



**T.C.**

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**



**DİELEKTRİK FİMLERİN KALINLIK VE  
KIRILMA İNDİSLERİNİN PAUL DALGACIK  
YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ Seçkin ÖZCAN**

**Fizik Anabilim Dalı**

**ÇANAKKALE**

**T.C.**  
**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**DOKTORA TEZİ**

**DİELEKTRİK FİLMLEİN KALINLIK VE**  
**KIRILMA İNDİSLERİNİN PAUL DALGACIK**  
**YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

**Seçkin ÖZCAN**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Tezin Sunulduğu Tarih: 22/07/2019**

**Tez Danışmanı:**  
**Prof. Dr. Serhat ÖZDER**

**ÇANAKKALE**

Seçkin ÖZCAN tarafından Prof. Dr. Serhat ÖZDER yönetiminde hazırlanan ve 22/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Dielektrik Filmlerin Kalınlık ve Kırılma İndislerinin Paul Dalgacık Yöntemi İle Belirlenmesi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı**’nda **DOKTORA TEZİ** olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

Prof. Dr. Serhat ÖZDER

.....

**Başkan**

Prof. Dr. Vildan BİLGİN

.....

**Üye**

Doç. Dr. Emre COŞKUN

.....

**Üye**

Doç. Dr. Özlem KOCAHAN YILMAZ

.....

**Üye**

Doç. Dr. Kadir ERTÜRK

.....

**Üye**

Prof. Dr. Levent GENÇ

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

Sıra No:.....

## İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI



**Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.**

Seçkin ÖZCAN

## TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Serhat ÖZDER'e, çalışma süresince her türlü desteği benden esirgemeyen Doç. Dr. Emre COŞKUN'a, Doç. Dr. Özlem KOCAHAN YILMAZ'a, doktora öğrencisi arkadaşım Erhan TİRYAKİ'ye, tüm zorlukları benimle göğüsleyen eşim Gamze ÖZCAN'a, hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme ve eğitim-öğretim yaşamımda katkısı olan tüm eski öğretmen ve hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Seçkin ÖZCAN

Çanakkale, Temmuz 2019

## SİMGELER VE KISALTMALAR

|                 |                                                     |
|-----------------|-----------------------------------------------------|
| SDD             | Sürekli dalgacık dönüşümü                           |
| $k_0$           | Dalga sayısı                                        |
| $\lambda$       | Dalga boyu                                          |
| $n$             | Kırılma indisi                                      |
| $n(k_0)$        | Kırılma indisi dağılımı                             |
| $d$             | Film kalınlığı                                      |
| $D$             | Optik kalınlık                                      |
| FD              | Fourier dönüşümü                                    |
| KZFD            | Kısa zamanlı Fourier dönüşümü                       |
| TFD             | Ters Fourier dönüşümü                               |
| fr              | Frekans                                             |
| Hz              | Hertz                                               |
| T               | Periyot                                             |
| $w$             | Kısa zamanlı fourier dönüşümü pencere fonksiyonu    |
| $b$             | Pencere fonksiyonunun konumunu belirleyen parametre |
| $x_0$           | $k_0$ uzayının Fourier uzayı                        |
| $E_i$           | Sınıra gelen elektrik alan vektörü                  |
| $E_t$           | Sınırdan geçen elektrik alan vektörü                |
| $E_r$           | Sınırdan yansıyan elektrik alan vektörü             |
| $H_i$           | Sınıra gelen manyetik alan vektörü                  |
| $H_t$           | Sınırdan geçen manyetik alan vektörü                |
| $H_r$           | Sınırdan yansıyan manyetik alan vektörü             |
| $k$             | Elektromanyetik dalganın ilerleme doğrultusu        |
| $\varepsilon_0$ | Boşluğun elektriksel geçirgenliği                   |
| $\mu_0$         | Boşluğun manyetik geçirgenliği                      |
| $r$             | Yansıma genlik katsayısı                            |
| $t$             | Geçme genlik katsayısı                              |
| $t$             | Zaman                                               |
| DD              | Dalgacık dönüşümü                                   |
| SD              | Stockwell dönüşümü                                  |
| BGF             | Bant geçiren filtre                                 |

|                 |                                                 |
|-----------------|-------------------------------------------------|
| AFD             | Ayrık Fourier dönüşümü                          |
| DOG             | Derivative of Gaussian                          |
| HFD             | Hızlı Fourier dönüşümü                          |
| $N_a$           | Toplam ölçek sayısı                             |
| $\psi$          | Sürekli dalgacık dönüşümünün pencere fonksiyonu |
| $a$             | Ölçek parametresi                               |
| $\hat{\psi}$    | $\psi$ fonksiyonunun Fourier uzayı              |
| $m$             | Paul dalgacığının derecesi                      |
| $\xi$           | Heaviside fonksiyonu                            |
| $A, B, C$       | Cauchy parametreleri                            |
| $C_1, C_2$      | İntegral sabitleri                              |
| $\Delta d$      | Kalınlıktaki belirsizlik                        |
| $\Delta n$      | Kırılma indisindeki belirsizlik                 |
| $\Delta D$      | Optik kalınlıktaki belirsizlik                  |
| $\Delta \theta$ | Geliş açısındaki belirsizlik                    |

## ÖZET

### DİELEKTRİK FİMLERİN KALINLIK VE KIRILMA İNDİSLERİNİN PAUL DALGACIK YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Seçkin ÖZCAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Serhat ÖZDER

22/07/2019, 71

Bu çalışmada Paul dalgacı özelinde sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) kullanarak dielektrik filmlerin kalınlık ve kırılma indisi dağılımı eş zamanlı olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, dielektrik filmlerin oda sıcaklığında, görünür bölge-yakın kızılötesi altı bölge aralığında iki farklı geliş açısında elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumları kullanılmıştır. Literatürde, SDD frekansı zamanla değişen sinyallerin frekans bilgilerini elde etmek için kullanılmıştır. Dielektrik filmlerin geçirgenlik spektrumlarına ait sinyallerin frekansları optik kalınlık (dolayısıyla kalınlık ve kırılma indisi) ile değişmektedir. Bu sebeple bu çalışmada iki farklı geliş açısı için elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyalinin içerisindeki tekrarlama frekansı bilgisinin (yani optik kalınlık bilgisinin) belirlenmesi ve buradan kalınlık ve kırılma indisi dağılımının eş zamanlı olarak elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için ilk olarak dielektrik filmlere ilişkin olan geçirgenlik spektrumu sinyalleri teorik olarak oluşturulmuştur. Bu sinyaller içerisindeki frekans bilgisi (yani optik kalınlık bilgisi) yardımıyla dielektrik filmlerin kalınlık ve kırılma indisi dağılımı eş zamanlı olarak belirlenmiştir. Sinyallere rasgele gürültü eklemek kaydıyla yöntem gürültülü geçirgenlik spektrumları için de çalışılmıştır. Bu çalışmalar 3. Bölümde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Simülasyon çalışmalarının sonuçlarına göre yöntem BK7 cama uygulanmıştır. Bu deneysel çalışma 4. Bölümde detaylıca anlatılmıştır. Yönteme ilişkin hata analizleri de yapılmış olup, bunlar sonuçlarla birlikte 5. Bölümde verilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Dielektrik Filmler, Fiziksel Kalınlık, Kırılma İndisi Dağılımı, Fourier Dönüşümü, Sürekli Dalgacık Dönüşümü, Paul Dalgacı.

## ABSTRACT

### DETERMINATION OF THICKNESSES AND REFRACTIVE INDICES OF DIELECTRIC FILMS BY PAUL WAVELET

Seçkin ÖZCAN

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Doctoral Dissertation in Physics Science

Advisor: Prof. Dr. Serhat ÖZDER

22/07/2019, 71

In this study thickness and refractive indices dispersion of dielectric films were determined using continuous wavelet transform (CWT/SDD) with Paul wavelet by simultaneously. For this purpose, transmittance spectrums which were acquired for two different angles in the visible and near infrared region at room temperature were used. In literature, CWT are used to determine the frequency information of chirp signals. The repetition frequencies of transmittance spectrums signals of dielectric films vary with optical thicknesses (then thickness and refractive index). Therefore, in this study, to determination of frequency information (or optical thickness information) in transmittance spectrum signals which were acquired for two different incident angles and to obtain thickness and refractive indices dispersion by simultaneously are intended. For this aim, firstly transmittance spectrum signals of dielectric films were generated theoretically. By aid of frequency information (so optical thicknesses information) in this signals thickness and refractive indices dispersion of dielectric films were determined by simultaneously. By adding random noisy to these signals, method also was tested for noisy transmittance spectrum signals. These studies are given in detail in chapter 3. According to the results of simulation studies, method was applied to BK7 glass example. This experimental studies are given in detail in chapter 4. Uncertainty and error of the method also are analysed they are given in chapter 5 with conclusions.

**Keywords:** Dielectric Films, Physical Thickness, Refractive Indices Dispersion, Fourier Transform, Continuous Wavelet Transform, Paul Wavelet.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

|                                                                                                                                                                                                        |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| TEZ SINAVI SONUÇ FORMU.....                                                                                                                                                                            | ii   |
| İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI.....                                                                                                                                                                    | iii  |
| TEŞEKKÜR.....                                                                                                                                                                                          | iv   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                                                                                                                                                          | v    |
| ÖZET .....                                                                                                                                                                                             | vii  |
| ABSTRACT.....                                                                                                                                                                                          | viii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                                                                                                                                  | xi   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                                                                                                                                                                 | xiv  |
| BÖLÜM 1                                                                                                                                                                                                |      |
| GİRİŞ .....                                                                                                                                                                                            | 1    |
| 1.1. Giriş.....                                                                                                                                                                                        | 1    |
| BÖLÜM 2                                                                                                                                                                                                |      |
| ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....                                                                                                                                                                                | 3    |
| 2.1. Sinyal Analiz Yöntemleri.....                                                                                                                                                                     | 3    |
| 2.1.1. Fourier Dönüşümü.....                                                                                                                                                                           | 5    |
| 2.1.2. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü .....                                                                                                                                                             | 9    |
| 2.1.3. Dalgacık Dönüşümü .....                                                                                                                                                                         | 12   |
| 2.2. Dielektrik Filmlerin Geçirgenlik Spektrumu .....                                                                                                                                                  | 15   |
| 2.3. Dielektrik Filmlere İlişkin Optik Analiz Çalışmaları.....                                                                                                                                         | 22   |
| BÖLÜM 3                                                                                                                                                                                                |      |
| MATERYAL VE YÖNTEM.....                                                                                                                                                                                | 40   |
| 3.1. Dielektrik Filmlerin Geçirgenlik Spektrumlarının SDD Analizinde Paul Dalgacığ<br>Kullanılarak Film Kalınlığı ile Kırılma İndisinin Eşzamanlı Olarak Belirlenmesi Teorisi<br>.....                 | 40   |
| 3.2. Dielektrik Filmlerin Geçirgenlik Spektrumlarının Paul Dalgacığ ile SDD Analizi<br>Sonucunda Film Kalınlığı ile Kırılma İndisinin Belirlenmesi İçin Simülasyon Çalışması<br>.....                  | 46   |
| 3.3. Dielektrik Filmlerin Gürültü Eklenmiş Geçirgenlik Spektrumlarının Paul Dalgacığ<br>ile SDD Analizi Sonucunda Film Kalınlığı ile Kırılma İndisinin Belirlenmesi İçin<br>Simülasyon Çalışması ..... | 50   |
| 3.4. Simülasyon Çalışmalarının Sonuçları .....                                                                                                                                                         | 55   |
| BÖLÜM 4                                                                                                                                                                                                |      |
| ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....                                                                                                                                                                  | 57   |
| 4.1. Deneysel Düzenek.....                                                                                                                                                                             | 57   |

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2. Dielektrik Filmin Paul Dalgacığı ile SDD Analizi Yardımıyla Kalınlık ve Kırılma İndisi Dağılımının Eş Zamanlı Olarak Belirlenmesi..... | 58 |
| BÖLÜM 5                                                                                                                                     |    |
| SONUÇ VE ÖNERİLER.....                                                                                                                      | 65 |
| 5.1. Yöntemin Belirsizlik Analizleri ve Hata Değerlendirmesi .....                                                                          | 65 |
| 5.2. Sonuçların Yorumu .....                                                                                                                | 67 |
| KAYNAKLAR .....                                                                                                                             | 68 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                                              | I  |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. (a) Eşitlik 2.3 ile verilen sabit frekanslı $f(t)$ trigonometrik sinüs sinyaline ilişkin fonksiyonunun zaman düzlemindeki grafiği. (b) $f(t)$ fonksiyonunun FD işlemine tabi tutulması sonucunda elde edilen $F(\xi)$ fonksiyonunun grafiği .....                                                                                                                                                                                               | 6  |
| Şekil 2.2. (a) Eşitlik 2.4 ile verilen ve sabit iki frekansa (10 Hz ve 20 Hz) sahip sinüs sinyallerin toplamı şeklinde tanımlanan $g(t)$ fonksiyonunun zaman düzlemindeki grafiği. (b) $g(t)$ fonksiyonunun FD işlemine tabi tutulması sonucunda elde edilen $G(\xi)$ fonksiyonunun grafiği .....                                                                                                                                                          | 7  |
| Şekil 2.3. (a) Eşitlik 2.5 ile verilen ve farklı zaman aralıklarında, farklı iki frekans bileşenine (10 Hz ve 20 Hz) sahip $g_2(t)$ fonksiyonunun zaman düzlemindeki grafiği. (b) $g_2(t)$ fonksiyonuna FD işlemi uygulanması sonucunda elde edilen $G_2(\xi)$ fonksiyonunun grafiği .....                                                                                                                                                                 | 8  |
| Şekil 2.4. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 10 |
| Şekil 2.5. (a) Eşitlik 2.7 ile verilen, belirli zaman aralıklarında dört farklı frekans bileşenine sahip $h(t)$ fonksiyonunun zaman düzlemindeki grafiği. (b) $h(t)$ fonksiyonuna KZFD uygulanması sonucunda elde edilen frekans-zaman gösterimine ait grafik .....                                                                                                                                                                                        | 11 |
| Şekil 2.6. Dalgacık analizi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 12 |
| Şekil 2.7. (a) Zaman düzleminde tanımlanmış ve frekansı zamanla lineer değişen (artan) bir chirp sinyalinin grafiği. (b) Chirp sinyaline SDD uygulanması sonucu elde edilen zaman-frekans değişimine ait grafik .....                                                                                                                                                                                                                                      | 14 |
| Şekil 2.8. $n_1$ ve $n_3$ kırılma indisine sahip iki geçirgen ortamın arasında bulunan $d$ kalınlığında ve $n_2$ kırılma indisine sahip dielektrik film üzerine gelen, polarize olmuş ışığın sınır durumlarındaki diyagram gösterimi (Hecht, 2002) .....                                                                                                                                                                                                   | 16 |
| Şekil 2.9. Bir dielektrik filme ait örnek bir geçirgenlik spektrumu sinyali (Sinyal 400-800 nm dalga sayısı aralığı için çizilmiştir) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 22 |
| Şekil 2.10. (a) Normal geliş açısında tek-katmanlı bir dielektrik filmin TE polarizasyonunda 600-700 nm dalga boyu aralığında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyali ( $T(k_0)$ ) (b) Normal geliş açısında tek-katmanlı bir dielektrik filmin geçirgenlik spektrumu sinyalinin FD spektrumu .....                                                                                                                                                     | 24 |
| Şekil 2.11. (a). Normal geliş açısında iki-katmanlı bir dielektrik filmin TE polarizasyonunda 650-670 nm dalga boyu aralığında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyali ( $T(k_0)$ ) (b) Normal geliş açısında iki-katmanlı bir dielektrik filmin geçirgenlik spektrumu sinyalinin FD spektrumu .....                                                                                                                                                    | 26 |
| Şekil 2.12. (a) İki-katmanlı bir dielektrik filmin TE polarizasyonunda 650-670 nm dalga boyu aralığında 0 derece (düz çizgi) ve 15 derece (kesikli çizgi) geliş açılarında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri ( $T_1(k_0)$ ve $T_2(k_0)$ ) (b) İki-katmanlı bir dielektrik filmin 0 derece (düz çizgi) ve 15 derecelik (kesikli çizgi) geliş açılarında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerinin FD spektrumları ..                     | 28 |
| Şekil 2.13. (a) Tek katmanlı bir dielektrik film için 0° (düz çizgi) ve 30° (kesikli çizgi) geliş açılarında TE polarizasyonunda 670-700 nm dalga boyu aralığında hesaplanmış geçirgenlik spektrumlarına ait sinyaller ( $T_1(k_0)$ ve $T_2(k_0)$ ) (b) Tek katmanlı bir film için 0° (düz çizgi) ve 30° (kesikli çizgi) geliş açılarında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerinin FD'ye tabi tutulması sonucunda elde edilmiş olan spektrum ..... | 30 |
| Şekil 2.14. (a) İki katmanlı bir dielektrik film için, 0° (düz çizgi) ve 30° (kesikli çizgi) geliş açılarında, TE polarizasyonunda 670 – 700 nm dalga boyu aralığında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri ( $T_1(k_0)$ ve $T_2(k_0)$ ) (b) İki katmanlı                                                                                                                                                                                          |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| bir dielektrik film için, 0° (düz çizgi) ve 30° (kesikli çizgi) geliş açılarında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerine FD işlemi uygulanması sonucunda elde edilmiş olan spektrum .....                                                                                                                                                                                                                                             | 32 |
| Şekil 2.15. Yalıtkan filmler için teorik olarak üretilmiş örnek bir geçirgenlik spektrumu sinyali ( $T(k_0)$ ) (Coşkun, 2012) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 38 |
| Şekil 2.16. Yalıtkan filmler için teorik olarak üretilmiş örnek bir geçirgenlik spektrumu sinyali ( $T(k_0)$ ) (Coşkun, 2012) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 39 |
| Şekil 3.1. Kalınlığı $d$ olan tek katmanlı dielektrik film.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 40 |
| Şekil 3.2. Tek katmanlı dielektrik film için $0,9090 - 2,2222 \mu m^{-1}$ dalga sayısı aralığında eşitlik 3.27 değerlerine göre 0° geliş açısında (sürekli çizgi) ve 15° geliş açısında (kesikli çizgi) elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyalleri .....                                                                                                                                                                              | 46 |
| Şekil 3.3. Dielektrik filmin iki farklı geliş açısında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacığı ile SDD uygulanması sonucunda elde edilmiş olan grafikler (0° geliş açısı mavi renk ile 15° geliş açısı kırmızı renk ile verilmiştir) .....                                                                                                                                                                             | 47 |
| Şekil 3.4. Dielektrik filmin iki farklı geliş açısı için teorik olarak üretilen geçirgenlik spektrumlarına ( $T(k_0)$ ) Paul dalgacığı ile SDD dönüşümü uygulanması sonucunda elde edilen optik kalınlık değerleri (0° geliş açısı düz çizgi ( $D$ ) ile 15° geliş açısı ( $D'$ ) kesikli çizgi ile verilmiştir).....                                                                                                                         | 48 |
| Şekil 3.5. Tek katmanlı dielektrik filmin çalışılan tüm $k_0$ uzayı için elde edilen kalınlık ( $d$ ) değerleri (noktalı çizgi) ve simülasyon için girilen teorik kalınlık ( $d$ ) değeri (düz çizgi) .....                                                                                                                                                                                                                                   | 49 |
| Şekil 3.6. Tek katmanlı dielektrik filmin çalışılan tüm $k_0$ uzayı için; sunulan yöntem ile bulunan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) (kesikli noktalı çizgi), teorik kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) (düz çizgi) ve Swanpoel (1983) tarafından geliştirilen yöntem ile elde edilen kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) (kesikli çizgi).....                                                                                        | 50 |
| Şekil 3.7. Tek katmanlı dielektrik film için $0,9090 - 2,2222 \mu m^{-1}$ dalga sayısı aralığında eşitlik 3.28 değerlerine göre 0° geliş açısında (sürekli çizgi) ve 30° geliş açısında (kesikli çizgi) elde edilmiş ve %20 rasgele gürültü eklenmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyalleri.....                                                                                                                                               | 51 |
| Şekil 3.8. Tek katmanlı dielektrik filmin iki farklı geliş açısında elde edilmiş ve % 20 rasgele gürültü eklenmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacığı ile SDD uygulanması sonucunda elde edilmiş olan grafikler (0° geliş açısı mavi renkli ile 30° geliş açısı kırmızı renk ile verilmiştir).....                                                                                                                              | 52 |
| Şekil 3.9. Dielektrik filmin iki farklı geliş açısı için teorik olarak üretilen ve %20 rasgele gürültü eklenen geçirgenlik spektrumlarına ( $T(k_0)$ ) Paul dalgacığı ile SDD dönüşümü uygulanması sonucunda elde edilen optik kalınlık değerleri (0° geliş açısı düz çizgi ( $D$ ) ve 30° geliş açısı ( $D'$ ) kesikli çizgi ile verilmiştir).....                                                                                           | 53 |
| Şekil 3.10. Tek katmanlı dielektrik filmin % 20 gürültü eklenmiş spektrum sinyallerine Paul Dalgacığı ile SDD uygulanması sonucunda, çalışılan tüm $k_0$ uzayı için elde edilen kalınlık ( $d$ ) değerleri (noktalı çizgi) ve simülasyon için girilen teorik kalınlık ( $d$ ) değeri (düz çizgi) .....                                                                                                                                        | 54 |
| Şekil 3.11. Dielektrik filmin gürültü eklenmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerinde çalışılan tüm $k_0$ değerleri için; sunulan yöntem ile bulunan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (noktalı çizgi) ve simülasyon için girilen teorik kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (düz çizgi) ve Swanpoel (1983) tarafından geliştirilen yöntem ile elde edilen kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (çember) ..... | 55 |
| Şekil 4.1. Dielektrik filmin geçirgenlik spektrumlarının ölçüldüğü deneysel düzenek.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 58 |
| Şekil 4.2. BK7 cam örneği için $1,14 - 1,535 \mu m^{-1}$ dalga sayısı aralığında 0° (düz çizgi) ve 8°(noktalı çizgi) geliş açısında elde edilen geçirgenlik spektrumu sinyalleri ..                                                                                                                                                                                                                                                           | 59 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.3. BK7 cam örneği için iki farklı geliş açısında geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacı ile SDD uygulanması sonucunda elde edilmiş olan grafikler ( $0^\circ$ geliş açısı mavi renk ile $8^\circ$ geliş açısı kırmızı renk ile verilmiştir) .....                                    | 59 |
| Şekil 4.4. BK7 cam örneği için iki farklı geliş açısında deneysel olarak elde edilen geçirgenlik spektrumu ( $T(k_0)$ ) sinyallerinin SDD'ye tabi tutulması sonucunda elde edilmiş olan optik kalınlık ( $D$ düz çizgi ve $D'$ kesikli çizgi) değerleri ..                                            | 60 |
| Şekil 4.5. BK7 cam örneği için $D$ ve $D'$ değerleri yardımıyla her $k_0$ değeri için hesaplanmış olan fiziksel kalınlık ( $d$ ) değerleri (kesikli çizgi) ve üretici firma katalog değeri (düz çizgi) .....                                                                                          | 61 |
| Şekil 4.6. BK7 cam örneği için $D$ ve $D'$ değerleri yardımıyla her $k_0$ değeri için hesaplanmış olan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (kesikli çizgi) ve zarf metodu ile bulunan kırılma indisi değerleri (çemberler) .....                                                           | 62 |
| Şekil 4.7. BK7 cam örneği için Cauchy parametreleri kullanılarak hesaplanmış olan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (kesikli çizgi) ve üretici firma katalog değerleri (kutucuklar) ve zarf metodu ile hesaplanmış olan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (düz çizgi) ..... | 64 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1. Tek katmanlı dielektrik film için yapılan simülasyon çalışmasında ve Paul dalgacı ile SDD uygulanması sonucunda elde edilen $A, B$ ve $C$ Cauchy parametreleri, film kalınlığı ve bu değerlerin görelî hata oranları..... | 56 |
| Çizelge 4.1. BK7 cam örneği için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen Cauchy parametreleri ( $A, B$ ve $C$ ).....                                                                                                                  | 62 |
| Çizelge 4.2. BK7 cam örneğinin farklı dalga boylarında sunulan yöntem ile hesaplanmış kırılma indisi değerleri ile katalog değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                        | 63 |



# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

### 1.1. Giriş

Günümüzde teknolojik ilerlemeye paralel olarak optik temelli cihazların kullanımı gitgide yaygınlaşmıştır. Ses ve veri iletiminden elektroniğe, elektrik enerjisi üretiminden mikroskoplara, tıbbi cihazlardan fotoğrafa kadar çok farklı uygulama alanlarında optik temelli alet ya da cihazlar tasarlanıp, üretilmekte ve kullanılmaktadır. Bu cihaz ya da aletlerin tasarım, kullanım ve üretim aşamalarında düşük üretim maliyeti, daha az enerji tüketimi, daha fonksiyonel ve/veya daha verimli olabilmesi açısından dielektrik filmler oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle dielektrik filmlerin optik özelliklerinin kolayca belirlenmesi bir gereklilik halini almıştır.

Bu tez çalışmasında dielektrik filmlerin kalınlık ( $d$ ) ve kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Bu amaçla iki farklı geliş açısında elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumları kullanılmıştır. Geçirgenlik spektrumlarına sürekli dalgacık dönüşüm (SDD) tekniği uygulanarak sinyal içerisinde var olan frekans bilgisinden faydalanılmıştır. SDD uygulanırken dalgacık olarak Paul Dalgacığı kullanılmıştır.

Belirli zaman diliminde kendisini tekrar eden sinyallere periyodik sinyal denmektedir. Doğada pek çok sinyal periyodiktir ve içerisinde frekans bilgisi içermektedir. Bu frekans bilgisini ortaya çıkarmak için sinyallerin analizi yapılmaktadır. Sinyallerin sahip oldukları frekans bilgilerine ulaşmak amacıyla en yaygın kullanılan yöntem Fourier dönüşümü (FD) tekniğidir. FD tekniği; kararlı, yani frekansı zamanla değişmeyen sinyallerin frekans bilgilerini elde etmede son derece kullanışlıdır. Fakat FD tekniği sadece sinyallerin içerisinde var olan frekans bileşenlerinin tespit edilmesinde işe yaramaktadır. Buna karşın sinyalin içerisinde var olan frekans ya da frekansların farklı zaman aralıklarında farklı değerler alması durumunda veya zamanla değişmesi durumunda, FD tekniği işe yaramamaktadır. Yani FD sinyal içerisindeki frekansların hangi zamanda ya da zaman aralıklarında var oldukları bilgisini verememektedir. Bu da kararlı olmayan sinyallerin, yani frekansı zamanla değişen sinyallerin analizinde bazı sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Zaman içerisinde bu sorunun üstesinden gelmek için kısa zamanlı Fourier dönüşümü (KZFD) tekniği geliştirilmiştir. Detayını ilerleyen bölümlerde göreceğimiz bu teknikte ise seçilen pencere fonksiyonun dar seçilmesi durumunda iyi zaman bilgisi elde edilirken, kötü frekans bilgisi elde edilmektedir. Tersisi durumda, yani pencere fonksiyonunun geniş seçilmesi durumunda ise, iyi frekans bilgisi elde edilirken, bu kez de kötü zaman bilgisi elde

edilmektedir. KZFD tekniğinin yarattığı bu problem çözünürlük problemi olarak adlandırılmaktadır ve bu problem bazı uygulamalarda bazı kısıtlar ortaya çıkarmaktadır.

Devam eden süreçte ortaya çıkan sürekli dalgacık dönüşümü (SDD), KZFD’de var olan çözünürlük probleminin üstesinden gelerek kararlı olmayan sinyallerin analizinin kolayca yapılabilmesinin önünü açmıştır. Yani SDD frekansı zamanla değişen sinyallerin, frekans-zaman bilgileri elde etmek için geliştirilmiş güçlü bir sinyal analiz yöntemidir.

Bu çalışmada dalgacık olarak Paul Dalgacığı kullanmak suretiyle SDD tekniği dielektrik filmlerin geçirgenlik spektrumu sinyallerine uygulanmıştır. İki farklı geliş açısında elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyallerine dalgacık dönüşümü tekniği uygulanması sonucu elde edilen iki farklı optik kalınlık-dalga sayısı değişimi ( $D(k_0) - k_0$  ve  $D'(k_0) - k_0$ ) bilgilerini kullanmak suretiyle filmin kalınlığı ( $d$ ) ve kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) belirlenmiştir. Sunulan yöntem ile dielektrik filmlerin kalınlık ( $d$ ) ve kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) ilk kez eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Kullanılan yöntemin en önemli avantajı sadece geçirgenlik spektrumu bilgisi kullanılarak, hem fiziksel kalınlığın ( $d$ ) hem de kırılma indisi dağılımının ( $n(k_0)$ ) eş zamanlı olarak tespit edilebilmesidir.

Tez çalışmasında dielektrik filmlerin iki farklı geliş açısında elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul Dalgacığı kullanılarak SDD tekniği uygulanması ve bunun sonucunda filmlerin kalınlık ( $d$ ) ve kırılma indisi dağılımının ( $n(k_0)$ ) elde edilmesine ilişkin yapılan hesaplamalar detaylıca sunulmuş ve yöntemin doğruluğu ve uygulanabilirliği incelenerek, güçlü ve zayıf yönleri araştırılmıştır.

Tezde önceki çalışmalar başlığı altında Bölüm 2’de dielektrik filmlerin özelliklerini belirlemeyi amaçlamış önceki çalışmalara yer verilmiştir. Bölüm 3’de teze konu yöntem aktarılarak yöntemin geçerliliği bilgisayar simülasyonu sonuçları ile gösterilmiştir. Yöntem laboratuvar ortamında bir dielektrik filme uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Bölüm 4’te verilmiştir. Son bölüm olan Bölüm 5’te ise sonuçlar yorumlanarak sonraki çalışmalar için öneriler verilmiştir.

## BÖLÜM 2

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

#### 2.1. Sinyal Analiz Yöntemleri

Sinyal, bir olgunun doğası ve davranışı hakkında bilgi taşıyan ve bağımsız değişkenler ile ifade edilen matematiksel bir fonksiyon olarak tanımlanabilir (Hsu, 1995). Doğada elektriksel sinyaller, akustik sinyaller, video sinyalleri ve biyolojik sinyaller gibi pek çok sinyal çeşidi vardır. Sinyaller içlerinde periyot, frekans, açısal hız, faz, genlik ve bunun gibi pek çok bilgi barındırmaktadırlar (Oppenheim ve ark, 1997). Bu bilgilere ulaşmak bazen son derece önemlidir. Ulaşılan bu bilgiler sayesinde başkaca yeni bilinmeyenleri bulmak ta mümkün olabilmektedir. Bu amaçla fizik, matematik ve mühendislik gibi bilim dalları için sinyal analizi konusu son derece önem arz etmektedir.

Doğadaki pek çok sinyal belirli zaman aralıklarında kendini tekrarlamaktadır. Bu tarz sinyallere periyodik sinyal (işaret) denilmektedir ve periyodik sinyallerin kendini tekrarladıkları süre periyot ( $T$ ) olarak tanımlanmaktadır. Bir periyoda sahip her sinyalin bir frekans değeri var demektir. Sinyalin bir saniyedeki tekrarlanma sayısı olarak tanımlanan frekans  $f$  ile temsil edilmekte ve Hertz ( $Hz$ ) birimi ile ifade edilmektedir.

Pek çok sinyal matematiksel ifade olarak genellikle zamanın (time,  $t$ ) bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır ve grafiksel çizimleri yine zaman düzleminde yapılmaktadır. Bu nedenle sinyallerin matematiksel ifadelerinde ya da grafik gösterimlerinde frekans bilgisine ait bilgi görülmemektedir. Eğer sinyallerin içerisindeki frekans ( $f$ ) bilgisine ihtiyaç duyulursa Zaman-Frekans Gösterimi en iyi çözüm olmaktadır.

Zaman-Frekans Gösterimi; “Zamanın fonksiyonu olarak tanımlanmış bir sinyalin hem zaman hem de frekans düzlemi üzerinde gösterilen bir görüntüsüdür” şeklinde tanımlanabilmektedir (Cohen, 1989). Zaman-Frekans Gösterimi için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler aynı zamanda integral dönüşüm yöntemleri olarak da adlandırılırlar.

İntegral dönüşüm yöntemlerinin tarihçesi Laplace ve Fourier dönüşümleri ile başlamaktadır (Debnath ve Bhatta, 2007). Pierre-Simon Laplace’ın 1780’lerde çalıştığı olasılık teorisine dayandırılabilen Laplace dönüşümü, lineer diferansiyel denklemlerin ve integral eşitliklerin çözümünde günümüzde de hala etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Jean-Baptiste Joseph Fourier ise ısı transferi konusundaki çalışmaları sonucunda elde ettiği ve bugün hala kendi adı ile anılan Fourier integral teoremini geliştirmiştir. Fourier, bu teoreme ulaşmasını sağlayan çok önemli çalışmalar yapmıştır. İlk olarak bugün Fourier serisi açılımı

olarak bilinen ve sonlu bir aralıkta tanımlanan keyfi bir fonksiyonun trigonometrik fonksiyonların toplamı şeklinde ifade edilebileceğini göstermiştir. Fourier ilerleyen çalışmalarında ise fonksiyonun sınırlarını sonsuza götürerek günümüzde Fourier dönüşümü (FD) ve ters Fourier dönüşümü (TFD) olarak bilinen integral dönüşümlerine ulaşmıştır (Debnath ve Bhatta, 2007).

