

T.C.  
MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

SAYDAM İLETKEN KAPLAMALARIN  
OPTİK VE ELEKTRİK PARAMETRELERİNİN  
ÜRETİM PARAMETRELERİNE  
BAĞIMLILIĞI VE OPTİMİZASYONU

Arş. Gör. Ümit Özlem ARIER  
DANIŞMAN: Prof. Dr. Bilgin AKDEMİR

İSTANBUL-TEMMUZ 2004

Ümit Özlem Arıer tarafından hazırlanan "Saydam İletken Kaplamaların Optik ve Elektrik Parametrelerinin Üretim Parametrelerine Bağımlılığı ve Optimizasyonu" adlı araştırmanın Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

28.07.2004



Prof. Dr. Bilgin Akdemir

Bu çalışma, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

28.07.2004

Danışman : Prof. Dr. Bilgin Akdemir



Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ender Aktulga



Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fatma Senyücel



# İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	I
ÖNSÖZ.....	II
ÖZET.....	III
SUMMARY.....	IV
GİRİŞ.....	1
1. KAPLAMALI CAMLAR.....	2
1.1. Optik Geçirgenlik.....	2
1.2. Elektrik İletkenlik.....	5
2. KAPLAMA TEKNİKLERİ.....	9
2.1. Kaplama Teknikleri.....	9
2.2. Sıçratma Tekniği.....	11
3. ÖLÇÜM TEKNİKLERİ.....	16
3.1. Geçirgenlik ve Yansıtma Ölçümleri.....	16
3.2. Kalınlık Ölçümü.....	16
3.3. Yüzey İletkenliği Ölçümü.....	17
4. OPTİK ORTALAMALAR.....	19
5. SAYDAM İLETKENLER.....	25
5.1. ITO.....	26
5.2. AZO.....	31
6. DENEY.....	34
6.1. Amaç.....	34
6.2. Uygulama.....	34
7. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	53
7.1. Geçirgenlik.....	53
7.2. Direnç.....	54
7.3. Kalınlık.....	54
KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	59

## **ÖNSÖZ**

Bu çalışma, katkılı ITO (İndium Tin Oksit) ile kaplanan camın elektrik ve optik parametrelerinin üretim parametrelerine olan bağımlılığının belirlenmesini içermektedir. Bu çalışmada esas amaç, yüksek optik geçirgen ve yüksek elektrik iletken olan bir kaplamalı cam elde etmektir.

Söz konusu bu çalışmanın deneysel bölümü, Şişe Cam Araştırma Merkezi İnce Film Laboratuvarında (İFL) gerçekleştirilmiştir.

Bu deneylere katılmama, elde edilen verileri kullanmama izin veren merkez yöneticilerine, İFL birim sorumlusu Ateş Parlar'a, deneyleri yürüten araştırma mühendisi Seniz Çolak Türköz'e çok teşekkür ederim.

Çalışmanın her aşamasında yardımlarını benden esirgemeyen kıymetli Hocam Prof. Dr. Ender Aktulga'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmayı yapmamda bana verdiği destek ve yardımlarından dolayı danışman Hocam Prof. Dr. Bilgin Akdemir'e çok teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren, hayatta en çok destekleyen canım babam Cuman Akkaya'ya ve annem Saime Akkaya'ya emeklerinden ve varlıklarından dolayı sonsuz teşekkürler.

Her koşulda yanımda olan, sabrını hiç esirgemeyen eşim Suphi'ye, desteklerinden dolayı kardeşlerim Selen ve Sıla'ya çok teşekkürler.

## ÖZET

Bu çalışmada, reaktif dc magnetron sıçratma tekniği kullanılarak katkılı ITO (İndium tin oksit) ile kaplanan camın elektrik ve optik parametrelerinin, üretim parametrelerine bağlı etkilenişi incelenmiştir.

Argon gazı debisi, oksijen gazı debisi, güç, geçiş hızı ve geçiş sayısı gibi üretim parametrelerinin değişik değerleri için, ITO kaplı (saydam iletken) camın gösterdiği optik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerlerinin, beklenildiği gibi birbirine göre ters yönde değiştiği gözlenmektedir. İletkenliğin artması, geçirgenliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu iki parametre için optimum bir düzey sağlayan üretim parametrelerinin değerleri araştırılmıştır.

Deneylerde argon gazı debisi, geçiş hızı ve geçiş sayısı için önceden belirlenen değerler kullanılmış, oksijen gazı debisi ve güç parametrelerinin değiştirilmesiyle yetinilmiştir. Bu iki parametredeki değişim sonunda camın geçirgenliği ve iletkenliği için % 78 ve 65 ohm/kare değerleri, optimal değerler olarak elde edilmiştir. Geçirgenlik için elde edilen değer yeterli olmakla birlikte, direnç için yeter bir değer sayılan 10 ohm/kare değerinin uzağında kalmıştır. Geçirgenliğin daha yeterli bir değerini elde etmek için bu çalışmanın, değişik argon gazı debilerinde yinelenmesi gereklidir.

