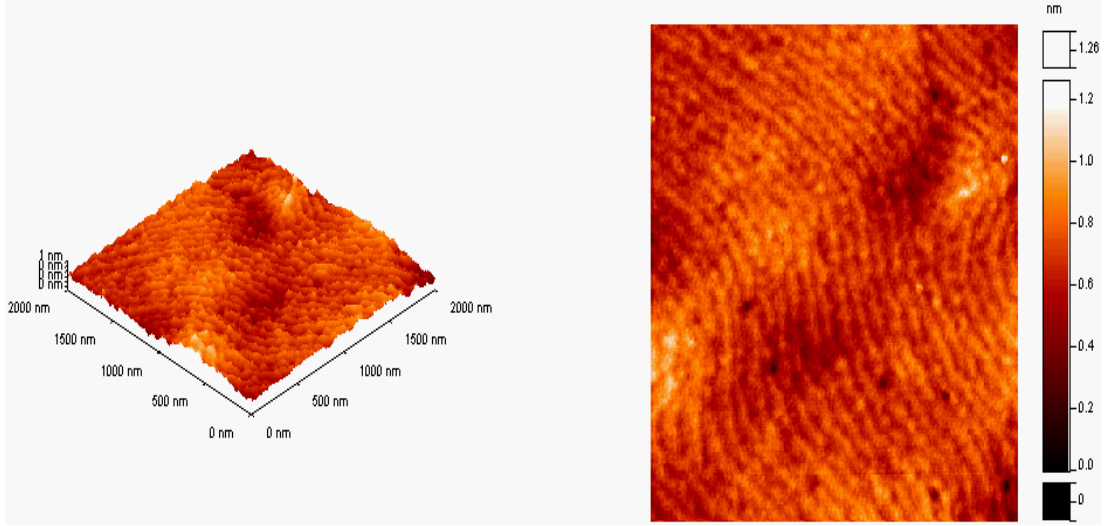
**Şekil 3.5:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlandıktan sonra görüntülenen  $2 \times 2\ \mu\text{m}^2$  tarama alanlı AFM görüntüleri [19].



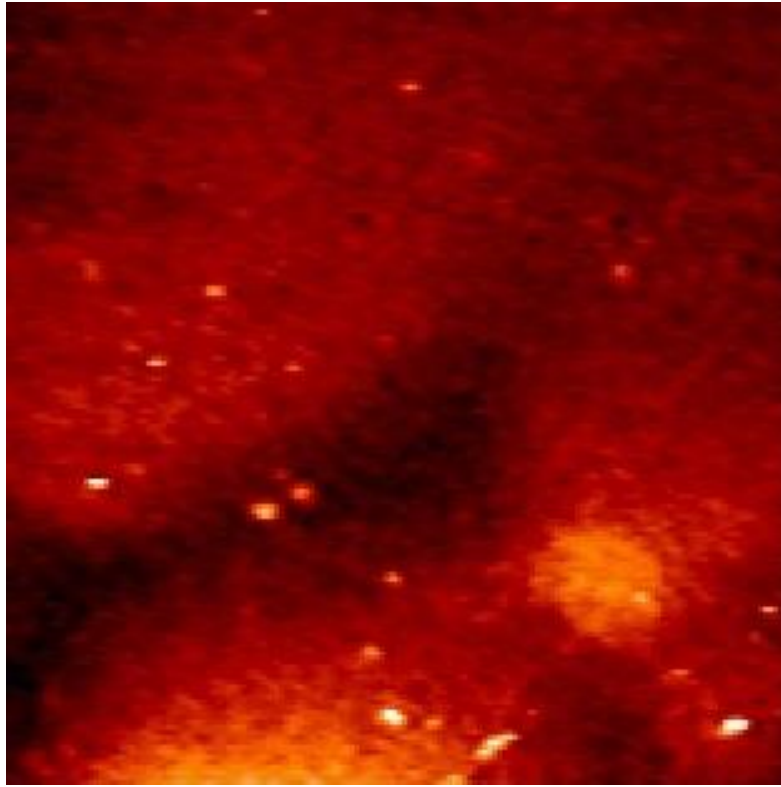
**Şekil 3.6:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin  $700\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlandıktan sonra görüntülenen  $2 \times 2\ \mu\text{m}^2$  tarama alanlı AFM görüntüleri [19].



**Şekil 3.7:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin  $800\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlandıktan sonra görüntülenen  $2 \times 2\ \mu\text{m}^2$  tarama alanlı AFM görüntüleri [19].

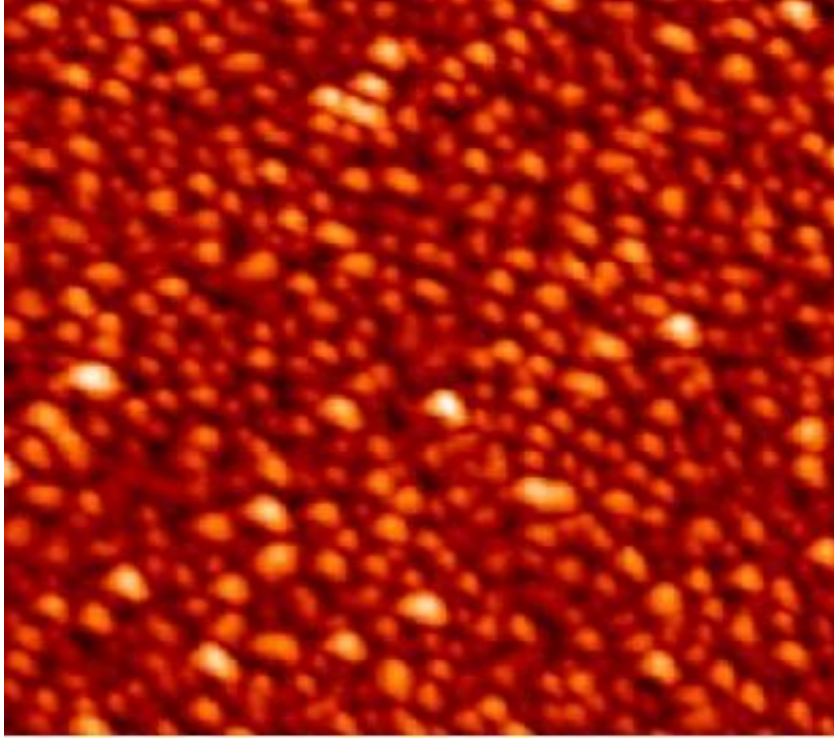


**Şekil 3.8:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlandıktan sonra görüntülenen  $2 \times 2\text{ }\mu\text{m}^2$  tarama alanlı AFM görüntüleri [19].

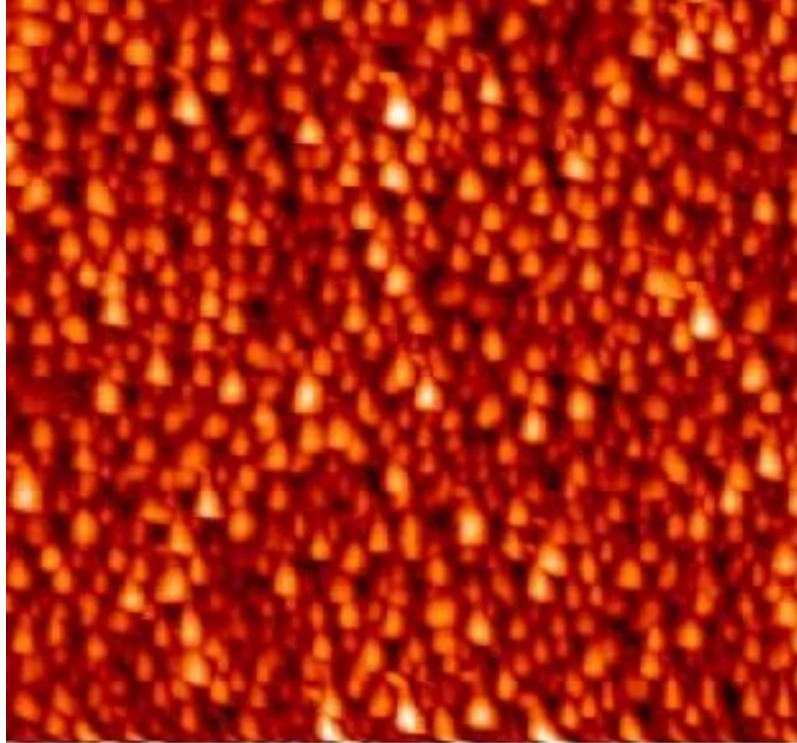


**Şekil 3.9:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlandıktan sonra görüntülenen  $2 \times 2\text{ }\mu\text{m}^2$  tarama alanlı AFM görüntüleri [19].





**Şekil 3.10:** Al<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>N / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yarıiletken ince filminin 1150 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 µm<sup>2</sup> tarama alanlı AFM görüntüleri [19].



**Şekil 3.11:** Al<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>N / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yarıiletken ince filminin 1200 °C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 µm<sup>2</sup> tarama alanlı AFM görüntüleri [19].