Fourier integral teoreminin büyük önemi, on dokuzuncu ve yirminci yüzyıllarda matematikçiler ve matematiksel fizikçiler tarafından fark edilmiştir. Oliver Heaviside çalışmalarını Fourier integral teoremine dayandırarak, ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için önemli çalışmalar yapmıştır. Bu gelişmelerle adi ve kısmi diferansiyel denklemler içeren sınır değer problemlerini çözmek için Mellin, Hankel, Hilbert ve Stieltjes dönüşümleri gibi Laplace ve Fourier dönüşümleri ile doğrudan ilişkili dönüşümler geliştirilmiştir (Bracewell, 2000).

1917 yılında Johann Radon tarafından geliştirilen Radon dönüşümü ortaya atıldığı ilk yıllarda çok fazla dikkat çekmemiş olsa da 1960'lı yıllarda tomografi çalışmalarında kullanılmış olup integral dönüşümleri içerisinde kendisine önemli bir yer edinmiştir (Debnath ve Bhatta, 2007; Teryaev, 2001).

1940 yılında Macar-İngiliz fizikçi Dennis Gabor iletişim teorisi çalışmasında bugün Gabor dönüşümü olarak bilinen dönüşümü geliştirmiştir (Gabor, 1946; Debnath, 2002). Bu dönüşüm ile tanımlanmış olan bir pencere fonksiyonu sayesinde, sinyale pencere genişliğince Fourier dönüşümü (FD) uygulanarak fonksiyonda hangi frekansın hangi zaman aralıklarında olduğu bilgisine ulaşılabilmektedir. Günümüzde genellikle kısa zamanlı Fourier dönüşümü (KZFD) olarak adlandırılan Gabor dönüşümü Fourier dönüşümünün yetersiz kaldığı bu bilgiye ulaşılmasını sağlayarak integral dönüşümü alanında çok büyük bir çığır açmıştır (Debnath, 2002).

Kısa zamanlı Fourier dönüşümü (KZFD) temeline dayanarak, 1982 yılında Fransız jeofizik mühendisi Jean Morlet ve arkadaşları tarafından, sismik sinyallerin analizinde kullanılmak üzere dalgacık dönüşümü (DD) ve 1996 yılında R. G. Stockwell ve arkadaşları tarafından da Stockwell dönüşümü (SD) ya da kısaca S-Dönüşümü geliştirilmiştir. Bu yöntemler günümüzde de sıklıkla kullanılan integral dönüşüm yöntemleridir (Morlet ve ark., 1982; Debnath ve Bhatta, 2007; Stockwell ve ark., 1996).

Literatürde var olan integral dönüşümlerinin büyük bir bölümü Erdelyi ve arkadaşları tarafından iki ciltlik bir kitapta toplanmıştır (Coşkun, 2012).

### 2.1.1. Fourier Dönüşümü

“Zaman-Frekans Gösterimi” için geliştirilmiş olan ilk teknik Fourier dönüşümü (FD) tekniğidir. FD; “Zamanın fonksiyonu olan bir sinyalin sahip olduğu frekans bileşenlerine ayrılmasıdır” olarak tanımlanabilmektedir (Bracewell, 1986).

Aynı frekanslı çok sayıda harmonik dalga toplandığında, dalga boyları ve fazları farklı olsa bile, yine aynı frekanslı bir harmonik dalga oluşturur. Eğer bindirilmiş dalgaların frekansları farklı olursa, bu kez sonuç “periyodik ama anharmonik” olur ve sinüzoidal dalga formundan farklı şekiller ortaya çıkabilir. Bu şekilde sonsuz sayıda farklı şekil oluşturulabilir. Verilen dalga formunu ters işlemle harmonik bileşenlerine ayrıştırmaya FD denir. (Pedrotti ve Pedrotti, 1993). Fourier dönüşümü (FD) ve ters Fourier dönüşümü (TFD) sırasıyla, eşitlik 2.1 ve 2.2 ile tanımlanır (Kammler, 2007).

$$\hat{F}(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i2\pi\xi t} dt \quad (2.1)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{F}(\xi)e^{i2\pi\xi t} d\xi \quad (2.2)$$

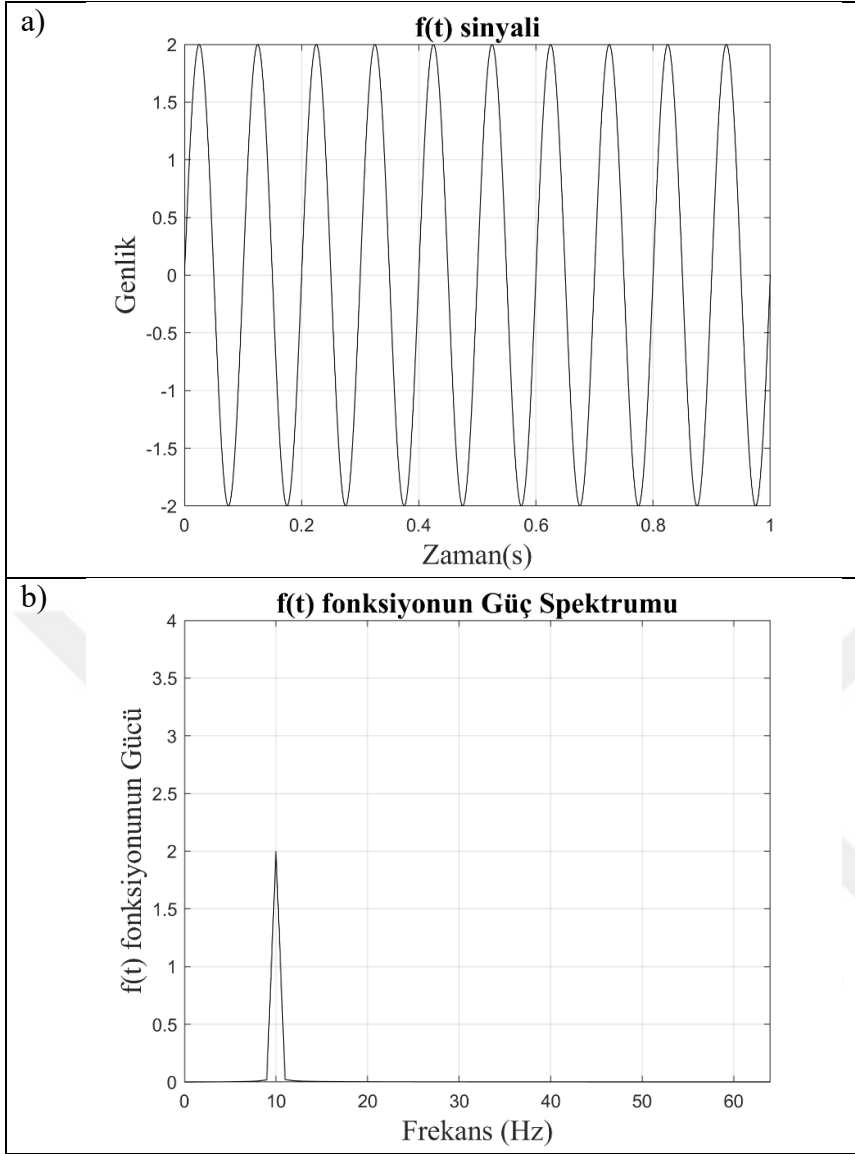
Burada  $f(t)$ , zamana bağımlı olan sinyal;  $\hat{F}(\xi)$ , frekansa bağımlı olan sinyal;  $t$ , zaman ve  $\xi$ , frekanstır. Eşitlik 2.1’de  $\hat{F}(\xi)$  fonksiyonu,  $f(t)$  fonksiyonunun Fourier dönüşümü; eşitlik 2.2’de ise  $f(t)$  fonksiyonu,  $\hat{F}(\xi)$  fonksiyonunun ters Fourier dönüşümü adını alır.  $\hat{F}(\xi)$  fonksiyonu,  $f(t)$  fonksiyonun “frekans-genlik gösterimini” verir. Bu gösterim sinyalde hangi frekansın var olduğunu verir.

FD işlemi, daha iyi anlaşılması açısından sabit frekanslı (10 Hertz frekansa sahip) bir  $f(t)$  fonksiyonuna uygulanmıştır.  $f(t)$  fonksiyonu eşitlik 2.3 ile verilmiştir.

$$f(t) = 2 \times \sin(2\pi 10t) \quad (2.3)$$

$f(t)$  fonksiyonunun zaman düzleminde çizilmiş olan grafiği Şekil 2.1.(a)’da gösterilmiştir.  $f(t)$  fonksiyonuna FD işlemi uygulanarak elde edilen sonuca ilişkin grafik ise Şekil 2.1.(b)’de verilmiştir.

Şekil 2.1.(a)’daki gibi zamanda sürekli ve sabit frekanslı  $f(t)$  gibi trigonometrik bir fonksiyona FD işlemi uygulanması sonucunda elde edilen ve şekil 2.2.(b)’de görülen  $\hat{F}(\xi)$  fonksiyonu grafiğinde, sinyalin sahip olduğu sabit frekans değerinde bir pik oluşmaktadır. Yani 10 Hz değerinde oluşan pik şekil 2.1.(b)’de görülmektedir.



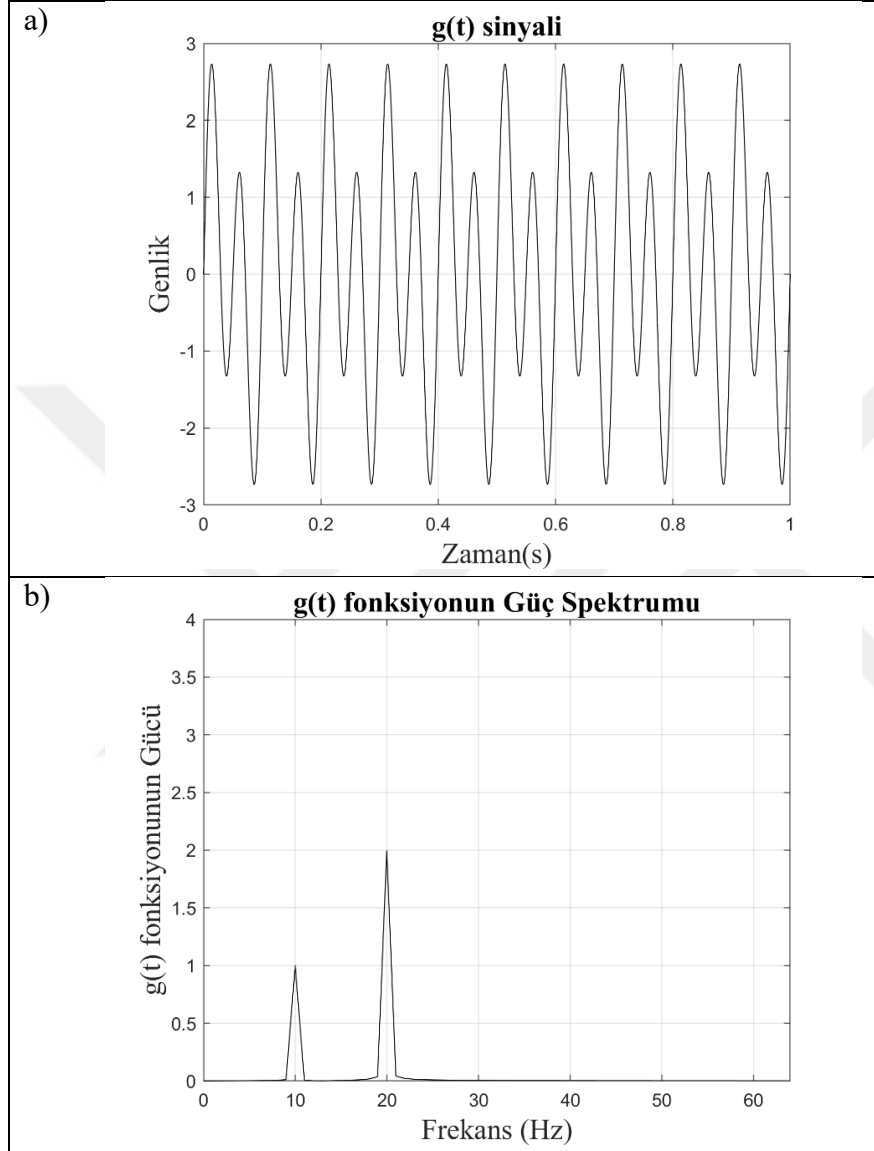
Şekil 2.1. (a) Eşitlik 2.3 ile verilen sabit frekanslı  $f(t)$  trigonometrik sinüs sinyaline ilişkin fonksiyonunun zaman düzlemindeki grafiği. (b)  $f(t)$  fonksiyonunun FD işlemine tabi tutulması sonucunda elde edilen  $\hat{F}(\xi)$  fonksiyonunun grafiği

Birden fazla sabit frekans bileşeni barındıran bir fonksiyona FD işlemi uygulandığında, FD işlemi sonucunda elde edilen fonksiyonun grafiğinde yine fonksiyonun içerisindeki frekans değerlerinde piklerin oluştuğu gözlenmiştir.

Örneğin içerisinde iki adet sabit frekans (10 Hz ve 20 Hz) barındıran ve iki sinüs sinyalinin toplamı şeklinde tanımlanan  $g(t)$  fonksiyonu eşitlik 2.4 ile verilmiştir.

$$g(t) = 1 \times \sin(2\pi 10t) + 2 \times \sin(2\pi 20t) \quad (2.4)$$

$g(t)$  fonksiyonunun zaman düzleminde çizilmiş olan grafiği Şekil 2.2.(a)'da gösterilmiştir.  $g(t)$  fonksiyonuna FD işlemi uygulanarak elde edilen  $\hat{G}(\xi)$  fonksiyonuna ilişkin grafik ise Şekil 2.2.(b)'de verilmiştir.



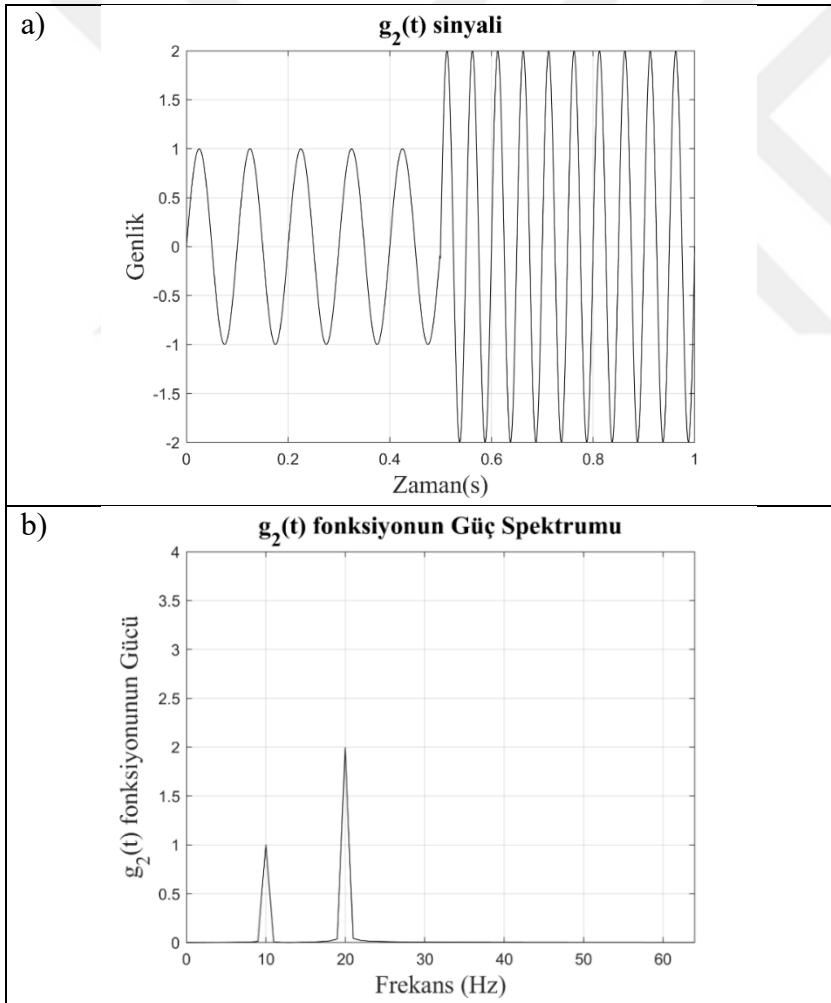
Şekil 2.2. (a) Eşitlik 2.4 ile verilen ve sabit iki frekansa (10 Hz ve 20 Hz) sahip sinüs sinyallerin toplamı şeklinde tanımlanan  $g(t)$  fonksiyonunun zaman düzlemindeki grafiği. (b)  $g(t)$  fonksiyonunun FD işlemine tabi tutulması sonucunda elde edilen  $\hat{G}(\xi)$  fonksiyonunun grafiği

Şekil 2.2'den de görüleceği üzere sabit frekanslı ve zamanın tüm anlarında birden fazla frekans bileşeninin toplamı şeklinde tanımlı olan sinyallere FD işlemi uygulanması sonucunda, yine sinyalin içerdiği frekans bileşenlerine (10 Hz ve 20 Hz) ulaşılabilir.

FD işlemi son olarak eşitlik 2.5'deki gibi tanımlanmış olan  $g_2(t)$  fonksiyonuna uygulanmıştır. Bu fonksiyonda  $g(t)$  fonksiyonu gibi içeriğinde birden fazla frekans bileşeni barındırmakta, fakat bu frekans bileşenleri zamanın tüm anlarında değil de belirli zaman aralıklarında mevcuttur. Öyle ki;

$$g_2(t) = \begin{cases} 1 \times \sin(2\pi 10t), & 0 \leq t < 0,5 \\ 2 \times \sin(2\pi 20t), & 0,5 \leq t < 1 \end{cases} \quad (2.5)$$

$g_2(t)$  fonksiyonunun zaman düzleminde çizilmiş olan grafiği şekil 2.3.(a)'da gösterilmiştir.  $g_2(t)$  fonksiyonuna FD işlemi uygulanarak elde edilen  $\widehat{G}_2(\xi)$  fonksiyonunun grafiği ise şekil 2.3.(b)'de verilmiştir.



Şekil 2.3. (a) Eşitlik 2.5 ile verilen ve farklı zaman aralıklarında, farklı iki frekans bileşenine (10 Hz ve 20 Hz) sahip  $g_2(t)$  fonksiyonunun zaman düzlemindeki grafiği. (b)  $g_2(t)$  fonksiyonuna FD işlemi uygulanması sonucunda elde edilen  $\widehat{G}_2(\xi)$  fonksiyonunun grafiği

Görüleceği üzere şekil 2.3.(b)'deki grafik ile şekil 2.2.(b)'deki grafik bire bir özdeşdir. Yani hem  $g(t)$  fonksiyonunun, hem de  $g_2(t)$  fonksiyonunun FD işlemine tabi tutulması ile elde edilen sonuçlara ait grafikler 10 Hz. ve 20 Hz. değerlerinde pik vermiştir.

Fakat şekil 2.3.(a) ve şekil 2.2.(a)'dan da görüleceği üzere FD'ye tabi tutulan  $g(t)$  ve  $g_2(t)$  sinyalleri zaman düzleminde aynı değildir.  $g(t)$  fonksiyonunun içerisindeki frekans bileşenleri zamanın tüm anlarında mevcut iken,  $g_2(t)$  fonksiyonunun içerisindeki frekans bileşenleri belirli zaman aralıklarında mevcuttur. Yani şekil.2.3.(b)'deki grafiğe bakarak sinyal içerisinde var olan frekans bileşenlerinin değerlerini söylemek mümkündür, fakat bu frekans bileşenlerinin zamanın hangi anlarında ya da aralığında olduğunu söylemek mümkün değildir.

Bundan dolayı FD işleminin frekansı zamanla değişen sinyallerde veya farklı zaman aralıklarında farklı frekans bileşenlerine sahip olan sinyallerde işe yaramadığı düşünülmüştür. FD tekniği sinyalin içerdiği frekans bileşenlerine dair bilgi vermesine karşın, bu frekans bileşenlerinin hangi zamanda var olduklarına dair bilgi verememektedir.

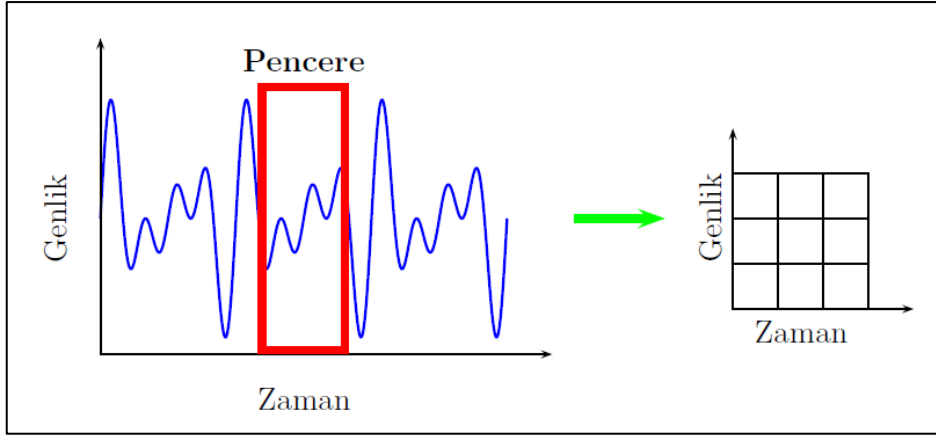
Çünkü FD işlemi, eşitlik 2.1'de verilen matematiksel bağıntısından da görüleceği üzere, zaman düzlemindeki sinyalin eksi sonsuz artı sonsuz aralığında integrali alınmak suretiyle yapıldığı için, sinyali tüm zaman aralığında işlemektedir. Yani kısaca FD işlemi bu durumlarda yetersiz kalmaktadır.

FD tekniğinin bu yetersizliğinden dolayı, sinyal analizine daha iyi olanak sağlayacak teknikler araştırılmaya devam edilmiştir. Sonrasında Gabor tarafından FD tekniğinin üzerine geliştirilen ve sinyalin pencere fonksiyonu denilen bir fonksiyon ile harmanlanması çalışmaları ile başlayan sürecin devamında bugün daha çok kısa zamanlı Fourier dönüşümü (KZFD) olarak adlandırılan teknik geliştirilmiştir (Chui, 1992; Torrence ve Compo, 1998).

### **2.1.2. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü**

Fourier dönüşümü tekniğinin zamanlama eksikliğini gidermek için, Gabor (1946), sinyali zaman alanında küçük bölümler (pencereleme) halinde analiz edebileceği fikrini ortaya atmış ve başarıyla uygulamıştır (Abbak, 2007).

Kısa zamanlı Fourier dönüşümü (KZFD) bir sinyalin zaman ve frekans görünüşü arasında uzlaşmasını sağlar. Yani sinyalin ne zaman ve hangi frekansta olduğu hakkında bilgi verir. Fakat bu bilgiler sınırlı doğrulukla elde edilir. Çünkü doğruluk, pencerenin boyutuyla ilgilidir (Şekil 2.4). Pencere genişliği fazla ise frekans çözünürlüğü iyi, pencere genişliği dar ise frekans çözünürlüğü düşük olur (Lee ve ark., 1999).



Şekil 2.4. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü

Kısa zamanlı Fourier dönüşümü Eşitlik 2.6 ile tanımlanmaktadır.

$$KZFD\{x(t)\}(\tau, f) = X(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-i2\pi ft}dt \quad (2.6)$$

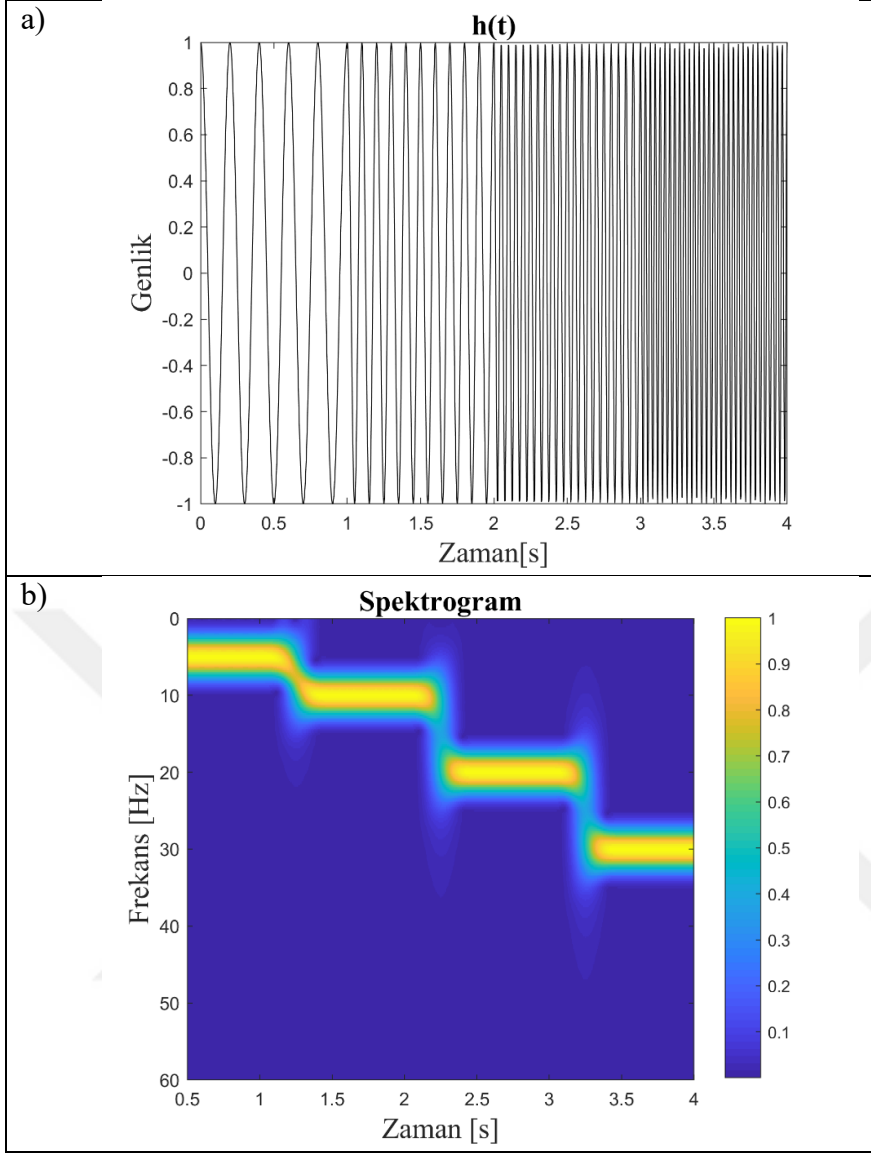
Burada  $w(t - \tau)$  pencere fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.  $\tau$ , pencere fonksiyonunun zaman uzayındaki konumunu belirleyen parametredir. Eşitlik 2.6'dan da görüleceği üzere KZFD yönteminde, sinyal önce pencere fonksiyonu ile çarpılmakta ve daha sonra bu çarpıma FD işlemi uygulanmaktadır.

Gabor, pencere fonksiyonu olarak Gauss fonksiyonunu seçmiştir fakat hesaplamalardaki verimlilik, uygulamalardaki kolaylıklar gibi nedenlerle farklı pencere fonksiyonları da kullanılabilir (Chui, 1992).

KZFD işlemi, daha iyi anlaşılması bakımından, farklı zaman aralıklarında farklı frekans bileşenlerine (5 Hz, 10 Hz, 20 Hz ve 30 Hz) sahip ve eşitlik 2.7 ile tanımlanmış olan  $h(t)$  fonksiyonuna uygulanmıştır.

$$h(t) = \begin{cases} 1 \times \cos(2\pi 5t), & 0 \leq t < 1 \\ 1 \times \cos(2\pi 10t), & 1 \leq t < 2 \\ 1 \times \cos(2\pi 20t), & 2 \leq t < 3 \\ 1 \times \cos(2\pi 30t), & 3 \leq t < 4 \end{cases} \quad (2.7)$$

$h(t)$  fonksiyonunun zaman düzleminde çizilmiş grafiği Şekil 2.5.(a)'da gösterilmiştir.  $h(t)$  fonksiyonuna KZFD işlemi uygulanarak elde edilen sonuca ilişkin grafik Şekil 2.5.(b)'de verilmiştir.



Şekil 2.5. (a) Eşitlik 2.7 ile verilen, belirli zaman aralıklarında dört farklı frekans bileşenine sahip  $h(t)$  fonksiyonunun zaman düzlemindeki grafiği. (b)  $h(t)$  fonksiyonuna KZFD uygulanması sonucunda elde edilen frekans-zaman gösterimine ait grafik

KZFD yönteminde sabit bir pencere fonksiyonu kullanılmaktadır ve bu sayede sinyalin zamanın hangi aralığında hangi frekans değerlerine sahip olduğu kolaylıkla tespit edilebilmektedir.

Ancak, KZFD yöntemi için seçilmiş pencerenin dar olması durumunda iyi bir zaman bilgisi elde edilmesine karşın frekans bilgisi seçiciliği zayıf kalmaktadır. Pencere fonksiyonu genişletildiğinde ise frekans bilgisi seçiciliği artmasına karşın, zaman aralığı çok geniş olduğundan zaman seçiciliği kötü olacaktır. (Mallat, 1999). KZFD’de çözünürlük problemi olarak adlandırılan bu durum Heisenberg Belirsizlik İlkesi ile de ilişkilendirilmektedir.

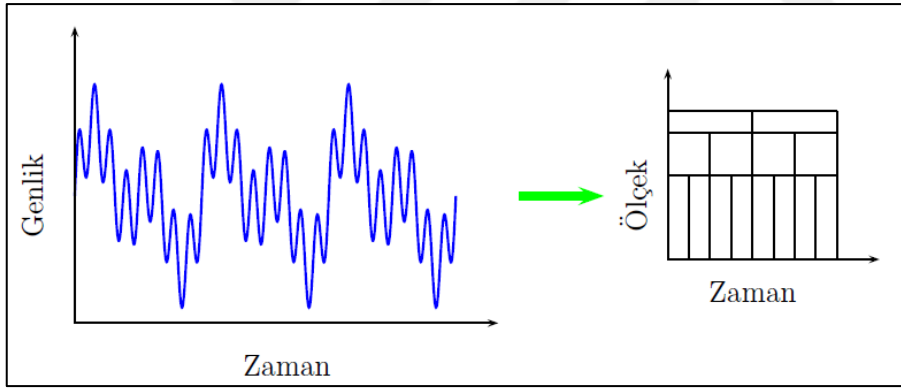
KZFD yönteminde karşılaşılan ve çözünürlük problemi olarak adlandırılan bu problemi aşmak için ilerleyen süreçte sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) yöntemi ortaya çıkmıştır.

### 2.1.3. Dalgacık Dönüşümü

KZFD'deki çözünürlük problemini aşmak için, pencere fonksiyonunun genişliğini ve genliğini değiştirmek temeli üzerine kurulmuş olan SDD ilk olarak Grossman ve Morlet tarafından geliştirilmiştir (Grossman ve Morlet, 1984).

Dalgacık dönüşümü hem uzun zaman aralığında alçak frekans bilgisini hem de kısa zaman aralığında yüksek frekans bilgilerini belirlememize yardımcı olur. Yani bir bakışta hem ormanı hem de ağaçları görmektir (Graps, 1995).

Dalgacık dönüşümü, KZFD'nin aksine zaman-frekans alanını değil, zaman-ölçek alanını kullanır. Şekil 2.6'da görüldüğü üzere analizin sonucunda tek boyutlu bir çizgi değil alanlar oluşur (Türkoğlu, 2013).



Şekil 2.6. Dalgacık analizi

Zaman düzleminde tanımlanmış bir  $x(t)$  fonksiyonunun sürekli dalgacık dönüşümünün (SDD) matematiksel ifadesi eşitlik 2.8 ile verilmiştir.

$$SDD\{x(t)\}(a, b) = X(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.8'de verilen SDD eşitliğinde;  $a$  parametresi ölçek parametresi,  $b$  parametresi pozisyon parametresi ve  $1/\sqrt{a}$  kesri ise normalizasyon sabitidir (Ergen ve Tatar, 2003).

Mantık olarak SDD; ana dalgacık olarak adlandırılan  $\Psi(t)$  pencere fonksiyonunun,  $a$  parametresi ile genişlemesinden ve  $b$  parametresi ile ötelenmesinden elde edilen  $\Psi_{(a,b)}(t)$

analiz dalgacık fonksiyonlarının, orijinal fonksiyon olan  $x(t)$  sinyali ile harmanlanmasıdır (Meyers ve ark., 1993; Addison, 2005; Yang, 2007).

SDD mantığına göre, ana dalgacık fonksiyonu  $\Psi(t)$ , aşağıdaki üç özelliğe sahip olmak zorundadır (Meyers ve ark., 1993).