## **SUMMARY**

That the electric and optic parameters of glass coated with ITO containing an additive are affected according to the parameters has been observed using the reactive dc magnetron sputtering technique in this study.

For different values of process parameters like the flow of argon gas, the flow of oxygen gas, power, transition speed and transmission number, optic transmission and the electrical conductivity values shown by transparent conductor glass coated with ITO are seen to be changing in the opposite direction to each other as expected. The increase in conductivity causes the decrease in transmission. The values of process parameters that provide an optimum level for these two parameters have been searched.

In experiments, the values determined in advance for the flow of argon gas, transition speed and transition number have been used and only the flow of oxygen gas and power parameters have been changed. At the end of the change in these two parameters, % 78 and 65 ohm per square values for transmission and conductivity of glass have been gotten as the optimal values. Though the value 10 ohm per square is considered a value sufficient for resistance. This study should be repeated in different flow of argon gas to get a more sufficient value of transmission.

## GİRİŞ

Kaplama işlemiyle cam, estetik (renk, parlaklık), konfor, yüzey dayanıklılığı gibi bir çok nitelik kazanır, enerji tasarrufu temin eder. Bir camın, spektrumun görünür bölgesinde optik geçirgen ve elektrik açıdan iletken olabilmesi için saydam iletken bir madde ile kaplanması gerekir. Sıydam iletken maddeler, geniş band aralıklı, n-tipi yarıiletken oksitlerdir.

Indium kalay oksit (ITO) iyi iletken, görünür bölge içinde yüksek optik geçirgendir. Kaplama yapıldığı atlığa çok iyi yapışması gibi özelliklerinden dolayı elektronik ve mekanik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir saydam iletkenidir [9]. Diğer saydam iletken oksitler, kaplama kolaylığı, maliyet, kırmızı-altı (IR) yansıması, optik geçirgenlik ve minimum yüzey direnciyle ITO'ya alternatif olarak endüstride kullanılmaktadır [1].

Sunulan bu çalışmada, Şişe Cam Araştırma Merkezi İnce Film Laboratuvarında, reaktif dc magnetron sıçratma tekniği kullanılarak, katkı ITO (katkı maddesi açıklanmamıştır) ile kaplanan camın, optik ve elektrik özelliklerinin optimize değerleri ile kaplama tekniğinde kullanılan üretim parametreleri arasındaki bağımlılık incelenmektedir.

Üretim parametrelerinden argon gazı debisi, geçiş hızı ve geçiş sayısının sabit kalması koşuluyla, oksijen gazı debisini değiştirip gücü sabit tutarak ya da gücü değiştirip oksijen gazı debisinin sabit tutulmasıyla geçirgenlik, direnç ve kalınlık değerlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir.

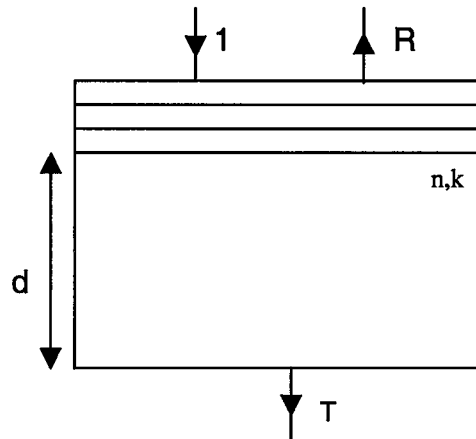
Ayrıca bu çalışma, kaplama yöntemlerini, kaplama işleminde kullanılan saydam iletkenlerden ITO ve AZO'nun (Aluminyum zinc oksit) fiziksel özelliklerini ve kaplama sonrası kaplamalı camın direnç, geçirgenlik, kalınlık gibi özelliklerinin nasıl belirlendiğini içermektedir.

## 1. KAPLAMALI CAMLAR

Cam yüzeyi üzerinde, değişik kaplama teknikleri yardımıyla belirli sayıda malzemeden, belirli sırada ve kalınlıkta homojen katmanlar oluşturulması sonucu kaplamalı cam elde edilir. Kaplama işlemi ile camın optik, elektrik ve mekaniksel nitelikleri değişmektedir. Kaplanmamış camın geçirgenlik, yansıtma, renk, iletkenlik gibi optik ve elektrik parametrelerine, söz konusu ince katmanları oluşturmada kullanılan malzemeye ve bunların katman kalınlıklarına bağlı olarak istenilen değerler verilebilir. Bu çalışmada, kaplama işlemiyle cam, geçirgenlik ve elektrik iletkenlik özelliklerine birlikte sahip olur.