### 3.3 Yüzey Morfolojisi Parametreleri Üzerine Nümerik Hesaplamalar

#### 3.3.1 Karekök Ortalama Pürüzlülük Değerinin (RMS) Bulunması

Pürüzlülük hesaplama, görüntülerin yüzey topografisindeki bir değişimin gözlenmesi için en basit ve en çok kullanılan parametredir. Yüzeyin RMS pürüzlülük değeri olan  $\sigma$ , MOD yüzeyinin doku özellikleri için klasik istatistik beklenen değer olup ortalama görüntüden herhangi uzaklıktaki noktaların karelerinin ortalama değerinin karekökü olarak tanımlanmaktadır. Numune yüzeyleri için  $\sigma(L)$  ayrıca bir yaklaşım olarak tanımlanır.

Burada sırasıyla,  $N$ , MOD yüzeyindeki veri noktalarının sayısı,  $h_{i,j}$ , 3 boyutlu resimler için her bir noktasında yükseklik değeridir. Ayrıca  $L$  yanal uzunluk ölçeği olan parametredir.  $h_{i,j}$  değeri, gri renk skalasına ve MOD yüzeyindeki yükseklik değerine bağlı olarak parametrenin 0 ile 255 arasında olduğu duruma göre karşılığında bir değer alır. Buradaki denklemler MOD yüzeyinin ortalama değerini temsil ederler. Hesaplama kolaylığı nedeniyle, RMS pürüzlülük değerini hesaplamak çok çekicidir. Böylece yüzey pürüzlülüğü tek bir değer ile özetlenebilir. Aritmetik pürüzlülük ise yüzey pürüzlülüğünü tanımlamak için kullanılacak bir diğer basit parametredir.

$$R_A = [(L^{-d}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |h_{i,j} - \bar{h}|] \quad (2.1)$$

İki örneğin doku özelliklerini ölçmek için pürüzlülük hesaplamaları yapılır. Pürüzlülük ve aritmetik pürüzlülük hesaplamaları taranan her bir farklı bölge için yapılır ve ardından bu bölgeler için bulunan değerlerin ortalamaları alınır. RMS pürüzlülük değeri hem tarama boyutu hem de MOD yüzeyindeki örnek sayısına sıkı şekilde bağlıdır. Dolayısıyla bu durum tarama boyutu ve fraktal geometri ile ilişkilidir. Pürüzlülük değerleri de yanal uzunluk ölçeği ile derinden ilişkilidir. Yüzeyin yanal uzunluk ölçeği,  $L$  olarak gösterilir. Yanal uzunluk ölçeği  $L$  ise;

$$\sigma(L) \propto L^H \quad (3.1)$$



Burada ara yüzün ölçekleme parametresi H, Hurst exponent değeri olarak adlandırılır. Bu yüzeyin dokusunun göstergesi olan bir parametredir.

H değerinin alabileceği sayı değerleri  $0 < H < 1$  olmaktadır ve  $f_D = 2$  fraktal kutu boyutları için arayüzeyleri tanımlar. Verilerle  $\log(\sigma)$  nın  $\log(L)$  ye karşı grafiği çizilir. Grafiğin herbir kısmındaki lineer rejim için veri noktaları en az iki kareye fitlenerek gösterilir [10].

### 3.3.2 Fraktal Boyut (Fractal Dimension) Değerinin Hesaplanması

Fraktal boyut değeriyle boşluk doldurma ilişkisi aslında yoğunluğu veren bir değer oluşturur. Fraktal boyut ise fraktalların bazı özellikleri ile ilgili kavramlar olan öz-benzerlik, detay veya düzensizliği ölçer; bir çizginin ya da yapının uzunluğunu ölçemez. Ancak uzayı doldurma, düzenli olma ve benzeri açılardan karşılaştırma yapma imkânı tanır.

Fraktal boyutlar bilgisayar programları için genel olarak kutu sayma yöntemiyle hesaplanır. Fraktal boyutların kutu sayma yöntemiyle ilişkisi,

$$f_D = \lim_{\Delta\delta \rightarrow 0} \frac{\log N(\delta)}{-\log(1/\delta)} \quad (2.7)$$

formülüne dayanır. N örneğin deseninin aynı olan yerlerini içeren sayı ve  $\delta$  kutu boyutunu gösteren sayıdır.

### 3.3.3 Tanecik Boyutu (Grain Size) Değerinin Bulunması

Asıl olarak Tanecik boyutları için hesaplama yöntemi farklıdır. Burada hesaplama yöntemi, planimetrik yöntem ortalama tane alanı hesaplanarak yani planimetrik metot kareli alanda tanelerin toplamıyla ortalama tanecik boyutlarını bize verir.

### 3.3.4 Hurst Eksponansiyel Değerinin Hesaplanması

Hurst üstel katsayısı 0 ve 1 aralığında değerler almaktadır. Hurst üstel katsayısına dayalı olarak serilerin üç kategoride sınıflandırılabilir. Hurst üstel katsayısı,  $H = 0,5$  durumunda (1), serinin rassal bir trend izlediği, başka bir ifadeyle

normal bir dağılım sergilediği söylenebilir.  $0 < H < 0,5$  durumu (2), serinin uzun dönem hafıza etkisine sahip olmadığı anlamına gelmektedir.  $0,5 < H < 1$  durumunda ise (3), uzun dönem hafıza etkisine sahip bir seriden söz edilebilir.

Dönüştürülmüş genişlik değerleri (R/S) ile gözlem sayısı (t) arasında regresyon denklemi kurulur. Regresyondan elde edilen doğru denkleminin eğimi, Hurst üstel katsayısının eğimidir.

### 3.3.5 Kaplama Oranı (Occupied Fraction)

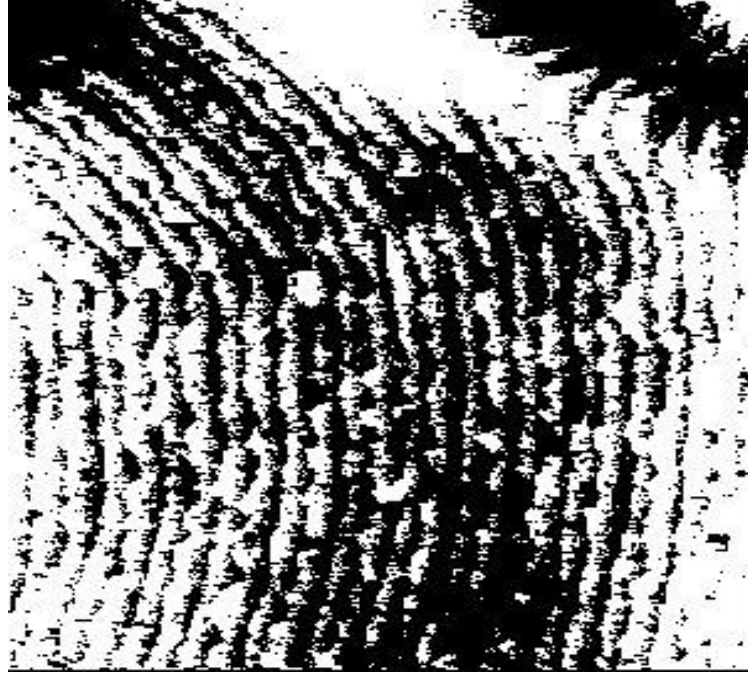
Kaplama oranı sıcaklıkla değişebilen bir niceliktir. Bunun sebebi maddelerin atomlar ve moleküllerden oluşmasıdır. Isı alan ve sıcaklığı artış gösteren bu atom ve moleküller farklı sıcaklıklarda hacimsel olarak artış ve azalış gösterirler. Fakat bu artış ve azalış değişik element atomları için farklı olur, farklı sıcaklıklarda gerçekleşir. Örneğin bir element atomunun sıcaklığı  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkarıldığında iki katına çıkarken, bir diğeri dört katına çıkabilmektedir.

$$\emptyset(N(r), L) = N(r)L^{-d} \quad (2.11)$$

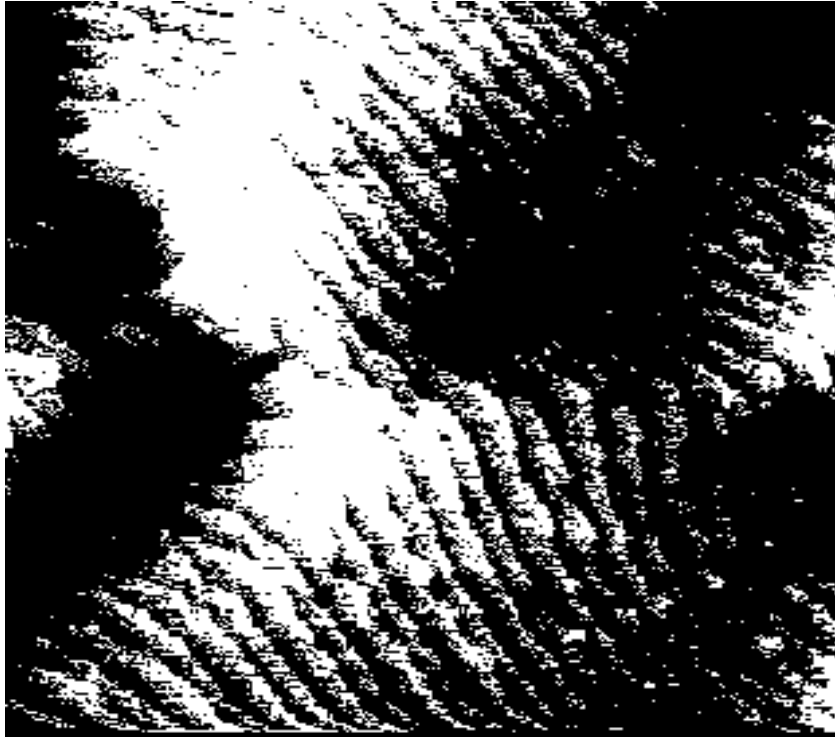
N, BMP resim formatına göre parçacıkların toplam sayısıdır.