- i. Ana dalgacık fonksiyonunun merkezi sıfırda olmalıdır ve  $t \rightarrow \infty$  'a giderken  $\Psi(t) \rightarrow 0$  'a gitmelidir.

Bu özelliğe göre ana dalgacık fonksiyonu, incelenen sinyale sadece  $t = b$  pozisyonunda etki konisi kadar olan bir bölgede etki eder. Bu dalgacığın temel koşuludur (Meyers ve ark., 1993; Torrence ve Compo, 1998).

- ii.  $\Psi(t)$  için ortalama değer sıfır olmalıdır. Bu koşula aynı zamanda kabul edilebilirlik koşulu denir.

Bu özellik dalgacığın tersinirlik özelliğini sağlamaktadır. Yani orijinal sinyal, dalgacık katsayıları kullanılarak tekrar geri elde edilebilir (Meyers ve ark., 1993).

- iii. Dalgacıklar genellikle düzenlidir, yani  $\hat{\Psi}(f < 0) = 0$  olur.

Bu özellik dalgacığın  $-f$  değerlerinin sıfıra eşitlenmesidir, böylece işlemin kolaylaşması sağlanır (Meyers ve ark., 1993).

SDD daha iyi anlaşılabilmesi açısından, eşitlik 2.9 ile tanımlanmış ve frekansı zamanla değişen bir  $x(t)$  sinyale uygulanmıştır.

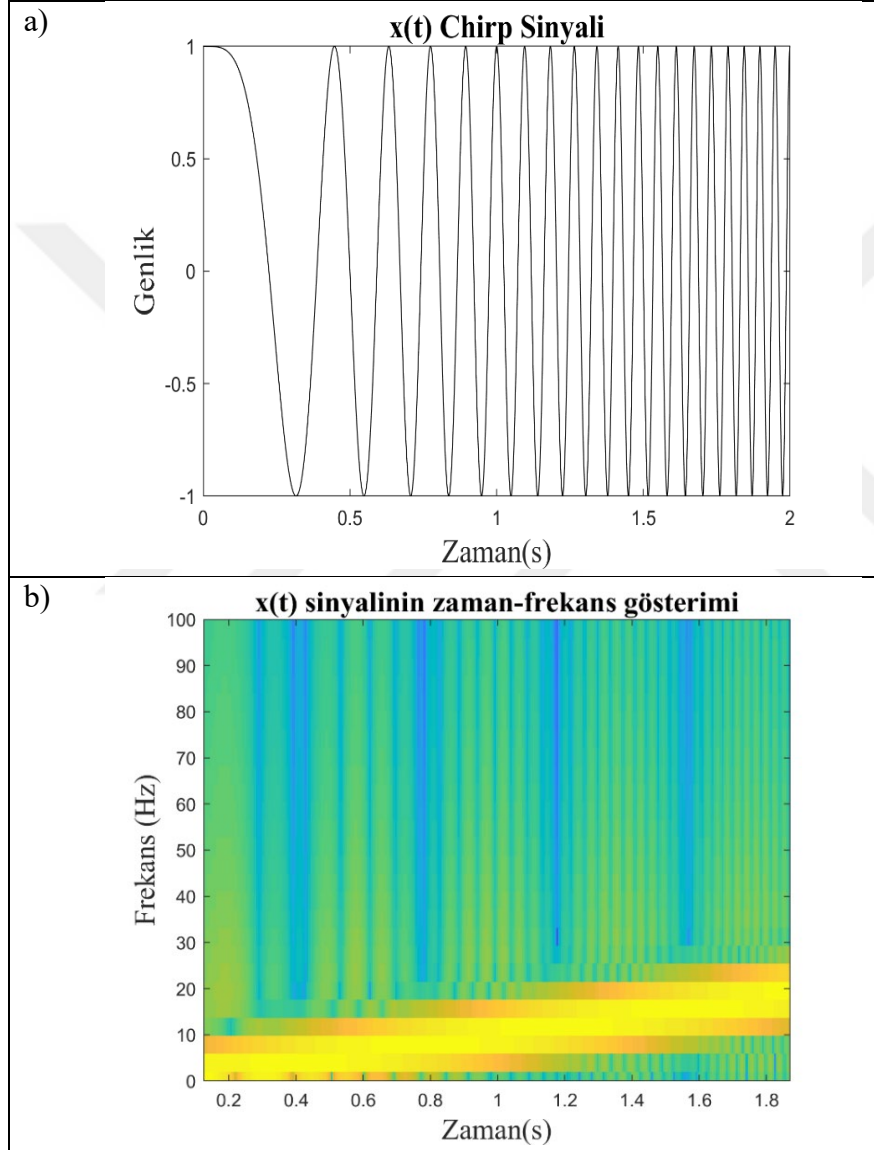
$$x(t) = 1 \times \sin(2\pi f(t)t) \quad (2.9a)$$

$$f(t) = 20t + 5 \quad (2.9b)$$

Eşitlik 2.9 ile verilen sinyal frekansı zamanla artan bir sinyaldir. Frekansı zamanla artan veya azalan bu tür sinyallere chirp sinyalleri adı verilmektedir. Frekansı zamanla değişen veya farklı zaman dilimlerinde farklı frekans bileşenlerine sahip sinyallerin

KZFD'ye tabi tutulması ile sinyal içerisindeki frekans bilgilerine ulaşılsa bile, bu algoritmik olarak çok zaman almaktadır veya çözünürlük probleminden dolayı zaman-frekans detayı net olarak elde edilememektedir. Bunun içinde SDD'nin yeni bir teknik olarak iyi bir çözüm ortaya koyduğu ifade edilmişti.

Eşitlik 2.9 ile verilen  $x(t)$  sinyalinin SDD'ye tabi tutulması sonucunda elde edilen sonuçlara ilişkin grafikler şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. (a) Zaman düzleminde tanımlanmış ve frekansı zamanla lineer değişen (artan) bir chirp sinyalinin grafiği. (b) Chirp sinyaline SDD uygulanması sonucu elde edilen zaman-frekans değişimine ait grafik

Hangi zaman aralığında hangi frekans bileşenlerinin bulunduğunu veya frekansın zamanla değişimini en net verebilen analiz yöntemi olarak SDD'nin bu üstünlüğü

sağlamasındaki temel esas bant geçiren filtre (BGF) gibi davranmasıdır. SDD, BGF özelliği sayesinde frekans bilgisini süzmede oldukça başarılıdır.

Günümüzde dalgacık dönüşümü tekniğinde kullanılan birden çok ve birbirinden farklı dalgacık fonksiyonu vardır. En çok kullanılan dalgacık fonksiyonlarının bazı örnekleri şunlardır:

- Haar dalgacığı,
- Meksika şapkası dalgacığı,
- Daubechies dalgacığı,
- Morlet dalgacığı,
- DOG (Derivative of Gaussian) dalgacığı,
- Paul dalgacığı
- Meyer dalgacığı.

Her bir dalgacık fonksiyonunun değişik kullanım alanları mevcuttur. Kullanım alanı analizi yapılacak olan sinyalin karakteristik özelliğine göre değişir (Abbak, 2007).

Bilimsel çalışmalar yapan bilim insanları sinyaller ve sinyal içerisinde var olan periyot, frekans, açısal hız vb bilgiler yardımıyla dielektrik filmler hakkında bazı çalışmalar yapılabileceği fikrinden yola çıkarak, dielektrik filmlerin optik geçirgenliği ya da bir başka deyişle geçirgenlik spektrumu sinyalleri yardımıyla dielektrik filmlerin ve/veya ince filmlerin bazı optik ve/veya fiziksel özelliklerinin belirlenmesi çalışmaları yapmıştır.

Geçirgenlik spektrumuna ait sinyaller filmin yapısına bağlı olarak sinüs benzeri periyodik sinyaller olduğu için bu sinyaller analiz edilerek, bu analiz sonucunda filmin bazı özellikleri buluna gelmiştir. 2.2 alt başlığında buna ait geçmişte yapılmış çalışmalar özetlenmiştir.

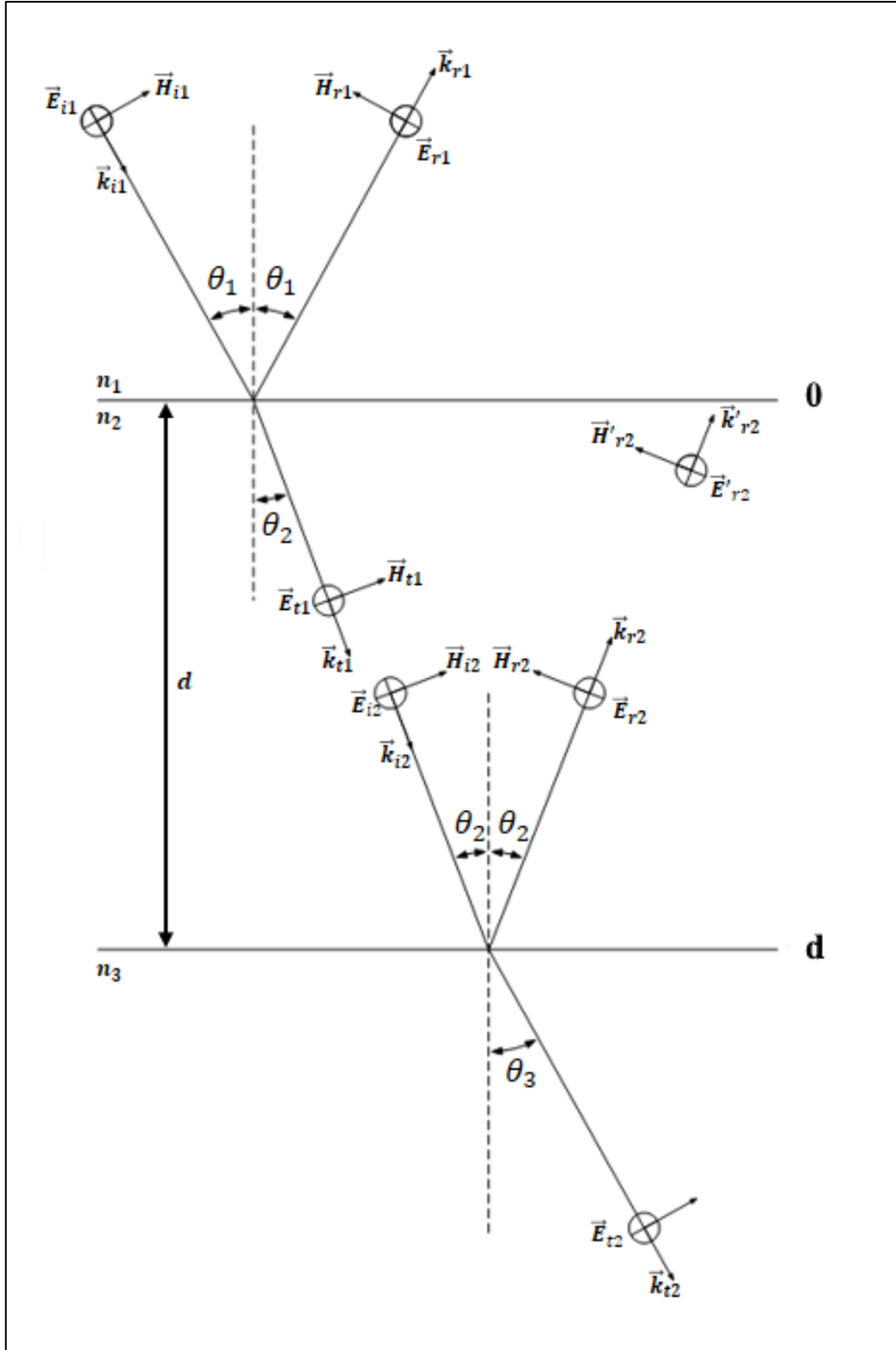
## **2.2. Dielektrik Filmlerin Geçirgenlik Spektrumu**

Şekil 2.8’de gösterilen diyagramdan faydalanarak dielektrik filmler için geçirgenlik ifadesi belirlenebilir.

Şekil 2.8’deki diyagram, ışığın elektrik alan vektörünün, yüzey normaline dik olduğu durum (TE mod) için çizilmiştir.

Şekilde;

\*  $n_1$ ,  $n_2$  ve  $n_3$  üç farklı geçirgen ortamın kırılma indislerini göstermektedir.



Şekil 2.8.  $n_1$  ve  $n_3$  kırılma indisine sahip iki geçirgen ortamın arasında bulunan  $d$  kalınlığında ve  $n_2$  kırılma indisine sahip dielektrik film üzerine gelen, polarize olmuş ışığın sınır durumlarındaki diyagram gösterimi (Hecht, 2002)

Ayrıca;

- \*  $E_{0i}$  ve  $H_{0i}$ ,  $n_1$  ortamından  $\theta$  sınırına  $k_{1i}$  doğrultusunda gelen ışığın;
- \*  $E_{1t}$  ve  $H_{1t}$ ,  $\theta$  sınırından  $n_2$  ortamına  $k_{1t}$  doğrultusunda geçen ışığın;
- \*  $E_{1r}$  ve  $H_{1r}$ ,  $\theta$  sınırından  $k_{1r}$  doğrultusunda yansıyan ışığın;
- \*  $E_{2i}$  ve  $H_{2i}$ ,  $d$  sınırına  $k_{2i}$  doğrultusunda gelen ışığın;
- \*  $E_{2r}$  ve  $H_{2r}$ ,  $d$  sınırından  $k_{2r}$  doğrultusunda yansıyan ışığın;
- \*  $E_{2t}$  ve  $H_{2t}$ ,  $d$  sınırından  $k_{2t}$  doğrultusunda  $n_3$  ortamına geçen ışığın;
- \*  $E_{2rr}$  ve  $H_{2rr}$ ,  $\theta$  sınırına  $n_2$  ortamından  $k_{2rr}$  doğrultusunda gelen ışığın;

sırasıyla elektrik ve manyetik alanlarını göstermektedir.

Son olarak;

- \*  $\phi_1$ ,  $\theta$  sınırına gelen ve sınırdan yansıyan ışıkların sınır normali ile yaptıkları açısı;
- \*  $\phi_2$ ,  $\theta$  sınırından geçen,  $d$  sınırına gelen ve sınırdan yansıyan ışıkların sınır normali

ile yaptığı açısı;

- \*  $\phi_3$ ,  $d$  sınırından geçen ışığın sınır normali ile yaptığı açısı;

göstermektedir (Hecht, 2002).

Burada  $n_2$  kırılma indisine sahip ortam,  $d$  kalınlığındaki dielektrik film olarak kabul edilmiştir (Hecht, 2002).

$\theta$  sınırında;

$$\vec{E}_{1i} + \vec{E}_{1r} = \vec{E}_{1t} + \vec{E}_{2rr} \quad (2.10)$$

$$E_{1i} + E_{1r} = E_{1t} + E_{2rr} \quad (2.11)$$

$$\vec{H}_{1i} \cos \phi_1 + \vec{H}_{1r} \cos \phi_1 = \vec{H}_{1t} \cos \phi_2 + \vec{H}_{2rr} \cos \phi_2 \quad (2.12)$$

$$(H_{1i} - H_{1r}) \cos \phi_1 = (H_{1t} - H_{2rr}) \cos \phi_2 \quad (2.13)$$

olur.

Aşağıda eşitlik 2.14 ile verilmiş olan ve elektrik alan ile manyetik alan arasındaki ilişkiyi veren bağıntı kullanılarak, eşitlik 2.13 yeniden düzenlenirse, eşitlik 2.15'e ulaşılır.

$$\vec{H} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n \vec{k} \times \vec{E} \quad (2.14)$$

$$\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} (E_{1i} - E_{1r}) n_1 \cos \phi_1 = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} (E_{1t} - E_{2rr}) n_2 \cos \phi_2 \quad (2.15)$$

$\varepsilon_0$  ve  $\mu_0$ , sırasıyla boşluğun elektriksel ve manyetik geçirgenlikleridir (Hecht, 2002).

$d$  sınırında;

$$\vec{E}_{2i} + \vec{E}_{2r} = \vec{E}_{2t} \quad (2.16)$$

$$E_{2i} + E_{2r} = E_{2t} \quad (2.17)$$

$$\vec{H}_{2i} \cos \phi_2 + \vec{H}_{2r} \cos \phi_2 = \vec{H}_{2t} \cos \phi_3 \quad (2.18)$$

$$\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} (E_{2i} - E_{2r}) n_2 \cos \phi_2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_{2t} n_3 \cos \phi_3 \quad (2.19)$$

olur.

$n_2$  ortamında oluşacak faz farkından dolayı;

$$E_{2i} = E_{1t} \exp(ik_0 h) \quad (2.20a)$$

$$E_{2r} = E_{2rr} \exp(ik_0 h) \quad (2.20b)$$

$$h = 2\pi n_2 d \cos \phi_2 \quad (2.20c)$$

eşitlikleri yazılabilir (Hecht, 2002). Eşitlik 2.20 ile verilen eşitlikler, eşitlik 2.17 ve 2.19’da kullanılırsa sırasıyla eşitlik 2.21 ve 2.22 elde edilir.

$$E_{1t} \exp(-ik_0 h) + E_{2rr} \exp(ik_0 h) = E_{2t} \quad (2.21)$$

$$n_2 [E_{1t} \exp(-ik_0 h) - E_{2rr} \exp(ik_0 h)] \cos \phi_2 = n_3 E_{2t} \cos \phi_3 \quad (2.22)$$

Eşitlik 2.11, 2.13 ve eşitlik 2.21, 2.22 için sırasıyla “ $E_1$ ,  $H_1$ ” ve “ $E_2$ ,  $H_2$ ” tanımlamaları yapılarak aşağıdaki dört eşitliğe ulaşılır (Eşitlik 2.23-2.26).

$$E_1 = E_{1t} + E_{2rr} \quad (2.23)$$

$$H_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (E_{1t} - E_{2rr}) n_2 \cos \phi_2 \quad (2.24)$$

$$E_2 = E_{1t} \exp(-ik_0 h) + E_{2rr} \exp(ik_0 h) \quad (2.25)$$

$$H_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_2 [(E_{1t} \exp(-ik_0 h) - E_{2rr} \exp(ik_0 h))] \cos \phi_2 \quad (2.26)$$

Eşitlik 2.25 ve 2.26,  $E_{1t}$  ve  $E_{2rr}$  için çözülerek; eşitlik 2.23 ve 2.24'de kullanılırsa eşitlik 2.27-2.29 bulunur.

$$E_1 = E_2 \cos(k_0 h) + H_2 (i \sin(k_0 h)) / Y_2 \quad (2.27)$$

$$H_1 = E_2 Y_2 i \sin(k_0 h) + H_2 \cos(k_0 h) \quad (2.28)$$

$$Y_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_2 \cos \phi_2 \quad (2.29)$$

Bulunan eşitlikler matris formunda yazılırsa eşitlik 2.30'a ulaşılır.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 h) & (i \sin(k_0 h)) / Y_2 \\ Y_2 i \sin(k_0 h) & \cos(k_0 h) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Şekil 2.8'de gösterilen tek katmanlı bir dielektrik film için karakteristik matris eşitlik 2.31 gibi olur.

$$M_1 = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 h) & (i \sin(k_0 h)) / Y_2 \\ Y_2 i \sin(k_0 h) & \cos(k_0 h) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Eğer iki film üst üste kaplanırsa, matris formları eşitlik 2.32,  $u$  katmanlı film üst üste kaplanırsa eşitlik 2.33 gibi olur (Hecht, 2002).

$$\begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} E_3 \\ H_3 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} E_3 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \dots M_u \begin{bmatrix} E_{u+1} \\ H_{u+1} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Tek katmanlı film için yansıma ve geçme genlik katsayılarının ( $r$  ve  $t$ ) bulunması için, eşitlik 2.11, 2.13, 2.21 ve 2.22, eşitlik 2.30'da gösterilen matris formunda kullanılırsa eşitlik 2.34'e ulaşılır.

$$\begin{bmatrix} E_{1i} + E_{1r} \\ Y_1(E_{1i} - E_{1r}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{2t} \\ Y_3 E_{2t} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$Y_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_1 \cos \phi_1 \quad (2.35a)$$

$$Y_3 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_3 \cos \phi_3 \quad (2.35b)$$

Eşitlik 2.34 ile gösterilen matris formları açılarak ve eşitlik 2.36 ile verilen  $r$  ve  $t$  kullanılarak eşitlik 2.37 ve 2.38'e ulaşılır (Hecht, 2002).

$$r = \frac{E_{1r}}{E_{1t}} \quad (2.36a)$$

$$t = \frac{E_{2t}}{E_{1i}} \quad (2.36b)$$

$$m_{11}t + m_{12}Y_3t = 1 + r \quad (2.37)$$

$$m_{21}t + m_{22}Y_3t = Y_1(1 - r) \quad (2.38)$$

Eşitlik 2.37 ve 2.38,  $r$  ve  $t$  için çözülürse eşitlik 2.39 ve 2.40'a ulaşılır.

$$r = \frac{Y_1 m_{11} + Y_1 Y_3 m_{12} - m_{21} - Y_3 m_{22}}{Y_1 m_{11} + Y_1 Y_3 m_{12} + m_{21} + Y_3 m_{22}} \quad (2.39)$$

$$t = \frac{2Y_1}{Y_1 m_{11} + Y_1 Y_3 m_{12} + m_{21} + Y_3 m_{22}} \quad (2.40)$$

Dielektrik filmler için kullanılacak olan geçirgenlik ( $T$ ) ifadesi ( $TE$  mod için) eşitlik 2.41'deki gibi olur (Hecht, 2002).

$$T(k_0) = \left( \frac{n_3 \cos(\theta_3)}{n_1 \cos(\theta_1)} \right) t^2 = \left( \frac{n_3 \cos(\theta_3)}{n_1 \cos(\theta_1)} \right) \left[ \frac{2Y_1}{Y_1 m_{11} + Y_1 Y_3 m_{12} + m_{21} + Y_3 m_{22}} \right]^2 \quad (2.41)$$

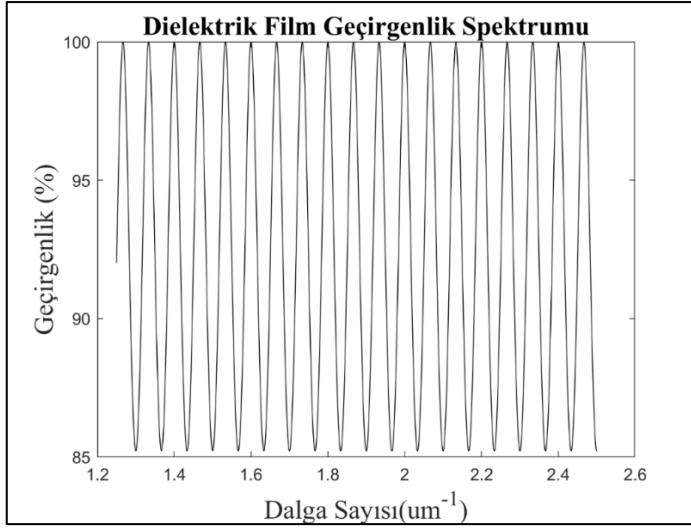
Dielektrik filmler için manyetik alanın, yüzey normaline dik olduğu durum için (yani  $TM$  mod için) eşitlik 2.29'daki  $Y_2$  ifadesi eşitlik 2.42'deki gibi olacaktır.

$$Y_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{n_2}{\cos(\theta_2)} \quad (2.42)$$

Şekil 2.8'deki gibi  $n_1$  ve  $n_3$  kırılma indisine sahip iki geçirgen ortamın arasında bulunan  $d$  kalınlığında ve  $n_2$  kırılma indisine sahip bir dielektrik film için, eşitlik 2.43 ile verilen değerler kullanılarak elde edilen geçirgenlik spektrumuna ait sinyal şekil 2.9 ile verilmiştir.

$$n_1 = 1, \quad n_2 = 1.5, \quad n_3 = 1 \quad (2.43a)$$

$$d = 5 \mu\text{m}, \quad \theta_1 = 0^\circ \quad (2.43b)$$



Şekil 2.9. Bir dielektrik filme ait örnek bir geçirgenlik spektrumu sinyali (Sinyal 400-800 nm dalga sayısı aralığı için çizilmiştir)

Şekil 2.9'dan da görüleceği üzere dielektrik filmlerin geçirgenlik spektrumlarına ilişkin sinyaller sinüs benzeri sinyallerdir.

Bilimsel çalışmalar yapan bilim insanları sinüs benzeri bu geçirgenlik sinyallerini kullanarak ince filmlere ait bazı parametreleri tespit edebileceklerini düşünmüşlerdir. Nitekim bu konuda aşağıda özetlenen bir takım bilimsel çalışmalar yapılmıştır.

### 2.3. Dielektrik Filmlere İlişkin Optik Analiz Çalışmaları

İnce filmlere ilişkin optik özelliklerin belirlenmesi için şimdiye kadar çok sayıda çalışma yapılmıştır. Çok ince kalınlığa ( $d$ ) sahip ince filmlerin analizinde spektroskopik elipsometri yöntemi kullanılabilir (Xie ve ark., 2009). Bu yöntemle belirli bir açıda gönderilen lazer ışığının filminden yansıması sonucunda polarizasyondaki değişimi gösteren çeşitli nümerik analiz yöntemleri kullanılarak filmin  $n$  ve  $d$  değerleri belirlenebilir (Tonova ve Konova, 2001).

1947 yılında Schulz yaptığı çalışmalarla Abbe refraktometre yönteminin filmin yapısını belirlemek için büyük bir potansiyeli olduğunu göstermiştir (Heavens, 1991). Abbe Refraktometresi bugün hala malzemelerin kırılma indislerinin ( $n$ ) belirlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır (Rheims ve ark., 1997).

Chang 1972 yılında saçak sayma yöntemiyle kalınlığı bilinen bir sıvı kristal hücrenin çift kırınım ( $\Delta n$ ) değerlerini hesaplamıştır (Chang, 1972).

1975 yılında Manifacier zayıf emici ince filmlerin optik sabitlerinin ( $n, \kappa$ ) ve kalınlıklarının ( $d$ ) belirlenmesi için basit bir metot önermiştir (Manifacier ve ark., 1976).

Swanepoel'in geliştirdiği zarf metodu, ince filmlerin optik sabitlerinin ( $n, \kappa$ ) ve kalınlıklarının ( $d$ ) belirlenmesinde hala yaygın olarak kullanılabilen bir metottur (Swanepoel, 1983).

2002 yılında Köysal ve arkadaşları saçak sayma yönteminin ince filmlerin kalınlıklarını ( $d$ ) belirlemek için kullanılabileceğini göstermiştir (Köysal ve ark., 2002).

Yine Köysal ve arkadaşları çok katmanlı dielektrik filmlerin kalınlık ( $d$ ) ve kırılma indislerini ( $n$ ) ayırık Fourier dönüşümü (AFD) ile eşzamanlı olarak belirleyebilmiştir. (Köysal ve ark., 2004). Ancak bu yöntemde kırılma indisi ( $n$ ) değeri sabit kabul edilmektedir.

Öyle ki;

Sinüs benzeri bir sinyal olan dielektrik filmlerin geçirgenlik spektrumlarına ait sinyaller, içerisinde frekans bileşeni barındırdığından dolayı, bu frekans bileşeni yardımıyla filme ait optik parametre ve/veya parametrelere ulaşılabileceği yadsınamaz bir gerçektir.

Bu fikirden yola çıkarak tek katmanlı bir dielektrik filmin geçirgenlik spektrumuna FD işlemi uygulanarak kırılma indisi ( $n$ ) bilinen bir filmin kalınlığına ( $d$ ) ulaşılabilmiiştir (Köysal ve ark., 2002).

Bu çalışmada Eşitlik 2.41 ile verilen dielektrik filmlerin geçirgenlik spektrumu ( $T(k_0)$ ) ifadesinin Fourier dönüşümü eşitlik 2.44 ile verilen eşitlik ile tanımlanmiiştır (Köysal ve ark., 2002).

$$f(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(k_0) e^{-ik_0 X} dk_0 \quad (2.44)$$

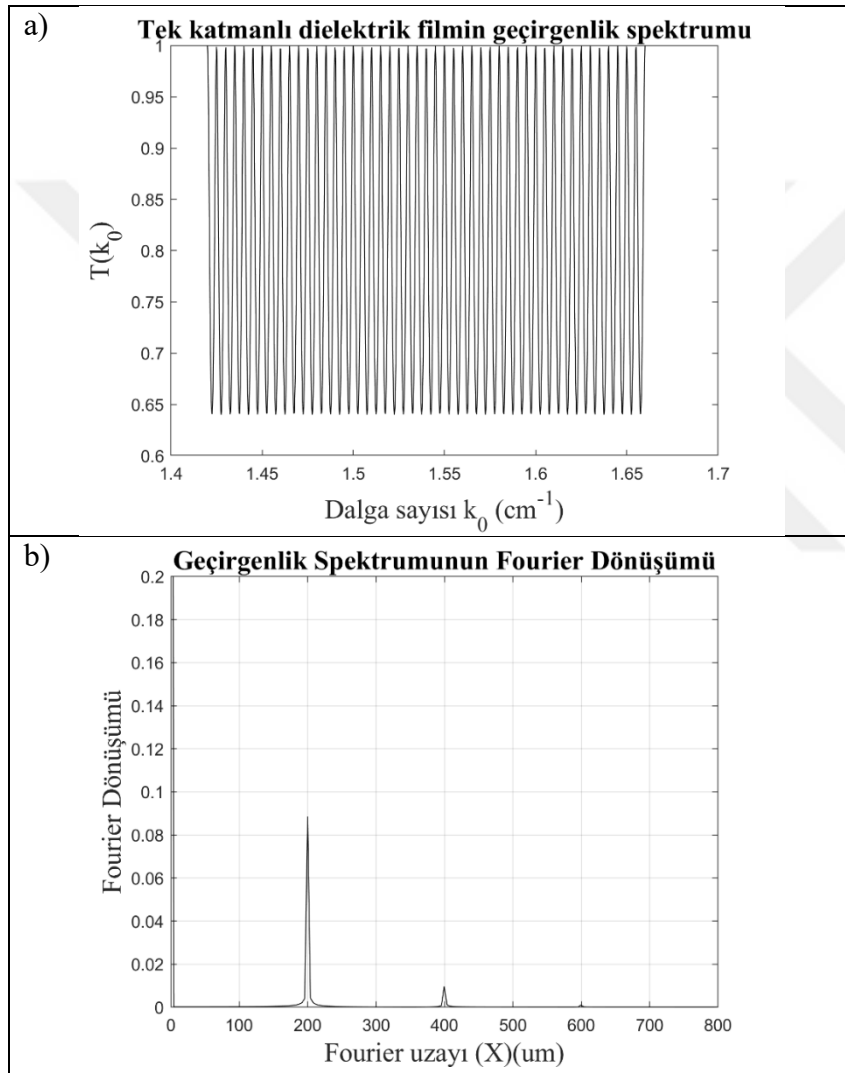
Geçirgenlik (transmitans) spektrumları birçok durumda ayırık örneklenmiş formda elde edilmektedir. Bu da bize integral ifadesinin toplam ifadesi şeklinde yazılmasına imkân vermektedir.  $k_p = p\Delta k$  ( $p = 0, \dots, N_s - 1$ ) şeklinde ifade edilen ayırık dalga sayısı noktalarında  $N_s$  ardışık örnekten oluşan ayırık bir geçirgenlik spektrumunun AFD'si eşitlik 2.45 ile tanımlanır (Burada  $\Delta k$  örnekleme aralığına karşılık gelmektedir).

$$f(X_q) = \sum_{p=0}^{N_s-1} T(k_p) e^{-ik_p X_q / N_s} \quad (2.45)$$

Eşitlik 2.45 ile verilen ifade sadece ,  $X_q = \frac{q\pi}{N_s \Delta k}$  ( $q = -\frac{N_s}{2}, -\frac{N_s}{2} + 1, \dots, \frac{N_s}{2}$ ) noktalarında değerler almaktadır.

Tek katmanlı bir film için  $f(X_q)$  filmin optik kalınlığına ( $D$ ) karşılık gelen noktada pik vermektedir (Köysal ve ark., 2002). Buradan filmin kırılma indisinin ( $n$ ) bilinmesi koşuluyla fiziksel kalınlığı ( $d$ ) hesap edilebilmektedir.

Örnek olarak; kırılma indisi değeri bilinen ( $n = 2$ ) bir filmin geçirgenlik spektrumuna (Şekil 2.10.a), Fourier dönüşümü uygulanarak elde edilen spektrumun grafiği şekil 2.10.b’de görülmektedir. Grafikte görüldüğü üzere 200 değerinde pik oluşmuştur. Bu değer filmin optik kalınlığıdır ( $D = 200 \mu m$ ).



Şekil 2.10. (a) Normal geliş açısında tek-katmanlı bir dielektrik filmin TE polarizasyonunda 600-700 nm dalga boyu aralığında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyali ( $T(k_0)$ ) (b) Normal geliş açısında tek-katmanlı bir dielektrik filmin geçirgenlik spektrumu sinyalinin FD spektrumu

Optik kalınlığın  $D = n * d$  şeklinde tanımlanan eşitliğinden, filmin fiziksel kalınlığı  $d = 100 \mu m$  bulunacaktır. Zaten geçirgenlik spektrumu oluşturulurken hesaplamada kullanılan değer tam da bu değerdir.