### 1.1. Optik Geçirgenlik

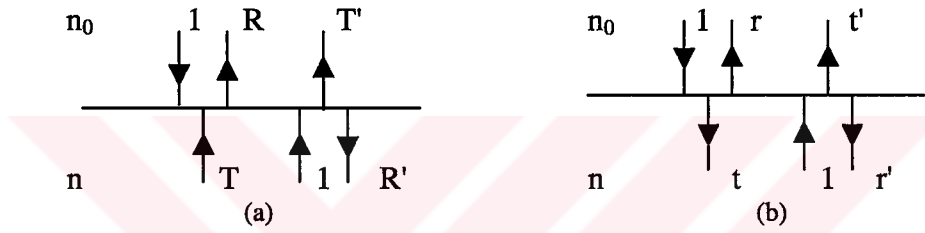
Kaplama ile camın optik parametrelerinin değişmesi, kaplamanın ara yüzlerinde oluşan geçme ve yansıma olaylarına bağlıdır. Işık bir yüzeye geldiğinde bir bölümü, en üst katmanın havaya komşu olan yüzünden yansır. Arta kalan bölümü ise ortama girer ve bu katmandan, bir sonraki katmana komşu olan yüzüne doğru ilerler. Bunun bir bölümü yol boyunca absorplanır. Bu süreç söz konusu ara yüzde ve sonrakilerde yinelenecektir. Bu ara yüzlerden yansıyarak geri dönen ışık bileşenleri, üst katmanlarda yansıyan bileşenlerle girişerek (belli faz farkları yaparak) birleşirler ve kaplamalı camın yansıtmasını ( $R$ ) oluştururlar. İleri yöndeki bileşenler de, yine girişerek camın kaplı olmayan yüzeyinden havaya çıkarlar ve camın geçirgenliğini ( $T$ ) oluştururlar.



Şekil-1: Kaplamalı cam yüzeyine gelen ışığın, geçirgenlik ( $T$ ) ve yansıtması ( $R$ )



Ara yüzden geçiş ve ara yüzde yansımalar ara yüzün iki yanındaki ortamların kırılma indislerine ( $n$ ) bağlıdır. Ortam içindeki absorpsiyon ise katman kalınlığına ( $d$ ) ve ortamın sönüm katsayısına ( $k$ ) bağlıdır. Ara yüzlerde,  $t$  ve  $t'$ , ara yüzden geçen ışığın genliğinin, ara yüze gelen ışığın genliğine oranını,  $r$  ve  $r'$  de ara yüzde yansıyan ışığın genliğinin, ara yüze gelen ışığın genliğine oranını göstermek üzere aşağıdaki fresnel bağıntıları geçerli olur [33]. Denklem 1 ve denklem 2 de verilen bu bağıntılar, ara yüzeye dik gelen ışık dalgasının genlikleri arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Geçirme ve yansıtma oranları, genliklerin kareleri ile orantılıdır.



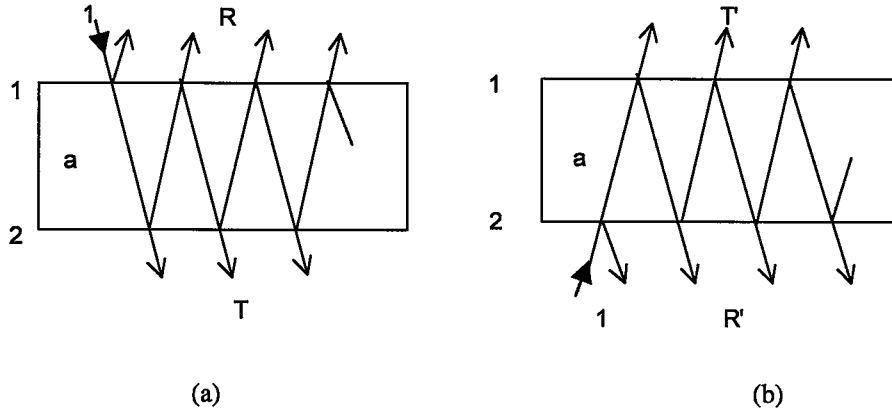
Şekil-2: (a), ara yüzeyin geçirme ve yansıtma oranları; (b), ara yüzeyin fresnel katsayıları.

$$T = T' = tt' \Rightarrow t = \frac{2n_0}{n + n_0} \quad t' = \frac{2n}{n + n_0} \quad (1)$$

$$R = r^2 \quad R' = r'^2 \Rightarrow r = \frac{n - n_0}{n + n_0} \quad r' = \frac{n_0 - n}{n + n_0} = -r$$

$$T = T' = \frac{4nn_0}{(n + n_0)^2} \quad R = R' = \left( \frac{n - n_0}{n + n_0} \right)^2 \quad (2)$$

Geçen ışık dalgaları arasında ve yansıyan ışık dalgaları arasında faz farkları bulunmaktadır. Bir yüzden yansıyan ışık bileşeni ile bir sonraki yüzden yansıyıp geri dönen ve ilki ile girişen ışık bileşeni arasındaki faz farkı, optik yolun ( $2nd$ ), dalgaboyuna ( $\lambda$ ) oranı kadardır. Bu oranın değeri, girişimin sönüme yol açıp açmayacağını belirler. Oranın buçuklu değer alması, sönüme yol açar. Sözü edilen girişim Şekil-3 de görüleceği gibi sonsuz sayıda ve genlikleri giderek sıfıra yaklaşacak olan terimlerden oluşmaktadır.