Bir tanecik kümesinin topolojik boyutunu hesaplamada kullanılan metotlardan biri *kutu sayma* yöntemidir. Bu yöntemde yüzeyde bulunan kümelerin tarayıcı (scanner) ile görüntüsü elde edilir. Bilgisayar ortamına taşınan ve seçilen herhangi bir kümenin etrafındaki kümeyle ait olmayan oluşumlar temizlenir. Kümeyle ait tüm alan belirlendikten sonra kapalı kare örgü içerisine taşınır. Küme kapalı kare örgüde haritalandırılır. Yazılım yardımı ile kapalı kare örgüdeki her gözün doluluk oranı belirlenir [10].

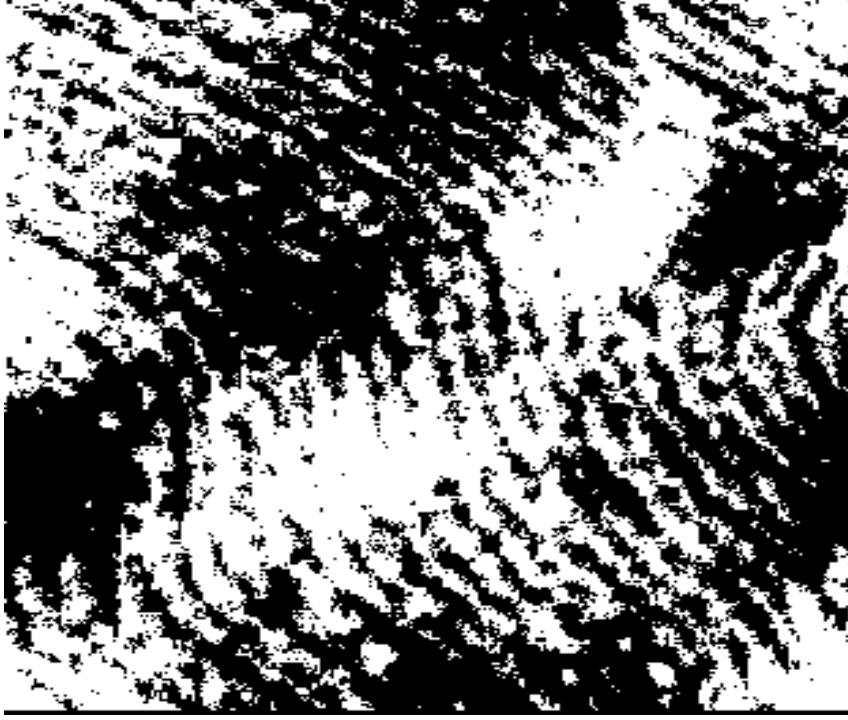
Örgü gözünün herhangi biri dolu ise tanecik yoğunluğu 1, eğer boş ise 0 alınır. Daha sonra örgü içindeki toplam dolu gözler saydırılır. Dolu gözlerin sayısı kümeyle meydana getiren toplam tanecik sayısı olarak atanır. Kümeyle ait nesnelere bulunduğu r yarıçaplı bölge içinde N(r) deki gözler sayılır. Yukarıdaki bağıntısının log - log grafiğinin doğruya karşılık (log N nin log 1/r'ye bağlı değişim grafiği) eğimi topolojik boyutu verir.



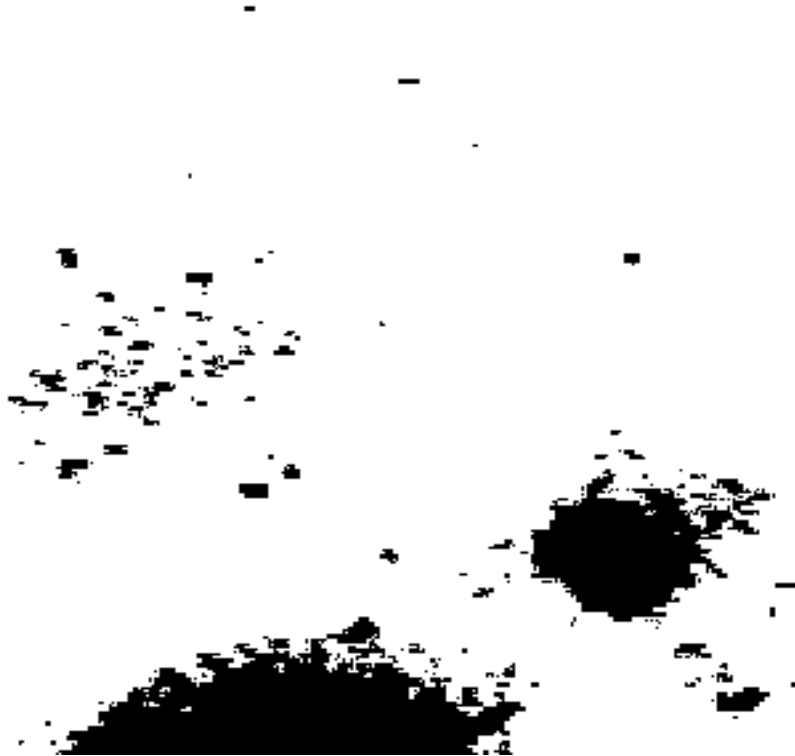
**Şekil 3.12:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin 200 °C’de binary formatına alınmış fotoğrafı.



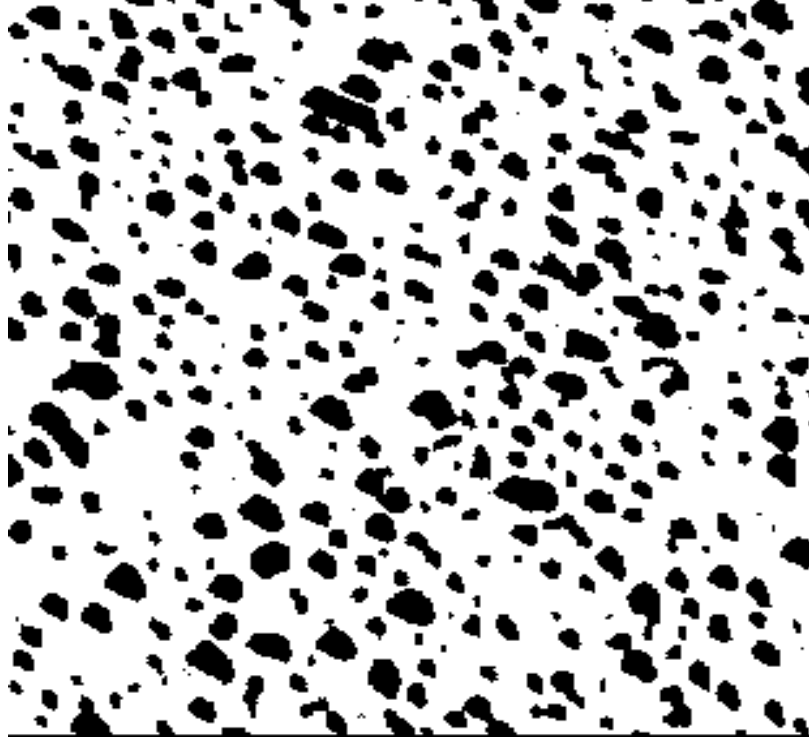
**Şekil 3.13:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin 500 °C’de binary formatına alınmış fotoğrafı.