Bu da Köysal ve arkadaşlarının geliştirdiği bu tekniğin, kırılma indisi ( $n$ ) bilinen filmler için, filmin fiziksel kalınlığını ( $d$ ) bulmada son derece basit ve pratik bir teknik olduğunu göstermektedir.

AFD'nin ayırık doğası sebebiyle filmin optik kalınlığının ( $D$ ) tespitinde olası bir hata olabilir. Pik, pozisyon olarak tam  $D$  değerinde oluşmayabilir ama bitişik noktaların birinde görülecektir. Bundan dolayı analizde hesaba katmak zorunda olduğumuz optik kalınlıktaki ( $D$ ) maksimum mutlak hata eşitlik 2.46 ile verilmiştir.

$$\delta D \cong (\Delta X_q)/2 \quad (2.46)$$

Dielektrik filmlerin geçirgenlik spektrumu sinyallerine FD işlemi uygulanarak kırılma indisi ( $n$ ) bilinen bir filmin kalınlığına ( $d$ ) ulaşılması fikri bir ileri boyuta taşınarak aynı teknik  $N$ -katmanlı bir filme uygulanmış ve yine olumlu sonuçlar alınmıştır.

Öyle ki  $N$ -katmanlı bir film için  $f(X_q)$  spektrumunda  $(N(N + 1))/2$  tane pik oluşmaktadır (Köysal ve ark., 2002).

Bunlardan;

**$N$  tanesi** her bir katmanın optik kalınlığına karşılık gelen pozisyonlardadır  $\{D_1, D_2, \dots, D_N\}$ ,

**$(N-1)$  tanesi** iki tane ardışık optik kalınlığın toplamına karşılık gelen pozisyonlardadır  $\{D_1 + D_2, D_2 + D_3, \dots, D_{N-1} + D_N\}$ ,

**$(N-2)$  tanesi** üç tane ardışık optik kalınlığın toplamına karşılık gelen pozisyonlardadır  $\{D_1 + D_2 + D_3, D_2 + D_3 + D_4, \dots, D_{N-2} + D_{N-1} + D_N\}$ ,

...

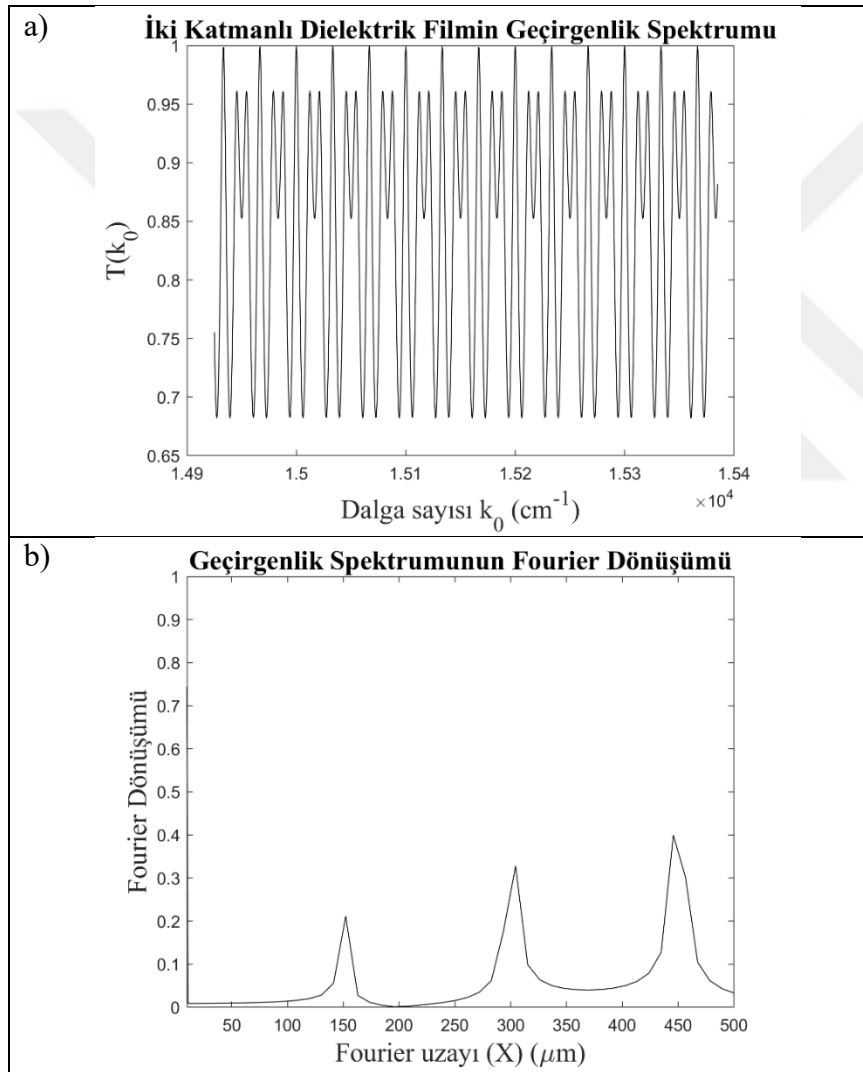
...

**$1$  tanesi** ise tüm katmanların optik kalınlıklarının toplamına karşılık gelen pozisyonlardadır  $\{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + \dots + D_{N-2} + D_{N-1} + D_N\}$  (Köysal ve ark., 2002).

Başlangıçta her bir katmanın kırılma indisi bilinmesine rağmen, deneysel olarak elde edilmiş AFD spektrumunda, hangi pike (optik kalınlığa ( $D$ )) hangi katmanın karşılık geldiğini belirlenememektedir. Çünkü katmanların fiziksel kalınlıkları bilinmediği için, pek çok  $\{n, d\}$  kombinasyonu aynı optik kalınlık değeri verebilir.

Sadece AFD spektrumundaki en son pik her zaman tüm katmanların optik kalınlıklarının toplamına karşılık geldiği bilinmektedir ( $\sum_{j=1}^N D_j$ ) (Köysal ve ark., 2002).

Örnek olarak kırılma indisi değerleri ( $n_1 = 1,5$  ve  $n_2 = 2$ ) bilinen 2-katmanlı bir filmin geçirgenlik spektrumu şekil 2.11.(a)'da verilmiştir. Verilen geçirgenlik spektrumu sinyali FD'ne tabi tutularak elde edilen spektrum (şekil 2.11.b) 3 farklı değerde (150, 300 ve 450) pikler oluşturmuştur. Bu değerlerin filmin 1. katmanının optik kalınlığına, 2. katmanının optik kalınlığına ve her iki katmanın optik kalınlığının toplamına karşılık gelen değerler olduğu bilinmektedir ( $D_1 = 150 \mu m$ ,  $D_2 = 300 \mu m$  ve  $D_1 + D_2 = 450 \mu m$ ).



Şekil 2.11.(a). Normal geliş açısında iki-katmanlı bir dielektrik filmin TE polarizasyonunda 650-670 nm dalga boyu aralığında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyali ( $T(k_0)$ ) (b) Normal geliş açısında iki-katmanlı bir dielektrik filmin geçirgenlik spektrumu sinyalinin FD spektrumu

Yalnız burada bu değerleri sağlayan farklı  $\{n, d\}$  kombinasyonları mevcuttur.

Öyle ki;

$\{n_1, d_1\} = \{1.5, 100\}$  ve  $\{n_2, d_2\} = \{2, 150\}$  ikilileri 150, 300 ve 450 değerlerinde pikler vermekte iken,

Yine;

$\{n_1, d_1\} = \{1.5, 200\}$  ve  $\{n_2, d_2\} = \{2, 75\}$  ikilileri 150, 300 ve 450 değerlerinde pikler vermektedir.

Bu durumda her iki katmanın kırılma indisi değerleri bilinse bile fiziksel kalınlıklarını bulmak mümkün değildir.

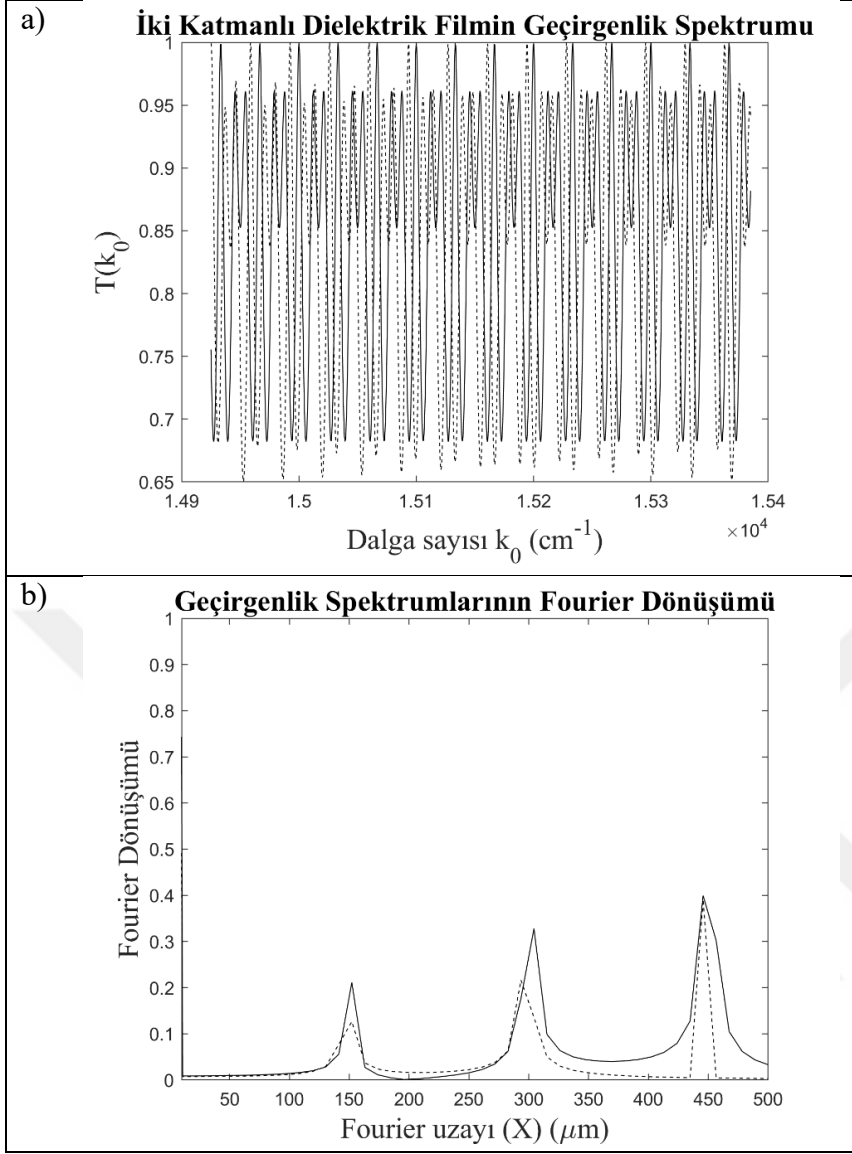
Bu  $(n, d)$  çiftlerindeki belirsizlik durumu nedeniyle hangi katmanın hangi kalınlığa sahip olduğunu hesap edememe problemi, farklı geliş açılarında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerinin FD işlemine tabi tutulması sonucu elde edilmiş spektrumlar yardımıyla çözülebilmektedir (Köysal ve ark., 2002).

$N$ -katmanlı bir film için  $N$  farklı geliş açısı için  $(\theta_i^\alpha, \alpha = I, II, \dots, N)$  elde edilen geçirgenlik spektrumlarının AFD'leri eşitlik 2.47 ile verilen  $N \times N$  matris eşitliğini yaratmaktadır.

$$\begin{bmatrix} n_1 \cos \theta_1^I & n_2 \cos \theta_2^I & \dots & n_N \cos \theta_N^I \\ n_1 \cos \theta_1^{II} & n_2 \cos \theta_2^{II} & \dots & n_N \cos \theta_N^{II} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_1 \cos \theta_1^N & n_2 \cos \theta_2^N & \dots & n_N \cos \theta_N^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ \dots \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(\theta_i^I) \\ P(\theta_i^{II}) \\ \dots \\ \dots \\ P(\theta_i^N) \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Eşitlik 2.47'de  $P(\theta_i^\alpha) = \sum_{j=1}^N D_j$ ,  $\theta_i^\alpha$  geliş açısına karşılık gelen optik kalınlıkların toplam değeridir ve her bir katmanın kırılma açısı, geliş açısına Snell yasası ( $n_1 \sin(\theta_1^\alpha) = n_2 \sin(\theta_2^\alpha) = \dots = n_N \sin(\theta_N^\alpha) = n_0 \sin(\theta_i^\alpha)$ ) ile bağlıdır. Bundan sonra, katmanların fiziksel kalınlıkları eşitlik 2.47 yardımıyla hesap edilebilmiştir (Köysal ve ark., 2002).

Örnek olarak, Şekil 2.12'de kırılma indisleri bilinen ( $n_1 = 1.5$  ve  $n_2 = 2$ ) iki katmanlı bir dielektrik filmin 2 farklı geliş açısında ( $\theta_1 = 0^\circ$  ve  $\theta_2 = 15^\circ$ ) elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri ve bu sinyallerin FD işlemine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş olan FD spektrumu verilmiştir.



Şekil 2.12. (a) İki-katmanlı bir dielektrik filmin TE polarizasyonunda 650-670 nm dalga boyu aralığında 0 derece (düz çizgi) ve 15 derece (kesikli çizgi) geliş açılarında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri ( $T_1(k_0)$  ve  $T_2(k_0)$ ) (b) İki-katmanlı bir dielektrik filmin 0 derece (düz çizgi) ve 15 derecelik (kesikli çizgi) geliş açılarında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerinin FD spektrumları

Spektrumda 0 derecelik geliş açısı için elde edilen pikler düz çizgi (ki onlar  $D_1 \cong 152.276 \mu m$ ,  $D_2 \cong 304.55 \mu m$  ve  $D_1 + D_2 \cong 445.95 \mu m$  değerlerindedir) ve 15 derecelik geliş açısında elde edilen pikler kesikli çizgi (ki onlar  $D'_1 \cong 141.4 \mu m$ ,  $D'_2 \cong 293.67 \mu m$  ve  $D'_1 + D'_2 \cong 435.07 \mu m$  değerlerindedir) ile gösterilmiştir.

Bulunan değerler eşitlik 2.47'de yerlerine konularak 2- katmanlı dielektrik filmin her bir katmanına ait fiziksel kalınlıklar sırasıyla  $d_1 = 101.2 \mu m$  ve  $d_2 = 150.48 \mu m$  olarak elde edilmiştir.

Geçirgenlik spektrumu sinyallerini elde etmek için kullandığımız değerler sırasıyla  $d_1 = 100 \mu m$  ve  $d_2 = 150 \mu m$ 'dir. Elde edilen sonuçların giriş değerleri ile uyum içerisinde olduğu ve geliştirilen tekniğin oldukça pratik olduğu görülmektedir.

Köysal ve arkadaşları tarafından başlatılan dielektrik filmlerin geçirgenlik spektrumlarına FD işlemi uygulanarak kırılma indisi ( $n$ ) bilinen bir filmin fiziksel kalınlığının ( $d$ ) bulunması süreci, kırılma indisi ( $n$ ) ve fiziksel kalınlığın ( $d$ ) eş zamanlı olarak elde edilmesi ile son bulmuştur.

Bu amaçla iki farklı geliş açısında elde edilmiş geçirgenlik spektrumları kullanılmıştır. Bu geçirgenlik spektrumu sinyallerine FD işlemi uygulanarak sinyaller içerisindeki frekans bilgileri elde edilmiştir. Bu frekans bilgileri iki farklı açı için filmin optik kalınlık değerlerine ( $D(\theta_i)$  ve  $D'(\theta'_i)$ ) karşılık gelmektedir.

Bu optik kalınlık ifadeleri eşitlik 2.48 ve eşitlik 2.49'daki gibi yazılabilir (Köysal ve ark., 2004).

$$D(\theta_i) = nd \cos \varphi = d \sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_i} \quad (2.48)$$

$$D(\theta'_i) = nd \cos \varphi' = d \sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta'_i} \quad (2.49)$$

Burada kırılma açısı, Snell yasası kullanarak elemine edilmiştir. Hem eşitlik 2.48, hem de eşitlik 2.49 iki bilinmeyenli ( $n$  ve  $d$ ) denklemlerdir. Birinci denklemden bilinmeyenlerden biri çekilip, diğer denklemden yerine konursa; her iki bilinmeyene karşılık gelen ifadeler aşağıdaki eşitlik 2.50 ve eşitlik 2.51'deki gibi açık olarak yazılabilir (Köysal ve ark., 2004).

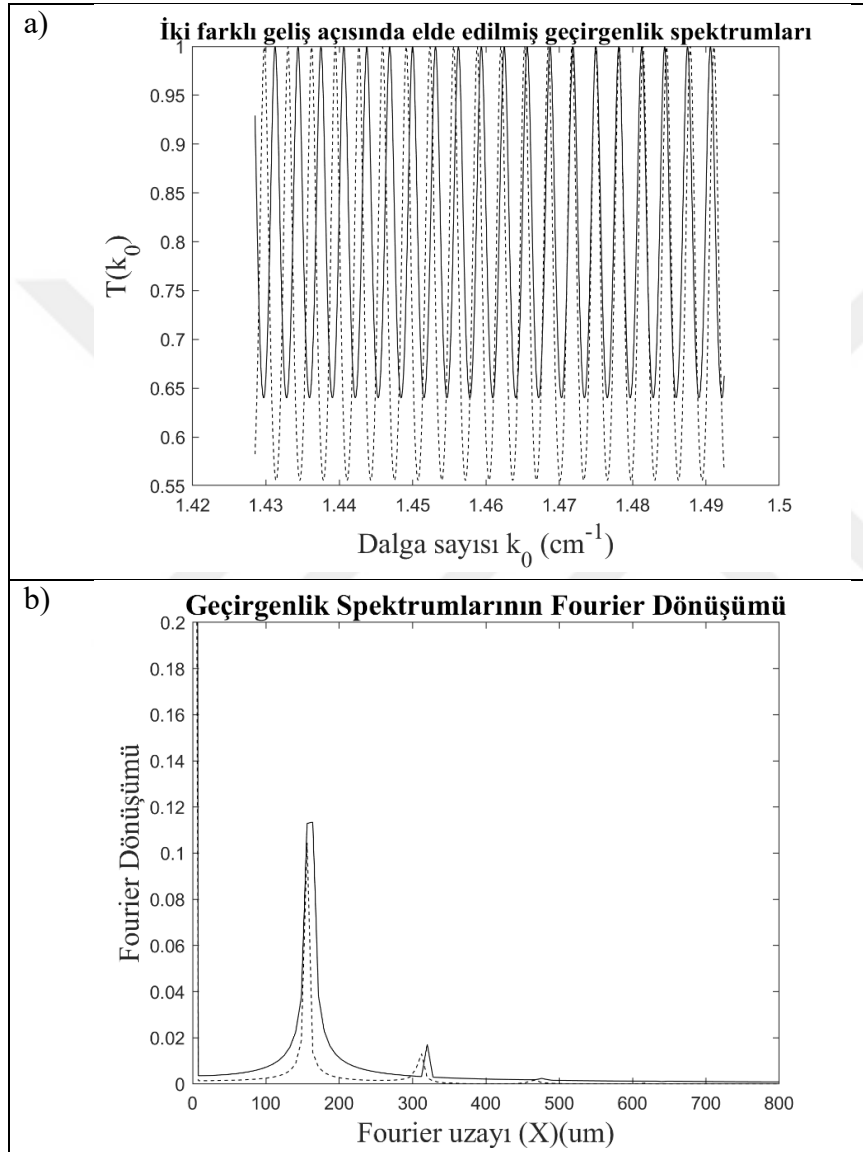
$$n^2 = n_0^2 \frac{D^2 \sin^2 \theta'_i - D'^2 \sin^2 \theta_i}{D^2 - D'^2} \quad (2.50)$$

$$d^2 = \frac{D^2 - D'^2}{n_0^2 (\sin^2 \theta'_i - \sin^2 \theta_i)} \quad (2.51)$$

Örneğin kırılma indisi  $n = 2$  ve fiziksel kalınlığı  $d = 80 \mu m$  olan tek katmanlı bir dielektrik filmin  $\theta_i = 0$  derecelik ve  $\theta'_i = 30$  derecelik iki farklı geliş açısında elde edilmiş

geçirgenlik spektrumu ve geçirgenlik spektrumunun Fourier dönüşümüne ait spektrum Şekil 2.13.(a) ve Şekil 2.13.(b)'de gösterilmiştir.

Şekil 2.13.(b)'den de görüldüğü gibi  $\theta_i = 0$  derecelik geliş açısı için  $D = 160 \mu m$  değerinde bir pik ve yine  $\theta'_i = 30$  derecelik geliş açısında  $D' = 154,92 \mu m$  değerinde bir pik gözlenmektedir.



Şekil 2.13. (a) Tek katmanlı bir dielektrik film için  $0^\circ$  (düz çizgi) ve  $30^\circ$  (kesikli çizgi) geliş açılarında TE polarizasyonunda 670-700 nm dalga boyu aralığında hesaplanmış geçirgenlik spektrumlarına ait sinyaller ( $T_1(k_0)$  ve  $T_2(k_0)$ ) (b) Tek katmanlı bir film için  $0^\circ$  (düz çizgi) ve  $30^\circ$  (kesikli çizgi) geliş açılarında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerinin FD'ye tabi tutulması sonucunda elde edilmiş olan spektrum

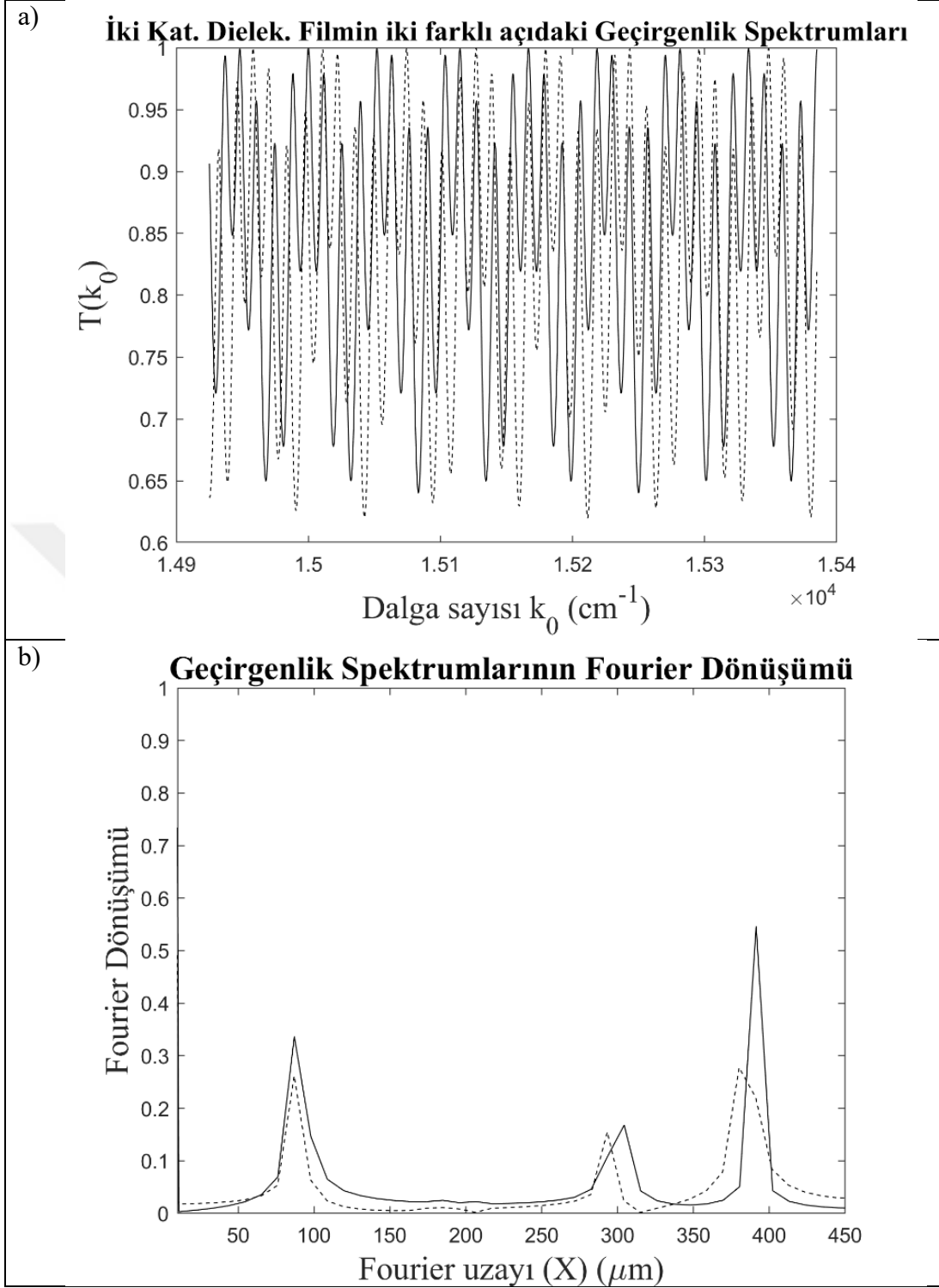
FD spektrumundan elde edilen bu değerler eşitlik 2.50 ve eşitlik 2.51’de yerlerine konulduğunda filmin kırılma indisi  $n = 2,000129$  ve fiziksel kalınlığı  $d = 79,9948 \mu m$  olarak hesap edilmektedir ki bu değerler giriş değerleri ile örtüşmektedir (Köysal ve ark., 2004).

Sonuç olarak iki farklı geliş açısında elde edilen geçirgenlik spektrumu sinyallerinin, FD işlemine tabi tutulması sonucu elde edilen frekans spektrumlarındaki pik değerleri ile filmin kırılma indisi ( $n$ ) ve fiziksel kalınlığı ( $d$ ) eşzamanlı olarak elde edilebilmektedir.

Kırılma indisi ( $n$ ) ve fiziksel kalınlık ( $d$ ) değerlerini eşzamanlı olarak belirleyebilmek için kullanılan bu yöntem iki ya da daha fazla katmanlı filmler için de geçerlidir (Köysal ve ark., 2004).

Aşağıda Şekil 2.14’te katmanlarına ait kırılma indisi ve fiziksel kalınlık çifti değerleri  $\{n_1, d_1\} = \{2, 45 \mu m\}$  ve  $\{n_2, d_2\} = \{1.5, 200 \mu m\}$  olan iki katmandan oluşmuş bir dielektrik filme ait  $\theta_i = 0^\circ$  ve  $\theta'_i = 30^\circ$  derecelik iki farklı geliş açısında elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumları ve bu spektrumların FD işlemine tabi tutulması sonucu elde edilmiş olan spektrumlar verilmiştir.

Şekil 2.14.(b)’de görülen frekans spektrumu grafiğindeki piklere ait değerler  $\{D_1, D'_1\} = \{90 \mu m, 87,1 \mu m\}$  ve  $\{D_2, D'_2\} = \{300 \mu m, 282,8 \mu m\}$  olarak gözlenmiştir. Bu değerler sırasıyla eşitlik 2.50 ve 2.51’de yerlerine konursa dielektrik filmin her bir katmanına ait kırılma indisi ve fiziksel kalınlık çiftleri ( $\{n, d\}$ ) sırasıyla,  $\{n_1, d_1\} = \{1,985, 45,3 \mu m\}$  ve  $\{n_2, d_2\} = \{1,498, 200,2 \mu m\}$  olarak bulunmaktadır.



Şekil 2.14. (a) İki katmanlı bir dielektrik film için,  $0^\circ$  (düz çizgi) ve  $30^\circ$  (kesikli çizgi) geliş açılarında, TE polarizasyonunda  $670 - 700 \text{ nm}$  dalga boyu aralığında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri ( $T_1(k_0)$  ve  $T_2(k_0)$ ) (b) İki katmanlı bir dielektrik film için,  $0^\circ$  (düz çizgi) ve  $30^\circ$  (kesikli çizgi) geliş açılarında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerine FD işlemi uygulanması sonucunda elde edilmiş olan spektrum

Görüldüğü üzere yöntem ile elde edilen kırılma indisi ( $n$ ) ve fiziksel kalınlık ( $d$ ) değerleri, spektrumları elde etmek için kullanılan giriş değerleri ile örtüşmektedir.

Bu noktaya kadar yapılan çalışmalarda dielektrik filmlere ilişkin kırılma indisi ( $n$ ) değerlerinin sabit olduğu varsayılmıştır. Oysa ki kırılma indisinin Cauchy parametreleri ile dalga boyuna ( $\lambda$ ) (dolayısıyla dalga sayısına ( $k_0$ )) bağlı olarak değiştiği kabul edilmektedir. Bu da geçirgenlik spektrumunun sahip olduğu frekansın (titreşim sıklığının) değişmesi anlamına gelmektedir.

Frekansı zamanla değişen sinyallerin zaman-frekans analizi için Dalgacık dönüşümü kullanımının daha iyi bir analize imkân verdiği önceki başlıkta anlatılmıştı.

İşte bu bağlamda geçirgenlik spektrumu sinyalleri Dalgacık dönüşümüne tabi tutulabilir mantığı ile Coşkun (2012) ince filmlerin optik özelliklerinin belirlenmesi çalışmalarını bir boyut ileri taşımıştır.

Coşkun'un çalışmasında SDD'nin Morlet, Paul ve DOG dalgacığı özelinde dielektrik filmlerin, yalıtkan filmlerin ve likit kristal hücrelerin geçirgenlik spektrumlarına uygulanmış örnekleri bulunmaktadır (Coşkun, 2012).

Coşkun çalışmasında dielektrik filmlerin geçirgenlik spektrumunu Dalgacık dönüşümüne tabi tutarak kalınlığı bilinen bir film için kırılma indisi dağılımını ( $n(k_0)$ ) bulabilmiştir ve bulduğu sonuçlar literatür ile tam uyum içerisinde.

$T(k_0)$  ifadesinin sürekli dalgacık dönüşümü eşitlik 2.52 ile verilmiştir.

$$SDD(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} T(k_0) \Psi^* \left( \frac{k_0 - b}{a} \right) dk_0 \quad (2.52)$$

Eşitlik 2.52 Parseval teoremi kullanılarak daha kullanışlı bir hale getirilmiştir.  $\Psi_{a,b}(k_0)$  fonksiyonu için FD,

$$\Psi_{a,b}(x_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi \left( \frac{k_0 - b}{a} \right) \exp(-i2\pi k_0 x_0) dk_0 \quad (2.53)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde  $\left[ \frac{(k_0 - b)}{a} \right] = l$  olacak şekilde değişken tanımlanırsa eşitlik 2.54 elde edilir.

$$\hat{\Psi}_{a,b}(x_0) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(l) \exp(-i2\pi(al + b)x_0) dl \quad (2.54)$$

Eşitlik 2.54 düzenlenirse eşitlik 2.55'e ulaşılır.

$$\hat{\Psi}_{a,b}(x_0) = \sqrt{a} \exp(-i2\pi bx_0) \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(l) \exp(-i2\pi l(ax_0)) dl \quad (2.55a)$$

$$\hat{\Psi}_{a,b}(x_0) = \sqrt{a} \exp(-i2\pi bx_0) \hat{\Psi}(ax_0) \quad (2.55b)$$

Eşitlik 2.55'deki  $\hat{\Psi}(ax_0)$ ,  $x_0$  uzayındaki analiz dalgacık fonksiyonudur. Eşitlik 2.55 için TFD ifadesi yazılırsa eşitlik 2.56'ya ulaşılır.

$$\Psi_{a,b}(k_0) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-i2\pi bx_0) \hat{\Psi}(ax_0) \exp(i2\pi k_0 x_0) dx_0 \quad (2.56)$$

$\Psi_{a,b}(k_0)$  fonksiyonunun kompleks eşleniği eşitlik 2.57'deki gibi olur.

$$\Psi_{a,b}^*(k_0) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(i2\pi bx_0) \hat{\Psi}^*(ax_0) \exp(-i2\pi k_0 x_0) dx_0 \quad (2.57)$$

Eşitlik 2.57, eşitlik 2.52'de yerine yazıp düzenlenirse eşitlik 2.58'e ulaşılır,

$$SDD(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{\Psi}^*(ax_0) \exp(i2\pi bx_0) dx_0 \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} T(k_0) \exp(-i2\pi k_0 x_0) dk_0 \right] \quad (2.58)$$

Köşeli parantez içindeki ifadenin eşiti,  $T(k_0)$  için, FD işlemidir. Bu değişim de yapılıncı elde edilen SDD ifadesi eşitlik 2.59'daki gibi olur.

$$SDD(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{\Psi}^*(ax_0) \hat{T}(x_0) \exp(i2\pi bx_0) dx_0 \quad (2.59a)$$

$$SDD(a, b) = \sqrt{a} TFD \{ \hat{\Psi}^*(ax_0) \hat{T}(x_0) \} \quad (2.59b)$$

Burada,  $\hat{T}(x_0)$  ve  $\hat{\Psi}(x_0)$  sırasıyla  $T(k_0)$  ve  $\Psi(k_0)$  eşitliklerinin FD sonucudur (Angrisani ve ark., 1999). Eşitlik 2.59, hızlı Fourier dönüşümü (HFD) algoritmasının kullanımına imkân verir; böylece eşitlik 2.52'ye göre daha hızlı işlem yapmak mümkün olur (Addison, 2005).