Şekil-3: (a), katmanın 1 nolu yüzüne gelen; (b), 2 nolu yüzüne gelen ışık için ölçülebilir geçirme ve yansıtma oranları.

Yansıyan ışığın şiddetinin, gelen ışığın şiddetine oranı olan bu yansıtma değeri (R) ve geçen ışığın şiddetinin, gelen ışığın şiddetine oranı olan geçirgenlik değeri (T), katmanların Şekil-2b de sözü edilen  $r$ ,  $r'$ ,  $t$ ,  $t'$  oranları ve katmanların oluşturduğu  $2nd/\lambda$  faz farkları yardımıyla belirlenir. Dolayısıyla yansıtma ve geçirgenlik değerleri dalgaboyunun birer fonksiyonudur.

Kaplanmamış camların yansıtması yaklaşık olarak %8 dir, tam yansıtmasız olabilmesi için kırılma indisini küçültmek yerine faz farkı ve kalınlıkta gerekli ayarlamalar yapılabilmektedir. Cam üzerine yapılan çok katmanlı kaplamalarda, her bir katmanda faz farkına bağlı olarak bir dalgaboyu ayarlaması yapılarak bu değerlerin bileşkesinin alınmasıyla belli bir dalga boyu aralığı için geçirgenlik yada yansıtma oranları elde edilebilir.

Kaplamalı camın kırılma indisi ( $n$ ), sönüm katsayısı ( $k$ ), kalınlık ( $d$ ) değerleri kullanılarak camın her iki yüzüne ait geçirme ve yansıtma değerleri ile herhangi bir dalgaboyundaki geçirme, yansıtma, kalınlık değerlerinden gidilerek kaplamanın o dalgaboyundaki  $n$  ve  $k$  optik indisleri hesaplanabilir.

## 1.2. Elektrik İletkenlik

Kaplanmamış cam iletken değildir, uygun malzemeler yardımıyla cam üzerinde iletken bir ya da birkaç katman oluşturulabilir. Bu katmanlar ince olduğu için söz konusu iletkenlik bir yüzey iletkenliğidir. Bu çalışmada elektrik iletkenliğini belirlemek için direnç ölçümü yapılmakta olup bunun için dört nokta probu kullanılmaktadır. Dört nokta probu, herhangi bir yarıiletken maddenin direncinin ölçümünde, bir hacim ya da ince kaplamanın direncini belirlemek için kullanılan bir alettir.

Elektrik iletkenliğinin ölçüsü olan yüzey direnci önemli bir yarıiletken parametresidir. Yüzey direncinin tarihine bakıldığında boyutsuz bir sayı olduğu anlaşılmaktadır. 1954 yılında Valdes, germanyum transistör üzerinde dört nokta probu ile çalışmalar yapmış, 1955'de Uhlir tarafından bu çalışma üç boyutlu yapılar için yapılmıştır [27]. 1958 yılında Smits, yapılan bu çalışmaları iki boyutlu sistemler için geliştirmiştir. Bu çalışmalardan sonra yüzey direnç ölçümleri, dört nokta probuyla yapılmıştır[27]. Bu çalışma, yarıiletkenler içinde yer alan yüzeylerin direnci için bir endüstri standardı olmuştur.

Direnç, uygulanan potansiyel farkının bir madde içinden geçen akıma oranıdır. Yüzey direnci, doğru akım alanının (volt/metre) yüzey akımına (amper/metre) oranıdır ve birimi ohm/kare (ohm per square) dir. Pratik olarak direnç  $R$  ( $\Omega$ ), özgül direnç  $\rho$  ( $\Omega cm$ ), kalınlık  $t$  olmak üzere aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır [28, 36].