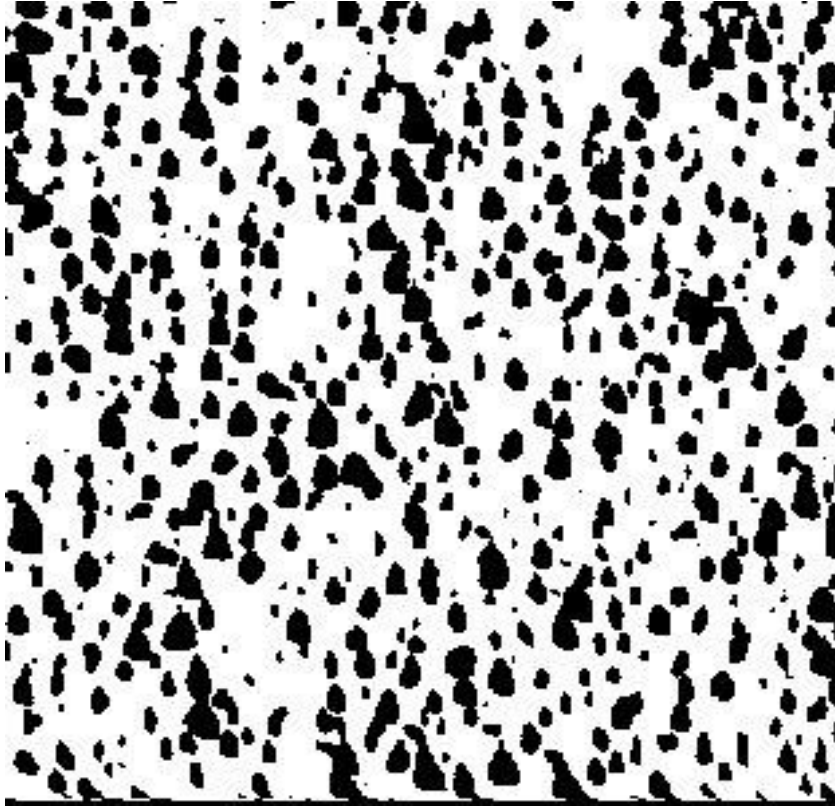
**Şekil 3.14:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin 900 °C’de binary formatına alınmış fotoğrafı.



**Şekil 3.15:**  $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$  yarıiletken ince filminin 1000 °C’de binary formatına alınmış fotoğrafı.



Şekil 3.16: Al<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>N / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yarıiletken ince filminin 1150 °C'de binary formatına alınmış fotoğrafı.



Şekil 3.17: Al<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>N / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yarıiletken ince filminin 1200 °C'de binary formatına alınmış fotoğrafı.

### 3.3.6 Ölçekleme Teorisi (Scaling Theory)

Ölçekleme yöntemiyle hesaplama yapmak istersek, numune yüzeyinin morfolojik yapısının istatistiksel niceliklerini belirlemek için Atomik Kuvvet Mikroskopuyla görüntüler alınır. Bu bilgiler bilgisayar ortamına aktarılır.

Görüntü resimleri BMP formatına dönüştürülerek kapalı kare örgü içine yerleştirilir.

Görüntülerde siyah ve beyaz oluşumların bulunduğu gözlemlenir. Beyaz bölgeler boş olup siyah bölgeler atomların toplandığı yerlerdir.

Görüntülerde siyah ve beyaz nokta birimli (piksel) sayıları ayrı ayrı 1, 2, 3, 4, ...n tane gruplanıp hesaplanmaktadır.  $N(h)$ , toplam piksel sayısı olmak üzere, siyah veya beyaz piksel grup sayısı ile arasındaki ilişki:

$$N(h) = \sum_{i \leq h} \rho(x_i) \quad (2.8)$$

bağıntısı ile verilir. Burada  $x_i$ ,  $i$ . Pikselin parçacık yoğunluğu olup dolu ve boş gözler için:  $\rho$ , eğer piksel siyah ise 1; eğer piksel beyaz ise 0 olur.

$$\rho(x_i) = \begin{cases} 1. \text{ eğer } x_i \text{ deki piksel siyah ise} \\ 0. \text{ eğer } x_i \text{ deki piksel beyaz ise} \end{cases} \quad (2.9)$$

bağıntısı ile tanımlanmaktadır.  $x_i$  piksel biriminde 0'dan n'ye kadar değişen  $h$  kalınlığının üzerinden toplam piksellerin sayısı

$$N(h) \sim h^\alpha \quad (2.10)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Burada  $\alpha$ , kritik üs değeridir. Kritik üs  $\alpha$  değeri artarken küme grupları da daha yoğun bir yapı özelliği göstermektedir [10].

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

AlGaN ince filminin 1200 °C'ye kadar yapılan tavlama esnasında periyodik olarak AFM ile alınan görüntüler üzerinden Image J ve Excel programlarıyla yaptırılan kutu saydırma, ölçekleme teorisi gibi yöntemler ile alınan ölçümler üzerinden yapılan hesaplamalarla AlGaN ince filmin topografik yapısına dair bazı parametre değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerler yüzeyin pürüzlülüğünden başlayarak topografik yapısına dair birçok bilgiyi sunmaktadır. Bu parametrelerin aldığı değerler Tablo 4.1' de listelenmiştir. Tablo 4.1'deki L hesaplama yapılacak parametreler için seçilen bölgenin uzunluğudur.

**Tablo 4.1:** AlGaN ince filmde sıcaklığa bağlı değişimleri incelenen parametre değerleri.

Sıcaklık	Tanecik Boyutu	Fraktal Boyut	Kaplama Oranı (%)	L=25 µm iken Pürüzlülük RMS Değeri	L=300 µm iken Pürüzlülük RMS Değeri	Hurst <u>exponansiyel</u>
200	12,599	1,855	6,173	0,073±0,010	0,138±0,007	0,574±0,079
300	10,171	1,817	3,436	0,081±0,010	0,125±0,008	0,568±0,760
500	4,993	1,911	1,413	0,085±0,027	0,159±0,014	0,613±0,065
600	6,048	1,928	3,629	0,111±0,007	0,127±0,008	0,599±0,105
800	3,801	1,844	2,191	0,098±0,003	0,182±0,009	0,625±0,071
900	8,302	1,876	4,359	0,109±0,014	0,158±0,011	0,622±0,088
1000	32,065	1,702	4,952	0,08±0,024	0,146±0,007	0,624±0,018
1150	60,919	1,630	21,730	0,185±0,041	0,205±0,012	0,695±0,114
1200	63,460	1,711	24,910	0,219±0,032	0,236±0,012	0,729±0,118

Tablo 4.1'de listelenen değerlerden tanecik boyutu, fraktal boyut, kaplama oranı ve Hurst eksponansiyel değerlerinin sıcaklığa göre değişimleri aşağıdaki başlıklarda incelenmiştir. Şekiller ise OriginPro 7.0 programında çizilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda incelenmiş ve birbirine göre değerlendirilme yapılmıştır. Bu değerlendirme yapılırken literatürde geçen bilimsel makalelerle karşılaştırma

yapılmış ve bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

#### 4.1 Tanecik Boyutunun Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Sıcaklık (T) ile tanecik boyutunun (S) değişimi Şekil 4.1’de görülmektedir. Bu değişimi bir matematiksel model ile tanımlamak mümkündür. Lineer olmayan regresyon metodu ile üstel büyüme fonksiyonuna göre uygun bir değişim denklem (4.1)’de görülmektedir.

$$S(T) = S_0 + A_1 e^{T/t} \quad (4.1)$$

Burada  $S_0$ ,  $A_1$  ve  $t$  regresyon sabitleri olup, yöntemin güvenilirliğini belirleyen regresyon sabiti  $r^2=0,92632$  değerindedir. Şekil 4.1’deki tanecik boyutunun sıcaklığa bağlı değişimi için hesaplanan sonuçlar, denklem (4.1)’den elde edilen matematiksel eğri ile uyum içindedir. Matematiksel modele ait parametreler Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

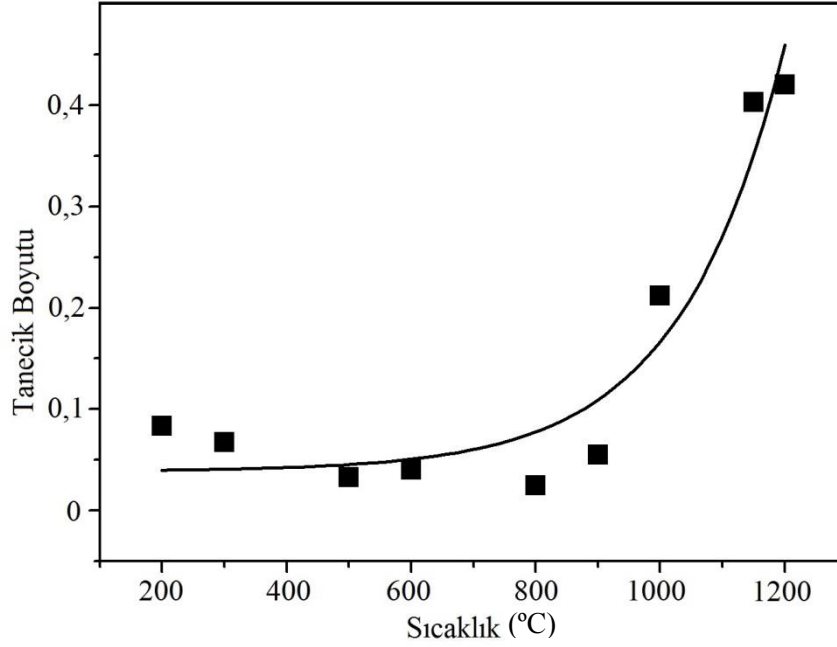
**Tablo 4.2:** Tanecik boyutunun sıcaklığa bağlı matematiksel modelindeki sabit parametrelerin değerleri.