SDD yöntemi ile yapılan analiz sonuçları seçilen ana dalgacığın ( $\Psi(k_0)$ ) formuyla büyük değişiklikler gösterir (Meyers ve ark., 1993). Bazı ana dalgacıklarla ilgili örnekler

Farge'nin çalışmasında bulunmaktadır (Farge, 1992). Dalgacık dönüşümünün Morlet, Paul ve DOG dalgacığı özelinde dielektrik filmlerin, yalıtkan filmlerin ve likit kristal hücrelerin geçirgenlik spektrumlarına uygulanmış örnekleri ise Coşkun'un çalışmasında bulunmaktadır (Coşkun, 2012).

Coşkun fiziksel kalınlığı ( $d$ ) bilinen dielektrik filmlerin geçirgenlik spektrumuna Paul dalgacığı kullanarak SDD uygulamıştır: Öyle ki; eşitlik 2.41 ile verilen  $T(k_0)$  ifadesinden elde edilen ve SDD'nin daha kolay yapılmasına imkân veren eşitlik 2.59'da kullanılacak olan  $\hat{T}(x_0)$  ifadesi eşitlik 2.60 ile verilmiştir:

$$\hat{T}(x_0) = C_1 \delta(x_0 - 4\pi D) + C_2 \delta(x_0) + C_3 \delta(x_0 + 4\pi D) \quad (2.60)$$

Burada  $C_1$ ,  $C_2$  ve  $C_3$  sabitlerdir ve  $D = nd$  eşitliği ile verilen optik kalınlıktır (Siqueiros ve ark., 1988).

SDD'nin daha hızlı yapılmasına imkân veren eşitlik 2.59'daki ifade için Paul dalgacığının FD ifadesine ihtiyaç vardır.

Paul dalgacığı için  $k_0$  uzayındaki ana dalgacık eşitlik 2.61'deki gibi tanımlanmıştır (Coşkun, 2012).

$$\Psi(k_0) = \frac{2^m m! (1 - i k_0)^{-(m+1)}}{2\pi \sqrt{\frac{(2m)!}{2}}} \quad (2.61)$$

burada  $m$ , Paul dalgacığının derecesidir (Afifi ve ark., 2002). Analiz Paul dalgacığı ise eşitlik 2.62 ile verilmektedir.

$$\Psi_{a,b}(k_0) = \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{2^m m! \left(1 - i \left(\frac{k_0 - b}{a}\right)\right)^{-(m+1)}}{2\pi \sqrt{\frac{(2m)!}{2}}} \quad (2.62)$$

$x_0$  uzayında yapılacak olan analiz için gerekli olan ana Paul dalgacığı eşitlik 2.63 ve yine  $x_0$  uzayındaki analiz Paul dalgacığı da eşitlik 2.64 ile verilmiştir (Coşkun, 2012).

$$\hat{\Psi}(x_0) = \frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} (x_0)^m \exp(-x_0) \xi(x_0) \quad (2.63)$$

$$\hat{\Psi}(ax_0) = \frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} (ax_0)^m \exp(-ax_0) \xi(ax_0) \quad (2.64)$$

Burada  $\xi$ , Heaviside fonksiyonudur (Afifi ve ark., 2002).

Paul dalgacığı için yazılmış olan eşitlik 2.64 ve dielektrik film için yazılmış olan eşitlik 2.60, SDD'nin hızlı yapılmasına imkân veren eşitlik 2.59'da yerlerine konulursa eşitlik 2.65'e ulaşılmıştır.

$$SDD(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} [C_1 \delta(x_0 - 4\pi D) + C_2 \delta(x_0) + C_3 \delta(x_0 + 4\pi D)] \frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} (ax_0)^m \exp(-ax_0) \xi(ax_0) \exp(i2\pi bx_0) dx_0 \quad (2.65)$$

Burada  $\xi(x_0)$ ,  $x_0 \leq 0$  durumunda sifıra eşit olduğundan,  $x_0 \leq 0$  durumlarında  $\hat{\psi}(ax_0) = 0$  olacaktır, dolayısıyla  $\hat{T}(x_0)$  ifadesinin negatifteki piklerine ulaşamaz.

Bundan dolayı da  $\hat{\psi}(ax_0)$ ,  $\hat{T}(x_0)$  ifadesinin sadece pozitif olan üçüncü piki üzerinde işlem görür. Bu açıklama ışığında eşitlik 2.65, eşitlik 2.66'daki gibi sadeleşir.

$$SDD(a, b) = \sqrt{a} C_1 \frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_0 - 4\pi D) (ax_0)^m \exp(-ax_0) \exp(i2\pi bx_0) dx_0 \quad (2.66)$$

Dirac delta fonksiyonun özellikleri kullanılarak eşitlik 2.66 biraz daha sadeleştirilebilir ve eşitlik 2.67'ye ulaşılır.

$$SDD(a, b) = \sqrt{a} C_1 \frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} (4\pi a D)^m \exp(-4\pi a D) \exp(i8\pi^2 b D) \quad (2.67)$$

$SDD(a, b)$  ifadesi normalize edilerek mutlak değeri alınırsa eşitlik 2.68'e ulaşılır.

$$|SDD(a, b)| = \sqrt{a} C_1 \frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} (4\pi a D)^m \exp(-4\pi a D) \quad (2.68)$$

Eşitlik 2.68'in karesinin  $a$  parametresine göre türevi alınıp 0'a eşitlenirse,  $|SDD(a, b)|$  matrisinde  $b$  değerinin sabit olduğu her sütundaki  $|SDD(a, b)|$  değerinin en büyük olduğu  $a$  değerine ulaşılır ( $a_{max}$ ) ve bu ifade eşitlik 2.69'de verildiği gibidir (Coşkun, 2012).

$$a_{max} = \frac{1+2m}{8\pi D} \rightarrow n_{2ap} = \frac{1+2m}{8\pi a_{max} D} \quad (2.69)$$

Eşitlik 2.69 yardımıyla, her  $b$  değeri için  $n_{2ap}(b)$  değerine ulaşılır. Sinyal  $[k_0 - \Delta k_0, k_0 + \Delta k_0]$  aralığında bilgi içerir ve eğer  $b \gg \frac{a}{\sqrt{2m-1}}$  ise;  $n_{2ap}(k_0) = n_{2ap}(b)$  olur. Bulunan anlık titreşim frekansına karşılık gelen kırılma indisinden,  $n_2(k_0)$  değerlerini bulmak için aşağıdaki işlemler yapılır (Coşkun, 2012).

$T(k_0)$  sinyallerinde, anlık titreşim sıklığına karşılık gelen  $n_{2ap}(k_0)$  ile gerçek titreşim sıklığına karşılık gelen  $n_2(k_0)$  arasında eşitlik 2.70 ile verilen bağıntı vardır (Meyer ve Xu, 1997).

$$n_{2ap}(k_0) = \frac{d\Omega(k_0)}{dk_0}, \quad \Omega(k_0) = n_2(k_0)k_0 \quad (2.70)$$

Eşitlik 2.70 çözülürse;

$$n_2(k_0) = \frac{1}{k_0} \left[ \int_{k_{0ilk}}^{k_0} n_{2ap}(k'_0) dk'_0 + C_4 \right] \quad (2.71)$$

Burada  $C_4$  integral sabitidir ve  $k_{0ilk}$ ,  $T(k_0)$  sinyalinin çalışılan aralıktaki ilk değeridir. Eşitlik 2.70 diferansiyel denklem olarak ta incelenebilir.

$$n_{2ap}(k_0) = \frac{dn_2(k_0)}{dk_0} k_0 + n_2(k_0) \quad (2.72)$$

$$\frac{dn_2(k_0)}{dk_0} + \frac{1}{k_0} n_2(k_0) = \frac{1}{k_0} n_{2ap}(k_0) \quad (2.73)$$

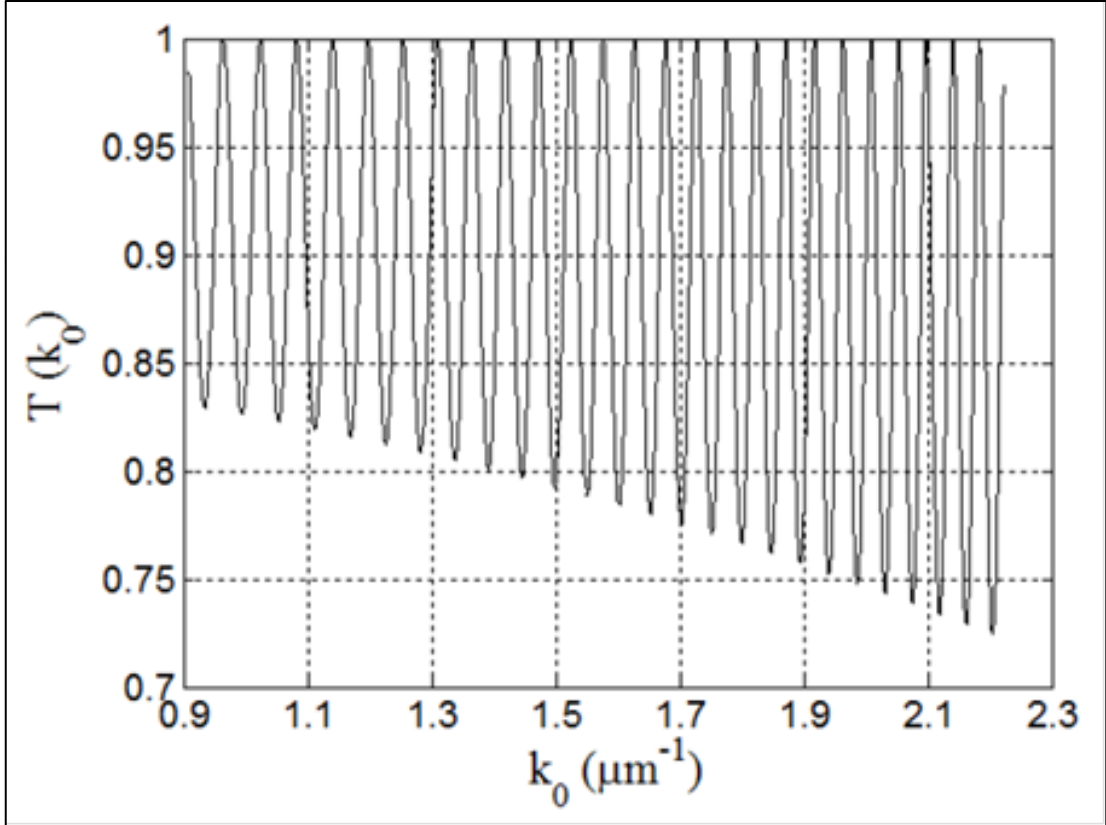
Eşitlik 2.73, 1. Dereceden lineer diferansiyel denklemdir ve çözümü eşitlik 2.71 ile aynıdır.  $C_4$  katsayısını bulmak için eşitlik 2.71,  $k_{0ilk}$  değeri yerine 0'dan başlatılırsa, eşitlik 2.70'te kullanılarak,  $k_0 = 0$  değeri için  $\Omega(0) = 0$  olacağından eşitlik 2.74'e ulaşılır (Coşkun, 2012).

$$\int_0^0 n_{2ap}(k'_0) dk'_0 + C_4 = 0 \quad (2.74)$$

Belirtilen koşullar altında ulaşılan eşitlik 2.74'ün sonucunda  $C_4 = 0$  olarak bulunur.  $C_4$  katsayısından kurtulmaya yarayan bu yaklaşım sonucunda eşitlik 2.71 eşitlik 2.75 gibi yazılabilir.

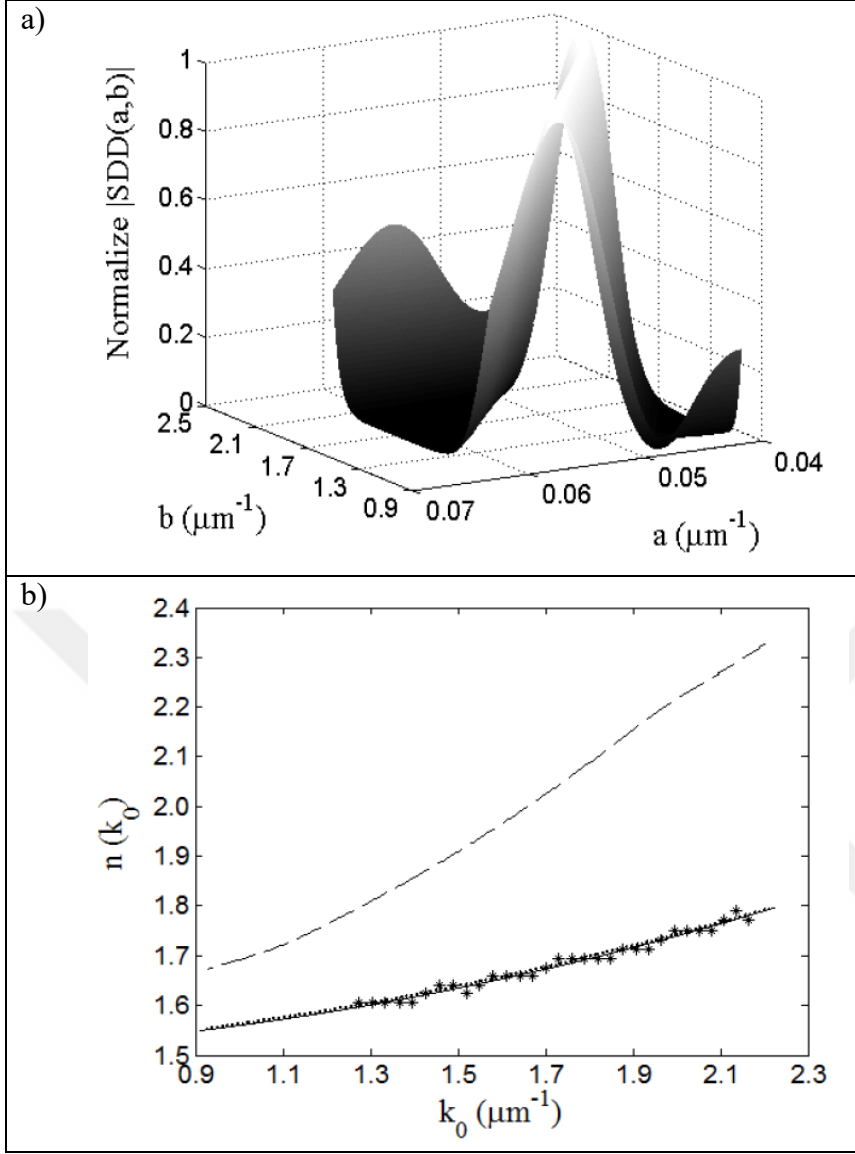
$$n_2(k_0) = \frac{1}{k_0} \left[ \int_0^{k_{oilk}} n_{2ap}(k'_0) dk'_0 + \int_{k_{oilk}}^{k_0} n_{2ap}(k'_0) dk'_0 \right] \quad (2.75)$$

SDD'nin hızlı uygulanmasına izin veren eşitlik 2.59'a göre örnek bir  $T(k_0)$  sinyalinin (şekil 2.15) 4. derece Paul dalgacığı ile SDD analizi yapılmış ve eşitlik 2.68'e karşılık gelen  $a \times b$  boyutlu matris şekil 2.16.(a)'de verilmiştir (Coşkun, 2012).



Şekil 2.15. Yalıtkan filmler için teorik olarak üretilmiş örnek bir geçirgenlik spektrumu sinyali ( $T(k_0)$ ) (Coşkun, 2012)

Normalize edilmiş  $|SDD(a, b)|$  matrisinden eşitlik 2.69 kullanılarak ulaşılan  $n_{2ap}(k_0)$  değerleri şekil 2.16.(b)'de ve eşitlik 2.75 kullanılarak ulaşılan  $n_2(k_0)$  değerleri yine şekil 2.16.(b)'de verilmiştir.



Şekil 2.16. Yalıtkan filmler için teorik olarak üretilmiş örnek bir geçirgenlik spektrumu sinyali ( $T(k_0)$ ) (Coşkun, 2012)

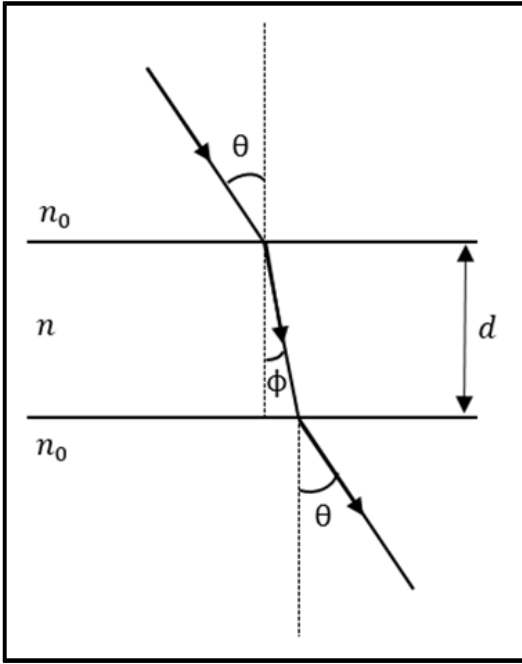
Coşkun çalışmasında ayrıca gürültü eklenmiş geçirgenlik spektrumu ve deneysel olarak elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerini Paul dalgacığı ile SDD'ye tabi tutarak fiziksel kalınlığı ( $d$ ) bilinen bir film için kırılma indisi dağılımını ( $n(k_0)$ ) elde etmiştir ve elde ettiği sonuçlar literatür ile tam uyum içerisindedir.

## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Dielektrik Filmlerin Geçirgenlik Spektrumlarının SDD Analizinde Paul Dalgacı Kullanılarak Film Kalınlığı ile Kırılma İndisinin Eşzamanlı Olarak Belirlenmesi Teorisi

Bu kapsamda yöntem bir boyut ileri taşınarak, fiziksel kalınlığı ( $d$ ) bilinmeyen tek katmanlı bir dielektrik filmin fiziksel kalınlığının ( $d$ ) ve kırılma indisi dağılımının ( $n(k_0)$ ) eş zamanlı olarak bulunması amaçlanmıştır.



Şekil 3.1. Kalınlığı  $d$  olan tek katmanlı dielektrik film

Şekil 3.1’de resmedilen  $d$  kalınlıklı tek katmanlı dielektrik film üzerine  $\theta$  geliş açısı ile  $k_0 = 1/\lambda_0$  dalga sayısındaki ve TE modda tek renkli ışık düştüğünde geçirgenlik sinyaline ilişkin ifade aşağıdaki eşitlik 3.1 ile verilmektedir (Hecht, 2002).

$$T(k_0) = \left[ \frac{2Y_0}{Y_0 u_{11} + Y_0^2 u_{12} + u_{21} + Y_0 u_{22}} \right]^2 \quad (3.1a)$$

$$Y_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_0 \cos \theta \quad (3.1b)$$

$$u = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\pi k_0 D) & -\frac{i}{Y_1} \sin(2\pi k_0 D) \\ -iY_1 \sin(2\pi k_0 D) & \cos(2\pi k_0 D) \end{bmatrix} \quad (3.1b)$$

$$D = nd \cos \phi \quad (3.1c)$$

$$Y_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n \cos \phi \quad (3.1d)$$

$n$  ve  $n_0$ , sırasıyla dielektrik filmin ve onu çevreleyen havanın kırılma indisleridir.  $D$  ise tek katmanlı film için optik kalınlığa karşılık gelmektedir.

Geçirgenlik sinyalinin tekrarlama frekansı dielektrik filmin kırılma indisi dağılımına ( $n(k_0)$ ) bağlı olması nedeniyle geçirgenlik sinyali ( $T(k_0)$ ) durağan olmayan bir sinyaldir. Bu nedenle,  $T(k_0)$  sinyali, tekrarlama frekansının belirlenmesi amacıyla SDD'ye tabi tutulabilir (Coşkun ve ark., 2013).

Geçirgenlik sinyalinin SDD'si eşitlik 3.2 ile verilmektedir.

$$SDD(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} T(k_0) \Psi^* \left( \frac{k_0 - b}{a} \right) dk_0 \quad (3.2)$$

Burada  $\Psi \left( \frac{k_0 - b}{a} \right)$  ana dalgacık fonksiyonundan ( $\psi(k_0)$ ) (Yang, 2007; Afifi ve ark. 2002) üretilen analiz dalgacık fonksiyonudur.  $a$  ( $a \geq 0$ ) parametresi ölçek parametresi olup analiz dalgacık fonksiyonun genişliğini ayarlama parametresidir.  $b$  ise pozisyon parametresi olup, analiz dalgacık fonksiyonun pozisyonun belirlenmesinde kullanılır (Meyers ve ark., 1993).  $\frac{1}{\sqrt{a}}$  ise normalizasyon sabitidir.

Eşitlik (3.2) hesaplama zamanını azaltmak için konvolüsyon teoremi kullanılarak Fourier uzayında ( $x_0$ ) eşitlik (3.3)'teki gibi yazılabilir (Addison, 2005).

$$SDD(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{\Psi}^*(ax_0) \hat{T}(x_0) \exp(ibx_0) dx_0 \quad (3.3)$$

Burada  $\sqrt{a} \hat{\Psi}(ax_0)$  and  $\hat{T}(x_0)$  sırasıyla  $a^{-1/2} \Psi \left( \frac{k_0 - b}{a} \right)$  ve  $T(k_0)$ 'ın Fourier dönüşümü (FD) uygulanmış halleridir. Bu eşitlikle, hızlı Fourier dönüşümü (HFD) algoritması dalgacık dönüşümüne hızlı bir şekilde uygulanabilmektedir (Addison, 2005). Bu tez çalışmasında,

ana dalgacık olarak Paul dalgacığı seçilmiştir. Analiz Paul dalgacığının  $k_0$  and  $x_0$  uzaylarındaki ifadeleri eşitlik (3.4) ve eşitlik (3.5)'teki gibidir.

$$\Psi_{a,b}(k_0) = \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{2^m m! \left(1 - i \left(\frac{k_0 - b}{a}\right)\right)^{-(m+1)}}{2\pi \sqrt{\frac{(2m)!}{2}}} \quad (3.4)$$

$$\widehat{\Psi}(ax_0) = \frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} (ax_0)^m \exp(-ax_0) \xi(ax_0) \quad (3.5)$$

Burada  $m$  Paul dalgacığının derecesi ve  $\xi(x_0)$  ise Heaviside fonksiyonudur (Afifi ve ark., 2002; Coşkun ve ark., 2013; Torrence ve Compo, 1998).

Negatif  $x_0$  değerleri için  $\widehat{\Psi}(ax_0) = 0$  olduğundan dolayı Paul dalgacığı ilerleyen bir dalgacıktır ve bu sebepten ötürü de causal (bir andaki değerleri ya o andaki ya da geçmişteki değerlere bağlı olan) sinyalleri analiz etmek için uygundur (Farge, 1992).

Analiz Paul dalgacığının  $k_0$  ve  $x_0$  uzaylarındaki merkezi ve varyansı eşitlik 3.6-3.9'daki gibi yazılabilir (Coşkun ve ark., 2011).

$$k_{0C} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} k_0 |\Psi_{a,b}(k_0)|^2 dk_0}{\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi_{a,b}(k_0)|^2 dk_0} = b \quad (3.6)$$

$$(\Delta k_0)^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (k_0 - k_{0C})^2 |\Psi_{a,b}(k_0)|^2 dk_0}{\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi_{a,b}(k_0)|^2 dk_0} = \frac{a^2}{2m-1} \quad (3.7)$$

$$x_{0C} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x_0 |\Psi(ax_0)|^2 dx_0}{\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(ax_0)|^2 dx_0} = \frac{2m+1}{2a} \quad (3.8)$$

$$(\Delta x_0)^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x_0 - x_{0C})^2 |\widehat{\Psi}(ax_0)|^2 dx_0}{\int_{-\infty}^{\infty} |\widehat{\Psi}(ax_0)|^2 dx_0} = \frac{2m+1}{4a^2} \quad (3.9)$$

Analiz Paul dalgacığının çözünürlüğü eşitlik (3.10)'daki gibi elde edilmektedir (Coşkun ve ark., 2011).

$$\Delta k_0 \times \Delta x_0 = \frac{\sqrt{2m+1}}{2\sqrt{2m-1}} \quad (3.10)$$

Eşitlik (3.10)'dan da görüleceği üzere analiz Paul dalgacığının çözünürlüğü m-parametresi (dalgacığın derecesi) ile kontrol edilmektedir.

Paul dalgacığının yerelleştirme özelliği kullanılarak  $[k_{0C} - \Delta k_0, k_{0C} + \Delta k_0]$  aralığında  $D(k_0)$  ifadesi  $D(b)$  ifadesine yakınlaşmaktadır. ( $D(k_0) \cong D(b)$ )

Buradan geçirgenlik sinyalinin  $f = 2D(b)$  frekansına sahip periyodik bir sinyal olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu periyodik geçirgenlik sinyalinin Fourier serisi açılımı eşitlik (3.11)'deki gibi yazılabilmektedir (Hildebrand, 1976).

$$T(k_0) = \alpha_0 + \sum_{q=1}^{\infty} [\alpha_q \cos(2\pi q f k_0) + \beta_q \sin(2\pi q f k_0)] \quad (3.11)$$

Burada  $\alpha_0, \alpha_q$  ve  $\beta_q$ ,  $q = 1, 2, 3, \dots$  olmak üzere periyodu  $P = \frac{1}{2D}$  olan periyodik geçirgenlik sinyalinin Fourier açılımına ilişkin Fourier katsayılarıdır ve eşitlik 3.12-3.14 ile verilmektedir.

$$\alpha_0 = \frac{1}{P} \int_{k_{0C}-\frac{P}{2}}^{k_{0C}+\frac{P}{2}} T(k_0) dk_0 = \frac{2Ddn_0}{D^2+d^2n_0^2} = \frac{2nn_0}{n^2+n_0^2} \quad (3.12)$$

$$\alpha_q = \frac{2}{P} \int_{k_{0C}-\frac{P}{2}}^{k_{0C}+\frac{P}{2}} T(k_0) \cos(2\pi q f k_0) dk_0 = 2\alpha_0 \left( \frac{D-n_0d}{D+n_0d} \right)^{2q} = 2\alpha_0 \left( \frac{n-n_0}{n+n_0} \right)^{2q} \quad (3.13)$$

$$\beta_q = \frac{2}{P} \int_{k_{0C}-\frac{P}{2}}^{k_{0C}+\frac{P}{2}} T(k_0) \sin(2\pi q f k_0) dk_0 = 0 \quad (3.14)$$

Sonrasında, geçirgenlik sinyalinin Fourier dönüşümü ifadesi olan  $\hat{T}(x_0)$  eşitlik 3.15'deki gibi hesap edilebilmektedir.

$$\hat{T}(x_0) = 2\pi\alpha_0\delta(x_0) + \pi \sum_{q=1}^{\infty} \alpha_q [\delta(x_0 - 2\pi q f) + \delta(x_0 + 2\pi q f)] \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.15 ile verilen  $\hat{T}(x_0)$  ifadesi eşitlik 3.3'te yerine konulmak suretiyle ve  $x_0 \leq 0$  değerleri için  $\hat{\psi}(ax_0) = 0$  olması da göz önüne alınırsa SDD ifadesi eşitlik 3.16'daki gibi elde edilecektir.

$$SDD(a, b) = \sqrt{a} \sum_{q=1}^{\infty} \alpha_q \hat{\psi}^*(aqX) \exp(ibqX) \quad (3.16)$$

Burada  $X = 2\pi f$ 'tir.  $\alpha_3$  katsayısı  $\alpha_1$  katsayısından daha küçük olduğu için,  $q \geq 3$  olan yüksek mertebeli terimler ihmal edilerek SDD ifadesinin mutlak değerinin karesi eşitlik 3.17'deki gibi hesap edilebilmektedir. Bu ifade aynı zamanda skalogram olarak ta adlandırılmaktadır (Coşkun ve ark., 2013).

$$|SDD(a, b)|^2 = a[\alpha_1^2 \hat{\psi}^2(aX) + \alpha_2^2 \hat{\psi}^2(a2X) + 2\alpha_1\alpha_2 \hat{\psi}(aX)\hat{\psi}(a2X)\cos(bX)] \quad (3.17)$$

Üstte verilen eşitlik 3.17,

$$\hat{\psi}(a2X) = \hat{\psi}(aX)2^m \exp(-aX) \quad (3.18)$$

ve

$$\alpha_2 = \left(\frac{n-n_0}{n+n_0}\right)^2 \alpha_1 = N\alpha_1 \quad (3.19)$$

ifadeleri yazılarak yeniden düzenlenirse, skalogram ifadesi eşitlik 3.20'deki gibi yazılabilmektedir.

$$|SDD(a, b)|^2 = a\hat{\psi}^2(aX)\alpha_1^2[1 + (N2^m \exp(-aX))^2 + 2(N2^m \exp(-aX))\cos(bX)] \quad (3.20)$$

$N \ll 1$  olması durumunda, eşitlik 3.20, aşağıda verilen eşitlik 3.21'e yaklaşmaktadır (Coşkun ve ark., 2013).

$$|SDD(a, b)|^2 = a\hat{\psi}^2(aX)\alpha_1^2 = a\alpha_1^2 \frac{2^{2m}}{m(2m-1)!} (aX)^{2m} \exp(-2aX) \quad (3.21)$$

Eşitlik 3.21 ifadesinde b değerleri sabitlenirse,  $|SDD(a, b)|^2$  ifadesinin değerinin en büyük olduğu  $a$  değerlerine ulaşılabilir.

$$a_{max} = \frac{2m+1}{2X} = \frac{2m+1}{8\pi D} \quad (3.22)$$

Eşitlik 3.22'den  $D(b)$  değerleri hesaplanabilir.  $N$  değerinin artmasıyla, skalogramın maksimum değeri aldığı noktalar, girişim terimi, yani eşitlik 3.20'nin parantez içindeki 3. terimi sebebiyle  $a_{max}$  civarında osilasyon yapmaya başlamaktadır. Bu da optik kalınlık ( $D$ ) hesabında yüksek hata oranına neden olur. Bu noktada, bu problemi çözmek için  $m$  parametresi kullanılmaktadır. Büyük  $m$  değeri seçilerek eşitlik 3.20'deki 2. terimin 3. terimi domine etmesi sağlanır ve osilasyonun şiddeti azaltılır (Coşkun ve ark., 2013).

Bu yüzden, bu tez çalışmasındaki tüm analizlerde  $m$  değeri büyük seçilmiştir. Tüm analizlerde  $m = 10$  ile çalışılmıştır.

Dielektrik filmin kalınlık ve kırılma indisi dağılımının eşzamanlı olarak elde edilmesini amaçladığımız bu tez çalışmasında, bu amaçla 2 bilinmeyen olması sebebiyle 2 denkleme ihtiyaç olduğu matematiksel bir gerçektir.

Bu amaçla,  $\theta_i$  ve  $\theta_i'$  olmak üzere iki farklı geliş açısında elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumları analiz edilerek, kalınlık ve kırılma indisi dağılımı eş zamanlı olarak elde edilebilir.

Bu iki geliş açısı için geçirgenlik spektrumlarının SDD'ye tabi tutulması sonucu  $D(\theta_i)$  ve  $D'(\theta_i')$  elde edilebilecektir.  $D(\theta_i)$  ve  $D'(\theta_i')$  ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$D(\theta_i) = nd \cos \phi = d\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2(\theta_i)} \quad (3.23)$$

$$D'(\theta_i') = nd \cos \phi' = d\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2(\theta_i')} \quad (3.24)$$

Eşitlik 3.23 ve eşitlik 3.24 ifadelerinden Snell yasası kullanılarak kırılma açısı yok edilebilir. Bu sayede her dalga sayısı için filmin kalınlık ve kırılma indisi değerine ilişkin açık ifadeler elde edilebilir (Köysal ve ark. 2004).

$$n^2 = n_0^2 \frac{D^2 \sin^2 \theta_i' - D'^2 \sin^2 \theta_i}{D^2 - D'^2} \quad (3.25)$$

$$d^2 = \frac{D^2 - D'^2}{n_0^2 (\sin^2 \theta_i' - \sin^2 \theta_i)} \quad (3.26)$$

Eşitlik 3.25 ve eşitlik 3.26'daki  $\theta_i$  ve  $\theta_i'$  geçirgenlik spektrumlarının elde edildiği iki farklı geliş açısıdır.  $n_0$  ise boşluğun kırılma indisidir.