$$R = \frac{\rho}{t} \quad (3)$$

Eşit uzaklıkta dört tungsten metal uç ve test altındaki malzeme ile kontak kurmak için yapılan proplardan oluşan dört nokta probunda, akım dış proplar arasından akar, potansiyel farkı içteki iki prop arasından ölçülür. Probun dıştaki iki ucu arasında akan akımın üst üste (superpose ilkesi) binmesinden, direnç  $R=V/2I$  olur. Direncin diferansiyel olarak ifadesi;

$$dR = \rho \frac{dx}{A} \quad (4)$$

dır [28]. Kalınlığın proplar arası uzaklıktan çok büyük olduğu ( $t \gg s$ ) hacim örneği için özgül direnç ;

$$\begin{aligned} R &= \int \rho \frac{dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x^2} \\ R &= \frac{\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right] \\ R &= \frac{\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{s} - \frac{1}{2s} \right] = \frac{\rho}{4\pi s} \quad (5) \\ V &= R \cdot 2I \\ V &= \frac{\rho}{4\pi s} \cdot 2I = \frac{\rho}{2\pi s} \cdot I \Rightarrow \rho = 2\pi s \frac{V}{I} \end{aligned}$$

dır. Kalınlığın proplar arası uzaklıktan çok küçük olduğu ( $t \ll s$ ) ince bir yüzey için özgül direnç (6) denklemi ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} dR &= \rho \frac{dx}{A} \\ R &= \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi xt} = \frac{\rho}{2\pi t} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x} \\ R &= \frac{\rho}{2\pi t} [\ln 2s - \ln s] \\ R &= \frac{\rho}{2\pi t} \ln 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V &= R \cdot 2I = \frac{\rho}{2\pi t} \text{Ln}2 \cdot 2I \\
 V &= \frac{\rho}{\pi t} \text{Ln}2 \cdot I \\
 \rho &= \frac{\pi t}{\text{Ln}2} \frac{V}{I}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Bu ifadeye, ince yüzey direncinin, proplar arası s uzaklığından bağımsız olduğu görülmektedir. Denklem 3 deki iletken direnci genel olarak,

$$\begin{aligned}
 V &= R \cdot 2I = \frac{\rho}{2\pi t} \text{Ln}2 \cdot 2I \\
 V &= \frac{\rho}{\pi t} \text{Ln}2 \cdot I \\
 \rho &= \frac{\pi t}{\text{Ln}2} \frac{V}{I}
 \end{aligned} \tag{7}$$

şekinde ifade edilir. Burada k, ince bir yüzey için geometrik faktör olup ideal olmayan başka örnekler için farklı değerler almaktadır,  $k = \frac{\pi}{\text{Ln}2} = 4,532$  değeri için,

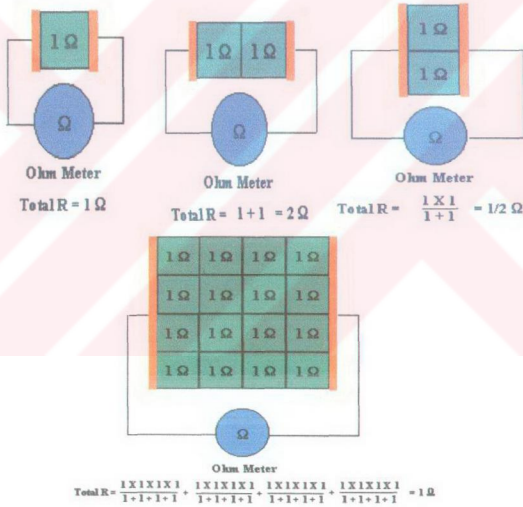
$$R = 4,532 \frac{V}{I} \text{ ohm / kare} \tag{8}$$

bulunur [28]. "Ohms Per Square" terimi bir metalin yüzey direncini tanımlamada kullanılır ve bir maddenin herhangi bir kare alanının yüzey özgül direncinin birimidir. Bu terim, bir birim kareden geçen elektronların yerdeğiştirmeye karşı direnmelerinin bir ölçüsüdür. Bu ölçüler basit bir madde parametresi olarak düşünülmüş olup belirlenen alana, uzunluğa ya da kalınlığa bağlı değildir [27].

Bu terim, Şekil-10 da gösterilen devreler yardımıyla daha iyi ifade edilmektedir ve şekillerden de anlaşıldığı gibi karenin büyüklüğü önemsenmeden direnç, daima 1 ohm değerini almaktadır. [27, 37]. Yüzeyin uzunluğu  $L$ , genişliği  $W$  olmak üzere direnç,

$$R = \rho \frac{L}{W} \quad (9)$$

özgül direnç,  $\rho = \frac{W}{L}$  olarak yazılabilir.  $W = L \Rightarrow (1 \text{ kare})$  ise  $R = \rho$  olur.



Şekil-4

## 2. KAPLAMA TEKNİKLERİ

### 2.1. Kaplama Teknikleri

Cam yüzeylerini kaplamak için kullanılan yöntemler; kimyasal buhar kaplama (CVD), fiziksel buhar kaplama (PVD), termal buharlaşma, reaktif termal buharlaşma, sol-jel, sprey piroliz, reaktif dc magnetron sıçratma şeklinde sıralanabilir.