Parametre	Değer
$S_0$	0,03892
$A_1$	0,00033
$t$	167,74171

Tanecik boyutunun sıcaklıkla değişimi Şekil 4.1’deki gibi üstel büyüme fonksiyonuna uyan bir davranış göstermiştir. Şekil 4.1’deki sonuçlar literatürde var olan sonuçlarla uyum içindedir [7]. Paslanmaz çelik (C, Cr, Ni, Mo, Mn, Si, N bileşimi) yüzeyi üzerine kısa sürede uygulanan tavlama sıcaklığının değişimi ile yüzey morfolojisindeki değişimin incelendiği bu çalışmada [7], sıcaklık 904 °C, 1010 °C, 1095 °C, 1194 °C değerlerine ulaştırılmış ve bu değerlerde yüzeye ait değerler ölçülmüştür. Sonuç olarak tanecik boyutu değerinin paslanmaz çelik için de 1000 °C altında çok fazla değişmediği, 1095 °C’de görülür şekilde arttığı, 1194 °C de ise büyük bir artışın olduğu göze çarpmaktadır. Şekil 4.1’deki sonuçlara göre 1000 °C’nin altında bazı değerlerde değişiklik görülse de 1000 °C ve üzerinde tanecik



boyutunda büyük bir artış olduğu ve literatürle de [7] uyum içinde olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.1:** Tanecik boyutunun sıcaklığa bağlı değişimi.

#### 4.2 Fraktal Boyutun Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Fraktal boyutun sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.2’ye göre fraktal boyut denklem (4.2)’deki gibi sıcaklığa 3. dereceden bir fonksiyonla bağlıdır.

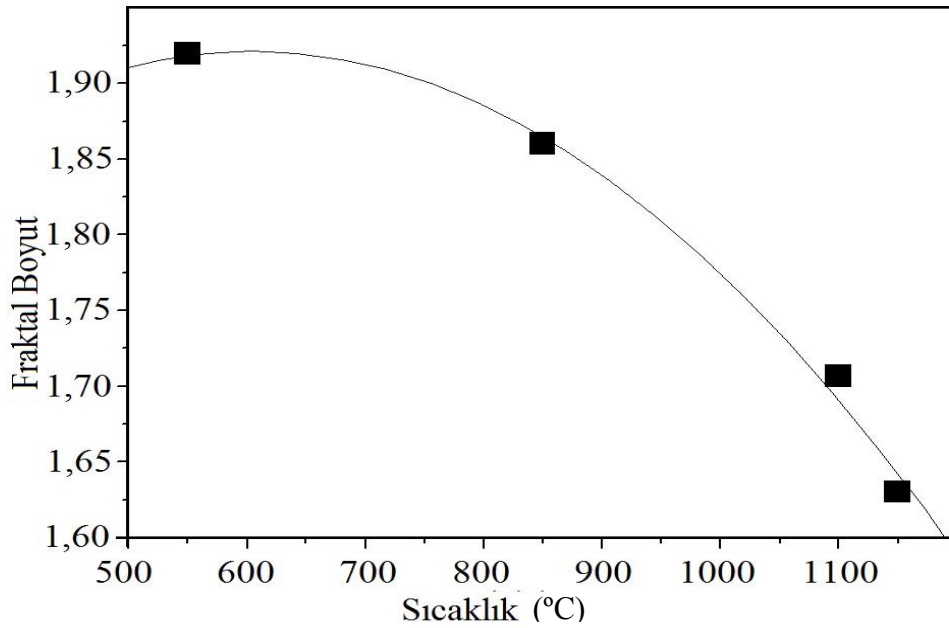
$$F_D = A + Bt + Ct^2 + Dt^3 \quad (4.2)$$

Tablo 4.2’de görüldüğü gibi A, B, C ve D birer sabit olup denklem (4.2)’deki gibi çıkan sonuçlarla uyumludur. Buna göre fraktal boyut değeri sıcaklık arttıkça lineer olmayan bir şekilde azalmıştır. Yöntemin güvenilirliğini belirleyen regresyon sabiti  $r^2 = 0,993$  değerindedir. Şekil 4.2’deki fraktal boyutun sıcaklığa bağlı değişimi için hesaplanan sonuçlar, denklem (4.2)’den elde edilen matematiksel eğri ile uyum içindedir.

**Tablo 4.3:** Fraktal boyutun sıcaklığa bağlı matematiksel modelindeki sabit parametrelerin değerleri.

Parametre	Değer
A	1,70261
B	6,20219
C	-2,67568
D	-2,77223

Literatür [7]'de paslanmaz çelik üzerinde tavlama sıcaklığına göre fraktal boyut ve tanecik büyüklüğü değerlerinin araştırıldığı makalede, tavlama sıcaklığının değişimi ile yüzey morfolojisindeki değişimi incelenmiştir. Araştırmada sıcaklık 904 °C, 1010 °C, 1095 °C, 1194 °C değerlerine ulaştırılmış ve bu değerlerde yüzeye ait değerler ölçülmüştür. Fraktal boyut değerleri bu tez çalışmasında bulunan değerlerle uyum içinde azalarak benzer davranış göstermiştir. Fraktal boyut değeri sıcaklığa 3. dereceden bir fonksiyonla bağlıdır. Bu çalışmada sıcaklık artışıyla fraktallığı düşürmektedir. Diğer bir değişle sıcaklık artışı fraktallığı azaltmaktadır, yani yüksek sıcaklıklarda var olan düzenli ve birbirini tekrarlayan yapı tamamıyla bozulmaktadır.



**Şekil 4.2:** Fraktal boyutun sıcaklığa bağlı değişimi.

### 4.3 RMS Pürüzlülük Değerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Yüzey yapısının değerlendirilmesi, yüzey pürüzlülüğü ile yapılır. Yüzey pürüzlülüğünü tanımlamak için gereken en önemli iki istatistiksel parametre aritmetik pürüzlülük (RA) ve karekök ortalama (Root Mean Square – RMS, ( $\sigma$ )) pürüzlülük değeri değerleridir [24].

AlGaN yarıiletkenin yüzey pürüzlülüğünün sıcaklığa bağlı değişim değerleri Şekil 4.3’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünü bulmak için  $L=25 \mu\text{m}$  alındığında hesaplanan RMS değerleri kullanılmıştır. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi, RMS pürüzlülük değerleri  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ’nin altındaki sıcaklık değerlerinde düşük ve  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ’nin üzerine çıktığında pürüzlülük değerinde artış görülmüştür. Bu artış sıcaklığa denklem (4.3)’deki gibi eksponansiyel fonksiyon şeklinde ifade edilir. Yöntemin güvenilirliğini belirleyen regresyon sabiti  $r^2= 0,997$  değerindedir. Şekil 4.3’deki fraktal boyutun sıcaklığa bağlı değişimi için hesaplanan sonuçlar, denklem (4.3)’den elde edilen matematiksel eğri ile uyum içindedir.

$$y=y_0+Ae^{(x/t)} \quad (4.3)$$

Denklemdaki  $y_0$ ,  $A$  ve  $t$  sabit değerleri Tablo 4.4’te listelenmiştir.

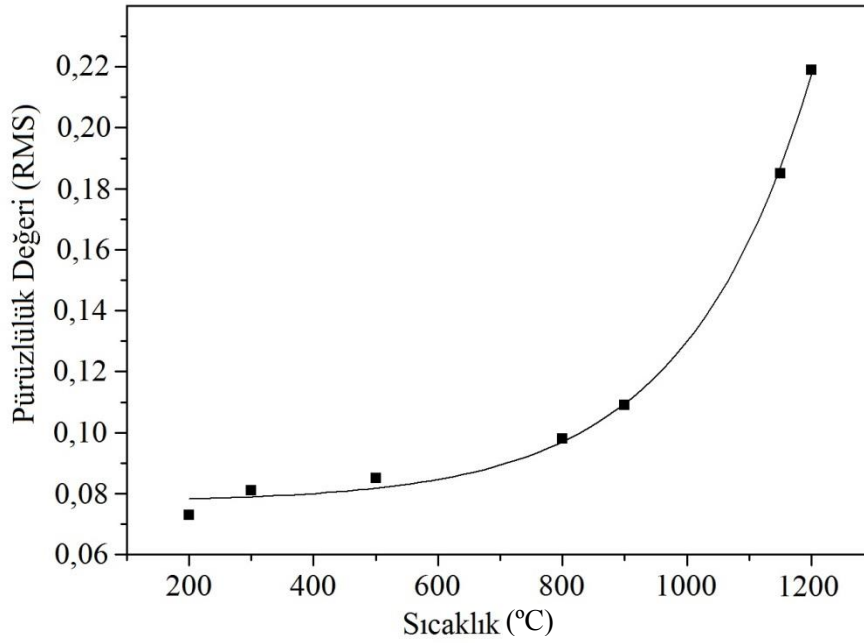
**Tablo 4.4:** RMS Pürüzlülük değerinin sıcaklığa bağlı matematiksel modeldeki sabit parametrelerin değerleri.