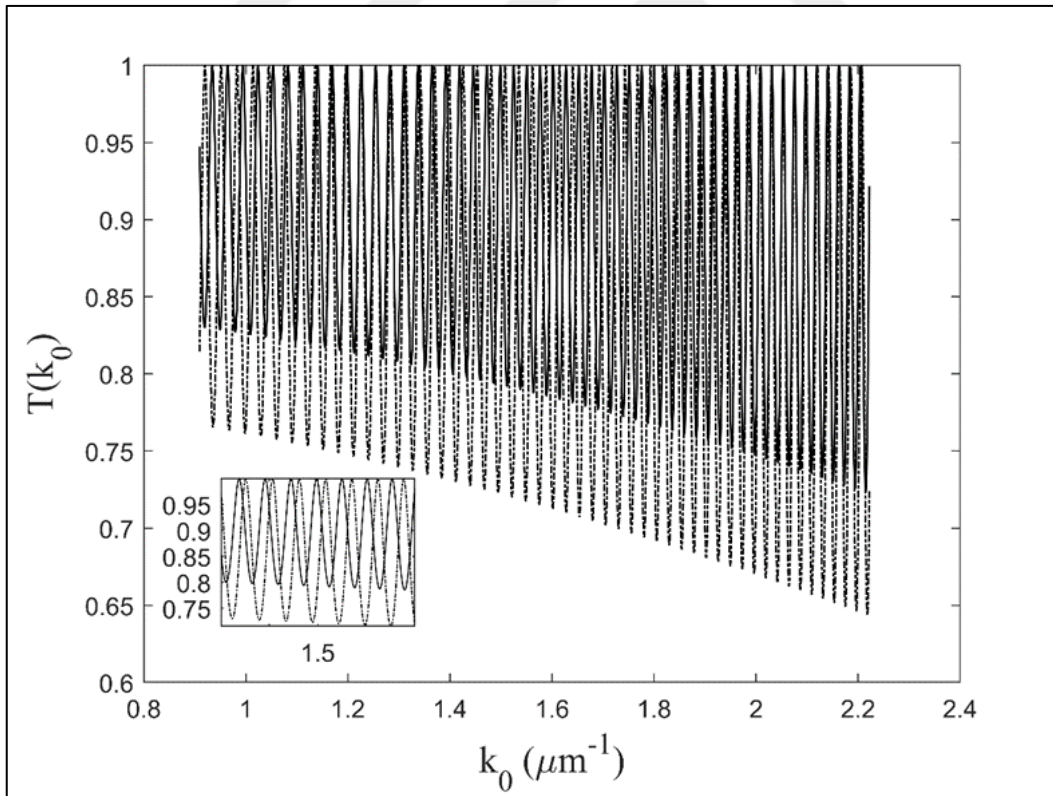
### 3.2. Dielektrik Filmlerin Geçirgenlik Spektrumlarının Paul Dalgacı ile SDD Analizi Sonucunda Film Kalınlığı ile Kırılma İndisinin Belirlenmesi İçin Simülasyon Çalışması

Tek katmanlı bir dielektrik film için geçirgenlik spektrumuna ilişkin ifade ( $T(k_0)$ ) eşitlik 3.1 ile verilmiştir. Aşağıdaki eşitlik 3.27 ile verilmiş olan değerler doğrultusunda görünür-yakın kırmızı altı bölge spektrumuna karşılık gelen  $0,9090 - 2,2222 \mu m^{-1}$  dalga sayısı ( $450 - 1100 nm$ ) aralığında iki farklı geliş açısı için tek katmanlı dielektrik filme ait geçirgenlik spektrumu sinyalleri şekil 3.2’de gösterilmiştir.

$$n(k_0) = A + Bk_0^2 + Ck_0^4 \quad (3.27a)$$

$$A = 1,5000, \quad B = 6 \times 10^{-2} \mu m^2, \quad C = 8 \times 10^{-6} \mu m^4 \quad (3.27b)$$

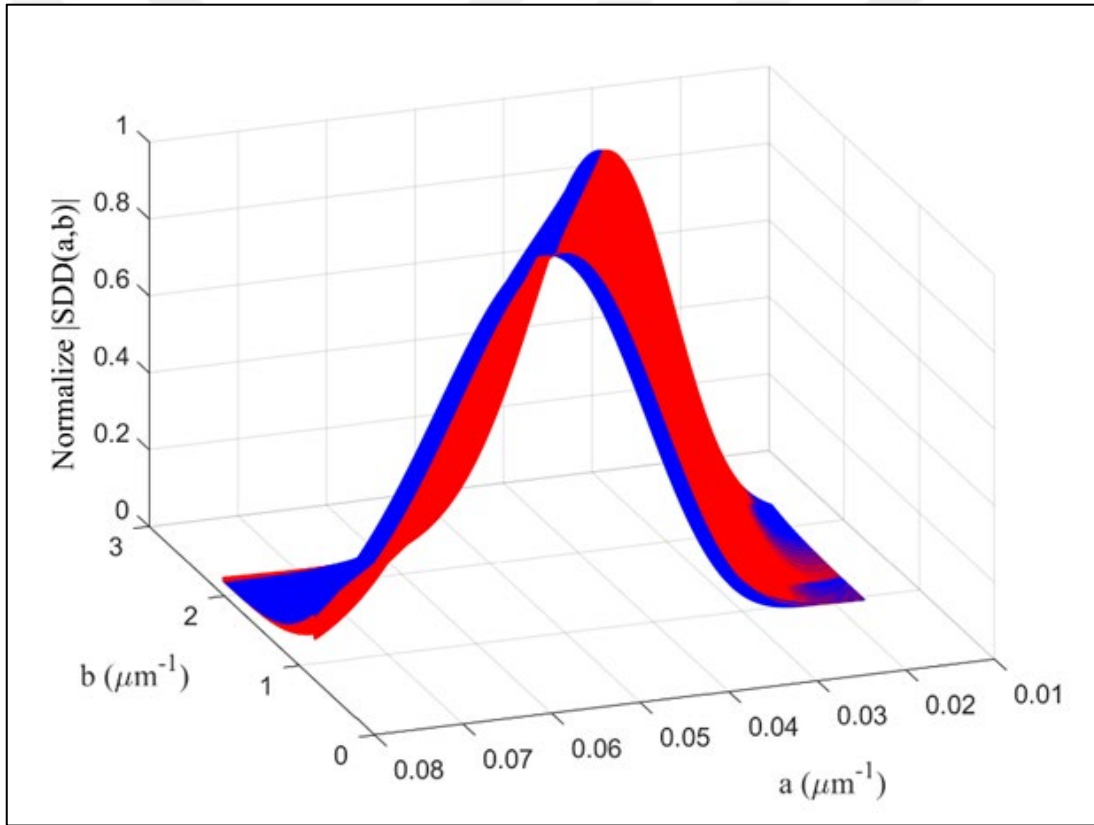
$$\theta_1 = 0^\circ, \quad \theta_2 = 15^\circ, \quad d = 10 \mu m, \quad n_0 = 1 \quad (3.27c)$$



Şekil 3.2. Tek katmanlı dielektrik film için  $0,9090 - 2,2222 \mu m^{-1}$  dalga sayısı aralığında eşitlik 3.27 değerlerine göre  $0^\circ$  geliş açısında (sürekli çizgi) ve  $15^\circ$  geliş açısında (kesikli çizgi) elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyalleri

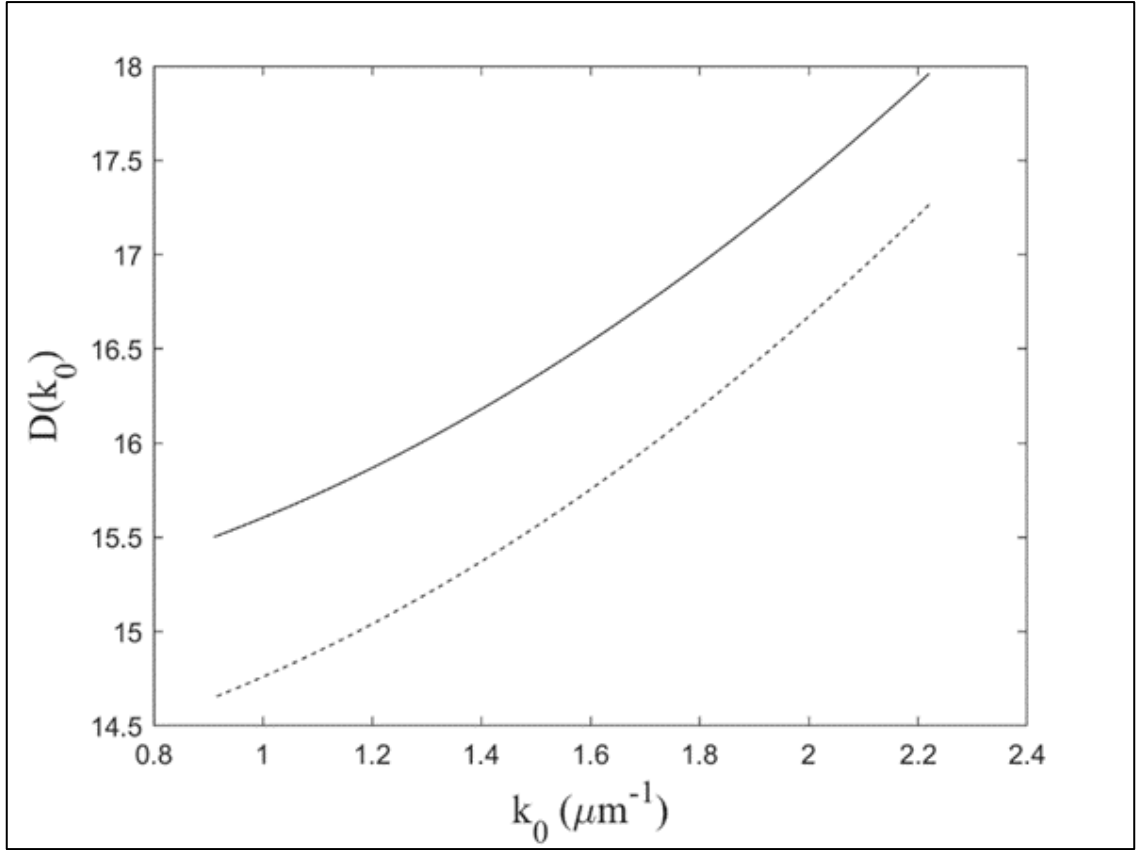
İki farklı geliş açısında teorik olarak üretilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacığı ile SDD uygulanması sonucu eşitlik 3.21'e uygun olarak elde edilmiş olan  $a \times b$  boyutlu grafikler Şekil 3.3'de verilmiştir. Geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacığı ile SDD uygulanırken Paul dalgacığının derecesi  $m = 10$  alınmıştır.

Şekil 3.3'de grafiğı verilen SDD sonucu elde edilmiş  $a \times b$  boyutlu matrizen, her  $b$  değeri için  $a$  değerinin maksimum olduğu değerler eşitlik 3.22 yardımı ile bulunmuştur. Her  $b$  değeri için bulunmuş olan  $a_{max}$  değerleri ve yine eşitlik 3.22 yardımıyla, yine her  $b$  değeri için, iki farklı geliş açısında üretilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyallerine ait optik kalınlık değerlerinin ( $D$  ve  $D'$ ) her dalga sayısına ( $k_0$ ) karşılık gelen değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Dielektrik filmin iki farklı geliş açısında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacığı ile SDD uygulanması sonucunda elde edilmiş olan grafikler ( $0^\circ$  geliş açısı mavi renk ile  $15^\circ$  geliş açısı kırmızı renk ile verilmiştir)

Eşitlik 3.27 ile verilmiş değerler doğrultusunda iki farklı geliş açısı için elde edilmiş olan  $D$  ve  $D'$  değerlerine ait grafik Şekil 3.4'te verilmiştir.

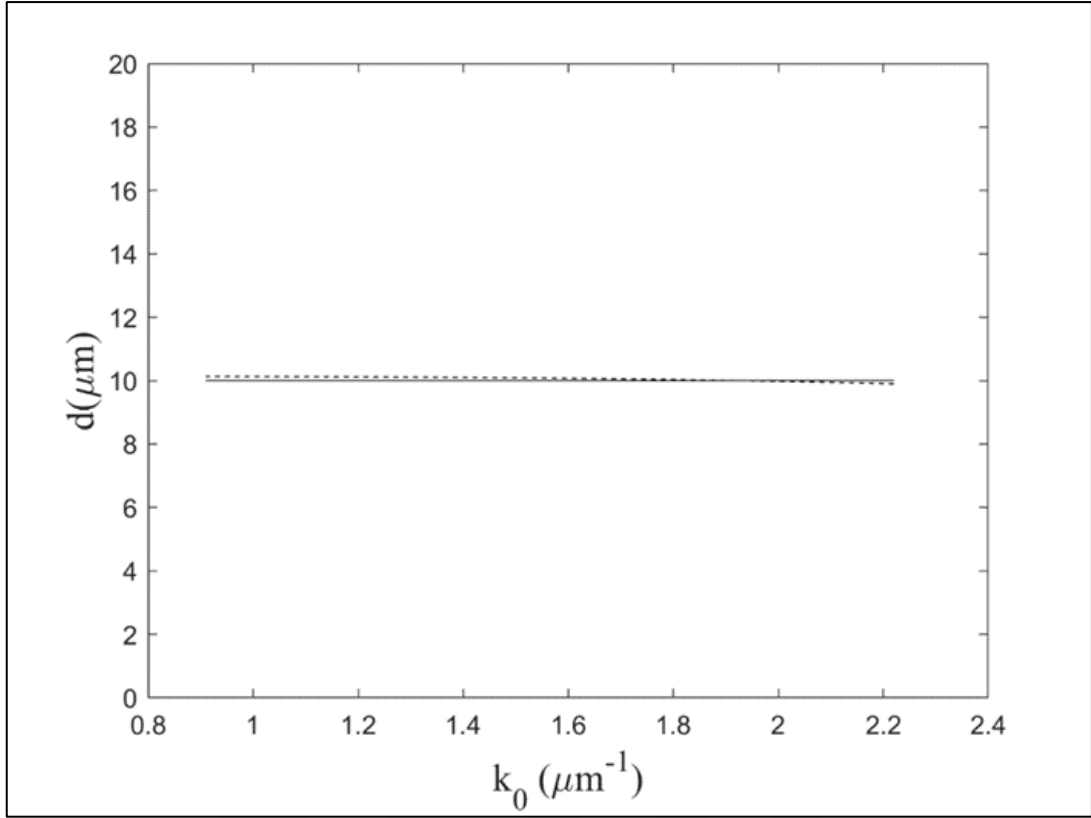


Şekil 3.4. Dielektrik filmin iki farklı geliş açısı için teorik olarak üretilen geçirgenlik spektrumlarına ( $T(k_0)$ ) Paul dalgacığı ile SDD dönüşümü uygulanması sonucunda elde edilen optik kalınlık değerleri ( $0^\circ$  geliş açısı düz çizgi ( $D$ ) ile  $15^\circ$  geliş açısı ( $D'$ ) kesikli çizgi ile verilmiştir)

Çalışılan tüm  $k_0$  uzayı boyunca, her  $k_0$  değeri için  $D$  ve  $D'$  değerleri elde edildikten sonra, bulunan bu değerler ve eşitlik 3.27'de verilen giriş (input) değerleri, eşitlik 3.26'da yerine konularak, filmin kalınlığına ( $d$ ) ulaşılmıştır.

Filmin kalınlığına ilişkin sonuçlar Şekil 3.5'te verilmiştir. Her  $k_0$  değeri için bir  $d$  değeri hesap edilmiş olup, bunlar grafikte görülmektedir. Bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilen  $d$  değeri analiz sonucu bulunan  $d$  değeri olarak kabul edilmiştir. Grafikte ayrıca filmin geçirgenlik spektrumunu teorik olarak üretmek için girilmiş olan girdi  $d$  değeri de verilmiştir.

Simülasyon çalışmasında girdi olarak  $d = 10 \mu m$  olarak kullanılan değere karşın analiz sonucunda  $d_{paul} = 10.0571 \mu m$  değeri elde edilmiştir.

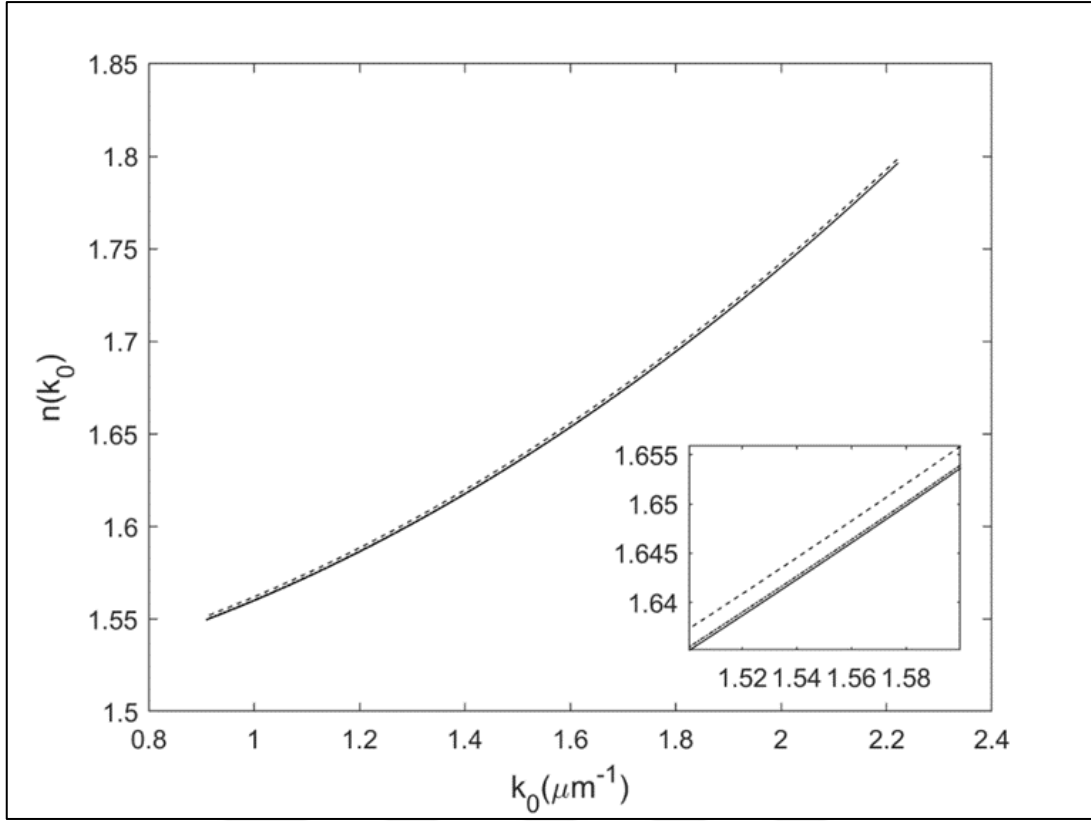


Şekil 3.5. Tek katmanlı dielektrik filmin çalışılan tüm  $k_0$  uzayı için elde edilen kalınlık ( $d$ ) değerleri (noktalı çizgi) ve simülasyon için girilen teorik kalınlık ( $d$ ) değeri (düz çizgi)

Yine çalışılan tüm  $k_0$  uzayı boyunca, her  $k_0$  değeri için  $D$  ve  $D'$  değerleri elde edildikten sonra, bulunan bu değerler ve eşitlik 3.27'de verilen giriş (input) değerleri, eşitlik 3.25'de yerine konularak, filmin kırılma indisi değerlerine ( $n(k_0)$ ) ulaşılmıştır.

Filmin kırılma indisi dağılımına ( $n(k_0)$ ) ilişkin sonuçlar Şekil 3.6'da verilmiştir. Her  $k_0$  değeri için bir  $n$  değeri hesap edilmiş olup, bunlar grafikte görülmektedir. Grafikte filmin geçirgenlik spektrumunu teorik olarak üretmek için girilmiş olan girdi (input)  $n(k_0)$  değeri de görülmektedir.

Ayrıca eşitlik 3.27'de görüleceği üzere, girdi değerini oluştururken kullanılan Cauchy parametreleri ( $A, B$  ve  $C$ ) ile kıyaslamak ve hata analizinde kullanmak amacıyla, yöntem sayesinde elde edilen kırılma indisi dağılımına ( $n(k_0)$ ) ilişkin Cauchy parametreleri ( $A_{paul}, B_{paul}$  ve  $C_{paul}$ ) de hesaplanmış ve “Simülasyon Çalışmalarının Sonuçları” isimli başlıkta yer alan çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Tek katmanlı dielektrik filmin çalışılan tüm  $k_0$  uzayı için; sunulan yöntem ile bulunan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) (kesikli noktalı çizgi), teorik kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) (düz çizgi) ve Swanpoel (1983) tarafından geliştirilen yöntem ile elde edilen kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) (kesikli çizgi)

Hem elde edilen film kalınlığı ( $d$ ) teorik değer ile karşılaştırıldığında (Şekil 3.5), hem de elde edilen kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) teorik değer ile karşılaştırıldığında (Şekil 3.6) elde edilen değerlerin birbiri ile son derece uyumlu olduğu görülmektedir. Buradan sonuçla yöntemin teoride çok iyi çalıştığını söyleyebiliriz.

Bundan sonraki aşamada; yöntem rasgele gürültü eklenmiş geçirgenlik sinyallerine uygulanmış ve gürültü eklenmiş sinyaller için yöntemin geçerliliği araştırılmıştır.

### 3.3. Dielektrik Filmlerin Gürültü Eklenmiş Geçirgenlik Spektrumlarının Paul Dalgacı ile SDD Analizi Sonucunda Film Kalınlığı ile Kırılma İndisinin Belirlenmesi İçin Simülasyon Çalışması

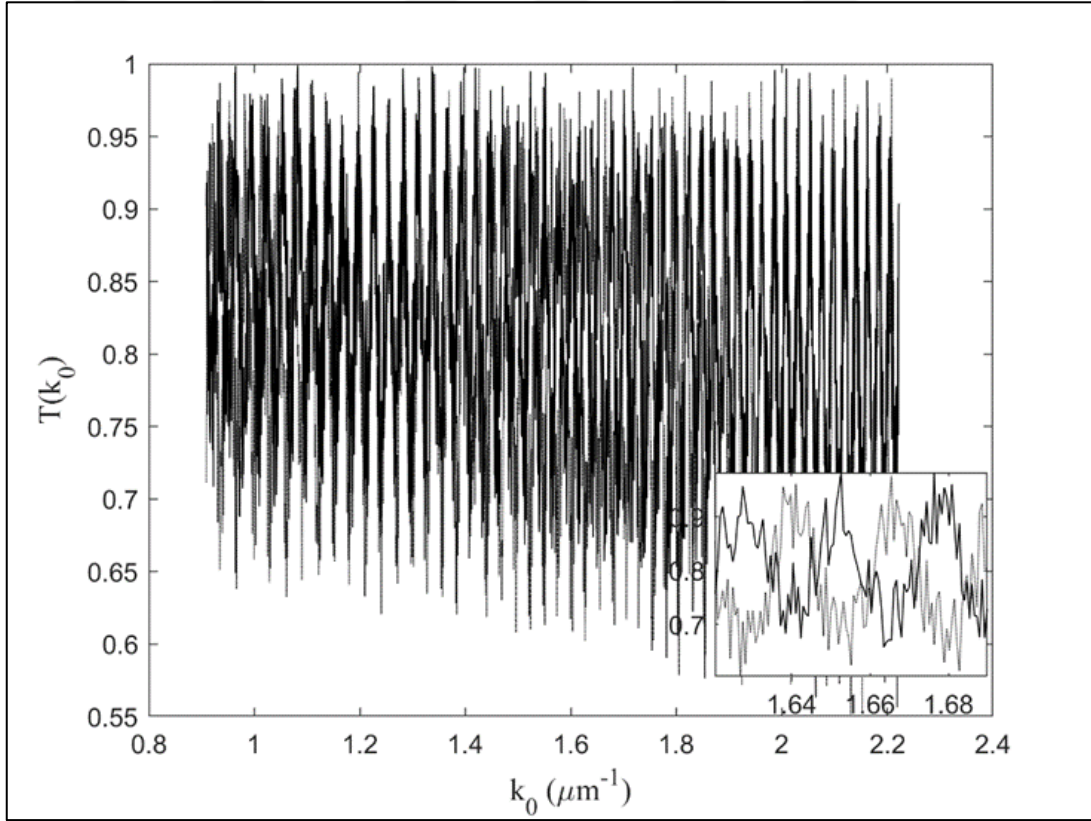
Bu başlıkta tek katmanlı dielektrik filmin geçirgenlik spektrumlarına belirli oranda ve rasgele gürültü eklenmesiyle oluşacak sinyaller yardımıyla yöntemin geçerliliği araştırılmıştır.

Eşitlik 3.28’da verilen değerler ve eşitlik 3.1 ile verilen geçirgenlik spektrumu ifadesi ( $T(k_0)$ ) doğrultusunda görünür-yakın kırmızı altı bölge spektrumuna karşılık gelen  $0,9090 - 2,2222 \mu m^{-1}$  dalga sayısı ( $450 - 1100 nm$ ) aralığında iki farklı geliş açısı için hesaplanan  $T(k_0)$  geçirgenlik spektrumlarına %20 oranında rasgele gürültü eklenmiştir. Gürültü eklenmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri şekil 3.7’de gösterilmiştir.

$$n(k_0) = A + Bk_0^2 + Ck_0^4 \quad (3.28a)$$

$$A = 1,5000, \quad B = 6 \times 10^{-2} \mu m^2, \quad C = 8 \times 10^{-6} \mu m^4 \quad (3.28b)$$

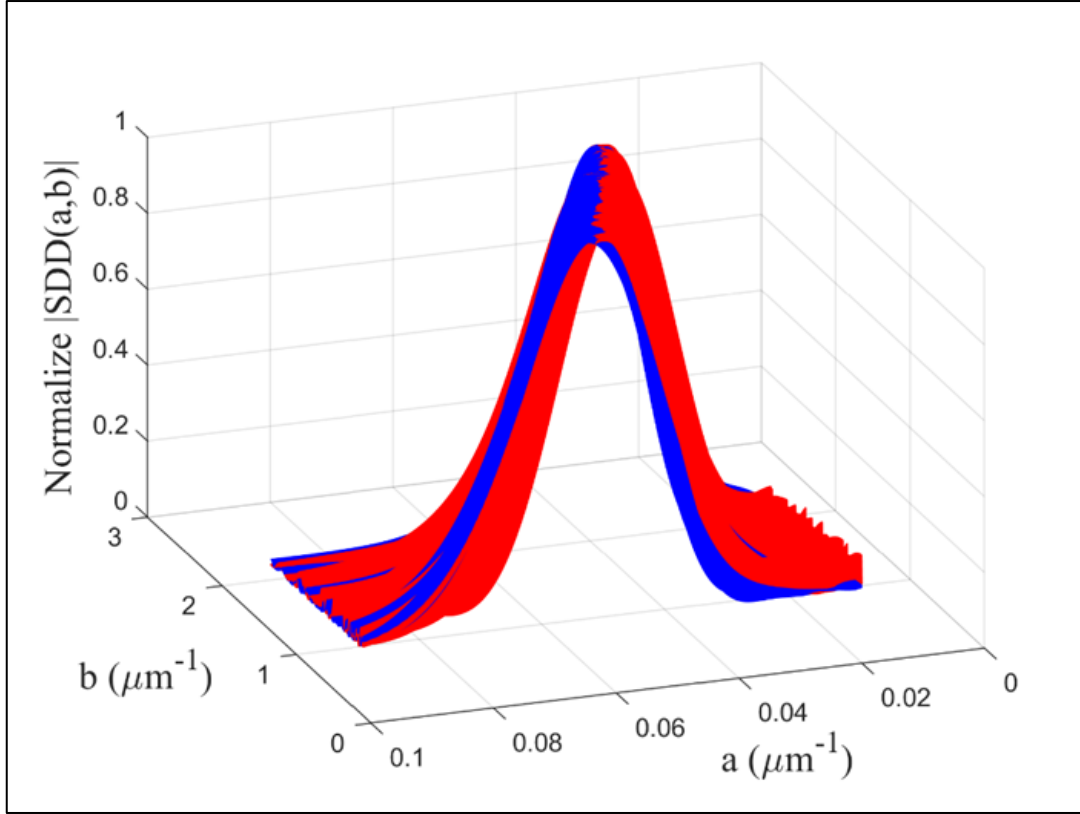
$$\theta_1 = 0^\circ, \quad \theta_2 = 30^\circ, \quad d = 10 \mu m, \quad n_0 = 1 \quad (3.28c)$$



Şekil 3.7. Tek katmanlı dielektrik film için  $0,9090 - 2,2222 \mu m^{-1}$  dalga sayısı aralığında eşitlik 3.28 değerlerine göre  $0^\circ$  geliş açısında (sürekli çizgi) ve  $30^\circ$  geliş açısında (kesikli çizgi) elde edilmiş ve %20 rasgele gürültü eklenmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyalleri

İki farklı geliş açısında teorik olarak üretilmiş ve %20 rasgele gürültü eklenmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacığı ile SDD uygulanması sonucu eşitlik

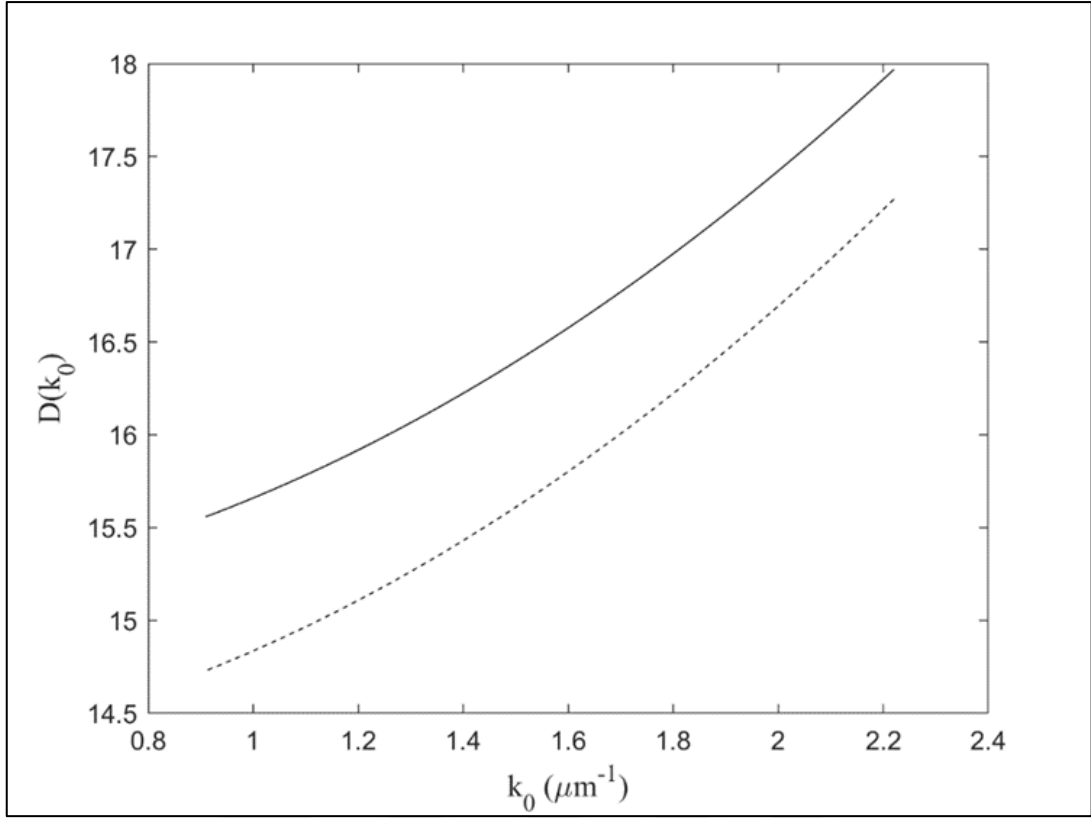
3.21'e uygun olarak elde edilmiş olan  $a \times b$  boyutlu grafikler Şekil 3.8'de verilmiştir. Geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacı ile SDD uygulanırken Paul dalgacığının derecesi  $m = 10$  alınmıştır.



Şekil 3.8. Tek katmanlı dielektrik filmin iki farklı geliş açısında elde edilmiş ve % 20 rasgele gürültü eklenmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacı ile SDD uygulanması sonucunda elde edilmiş olan grafikler ( $0^\circ$  geliş açısı mavi renkli ile  $30^\circ$  geliş açısı kırmızı renk ile verilmiştir)

Şekil 3.8'de grafikleri verilen SDD sonucu elde edilmiş  $a \times b$  boyutlu matrislerin her birinden, her  $b$  değeri için  $a$  değerinin maksimum olduğu değerler eşitlik 3.22 yardımı ile bulunmuştur. Her  $b$  değeri için bulunmuş olan  $a_{max}$  değerleri ve yine eşitlik 3.22 yardımıyla, yine her  $b$  değeri için, iki farklı geliş açısında üretilmiş olan gürültülü geçirgenlik spektrumlarına ait optik kalınlık değerlerinin ( $D$  ve  $D'$ ) her dalga sayısına ( $k_0$ ) karşılık gelen değerleri elde edilmiştir.