Buhar kaplama, buhar ortamında maddelerin bir katı madde formuna, kimyasal reaksiyon ya da dönüştürme yoluyla yoğunlaştırılmasıdır [2]. Bu teknik bir kaplama sistemi içinde yapılı ve iki tip buhar kaplama vardır, bunlar fiziksel buhar kaplama (PVD) ve kimyasal buhar kaplama (CVD) dir [40].

CVD yönteminde, ısıtıldığında ya da karıştığında reaksiyon oluşturarak başlangıçtaki kaplama malzemesinin kimyasal formülünü değiştirip yeni bir kimyasal formül ile taşıyıcı altlık üzerinde, katı fazda bir kaplama oluşturulmaktadır. CVD mekanizması, hacim içindeki kütle transferi, gaz-faz reaksiyonları (homojen), yüzeye kütle taşıma, yüzeyde absorplanma, yüzey reaksiyonları (heterojen), yüzeyden göç, kaplama öğelerinin birleşmesi ve altlık üzerinde kaplama oluşumu gibi kısımları içermektedir [2]. Kaplama sisteminin girişine oda sıcaklığında reaktant gazları (ısıtılarak akışkanlaştırılmış taşıyıcı gaz) uygulanır. Gaz karışımı kaplama yüzeyine yaklaşırken ısıtılır ve bir ısıtılmış altlık yüzeyi üzerinde kaplama oluşur [2].

Vakum kaplama tekniği olarak bilinen PVD, kaplanma işleminde kullanılan maddenin buharlaşana kadar ısıtılması ve sonra soğuk altlık yüzeyi üzerinde katı fazda ince bir kaplama oluşturulması işlemidir. PVD, maskelenmiş bölgeler üzerine ve aynı zamanda bütün nesne üzerine kaplanan, temiz ve kuru bir kaplamadır [41]. Başlıca PVD yöntemleri, iyon kaplama, iyon aşılama, lazer ile yüzeyde meydana getirilen metal alaşımıdır [2].

Termal buharlaşmada, yüksek sıcaklıkta buharlaşmış olan madde içeren bir sistemde, dayanıklı ısıtma ya da iyon bombardımanı ile kaplama yapılmaktadır [2]. Benzer şekildeki reaktif termal buharlaşma ise kaplama sırasında kaplama sistemi içine oksijen konulmasıyla oluşmaktadır [2].

Sol-Jel tekniğiyle yapılan kaplama ile cam yüzeyin dayanıklılığının artırılması sağlanır. Sol-Jel tekniğinde, kaplama yapılacak numune, çözeltiyi batırılarak üzerinde ıslak bir tabaka oluşması sağlanır ve numune üzerinde oluşan bu çözücünün buharlaşmasıyla kaplama işlemi tamamlanmış olur. Sol-Jel kaplamayla, cam yüzeydeki mikroçatlaklar doldurulur, çatlak uçlar kaplama solüsyonuyla kapatılır.

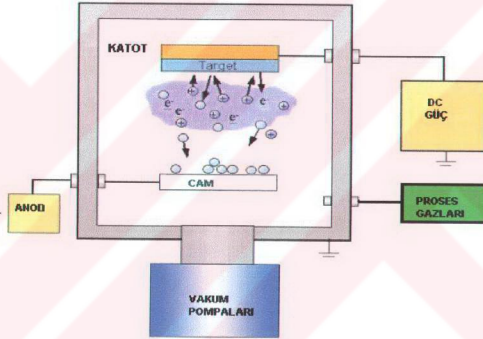
Spray piroliz yönteminde, püskürtme işlemi yapılarak bir cam yüzeyi kaplanır. Spray piroliz kaplamanın özellikleri, sprey solüsyonunun birleşimine ve altlığın pozisyonuna bağlıdır. Spray piroliz kaplama, oldukça hızlı olarak ( $>1000 \text{ A}^0/\text{sec}$ ) vakumda yapılmaktadır [2].

Reaktif dc magnetron sıçratma tekniği ile yapılan kaplama işleminde, sıçratılacak olan hedef madde ve altlıktan oluşan, güç kaynağına bağlı, vakum içeren kapalı sisteme, magnetik alan uygulanmasıyla ve gaz ilavesi yapılmasıyla, hedefteki parçacıkların pozitif iyonlarla vurularak sıçratılması sonucu, altlık yüzeyi üzerinde ince bir katman oluşturulmaktadır. Bu çalışmada reaktif dc magnetron sıçratma tekniği kullanıldığından, sıçratma tekniği daha ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.



## 2.2. Sıçratma Tekniği

İlk kez 150 yıl önce tanımlanmış olan sıçratma (Sputtering) tekniği, 1852 yılında W. R. Grove, 1858 yılında Plücker tarafından yüzey kaplama çalışmaları sırasında kullanılmıştır [18]. Asıl adı Spluttering olan terim, yazıcı hatası olarak bilimsel literatüre sputtering olarak geçmiştir [18]. Sıçratma sistemi içinde, hedef (target) maddenin parçacıklarının ortamdaki gaz iyonlarıyla bombardıman edilmesi sonucu hedef yüzeyden parçacıkların atılmasıyla, taşıyıcı altlık (cam) üzerinde ince bir katman oluşturulması işlemine sıçratma tekniğiyle kaplama denir.