Parametre	Değer
$y_0$	0,07722
$A$	3,92749
$t$	204,137

Yapılan hesaplamalarda RMS pürüzlülük değeri için ulaşılan sonuç literatürle [23] uyum içindedir.  $\text{TiO}_2$  ince filminin yüzey morfolojisi ve fraktal boyutları üzerine yapılan çalışmada [23], AFM ile elde edilen görüntülerde, filmlerin tavlama sıcaklığı  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığa çıkıldıkça,  $\text{TiO}_2$  filmlerinin AFM görüntülerinde yüzey pürüzlülüğünü gösteren RMS değerinde artış görülmüştür. Özellikle sıcaklık değerleri  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ ’ye ulaştığında  $\text{TiO}_2$  filmlerin yüzey morfolojisinde ve pürüzlülükte

değişim tamamıyla belirgin hale gelmiştir [23]. Bu tez çalışmasında ise AlGaN ince filmleri üzerine uygulanan tavlama işleminde 1000 °C'nin üstünde yüzey pürüzlülüğündeki artış tamamıyla belirgin hale geldiği görülmüştür.

Ayrıca Tablo 4.4'te RMS değerleri incelendiğinde, L=500 µm iken alınan RMS değerlerinin her sıcaklıkta, L=25 µm'deki değerlerden fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar literatürdeki [8] sonuçlarla uyum içindedir. Bakır, mika ve titanium-bakır filmler üzerine yapılan araştırmada L=500 nm iken alınan bütün değerler L=50 nm iken bulunan değerlerden yüksek bulunmuştur. Dolayısıyla literatür [8]'de L uzunluk değeri arttıkça RMS pürüzlülük değerinin artış gösterdiği gözlenmiştir.



**Şekil 4.3:** RMS pürüzlülük değerinin sıcaklığa bağlı değişimi.

#### 4.4 Hurst Eksponansiyel Değerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Yüzeyin Hurst eksponansiyel değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Şekil 4.4'deki hesaplanan sonuçlar, denklem (4.4)'deki 2. dereceden bir fonksiyonun grafiğine uymaktadır.

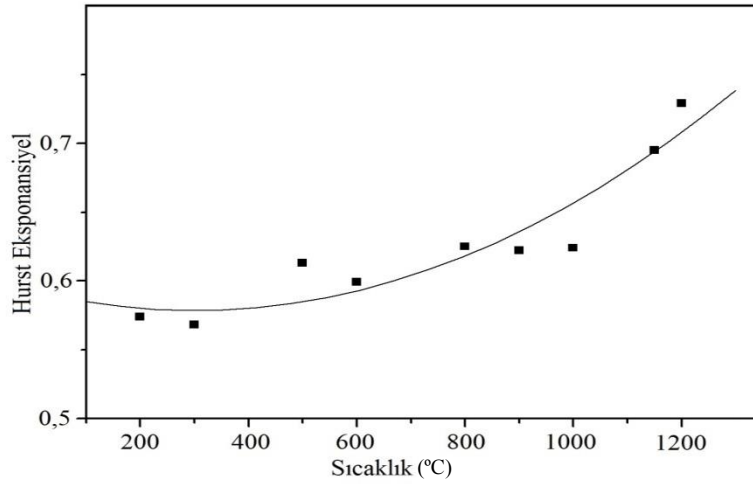
$$Y = A + B_1x + B_2x^2 \quad (4.4)$$

Yöntemin güvenilirlik değeri olan regresyon sabiti  $r^2 = 0,87$  dir. Tablo 4.5’de sabit parametreler listelenmiştir.

**Tablo 4.5:** Hurst eksponansiyel değerinin sıcaklığa bağlı matematiksel modeldeki sabit değerleri.

Parametre	Değer
A	0,59314
B <sub>1</sub>	-9,71338
B <sub>2</sub>	1,60719

Bulunan sonuçlara göre, Hurst eksponansiyel değeri, sıcaklık arttıkça, sıcaklığa 2. dereceden bir fonksiyonun grafiğine uymaktadır. Bu sonuçlar literatürle de uyum içindedir [14]. Borid tabakaların mikro yapısına dair yapılan bu çalışmada, borid yapıların fraktal boyutlarının ve kendine benzerliğinin sıcaklığa bağlı olarak nasıl değişim gösterdiği incelenmiştir. Görülmüştür ki sıcaklık 1193 K’den 1293 K’ne çıkartıldığında Hurst eksponansiyel parametresi de artış göstermiştir. Bu pürüzlülük değeri incelenen örnek yüzeyin yüzeyine bağlı olup yüzeyin fraktallığı hakkında bilgi vermektedir [14]. Bu tez çalışmasında ise Hurst üstel değerinin sıcaklığa bağlı olan değişimi Şekil 4.4’de görüldüğü gibi literatürle [14] uyum içindedir. Sıcaklık arttıkça Hurst eksponansiyel parametresi artmaktadır.



**Şekil 4.4:** Hurst eksponansiyel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.

#### 4.5 Kaplama Oranının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Sıcaklık artışı ile yüzeydeki noktaların görüntüyü kaplama oranı Şekil 4.5’de verilmiştir. Yapılan hesaplamalar, yüksek sıcaklıklardaki kaplama oranında net bir artış olduğunu göstermiştir. Bu artış üstel olarak sıcaklığa denklem (4.5)’deki gibi bağlıdır.

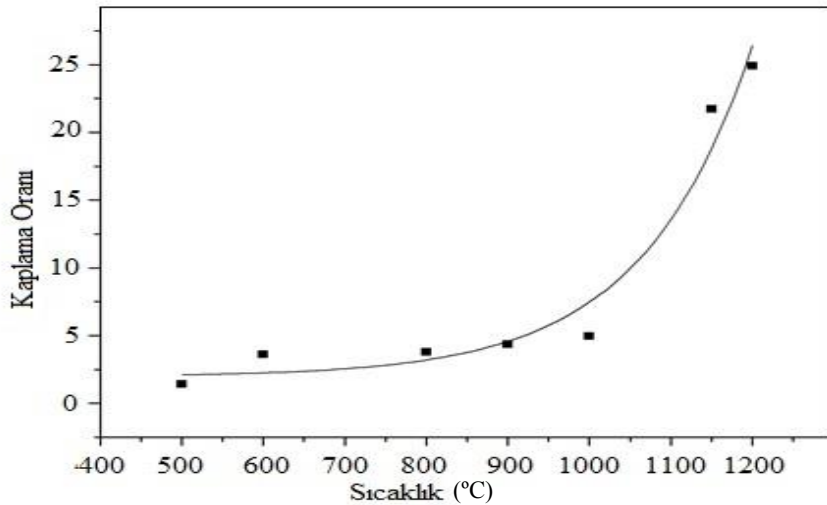
$$Y=A_1e^{(-x/t)}+y_0 \quad (4.5)$$

Bağıntıda  $A_1$ ,  $y_0$  sabittir.  $Y$  değeri ise sıcaklık ile artmaktadır. Bulunan denklemin regresyon sabiti  $r^2= 0,96482$ ’dir. Tablo (4.6)’da sabitler listelenmiştir:

**Tablo 4.6:** Kaplama oranının sıcaklığa bağlı matematiksel modeldeki sabit parametrelerin değerleri.

Parametre	Değer
$y_0$	1,97349
$A_1$	0,00315
$t$	-134,0019

Bu çalışmada, ince film yüzeyinde bulunan tanecikler sıcaklık değişimi uygulandığında boyutça değişim göstermeye başlamaktadır, fakat bu değişim 1000 °C’ye kadar az olmakta, 1100 °C’nin üstünde büyük artış göstermektedir. Sonuç olarak, sıcaklık arttıkça tanecikler de büyümekte ve kaplama oranı artmaktadır.



**Şekil 4.5:** Kaplama oranının sıcaklığa bağlı değişimi.

#### 4.6 Hurst Eksponansiyel Değerinin Fraktal Boyuta Bağlı Değişimi

Hurst eksponansiyel değerinin fraktal boyuta bağlı grafiği üstel bir fonksiyon olarak denklem (4.6)'da tanımlanmıştır. Fraktal boyut değerinin Hurst eksponansiyel değerinin artmasıyla azaldığı bulunmuştur. Hurst eksponansiyel değeri fazla artınca, fraktal boyut değerinde ani bir düşüş gözlenmiştir.