Eşitlik 3.28 ile verilmiş değerler doğrultusunda iki farklı geliş açısı için elde edilmiş olan gürültülü geçirgenlik spektrum sinyallerinden elde edilmiş olan  $D$  ve  $D'$  değerlerine ait grafikler Şekil 3.9'da verilmiştir.

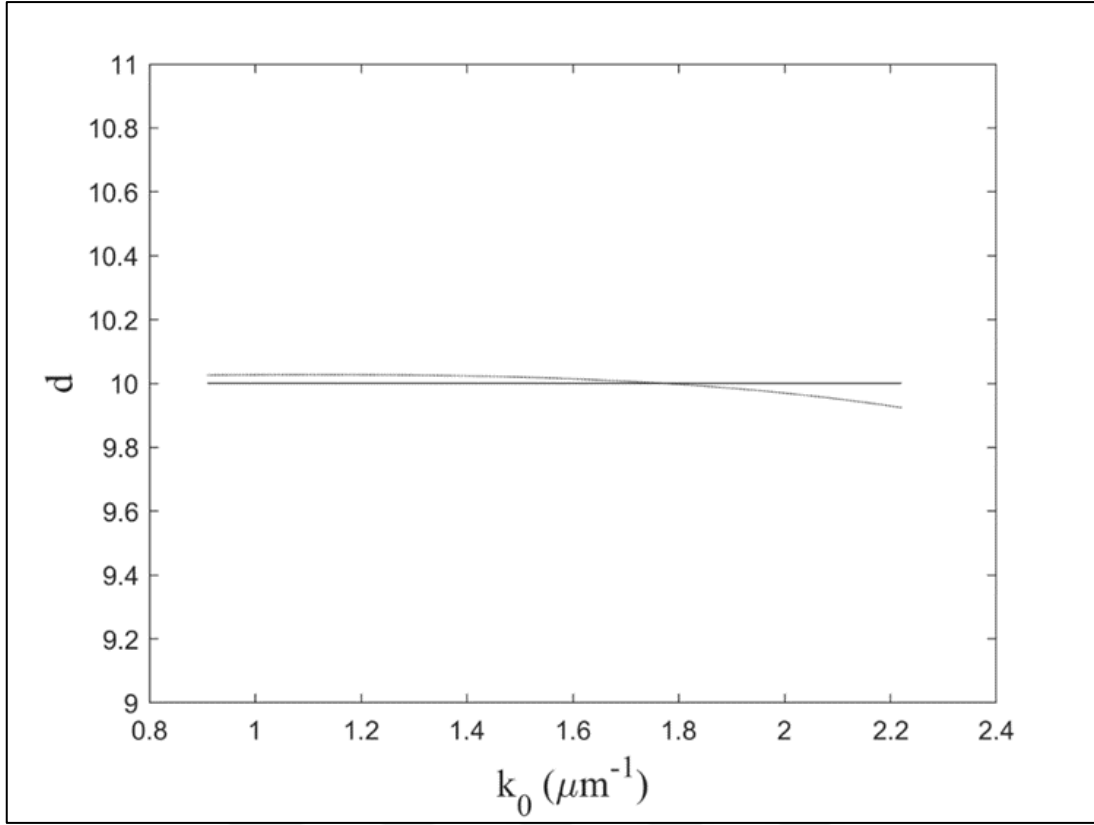


Şekil 3.9. Dielektrik filmin iki farklı geliş açısı için teorik olarak üretilen ve %20 rasgele gürültü eklenen geçirgenlik spektrumlarına ( $T(k_0)$ ) Paul dalgacı ile SDD dönüşümü uygulanması sonucunda elde edilen optik kalınlık değerleri ( $0^\circ$  geliş açısı düz çizgi ( $D$ ) ve  $30^\circ$  geliş açısı ( $D'$ ) kesikli çizgi ile verilmiştir)

Gürültülü geçirgenlik spektrumu sinyallerine ait çalışılan tüm  $k_0$  uzayı boyunca, her  $k_0$  değeri için  $D$  ve  $D'$  değerleri elde edildikten sonra, bulunan bu değerler ve eşitlik 3.28'de verilen giriş (input) değerleri, eşitlik 3.26'da yerine konularak, filmin kalınlığına ( $d$ ) ulaşılmıştır.

Filmin kalınlığına ilişkin sonuçlar Şekil 3.10'da verilmiştir. Her  $k_0$  değeri için bir  $d$  değeri hesap edilmiş olup, bunlar grafikte görülmektedir. Bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilen  $d$  değeri analiz sonucu bulunan  $d$  değeri olarak kabul edilmiştir. Grafikte ayrıca filmin geçirgenlik spektrumunu teorik olarak üretmek için girilmiş olan girdi  $d$  değeri de verilmiştir.

Gürültülü geçirgenlik spektrumu sinyalleri ile yapılan simülasyon çalışmasında girdi olarak  $d = 10 \mu m$  olarak kullanılan değere karşın analiz sonucunda  $d_{paul} = 9,9550 \mu m$  değeri elde edilmiştir.

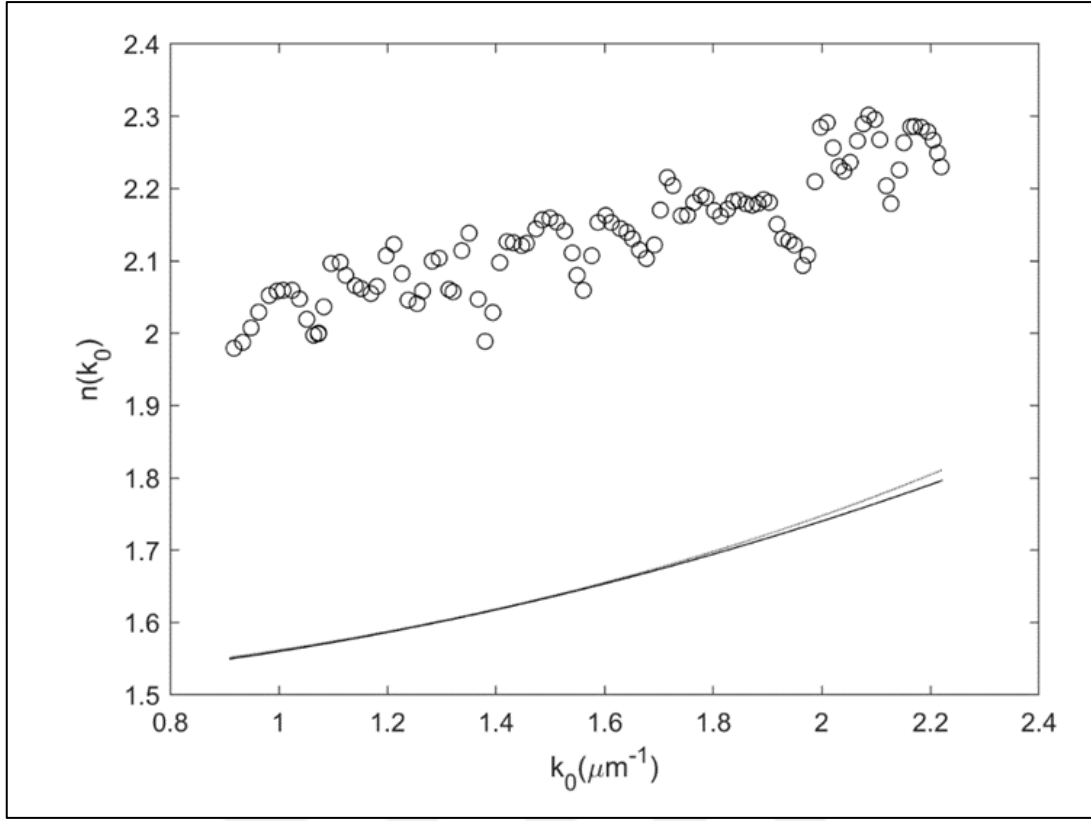


Şekil 3.10. Tek katmanlı dielektrik filmin % 20 gürültü eklenmiş spektrum sinyallerine Paul Dalgacığı ile SDD uygulanması sonucunda, çalışılan tüm  $k_0$  uzayı için elde edilen kalınlık ( $d$ ) değerleri (noktalı çizgi) ve simülasyon için girilen teorik kalınlık ( $d$ ) değeri (düz çizgi)

Gürültülü geçirgenlik spektrumu sinyallerinin çalışıldığı tüm  $k_0$  uzay boyunca, her  $k_0$  değeri için  $D$  ve  $D'$  değerleri elde edildikten sonra, bulunan bu değerler ve eşitlik 3.28'de verilen giriş (input) değerleri, eşitlik 3.25'te yerine konularak, filmin kırılma indisi dağılımına ( $n(k_0)$ ) ulaşılmıştır.

Filmin kırılma indisi dağılımına ilişkin sonuçlar Şekil 3.11'de verilmiştir. Her  $k_0$  değeri için bir  $n$  değeri hesap edilmiş olup, bunlar grafikte görülmektedir. Grafikte filmin gürültülü geçirgenlik spektrumunu teorik olarak üretmek için girilmiş olan girdi (input)  $n(k_0)$  değeri de görülmektedir.

Ayrıca eşitlik 3.28'de görüleceği üzere, girdi değerini oluştururken kullanılan Cauchy parametreleri ( $A, B$  ve  $C$ ) ile kıyaslamak ve hata analizinde kullanmak amacıyla, yöntem sayesinde elde edilen kırılma indisi dağılımına ( $n(k_0)$ ) ilişkin Cauchy parametreleri ( $A_{paul-noisy}, B_{paul-noisy}$  ve  $C_{paul-noisy}$ ) de hesaplanmış ve “Simülasyon Çalışmalarının Sonuçları” isimli başlıkta yer alan çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Dielektrik filmin gürültü eklenmiş geçirgenlik spektrumu sinyallerinde çalışılan tüm  $k_0$  değerleri için; sunulan yöntem ile bulunan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (noktalı çizgi) ve simülasyon için girilen teorik kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (düz çizgi) ve Swanpoel (1983) tarafından geliştirilen yöntem ile elde edilen kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (çember)

Gürültü eklenmiş geçirgenlik spektrumlarına Paul dalgacığı ile SDD uygulanması ile yapılan analiz sonucunda bulunan film kalınlığı ( $d$ ) teorik (girdi) değer ile karşılaştırıldığında (Şekil 3.10), hem de bulunan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) teorik (girdi) değer ile karşılaştırıldığında (Şekil 3.11) yöntemin gürültü eklenmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri için de gayet iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bunu, SDD bant-geçiren filtre özelliğı sayesinde başarmaktadır (Coşkun ve ark., 2013). Yani sinyal, gürültü eklenmiş bir sinyal bile olsa, SDD ile sinyallerin içerisindeki tekrarlama frekans bilgisi kolayca filtre edilebilmektedir.

### 3.4. Simülasyon Çalışmalarının Sonuçları

Yöntemin geçerliğini test etmek amacıyla yapılmış olan simülasyon çalışmalarının sonuçları topluca bu başlık altında verilerek, bir değerlendirme yapılmıştır.

$A, B$  ve  $C$  Cauchy parametreleri ve  $d$  film kalınlığı gibi giriş değerleri kullanılarak simule edilen tek katmanlı dielektrik film için iki farklı geliş açısında elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri kullanılmıştır. Bu sinyallere Paul dalgacığı ile SDD uygulanması sonucunda bu geçirgenlik spektrumu sinyalleri içerisindeki frekans bilgileri elde edilmiştir. Bu frekans bilgisi ise filmin optik kalınlık bilgisi ( $D$  ve  $D'$ ) ile bağlantılıdır. İki farklı geliş açısı için elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyalleri içerisindeki frekans bilgisi sayesinde elde edilen optik kalınlık bilgileri ( $D$  ve  $D'$ ) yardımıyla filmin kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) ve fiziksel kalınlığı ( $d$ ) eş zamanlı olarak bulunmuştur. Bulunun kırılma indisi dağılımına göre Cauchy parametreleri ( $A, B$  ve  $C$ ) elde edilmiştir. Elde edilen değerler çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Tek katmanlı dielektrik film için yapılan simülasyon çalışmasında ve Paul dalgacığı ile SDD uygulanması sonucunda elde edilen  $A, B$  ve  $C$  Cauchy parametreleri, film kalınlığı ve bu değerlerin görelî hata oranları

|                   | Cauchy parametreleri |                       |                       | Film kalınlığı |
|-------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
|                   | $A$                  | $B(\mu m^2)$          | $C(\mu m^4)$          | $d(\mu m)$     |
| Girilen Değerler  | 1,5000               | $6 \times 10^{-2}$    | $8 \times 10^{-6}$    | 10,0000        |
| Gürültüsüz sinyal | 1,5119               | $5,74 \times 10^{-2}$ | $8,68 \times 10^{-6}$ | 10,0571        |
| Görelî Hata (%)   | 0,7933               | 4,33                  | 8,5                   | 0,571          |
| Gürültülü sinyal  | 1,5346               | $2,70 \times 10^{-2}$ | $6,51 \times 10^{-6}$ | 9,9550         |
| Görelî Hata (%)   | 2,3066               | 55                    | 18,625                | 0,45           |

Çizelge 3.1’den de görüleceğı üzere hem gürültüsüz geçirgenlik spektrumu sinyalleri kullanıldığında hem de rasgele gürültü eklenmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri kullanıldığında elde edilen film kalınlıkları girilen değerle tam uyum içerisinde. Görülen en büyük görelî hata % 0,58’den bile daha azdır. Benzer şekilde elde edilen Cauchy parametreleri de girilen değerlerle uyum içerisinde.

Yöntem filmin kırılma indisi dağılımını ( $n(k_0)$ ) ve fiziksel kalınlığını ( $d$ ) eş zamanlı olarak elde etmek açısından son derece pratiktir.

## BÖLÜM 4

### ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Fourier dönüşümü (FD), kısa zamanlı Fourier dönüşümü (KZFD) ve sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) gibi sinyal analiz yöntemleri, dielektrik filmlerin geçirgenlik spektrumları ve dielektrik filmlere ilişkin optik analiz yöntemleri “Önceki Çalışmalar” başlığı altında Bölüm 2’de detaylıca verilmiştir.

Bölüm 3’de ise tek katmanlı dielektrik filmler için, iki farklı geliş açısında elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyallerinin Paul dalgacığı ile SDD’ye tabi tutulması sonucunda filmin kalınlığının ( $d$ ) ve kırılma indisi dağılımının ( $n(k_0)$ ) eş zamanlı olarak belirlenmesi çalışmalarına ilişkin yöntem aktarılmış ve yöntemin geçerliliği simülasyon çalışmaları ile test edilmiştir.

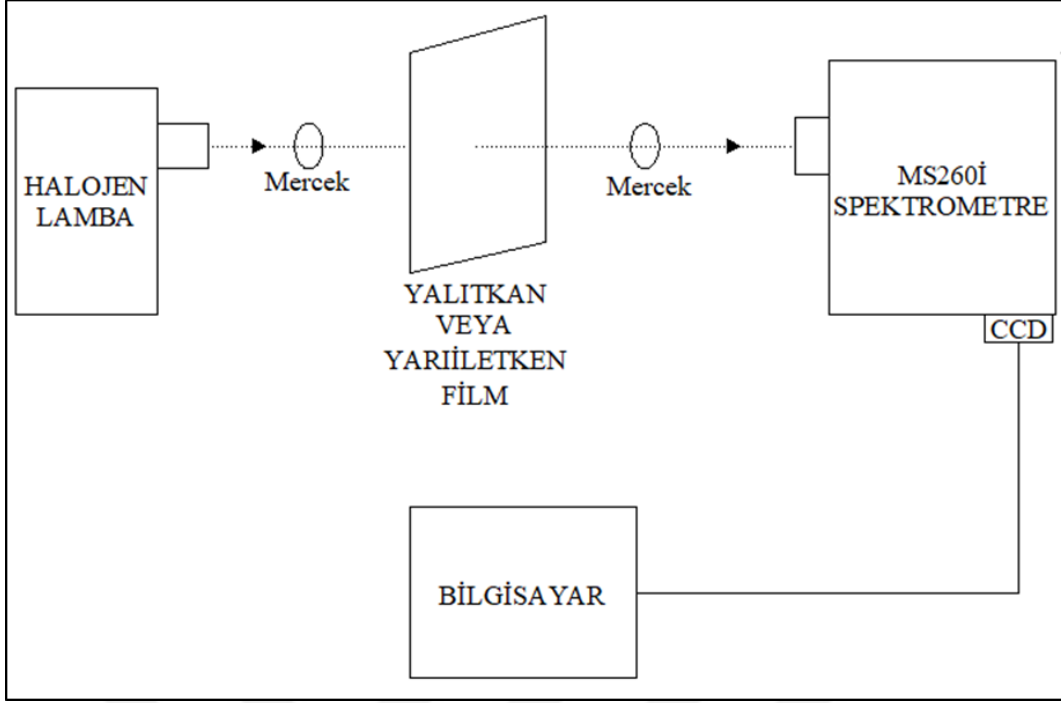
Bu bölümde ise yöntem, deneysel olarak elde edilmiş veriler için incelenecektir. Tek katmanlı dielektrik film olarak BK7 ince filmi deneysel örnek olarak seçilmiştir. Bu amaçla filme ait iki farklı geliş açısında elde edilecek olan geçirgenlik spektrumu ( $T(k_0)$ ) sinyalleri aşağıda detayı anlatılan deneysel düzenek ile elde edilmiştir.

#### 4.1. Deneysel Düzenek

Sunulan yöntem için incelenen tek katmanlı dielektrik filmin geçirgenlik spektrumu ( $T(k_0)$ ) sinyallerinin iki farklı geliş açısında elde edilmesi gerekmektedir. Deneysel  $T(k_0)$  sinyalleri Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fizik Bölümü’ne ait Katihal Fiziği laboratuvarında elde edilmiştir.

Tek katmanlı dielektrik film olarak BK7 cam incelenmiştir. Analiz için gerekli olan geçirgenlik spektrumu ( $T(k_0)$ ) sinyalleri şekil 4.1’de resmedilmiş olan düzenek kullanılarak elde edilmiştir.

Şekil 4.1’deki deney düzeneğindeki lamba 10-250 Watt güç aralığında quartz halojen lambadır. Işığın dalga boylarına ayrıldığı spektrometre, morötesi-görünür bölge geçirgenlik ölçümlerinin yapılabildiği çözünürlüğü 1,95 nm, çizgi yoğunluğu 150 çizgi/mm ve çözünürlüğü 0,17 nm, çizgi yoğunluğu 1800 çizgi/mm olan iki kırınım ağına sahip Oriel MS260i modeldir (Coşkun ve ark., 2013). Spektrometreden çıkan dalga boylarına ayrılmış ışık CCD kamera ile eş zamanlı olarak ölçülebilmektedir (Coşkun ve ark., 2013).



Şekil 4.1. Dielektrik filmin geçirgenlik spektrumlarının ölçüldüğü deneysel düzenek

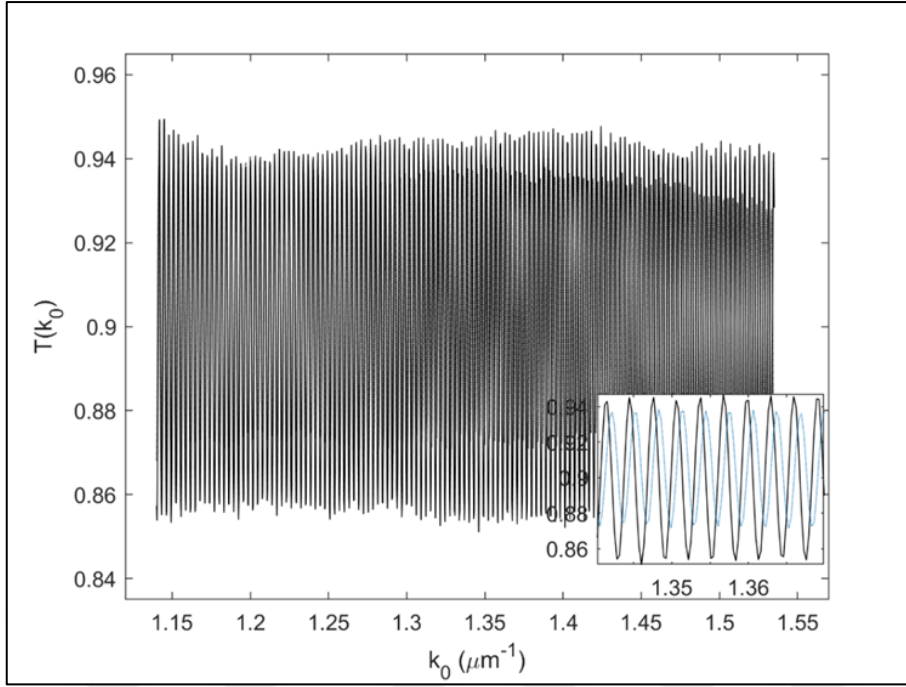
#### 4.2. Dielektrik Filmin Paul Dalgacığı ile SDD Analizi Yardımıyla Kalınlık ve Kırılma İndisi Dağılımının Eş Zamanlı Olarak Belirlenmesi

Şekil 4.1'deki deneysel düzenekte görüldüğü gibi halojen lambadan çıkan ışık ince kenarlı mercekten geçerek toplanır ve filmin yüzeyine filmin yüzey normaline göre ayarlanan açı ile düşer. Filmden geçen ışık tekrar ince kenarlı mercek ile toplanarak spektrometrenin içine girer. Burada kırınım ağı sayesinde dalga boylarına ayrılan ışık CCD kameraya gelir ve bilgisayara aktarılır (Coşkun ve ark., 2013).

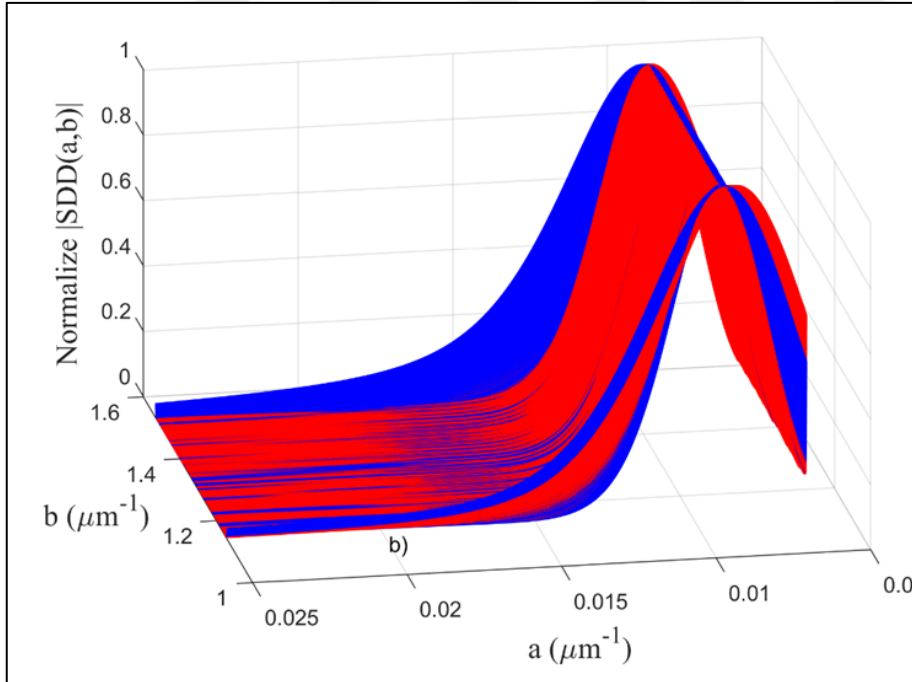
$d = 100 \mu m$  olarak satın alınan BK7 cam örneğı için, oda sıcaklığında  $1,14 - 1,535 \mu m^{-1}$  dalga sayısı aralığında iki farklı geliş açısında ( $\theta_i = 0^\circ$  ve  $\theta'_i = 8^\circ$ ) elde edilen geçirgenlik spektrumu ( $T(k_0)$ ) sinyalleri şekil 4.2 ile verilmiştir.

Şekil 4.2 ile verilen ve BK7 cam örneğinin yüzeyinin normaline göre iki farklı geliş açısında ( $\theta_i = 0^\circ$  ve  $\theta'_i = 8^\circ$ ) elde edilmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri ( $T(k_0)$ ), Paul dalgacığı ile SDD'ye tabi tutulması sonucu eşitlik 3.21'e uygun olarak  $a \times b$  boyutlu iki farklı  $|SDD(a, b)|$  matrisi elde edilmiştir. Bu  $|SDD(a, b)|$  matrislerine ait grafikler şekil 4.3'te verilmiştir.

Geçirgenlik spektrumu sinyallerinin Paul dalgacığı ile SDD'ye tabi tutulmasında Paul dalgacığının derecesi yine  $m = 10$  olarak alınmıştır.



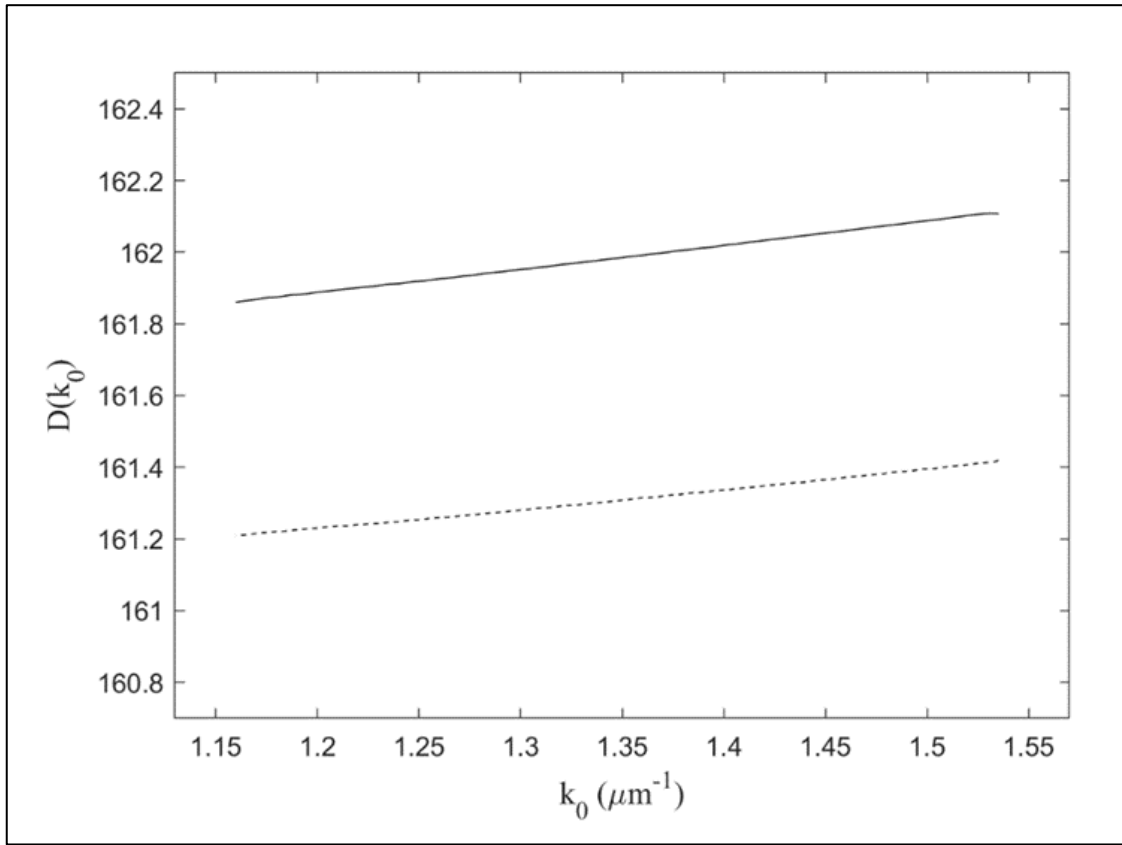
Şekil 4.2. BK7 cam örneği için  $1,14 - 1,535 \mu m^{-1}$  dalga sayısı aralığında  $0^\circ$  (düz çizgi) ve  $8^\circ$  (noktalı çizgi) geliş açısında elde edilen geçirgenlik spektrumu sinyalleri



Şekil 4.3. BK7 cam örneği için iki farklı geliş açısında geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacığı ile SDD uygulanması sonucunda elde edilmiş olan grafikler ( $0^\circ$  geliş açısı mavi renk ile  $8^\circ$  geliş açısı kırmızı renk ile verilmiştir)

Şekil 4.3’de grafiği verilen SDD sonucu elde edilmiş  $a \times b$  boyutlu matristen, her  $b$  değeri için  $a$  değerinin maksimum olduğu değerler eşitlik 3.22 yardımı ile bulunmuştur. Her  $b$  değeri için bulunmuş olan  $a_{max}$  değerleri ve yine eşitlik 3.22 yardımıyla, yine her  $b$  değeri için, iki farklı geliş açısında ölçüm ile deneysel olarak elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyallerine ait optik kalınlık değerlerinin ( $D$  ve  $D'$ ) her dalga sayısına ( $k_0$ ) karşılık gelen değerleri elde edilmiştir.

BK7 cam örneği için, iki farklı geliş açısı için hesaplanmış olan  $D$  ve  $D'$  değerlerine ait grafikler şekil 4.4’te verilmiştir.

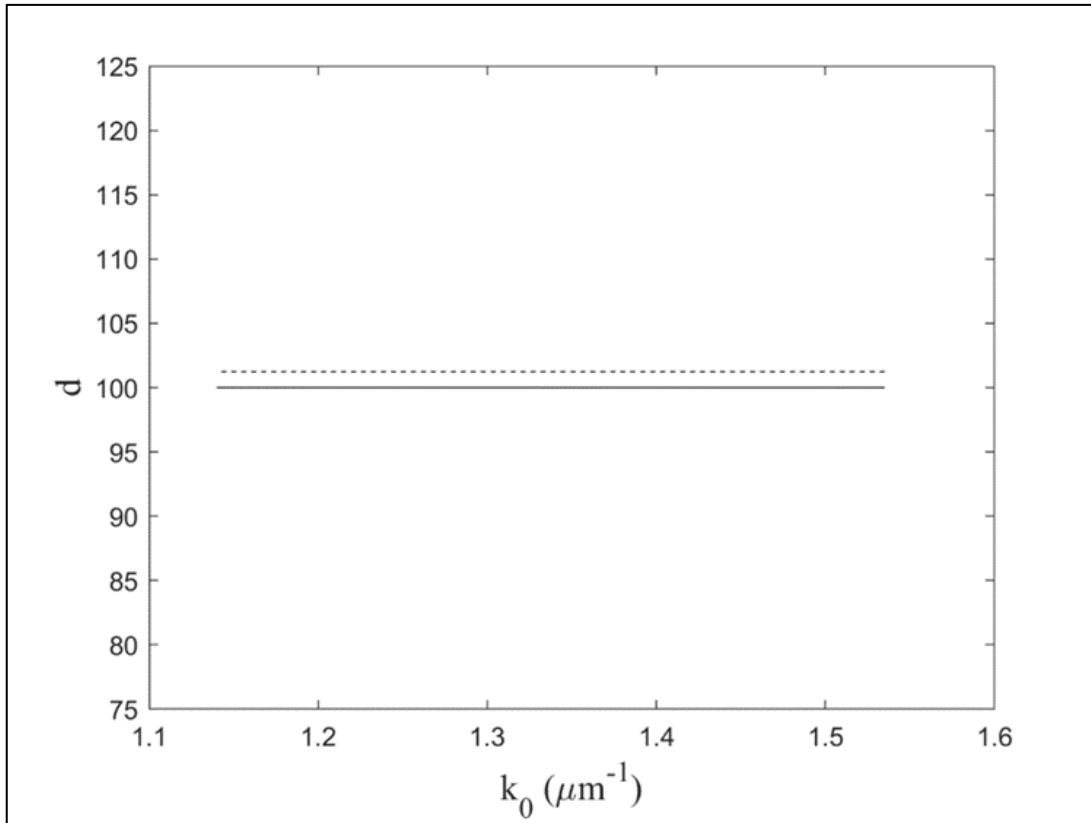


Şekil 4.4. BK7 cam örneği için iki farklı geliş açısında deneysel olarak elde edilen geçirgenlik spektrumu ( $T(k_0)$ ) sinyallerinin SDD’ye tabi tutulması sonucunda elde edilmiş olan optik kalınlık ( $D$  (düz çizgi) ve  $D'$  (kesikli çizgi)) değerleri

BK7 cam örneği için deneysel olarak elde edilen geçirgenlik spektrumu sinyallerine ait çalışılan tüm uzay boyunca, her  $k_0$  değeri için  $D$  ve  $D'$  değerleri elde edildikten sonra, bulunan bu değerler ve iki farklı geliş açısı değeri ( $\theta_i = 0^\circ$  ve  $\theta'_i = 8^\circ$ ), eşitlik 3.26’da yerine konularak, filmin kalınlığına ( $d$ ) ulaşılmıştır.

Filmin kalınlığına ilişkin elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'te verilmiştir. Her  $k_0$  değeri için bir  $d$  değeri hesap edilmiş olup, bunlar grafikte görülmektedir. Bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilen  $d$  değeri analiz sonucu bulunan  $d$  değeri olarak kabul edilmiştir. Grafikte ayrıca BK7 cam örneği için üretici firmanın katalog verisi olarak verdiği kalınlık ( $d$ ) değeri de verilmiştir.