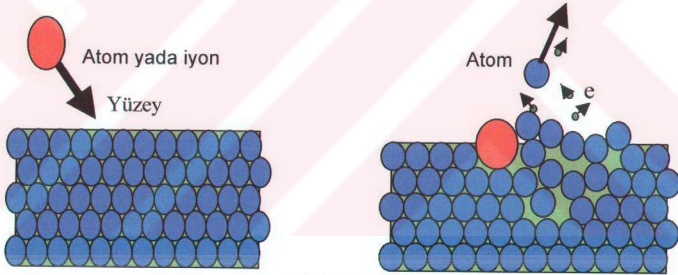
Şekil-5

Hedef maddenin yüzeyine gelen iyon, madde içinde atomik ve elektronik etkileşimlere uğrar ve bunun sonucu hedef maddeden altlığa parçacık geçişi olur. Sıçratma işlemi, sistem içinde bombardıman edilen gaz iyonlarının hedefdeki parçacıklar ile çarpışma yaparak momentum transfer etmesi sonucu oluşan mekanik bir işlemdir [19]. Sıçratma sistemi, hedef (katot) ve bir altlık tablasından (anot) oluşmaktadır. Sıçratma sistemi içindeki elektrik alan, plazmada kullanılan gazın pozitif iyonlarını ve gaz atomlarıyla çarpışan elektronları ivmelendirir [2]. Bu yüklü parçacıklar elektrik alan tarafından hızlandırılır, elektronlar anoda doğru, gazın pozitif iyonları hedef maddeye (katoda) doğru ivmelendirir [19].

Bir iyon hedefe yaklaştığında birbirini takiben şunlar meydana gelir:

- Bir elastik çarpışma yapabilir ve yansiyabilir.
- Bir inelastik çarpışma yapabilir ve hedef içine gömülebilir.
- Hedef madde içinde yapısal düzenlemeleri yeniden oluşturabilir.
- Bu etki, hedefin atomları arasında, çarpışmalar serisine neden olabilir.

Sıçratma işlemi, atomik bilardo oyunu başlangıcında, ilk başlama topuna vurulduğu zaman oluşan saçılmaya benzetilebilir. Başlama topu gibi gösterilen uyarılmış iyonlar, hedefin atomik sıralamasında vurulabilir ve vurulan atomlar bütün doğrultularda saçılırlar.



Şekil-6

Sıçrayan atomlar, vurulana ve altlık yüzey üzerinde yoğunlaşana kadar alan içinde gezinecektir [2]. Çarpışan iyonlar genellikle bazı atomik alanlarda hedefin içine girerler ve burada momentumlarını adım adım kaybederler. Bazı özel yönlerde atomlar arka arkaya çarpışırlar, bu yönler atomik çaplar ve uzaklıklar arasındaki orana bağlı olup özel bir aralıktadır [18]. İyonların kinetik enerjisinin yaklaşık % 95'i hedefteki örgü titreşimlerinin uyarılması için kullanılır, sadece % 5'i sıçratılan parçalara transfer edilir [18].

Hedef madde içine aşılacak iyonların uzunluğu, tipik olarak 10 ve 40 nm arasındadır. Bu uzunluk, iyonların enerjisine, yüzeye geliş açısına ve iyonların kütlelerinin hedef atomlarının kütlelerine benzemesine bağlıdır [19].

Sıçratma sistemi içindeki iyonize gaz, plazmayı ifade eder. Plazma, yarı-nötr haldeki pozitif iyonların ve elektronların bir akışkanıdır. Plazma, elektriksel olarak nötr ( $n_i = n_e$ ) rastgele doğrultuda belli sınırlar içinde hareket eden serbest yüklü parçacıklardan oluşur ve maddenin dördüncü hali olarak adlandırılır [19]. Düşük basınçlı plazmada, sıçratılan atomlar altlığa doğru ilerlerken daha az çarpışma yapmaktadır. Kaplama sistemi içindeki toplam basıncın kaplama işlemine etkileri şunlardır [2]:

- Daha büyük basınç, plazma içinde daha çok sayıda parçacık oluşumuna neden olur.
- Artan parçacık sayısı, verilen dc güçte hedeften sıçratma olasılığını artırır ve bu yüzden kaplama hızı artar.
- Bununla beraber parçacıkların sayısının artması, hedeften altlığa geçiş sırasında sıçrayan parçacıkların dağılıma olasılığını artırır.