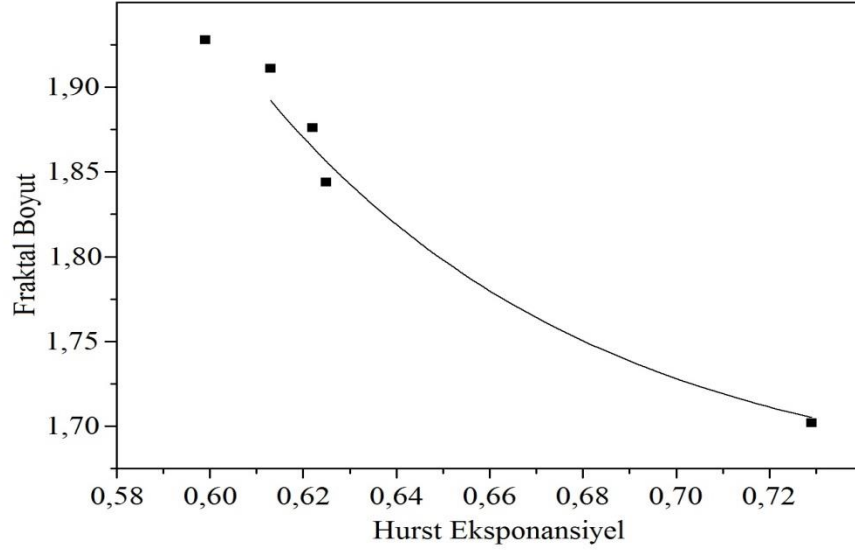
$$y = y_0 + A_1 e^{(-x/t)} \quad (4.6)$$

Denklemden  $y_0$ ,  $A_1$  ve  $t$  birer sabit olup fraktal boyut Hurst eksponansiyel değeriyle bağlı üstel bir fonksiyondur. Bu denklem, Şekil 4.6'da bulunan değerler ile  $r^2=0,97$  oranında bağdaşmaktadır. Denklemdenki sabitler Tablo 4.7'de listelenmiştir.

**Tablo 4.7:** Hurst eksponansiyel değerinin fraktal boyuta bağlı matematiksel modeldeki sabit parametrelerin değerleri.

Parametre	Değer
$y_0$	1,6593
$A_1$	1254,8573
$t$	0,0713

Hurst eksponansiyel değeri pürüzlülüğün önemli bir ölçüsüdür. Hurst eksponansiyel değerinin sıcaklığa bağlı durumu Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, Hurst eksponansiyel değerinin artıkça fraktal boyut azalmaktadır. Sonuç olarak, Hurst eksponansiyel değeri ile fraktal boyut ters orantılıdır.



**Şekil 4.6:** Fraktal boyut değerinin, Hurst eksponansiyel değerine bağlı değişimi.

#### 4.7 Tanecik Boyutunun Fraktal Boyuta Bağlı Değişimi

Tanecik boyutunun fraktal boyut ile değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir. Tanecik boyutu Şekil 4.1'de görüldüğü gibi sıcaklıkla artış göstermektedir. Fraktal boyutunun ise sıcaklığın artmasıyla azalan bir eğilimi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Şekil 4.7'de tanecik boyutunun artmasıyla fraktal boyut azalmıştır.

$$y=y_0+A_1e^{(-x/t)} \quad (4.7)$$

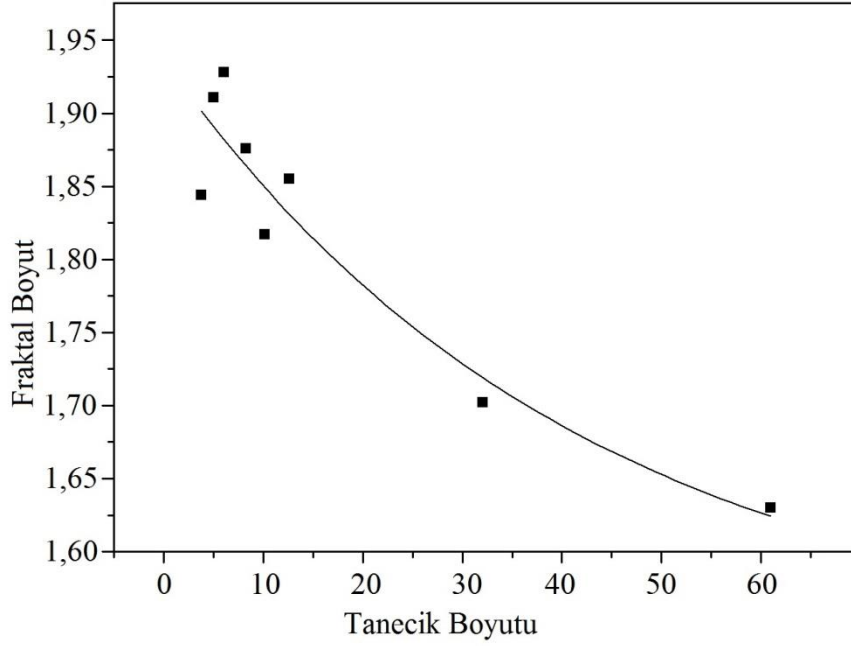
Şekil 4.7'deki hesaplanan sonuçlar denklem (4.7)'deki fonksiyona eksponansiyel olarak uymaktadır. Buradaki  $y_0$ ,  $A_1$  ve  $t$  sabitlerdir. Denklem (4.7)'nin Şekil 4.7'deki uyumunun güvenilirliğini veren regresyon sabiti ise  $r^2=0,89$  civarındadır. Denklemdeki parametreler Tablo 4.8'de listelenmiştir.

**Tablo 4.8:** Tanecik boyutunun fraktal boyuta bağlı matematiksel modeldeki sabit parametrelerin değerleri.

Parametre	Değer
$y_0$	1,528
$A_1$	0,4088
$t$	42,0778



Paslanmaz çelik üzerine tavlama sıcaklığının etkisinin araştırıldığı çalışma [7], tanecik boyutunun fraktal boyut ile değişimi bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyum içindedir. Sonuç olarak, sıcaklık artışının, tanecik boyutu değerinde artışa neden olduğu ve buna karşılık fraktal boyut değerinde azalma ile sonuçlandığı görülmüştür.



**Şekil 4.7:** Fraktal boyut değerinin tanecik boyutuna bağlı değişimi.

#### 4.8 Tanecik Boyutunun RMS Pürüzlülük Değerine Bağlı Değişimi

Bu iki parametrenin birbirine bağlı değişimi Şekil 4.8'de görülmektedir. Sıcaklık arttıkça örneğin yapısındaki tanecik yapısı büyüklüğünde artış olmuştur. Sıcaklık arttıkça pürüzlülük artmıştır. Dolayısıyla bu değerlerin birbirine bağlı grafiği de Şekil 4.8'de görüldüğü gibi orantılı bir artış görülmektedir. Bu artış değerleri denklem (4.8)'e uymaktadır.

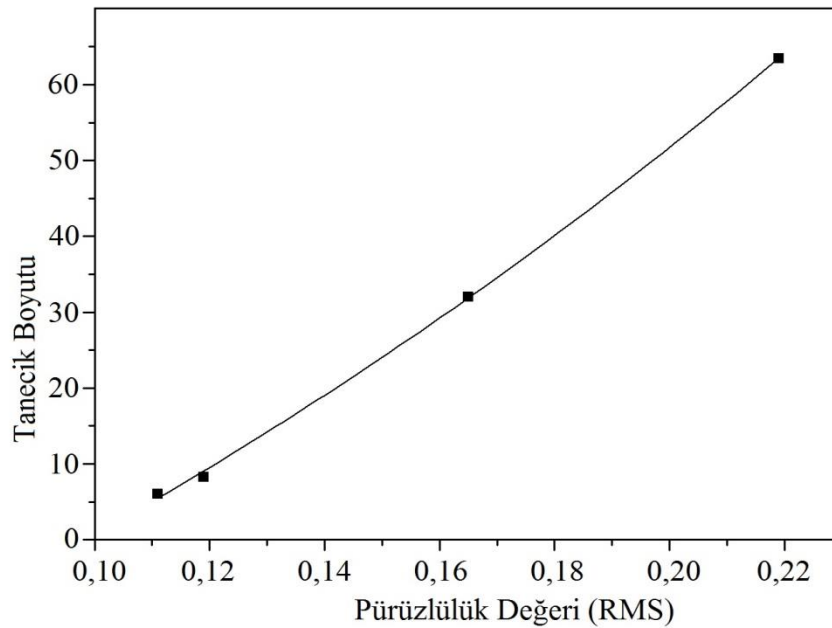
$$y = y_0 + A_1 e^{(-x/t)} \quad (4.8)$$

Denklemden  $y_0$ ,  $A$ ,  $t$  sabit parametreler olup değerleri Tablo 4.9’da listelenmiştir. Şekil 4.8’e bağlı olarak bulunan (4.8) denklemin doğruluğunu gösteren regresyon sabiti  $r^2=0,99$  bulunmuştur. Sonuç olarak bulunan değerler ile denklemden elde edilen değerler tam uyum içindedir.