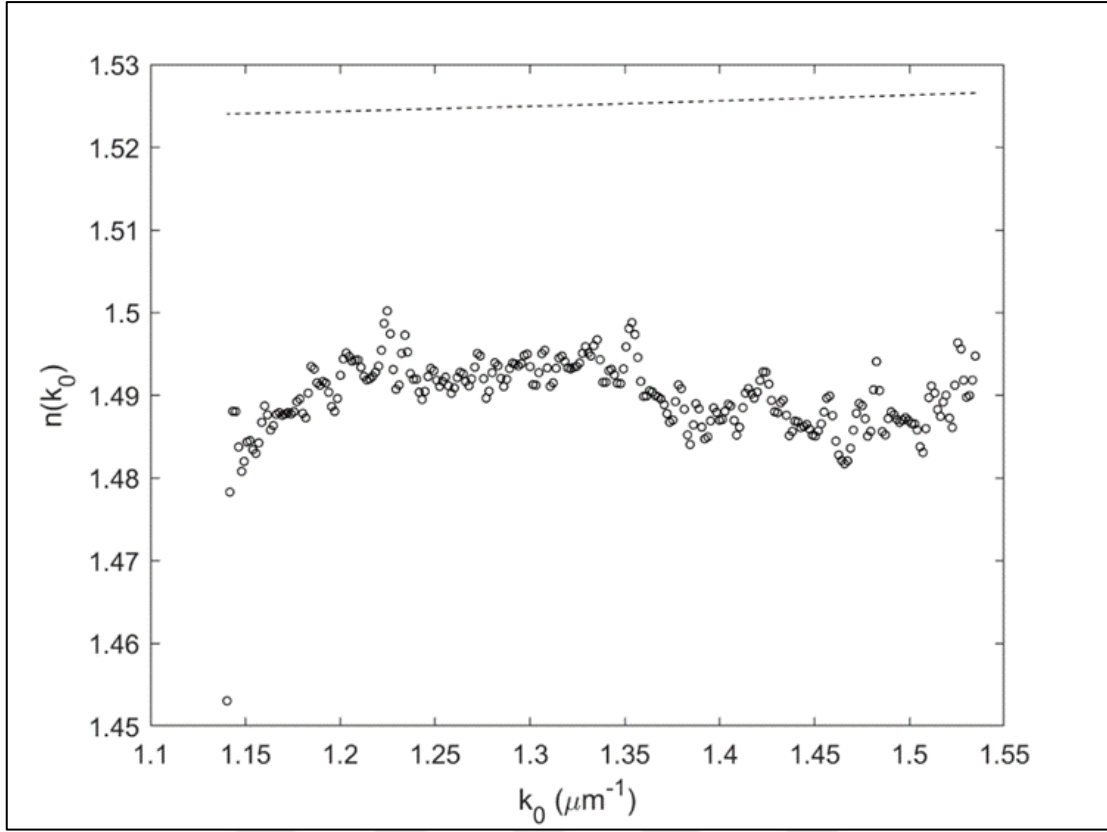
BK7 cam örneğinin katalogda  $d = 100 \mu m$  (Schott, 2016) olarak verilen kalınlık değerine karşın analiz sonucunda  $d_{paul} = 101,24 \mu m$  değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.5. BK7 cam örneği için  $D$  ve  $D'$  değerleri yardımıyla her  $k_0$  değeri için hesaplanmış olan fiziksel kalınlık ( $d$ ) değerleri (kesikli çizgi) ve üretici firma katalog değeri (düz çizgi)

Yine BK7 cam örneği için, tüm  $k_0$  uzayı boyunca, her  $k_0$  değeri için  $D$  ve  $D'$  değerleri elde edildikten sonra, bulunan bu değerler ve iki farklı geliş açısı değeri ( $\theta_i = 0^\circ$  ve  $\theta'_i = 8^\circ$ ), eşitlik 3.25'te yerine konularak, filmin kırılma indisi dağılımına ( $n(k_0)$ ) ulaşılmıştır.

Filmin kırılma indisi dağılımına ilişkin sonuçlar şekil 4.6'da verilmiştir. Her  $k_0$  değeri için bir  $n$  değeri hesap edilmiş olup, bunlar grafikte görülmektedir. Grafikte ayrıca zarf metoduna (Swanpoel, 1983) ilişkin sonuçlar da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. BK7 cam örneği için  $D$  ve  $D'$  değerleri yardımıyla her  $k_0$  değeri için hesaplanmış olan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (kesikli çizgi) ve zarf metodu ile bulunan kırılma indisi değerleri (çemberler)

Yöntem sayesinde BK7 cam örneği için elde edilen kırılma indisi dağılımına ( $n(k_0)$ ) ilişkin Cauchy parametreleri de ( $A, B$  ve  $C$ ) ve Swanpoel (1983) tarafından geliştirilen zarf metodu ile elde edilmiş olan kırılma indisi değerlerine ilişkin Cauchy parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. BK7 cam örneği için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen Cauchy parametreleri ( $A, B$  ve  $C$ )

|                               | Cauchy parametreleri |                        |                         |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|
|                               | $A$                  | $B(\mu m^2)$           | $C(\mu m^4)$            |
| Paul Dalgacığı ile SDD metodu | 1,52                 | $0,24 \times 10^{-2}$  | $1,67 \times 10^{-6}$   |
| Zarf Metodu                   | 1,22                 | $41.65 \times 10^{-2}$ | $-15.78 \times 10^{-2}$ |

Çizelge 4.1’de verilen değerler ve  $n(k_0) = A + Bk_0^2 + Ck_0^4$ , ( $k_0 = \frac{1}{\lambda_0}$ ) eşitliği yardımıyla istenilen dalga boyu ( $\lambda_0$ ) değeri için kırılma indisi değeri hesap edilebilmektedir. Karşılaştırma olması bakımından üretici firmanın kataloğundaki  $n - \lambda_0$  değerlerine karşın, aynı dalga boyu ( $\lambda_0$ ) değerindeki yöntem ile bulunan  $n$  değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

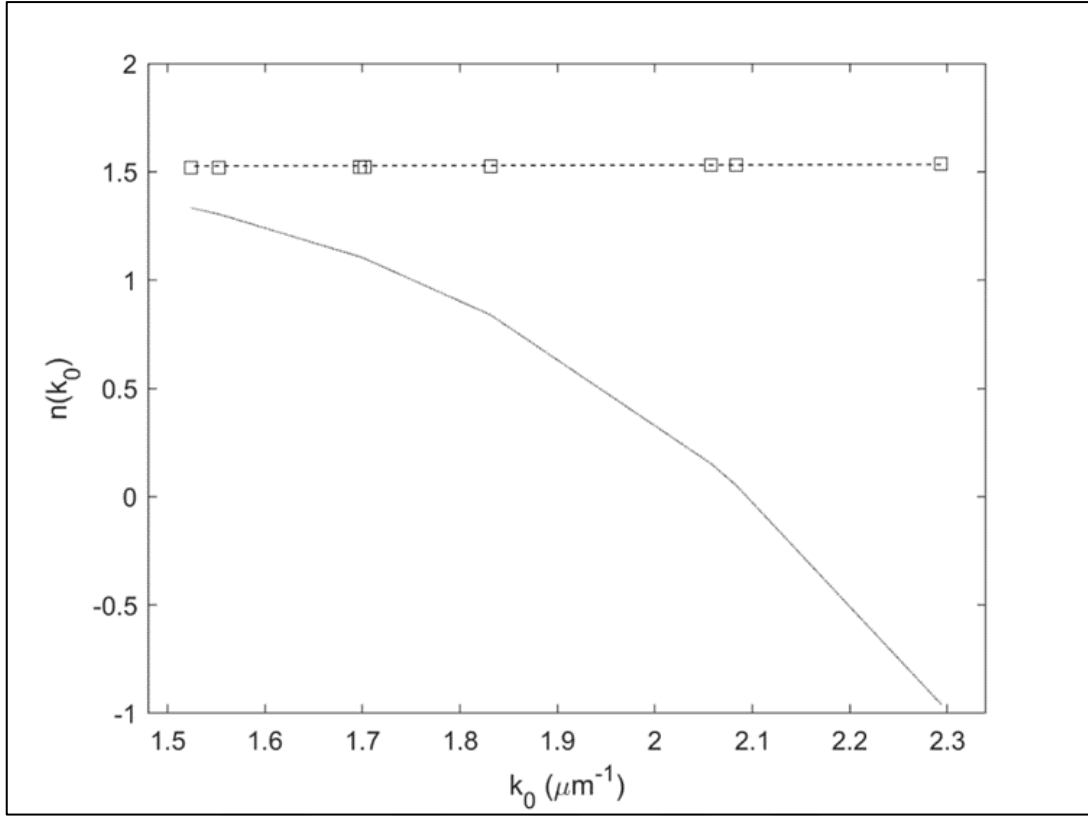
Çizelge 4.2. BK7 cam örneğinin farklı dalga boylarında sunulan yöntem ile hesaplanmış kırılma indisi değerleri ile katalog değerlerinin karşılaştırılması

| $\lambda_0 = \frac{1}{k_0} \text{ (nm)}$ | $n_{katalog}$ | $n_{SDD-Paul}$ | $\frac{ n_{SDD-Paul} - n_{katalog} }{n_{katalog}}$ |
|------------------------------------------|---------------|----------------|----------------------------------------------------|
| 436.0                                    | 1.5354        | 1.5336         | $1.19 \times 10^{-3}$                              |
| 480.0                                    | 1.5305        | 1.5313         | $0.55 \times 10^{-3}$                              |
| 486.0                                    | 1.5300        | 1.5311         | $0.71 \times 10^{-3}$                              |
| 546.0                                    | 1.5255        | 1.5290         | $2.27 \times 10^{-3}$                              |
| 587.5                                    | 1.5231        | 1.5279         | $3.13 \times 10^{-3}$                              |
| 589.3                                    | 1.5230        | 1.5278         | $3.17 \times 10^{-3}$                              |
| 644.0                                    | 1.5209        | 1.5267         | $3.81 \times 10^{-3}$                              |
| 656.6                                    | 1.5204        | 1.5265         | $4.00 \times 10^{-3}$                              |

Çizelge 4.1’de verilen değerler ve  $n(k_0) = A + Bk_0^2 + Ck_0^4$  eşitliği yardımıyla  $n(k_0)$  değerleri istenilen  $k_0$  aralığı için hesap edilebilmektedir.

BK7 cam örneği için  $k_0 = [1,1400 - 2,2936] \mu m^{-1}$  dalga sayısı aralığında Cauchy parametreleri kullanılarak elde edilen kırılma indisi dağılımı ve üretici firma tarafından verilen kırılma indisine ilişkin katalog değerleri şekil 4.7’de verilmiştir.

Benzer şekilde deneysel olarak elde edilen geçirgenlik spektrumu karşılaştırma yapmak amacıyla zarf metodu ile de analiz edilmiş, zarf metoduna ilişkin Cauchy parametreleri çizelge 4.1’de verilmiş ve bu Cauchy parametreleri yardımıyla elde edilen kırılma indisi dağılımı yine şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. BK7 cam örneği için Cauchy parametreleri kullanılarak hesaplanmış olan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (kesikli çizgi) ve üretici firma katalog değerleri (kutucuklar) ve zarf metodu ile hesaplanmış olan kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) değerleri (düz çizgi)

Deneysel düzenek yardımıyla iki farklı geliş açısında elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumu sinyallerine Paul dalgacı ile SDD uygulanması sonucunda; hem bulunan film kalınlığı üretici firmanın katalog değeri ile karşılaştırıldığında (Şekil 4.5), hem de bulunan kırılma indisi dağılımı üretici firmanın katalog değerleri ile karşılaştırıldığında (Çizelge 4.2) yöntemin gayet iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Deneysel çalışma sunulan yöntemin (Paul dalgacı ile SDD uygulanması) kırılma indisi dağılımının ve kalınlığın eş zamanlı olarak belirlenmesi için uygun, pratik ve hızlı bir yöntem olduğunu göstermektedir.

## BÖLÜM 5

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 5.1. Yöntemin Belirsizlik Analizleri ve Hata Değerlendirmesi

Her bilimsel yöntemin analiz sonuçlarına etkisi, yönteme dair belirsizlik analizinin yapılmasıyla görülmektedir. Paul dalgacığı kullanmak suretiyle SDD tekniğinin geçirgenlik spektrumu sinyallerine uygulanması sonucunda bu sinyallerin içerisindeki frekans bilgilerine ulaşılmıştır. Bu frekans bilgilerinden  $D(k_0) - k_0$  ve  $D'(k_0) - k_0$  değerlerine ulaşılmıştır. Daha sonra eşitlik 3.25 ve eşitlik 3.26'yı kullanmak suretiyle tek katmanlı bir dielektrik filmin kalınlık ( $d$ ) ve kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) eş zamanlı olarak elde edilmiştir.

Görelî belirsizliğin bulunmasında genel olarak eşitlik 5.1'deki gibi bir fonksiyon için eşitlik 5.2'deki gibi bir denklem kullanılmaktadır (Coşkun, 2012).

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.1)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \left[ \left( \frac{\frac{\partial R}{\partial x_1}}{R} \right)^2 (\Delta x_1)^2 + \left( \frac{\frac{\partial R}{\partial x_2}}{R} \right)^2 (\Delta x_2)^2 + \dots + \left( \frac{\frac{\partial R}{\partial x_n}}{R} \right)^2 (\Delta x_n)^2 \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

Burada  $\Delta x_i$  her değişkene ait belirsizliği göstermektedir.

Eşitlik 3.25 ile verilen ifaden de görüleceği üzere, kırılma indisi optik kalınlık ( $D$  ve  $D'$ ) ve geliş açılarının ( $\theta_i$  ve  $\theta_i'$ ) fonksiyonudur. Optik kalınlık ( $D$ ) ise eşitlik 3.22 den görüleceği üzere  $a_{max}$ 'ın bir fonksiyonudur. Sonuç olarak kırılma indisi eşitlik 5.3'de detayı görülen değişkenlerin bir fonksiyonudur.

$$n = f(D(a_{max}), D'(a_{max}'), \theta_i, \theta_i') \quad (5.3)$$

Kırılma indisi ifadesi eşitlik 5.2 çerçevesinde ele alındığında kırılma indisindeki görelî belirsizlik ifadesi eşitlik 5.4'teki gibi elde edilmektedir.

$$\frac{\Delta n}{n} = \left[ \left( \frac{\frac{\partial n}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial a_{max}}}{n} \right)^2 (\Delta D)^2 + \left( \frac{\frac{\partial n}{\partial D'} \frac{\partial D'}{\partial a_{max}'}}{n} \right)^2 (\Delta D')^2 + \left( \frac{\frac{\partial n}{\partial \theta_i}}{n} \right)^2 (\Delta \theta_i)^2 + \left( \frac{\frac{\partial n}{\partial \theta_i'}}{n} \right)^2 (\Delta \theta_i')^2 \right]^{1/2} \quad (5.4)$$

Benzer şekilde eşitlik 3.26 ile verilen ifadeden de görüleceği üzere, kalınlık optik kalınlık ( $D$  ve  $D'$ ) ve geliş açıları ( $\theta_i$  ve  $\theta_i'$ ) fonksiyonudur. Optik kalınlık ( $D$ ) ise eşitlik 3.22 den görüleceği üzere  $a_{max}$ 'ın bir fonksiyonudur. Sonuç olarak kalınlık, eşitlik 5.5'de detayı görülen değişkenlerin bir fonksiyonudur.

$$d = f(D(a_{max}), D'(a_{max}'), \theta_i, \theta_i') \quad (5.5)$$

Kalınlık ifadesi eşitlik 5.2 çerçevesinde ele alındığında kalınlıktaki görel belirsizlik ifadesi eşitlik 5.6'daki gibi elde edilmektedir.

$$\frac{\Delta d}{d} = \left[ \left( \frac{\frac{\partial d}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial a_{max}}}{d} \right)^2 (\Delta D)^2 + \left( \frac{\frac{\partial d}{\partial D'} \frac{\partial D'}{\partial a_{max}'}}{d} \right)^2 (\Delta D')^2 + \left( \frac{\frac{\partial d}{\partial \theta_i}}{d} \right)^2 (\Delta \theta_i)^2 + \left( \frac{\frac{\partial d}{\partial \theta_i'}}{d} \right)^2 (\Delta \theta_i')^2 \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

Eşitlik 4.1 ile resmedilmiş deneysel düzeneğin geliş açısı için mutlak belirsizlik değeri  $\Delta \theta_i = \pm 0.2^\circ$ 'dir. Ölçek parametresindeki ( $a_{max}$ ) belirsizlik ise  $10^{-3} - 10^{-4}$  mertebelerindedir (Coşkun, 2012). Bu değer yarattığı belirsizlik etkisi, geliş açısının yarattığından oldukça azdır.

Sonuç olarak sunulan yöntemde kırılma indisi dağılımı için görel belirsizlik ( $\frac{\Delta n}{n}$ ), 0.0289 olarak hesap edilmiştir.

Benzer biçimde sunulan yöntemde kalınlık için görel belirsizlik ( $\frac{\Delta d}{d}$ ), 0.0248 olarak hesap edilmiştir.

Bu sonuçlara göre yöntemin sonuçlar üzerindeki belirsizlik etkisinin literatürdeki diğer yöntemlerden farklı olmadığı görülmektedir.

## 5.2. Sonuçların Yorumu

Bu tez çalışması kapsamında, tek katmanlı dielektrik filmlerin fiziksel kalınlık ( $d$ ) ve kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) eş zamanlı olarak bulunmuştur. Bu literatürde ilk eş zamanlı kalınlık ( $d$ ) ve kırılma indisi dağılımının ( $n(k_0)$ ) bulunduğu bir çalışmadır. Önceki çalışmalarda ya filmin kalınlığı ( $d$ ) bilinmekteydi ya da kırılma indisi ( $n$ ) sabit kabul edilmekteydi.

Bu amaçla incelenen tek katmanlı dielektrik film için iki farklı geliş açısında elde edilmiş olan geçirgenlik spektrumu ( $T(k_0)$ ) sinyalleri kullanılmıştır. Bu sinyaller Paul dalgacı özelinde SDD'ye tabi tutulduğunda sinyaller içerisindeki frekans bilgilerine ulaşılmaktadır ki bu frekans bilgileri filmin optik kalınlık ( $D$  ve  $D'$ ) bilgilerini de içermektedir. Bu optik kalınlık bilgileri kullanılarak, film kalınlığı ( $d$ ) ve kırılma indisi dağılımı ( $n(k_0)$ ) eş zamanlı olarak elde edilmektedir.

Yöntem bilgisayar simülasyonu çalışmaları ile test edilmiştir. Önce gürültüsüz geçirgenlik spektrumu sinyalleri kullanılmış ve girdi olarak kullanılan  $d = 10 \mu m$  kalınlık değerine karşın simülasyon sonucunda yöntem ile  $d = 10.0571 \mu m$  değeri elde edilmiştir (Çizelge 3.1). Oluşan % 0,571'lik hata % 2,89'luk belirsizlik sınırı içerisinde kalmaktadır. Sonra rasgele %20 oranında gürültülü eklenmiş geçirgenlik spektrumu sinyalleri kullanılmış ve yine girdi olarak kullanılan  $d = 10 \mu m$  kalınlık değerine karşın simülasyon sonucunda yöntem ile  $d = 9.9550 \mu m$  değeri elde edilmiştir (Çizelge 3.1). Benzer bir biçimde kırılma indisi değerlerindeki hatalar da belirsizlik sınırları içerisinde kalmaktadır.

Yöntem deneysel verilerle de test edilmiş olup, deney için kullanılan  $d = 100 \pm 20 \mu m$  kalınlığındaki BK7 cam örneği için, yöntem sonucunda  $d = 101,24 \mu m$  kalınlık değerine ulaşılmıştır. Burada oluşan %1,24'lük hata da belirsizlik sınırı içerisinde kalmaktadır. Benzer bir biçimde yöntem ile elde edilen kırılma indisi değerleri, BK7 cam örneğinin üretici firması tarafından verilen katalog değerleri ile birlikte Çizelge 4.2'de topluca verilmiştir. Bu çizelgeden de görüleceği üzere hesaplanmış kırılma indisi değerlerindeki hatalar da belirsizlik sınırları içerisinde kalmaktadır. Yani yöntemin yaratacağı belirsizliğin sonuçlar üzerindeki etkisi kabul edilebilir düzeydedir.

Bu tez çalışmasında sunulan yöntem frekansı zamanla değişen sinyalleri detaylıca analiz etmek amacıyla kullanılabilir. "Sinyal İşleme" alanında detaylı bir analiz yöntemi olarak kullanılabilir.

Benzer bir çalışma ileride filmlerin yansıma spektrumları kullanarak da yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Addison P.S., 2005. Wavelet Transform and the ECG: A Review. *Physiological Measurement*, 26: R155-R159.
- Abbak R. A., 2007. Jeodezide Zaman Dizilerinin Dalgacık (Wavelet) Analizi, Konya.
- Afifi M., Fassi-Fihri A., Marjane M., Nassim K., Sidki M., Rachafi S., 2002. Paul Wavelet-Based Algorithm for Optial Phase Distrubition Evaluation. *Optic Communications*, 21: 47-51.
- Angrisani L., Daponte P., D'Apuzzo M., 1999. A Method for the Automatic Detection and Measurement of Transients, Part I: The Measurement Method. *Measurement*, 25: 19-30.
- Bracewell R., 1986. *The Fourier Transform and Its Applications* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill. 474 p.
- Bracewell R.N., 2000. *The Fourier Transform and Its Applications* (3th ed.). McGraw-Hill, Singapore. 616 p.
- Chang R., 1972. Application of Polarimetry and Interferometry to Liquid Crystal-Film Research. *Materials Research Bulletin*, 7: 267-278.
- Chui C., 1992. *An Introduction to wavelets* (1st ed.). Academic Press, San Diego. 266 p.
- Cohen L., 1989. Time-Frequency Distribution a Review. *Proceedings of IEEE*, 77 (7): 941-981.
- Coşkun E., Özder S., 2011. Paul wavelet algorithm for the determination of birefringence dispersion of a liquid crystal cell. *J. Opt. Soc. Am. B* 28(12), 2974.
- Coşkun E., 2012. İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İntegral Dönüşüm Yöntemleri İle Belirlenmesi. Doktora Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Türkiye.
- Coşkun E., Özder S., Tiryaki E., 2013. The Paul wavelet algorithm: an alternative approach to calculate the refractive index dispersion of a dielectric film from transmittance spectrum. *Applied Physics B* **113(2)**: 243-250.
- Debnath L., 2002. *Wavelet Transforms & Their Applications* (1st ed.). Birkhauser, United

- States of America. 565 p.
- Debnath L., Bhatta D., 2007. Integral Transforms and Their Applications (2nd ed.). Chapman & Hall, United States of America. 688 p.
- Ergen B., Tatar Y., 2003. Optimal Continuous Wavelet Analysis of Phonocardiogram Signals. IJCI Proceedings of International Conference on Signal Processing, 1(2): 188-192.
- Farge M., 1992. Wavelet Transforms and Their Applications to Turbulence. Annual Reviews of Fluid Mechanics, 24: 395-457.
- Gabor D., 1945. Theory of Communication. Radio Section Paper, 429-457.
- Graps A., 1995. An Introduction to Wavelets. IEEE Computational Science & Engineering, (2): 50-61.
- Grossman A., Morlet J., 1984. Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 15 (4): 723-736
- Heavens O. S., 1991. Optical Properties of Thin Solid Films (1st ed.). General Publishing Company, London. 65 p.
- Hecht E., 2002. Optics (4th ed.). Addison Wesley, San Francisco. 698 p.
- Hildebrand, F.B., 1962. Advanced calculus for applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 768 p.
- Hsu H.P., 1995. Schaum's outlines of Theory and Problems of Signals and Systems. McGraw-Hill, New Jersey. 470 p.
- Kammler D.W., 2007. A First Course in Fourier Analysis (1st ed.). Cambridge University Press, New York. 798 p.
- Köysal O., Önal D., Özder S., Ecevit F. N., 2002. Thickness Measurement of Dielectric Films by Wavelength Scanning Method. Optics Communications, 205: 1-6.
- Köysal O., San S. E., Özder S., 2004. Simultaneous determination of refractive index and thickness of multilayer dielectric films by discrete Fourier transform. Optics Communications, 230(4): 273-278.

- Lee J. J., Lee S. M., Kim I. Y., Min H. K., Hong S. H., 1999. Comparison between short time Fourier and wavelet transform for feature extraction of heart sound. *IEEE Tencon*, 102: 18-55.
- Mallat S., 1999. *A Wavelet Tour of Signal Processing* (2nd ed.). Academic Press, California. 637 p.
- Manifacier J. C., Gasiot J., Fillard J. P., 1976. A simple method for the determination of the optical constant  $n$ ,  $k$  and the thickness of a weakly. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 9: 1002-1004.
- Meyers S.D., Kelly B.G., O'Brien J.J., 1993. An Introduction to Wavelet Analysis in Oceanography and Meteorology: With Application to the Dispersion of Yanai Waves. *Weather Review*. 121 (10):2857-2866.
- Meyer Y., Xu H., 1997. Wavelet Analysis and chirps. *Applied and Computational, Harmonic Analysis*, 4:366-379.
- Morlet J., Arens G., Fourgeau E., Giard D., 1982. Wave Propagation and Sampling Theory-Part I: Complex Signal and Scattering in Multilayer Media. *Geophysics*, 47 (2) 203-221.
- Oppenheim A.V., Willsky A.S., 1997. *Signals and Systems* (Second Edition). Prentice Hall, Massachusetts, 3 p.
- Pedrotti F.L., Pedrotti L.S., 1993. *Introduction to Optics* (2nd ed.). Prentice Hall, New Jersey, 602 p.
- Rheims J., Köser J., Wriedt T., 1997. Refractive-index measurement in the near-IR using an Abbe Refractometer. *Measurement Science and Technology*, 8: 601-605.
- Schoot, 2016 (b.t.), D263 T Thin Glass Specifications 2016 [www.pgo-online.com/intl/katalog/D263.html](http://www.pgo-online.com/intl/katalog/D263.html)
- Siqueiros J.M., Regalado L.E., Mchorro R., 1988. Determination of  $(n, k)$  for Absorbing Thin Films Using Reflectance Measurement. *Applied Optics*, 27 (20): 4260- 4264.
- Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P., 1996. Localization of the Complex Spectrum: The S Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44 (4): 908-1001.

- Swanepoel R., 1983. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 16:1214-1222.
- Teryaev O.V., 2001. Crossing and Radon tomography and generalized parton distributions. *Physics Letters B*, 510:125-132.
- Tonova D. A., Konova A. A., 2001. Characterization of Inhomogeneous Dielectric Coatings with Arbitrary Refractive Index Profile with Multiple Angle of Incidence Ellipsometry. *Thin Solid Films*, 397: 17-23.
- Torrence C., Compo G., 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 61-78.
- Türkoğlu H. İ., 2013. Terkos Gölüne Gelen Aylık Debinin Çeşitli Metotlarla Tahmini. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Xie H., Ng F. L., Zeng X. T., 2009. Spectroscopic Ellipsometry Study of Thin Film Thermo-optical properties. *Thin Solid Films*, 517: 5066-5069.
- Yang W., 2007. A Natural Way for Improving the Accuracy of the Continuous Wavelet Transforms. *Journal of Sound and Vibration*, 306: 928-939.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Seçkin ÖZCAN  
Doğum Yeri : Çanakkale  
Doğum Tarihi : 11.12.1977

### EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi: Yıldız Teknik Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Fakültesi  
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği  
Yüksek Lisans Öğrenimi: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Bilgisayar Mühendisliği ABD  
Doktora Öğrenimi: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik ABD  
Bildiği Yabancı Diller: İngilizce

### BİLİMSEL FAALİYETLERİ

#### a) Yayınlar -SCI -Diğer

1. Savaş ELMAS, **Seçkin ÖZCAN**, Serhat ÖZDER, Vildan BİLGİN, “Influence of Annealing Temperature on the Electrical and Optical Properties of CdS Thin Films”, Acta Physica Polonica A, 1 (121), 56-58 (2012).
2. **Özcan Seçkin**, Coşkun Emre, Kocahan Yılmaz Özlem, Özder Serhat, “An improved method for the determination of birefringence dispersion of liquid crystal cell: A simulation study”, AIP Conference Proceedings, 1722, 090002, (2016).
3. **Özcan Seçkin**, Coşkun Emre, Kocahan Yılmaz Özlem, Özder Serhat, “An improved method for determination of refractive index of absorbing films: A simulation study”, American Institute of Physics, 1815, 050009, (2017).

4. Kocahan Yılmaz Özlem, **Özcan Seçkin**, Coşkun Emre, Özder Serhat, The generalized Morse wavelet method to determine refractive index dispersion of dielectric films. Measurement Science and Technology, 28 (4), 045013, (2017).

b) Bildiriler -Uluslararası -Ulusal

1. **Seçkin ÖZCAN**, Kamil AKGÜN, “LED Lambaların Kompakt Flüoresan Lambalar ile Teknik Özellikleri ve Maliyet Analizi Açısından Karşılaştırılması”, 2. LED Konferansı, (2010).

2. Savaş ELMAS, **Seçkin ÖZCAN**, Serhat ÖZDER, Vildan BİLGİN, “Influence of Annealing Temperature on the Electrical and Optical Properties of CdS Thin Films”, Advances in Applied Physics & Materials Science Congress (APMAS2011), (2011).

3. Fehmi Volkan AKYÖN, **Seçkin ÖZCAN**, Göksel ÖZTÜRK, “İtfaiye Teşkilatı Personelinin Kişisel Koruyucu ve Kurtarma Malzemelerine Yönelik Memnuniyet Düzeylerinin Araştırılması: Çanakkale İli Örneği”, TÜYAK 2011 Yangın ve Güvenlik Sempozyumu, (2011).

4. **Seçkin ÖZCAN**, Ayşin AŞKIN, Selin NEHİR, “Mobilya Satış Mağazalarının Tasarımında Elektriksel Işık Kaynaklarından Yararlanma Bilinci: Çanakkale İli Örneği”, 3. Ulusal İç Mimarlık Sempozyumu, (2013).

5. Ayşin AŞKIN, **Seçkin ÖZCAN**, “The Importance of Vocational Schools in Vocational Technical Education”, The Fifth International Congress of Educational Research, (2013).

6. **Özcan Seçkin**, “Rüzgâr Enerjisi Santrallerinde Yangın Koruma Tedbirleri Üzerine Bir Araştırma”, TÜYAK 2013 Yangın ve Güvenlik Sempozyumu, (2013).

7. **Özcan Seçkin**, “Elektrikli Ev Aletlerinde Enerji Tasarrufu ve Stand By Prizi”, 20th International Energy and Environment Fair and Conference, (2014).

8. **Özcan Seçkin**, Coşkun Emre, Kocahan Yılmaz Özlem, Özder Serhat, “An improved method for the determination of birefringence dispersion of liquid crystal cell: A simulation study”, 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union – BPU9, (2015).

9. **Özcan Seçkin**, “Kreşlerdeki Yangın Güvenlik Kriterlerinin Değerlendirilmesi”, TÜYAK 2015 Yangın ve Güvenlik Sempozyumu ve Sergisi (2015).

10. **Özcan Seçkin**, “Occupational Health And Safety Precautions In Electrical Machinery Workshops: An Example Of Çanakkale Onsekiz Mart University Çanakkale

Technical Vocational School's Electrical Machinery Workshops", 8. Uluslararası İş Sağlığı ve Güvenliği Konferansı, (2016).

11. **Özcan Seçkin**, Coşkun Emre, Kocahan Yılmaz Özlem, Özder Serhat, "An Improved Method For Determination Of Refractive Index Of Absorbing Films: A Simulation Study", 32. Uluslararası Fizik Kongresi, (2016).

12. **Özcan Seçkin**, Coşkun Emre, Kocahan Yılmaz Özlem, Özder Serhat, "An Improved Method For Simultaneous Determination Of Refractive Index And Thickness Of Dielectric Films: A Simulation Study", Science and Applications of Thin Films Congress & Exhibition - SATF 2016, (2016).

13. **Özcan Seçkin**, Akyön Fehmi Volkan, "Açık Elektrik Şalt Sahalarında Yangın Güvenlik Kriterlerinin Değerlendirilmesi", TÜYAK2017 Uluslararası Yangın ve Güvenlik Sempozyumu ve Sergisi (2017).

14. Akyön Fehmi Volkan, **Özcan Seçkin**, "Camilerde Yangın Güvenlik Kriterlerinin Değerlendirilmesi", TÜYAK2017 Uluslararası Yangın ve Güvenlik Sempozyumu ve Sergisi, (2017).

## **İŞ DENEYİMİ**

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl: - Öğretim Görevlisi: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi  
Çanakkale Teknik Bilimler MYO (2004-...).

- Mühendis: Ark Yapı A.Ş. (1999-2002).

- Korteks Mensucat Sanayi ve Ticaret A.Ş. (1998-1999).

## **İLETİŞİM**

E-posta Adresi: seckinozcan@comu.edu.tr