**Tablo 4.9:** Tanecik boyutunun RMS pürüzlülük değerine bağlı matematiksel modeldeki sabit parametrelerin değerleri.

Parametre	Değer
$y_0$	-129,41893
$A_1$	93,33718
$t$	-0,30163

Bulunan sonuçlarla literatürdeki çalışmalar [9] karşılaştırıldığında uyumlu olduğu grlmştir. AFM’ye dayalı ince film yüzeyinde güç spektral yoğunluğu incelemesi çalışmasında [9], pürüzlülük değeri arttıķa tanecik boyutunun da arttığı ifade edilmiştir. Dolayısıyla alışmamızda bulunduğumuz sonuç literatürle uyum içindedir. Sonuç olarak tanecik boyutu arttıķa RMS pürüzlülük değeri de artmaktadır.



**Şekil 4.8:** Tanecik boyutunun RMS pürüzlülük değerine göre değişimi.

## 5. SONUÇ

Tanecik boyutunun sıcaklıkla değişimi üstel büyüme fonksiyonuna uyan bir davranış gösterdiği görüldü. Sonuç olarak 1000 °C'nin altında bazı değerlerde değişiklik görölse de 1000 °C ve üzerinde tanecik boyutunda büyük bir artış olduğu ve literatürle de [7] uyum içinde olduğu görüldü.

Fraktal boyut değeri sıcaklığa 3. dereceden bir fonksiyonla bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda var olan düzenli ve birbirini tekrarlayan yapı tamamıyla bozulmaktadır yani sıcaklık artışı fraktallığı düşürdüğü gözlemlendi. Fraktal boyut değerleri literatürle de uyum içindedir [7].

AlGaIn yarıiletkenin yüzey pürüzlülüğünün sıcaklığa bağlı değişimi 1000 °C'nin altındaki sıcaklık değerlerinde düşük olduğu ve 1000 °C'nin üzerine çıkıldığında pürüzlülük değerinde artış görüldü. RMS pürüzlülük değeri literatürle [23] uyum içinde olduğu görüldü. Literatür [8]'e uyumlu olarak L uzunluk değeri arttıkça RMS pürüzlülük değerinin artış gösterdiği gözlemlendi.

Hurst eksponansiyel değeri sıcaklık arttıkça, sıcaklığa 2. dereceden bir fonksiyona bağlı olduğu gözlemlendi. Hurst eksponansiyel değeri literatürle [14] uyum içinde olduğu, sıcaklık arttıkça Hurst eksponansiyel değerinin arttığı gözlemlendi.

Sıcaklık artışı ile yüzeydeki noktaların görüntüyü kaplama oranında bir yükseliş olduğu gözlemlenmiş fakat bu yükseliş 1000 °C'ye kadar az olmakta, 1100 °C'nin üstünde büyük artış gösterdi. Sonuç olarak, sıcaklık arttıkça tanecikler de büyümekte ve kaplama oranı arttığı gözlemlendi.

Hurst eksponansiyel değeri fraktal boyuta üstel bir fonksiyonla bağlıdır. Fraktal boyut değerinin Hurst eksponansiyel değerinin artmasıyla azaldığı gözlemlendi. Hurst eksponansiyel değeri fazla artınca, fraktal boyut değerinde ani bir düşüş gözlemlendi. Sonuç olarak, Hurst eksponansiyel değeri ile fraktal boyut ters orantılıdır.

Tanecik boyutu sıcaklıkla artış gösterdiği gözlemlendi. Fraktal boyut ise sıcaklığın artmasıyla azalan bir eğilim gösterdi. Tanecik boyutunun fraktal boyut ile değişimi eksponansiyel fonksiyona uymakta. Sonuç olarak, sıcaklık artışının, tanecik

boyutu değerinde artışa neden olduğu ve buna karşılık fraktal boyut değerinde azalma ile sonuçlandığı görüldü.

Tanecik boyutunun RMS pürüzlülük değerine bağlı değişiminde orantılı bir artış görüldü. Sıcaklık artıkça örneğin yapısındaki tanecik yapısı büyüklüğünde artış olmuştur. Böylece sıcaklık arttıkça pürüzlülük arttı. Elde edilen sonuçlar literatürle [9] uyum içindedir. Sonuç olarak tanecik boyutu arttıkça RMS pürüzlülük değeri de artmaktadır.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Sze, S. M. and Kwok K. N., *Physics of Semiconductor Devices*, New Jersey: John Wiley and Sons, 7-62, (2007).
- [2] Quinn B.G. and Hannan E. J., *The estimation and tracking of frequency*, New York: Cambridge University Press, 1-44, (2001).
- [3] Rao Neti, N., Rani Parmar, G., Bakardjieva, S. and Subrt, J., “Thick film titania on glass supports for vapour phase photocatalytic degradation of toluene, acetone, and ethanol”, *Chem. Eng. J.*, 163, 219-229, (2010).
- [4] Jang, H. D., Kim, S. K. and Kim, S. J., “Effect of particle size and phase composition of titanium dioxide nanoparticles on the photocatalytic properties”, *J. Nanopart. Res.*, 3, 141-147, (2001).
- [5] Neamen, A. D., *Semiconductor Physics and Devices*, New York: Mc Grow Hill, 1-51, (2003).
- [6] Militký, J. and Bajzík, V., “Surface roughness and fractal dimension”, *The Journal of The Textile Institute*, 92 (3), 91-113, (2001).
- [7] Colas, R., “On the variation of grain size and fractal dimension in an Austenitic Stainless Steel”, *Materials Characterization*, 46, 353-358, (2001).
- [8] Lee, S. M. and Krim, J., “Scanning tunneling microscopy characterization of the surface morphology of copper films grown on mica and quartz”, *Thin Solid Films*, 489, 325-329, (2005).
- [9] Gavrilă, R., Dinescu, A. and Mardare D., “A power spectral density study of thin films morphology based on AFM profiling”, *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 10 (3), 291-300, (2007).
- [10] Bayırlı, M., “Simülasyon ve ölçekleme yöntemi kullanarak küme parametrelerinin hesaplanması”, *Kırıkkale Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Bilimde Gelişmeler Dergisi*, 1, 7-10, (2012).

- [11] Bojovic, B., Kalajdzic, M., Miljkovic, Z. and Babic, B., “Fractal approach for substrates surface topography image evaluation”, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN) and EUREKA Brokerage Event*, Kallithea of Chalkidiki, Greece, 443-452, (2008).
- [12] Mandelbrot, B., *The fractal geometry of nature*, New York: W. H. Freeman and Company, (1982).
- [13] Balankin, A. S., “Physics of fracture and mechanics of self-affine cracks”, *Eng. Fracture Mech.*, 57, 135-204, (1997).
- [14] Campos, I., Ramirez, G., Balankin A. S. and Torres R., “Self affine patterns of boride layers”, *Materials Science Forum*, 553, 27-32, (2007).
- [15] Meakin, P., *Fractals, scaling and growth far from equilibrium*, Cambridge: Cambridge Non-linear Science Series 5, Cambridge University Press, (1998).
- [16] Middleton G. V., *Data analysis in the earth science using MATLAB*, New York: Prentice Hall NJ, (2000).
- [17] Xagas, A. P., Androulaki E., Hiskia A. and Falaras P., “Preparation, fractal surface morphology and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub> films”, *Thin Solid Films*, 357, 173-178, (1999).
- [18] Bassler, K. E., Gunaratne G. H. and McCauley J. L., “Markov processes, Hurst exponents, and nonlinear diffusion equations with application to finance”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 369 (2), 343-353, (2006).
- [19] Dinç, Y., “AlGaN İnce Filminin Isıl İşlem Sonrası Yapısal ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2007).
- [20] Lam, K. T. and Ji, L. W., “Fractal analysis of InGaN selfassemble quantum dots grown by MOCVD”, *Microelectron. J.*, 38, 905-909, (2007).

- [21] Robert A., Wilson, A. and Heather A. B., *Introduction to Scanning Probe Microscopy (SPM) Basic Theory Atomic Force Microscopy (AFM)*, New York: Prentice Hall NJ, (2006).
- [22] Sarto, F. , Castagna, E., Sansovini, M., Lecci, S., Violante, V., Knies, D. L., Grabowski, K. S. and Hubler, G. K., “Electrode surface morphology characterization by atomic force microscopy”, *ICCF-14 International Conference on Condensed Matter Nuclear Science*, 437-443, [www.iscmns.org/iccf14/ProcICCF14b.pdf](http://www.iscmns.org/iccf14/ProcICCF14b.pdf), (2008).
- [23] Petrović, S., Rožić, L., Grbić, B., Radić, N., Dostanić, J., Stojadinović, S. and Vasilić, R., “Morphology and fractal dimension of TiO<sub>2</sub> thin films”, *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 32 (2), 309-317, (2013).
- [24] Bayırlı, M., “Mangan dentritleri ve difüzyon ile sınırlı kümeleşme modeli”, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bil. Enstitüsü Dergisi*, 5 (2), 47-54, (2003).