Radyo frekansı (rf) sıçratma yöntemi, pratikte iletken olmayan maddelerin kaplanmasında kullanılır [19]. R. f. güç kaynağı, plazma ve sıçratmayı meydana getirmek için hedefe yönelen ivmeli elektronlar oluşturur.

DC Magnetron Sıçratma, sıçratma sistemine magnetik alan uygulanmasıyla oluşan bir plazma vakum kaplama tekniğidir. Magnetik alan, elektronların daha çok çarpışma yapmalarına neden olmaktadır [18]. Magnetron sıçratma, yüksek kaplama hızı, düşük çalışma basıncı, düşük boşalma gerilimi ve düzgün olmayan (non uniformity) kalınlık gibi özelliklere sahiptir [19].

Reaktif sıçratma yönteminde, sıçratma sistemine gaz ilavesi yapılarak hedef maddeden farklı birleşime sahip kaplamalar elde edilmektedir. Reaktif sıçratmada, ortama oksijen gazı ilavesi yapıldığında, sıçrayan parçacıklar ortamdaki oksijenle bağ yapıp bileşik oluşturduktan sonra altlığa (cama) yapışmaktadır [19].

Hedef + Reaktif gaz (gaz tepkimesi) = Kaplama

Reaktif dc magnetron sıçratma tekniğinde, dc magnetron sıçratma tekniğinin uygulandığı sisteme gaz ilave edilerek kaplama yapılmaktadır. Bu çalışmada, sisteme argon ve oksijen gazı ilave edilmiştir. Reaktif dc magnetron sıçratma tekniğinde kullanılan üretim parametreleri ise, hedef altlık uzaklığı, geçiş sayısı, altlık sıcaklığı, hız, güç, argon ve oksijen gaz debileri şeklinde sıralanabilir. Saydam iletken kaplamalarda, minimum elektrik direnci ile görünür bölgede maksimum optik geçirgenlik optimizasyonu, kaplama sırasında kullanılan üretim parametrelerinin değişimine bağlıdır.

Sıçratma işleminin verimliliği, hedefin yapısına, iyonların oluşumuna, iyonların enerjisine, yüzeye geliş açısına bağlıdır. İyon yoğunluğu ne kadar çok artırılırsa, sıçratma o kadar artar [19].

Sıçratma ile kaplamanın faydaları şunlardır [18] :

- Çok bileşenli kaplamalar, yalıtkanlar yansıtıcı maddelerle kaplanabilir.
- İyi yapışma elde edilir.
- Kalınlık değişmezliği geniş alanlarda elde edilebilir.
- Kaplama kalınlığı kaplama süresiyle orantılıdır.
- İyon bombardımanı ile, altlık temizlenmesi mümkündür.

Dezavantajları ise [18] ;

- Kaynak madde levha şeklinde olmalıdır.
- Kaplama hızı genellikle  $40 \text{ A}^0 \text{ s}^{-1}$  in altındadır.
- Altlık kısa süreli kullanımlar hariç soğutulmalıdır.

Sinterleme, malzeme üretme yöntemidir, bu çalışmada hedef madde olarak kullanılan katkılı ITO bu yöntemle üretilmiştir. Sıçratma yöntemi ile kaplamada, sıçratılacak hedef maddenin doğru seçilmesi gerekmektedir. Oksit hedefler için önemli noktalar şunlardır; kaplama hızları düşüktür, yalıtıcı (ayırıcı) katmanlar mevcuttur ve oksijen iyonları hedeften ivmelenmektedir [19]. Metal hedef uygulamalarındaki önemli noktalar ise şunlardır; kaplama hızları yüksektir, altlıkta iyi bir kaplama elde etmek için reaktif gazın iyi kontrol edilmesi gerekir ve gaz debisi ile sıçratma ayarlanmaktadır [19]. Altlık sıcaklığı, önemli ölçüde kaplamanın elektrik ve optik özellikleri üzerinde etkilidir. Kaplama sırasında altlık sıcaklığı, sıçratılan iyonlar tarafından yapılan bombardıman ile artar.

Sıçratılan maddenin iletkenliği, altlık sıcaklığının artışıyla artar. Optik geçirgenliğinin artışı, altlık sıcaklığının artışıyla kaplama kristallüğünün düzeltilmesine bağlıdır. Kaplama hızı, verici konsantrasyon ve kaplama sıcaklığı ile artar, hedef ile altlık arası uzaklık arttıkça azalır [2].

Kaplama işleminde verimliliği artırmak için kaplama yapılmadan önce altlık yüzeyi üzerindeki kirli, pürüzlü yüzeyler temizlenmelidir. Bu çalışmada kullanılan kaplama malzemeleri ve kalınlıkları bilgisayar ortamında hazırlanmış modelleme programlarıyla belirlendikten sonra, fiziksel kaplama çalışmaları yapılmaktadır. Kaplama işlemi sırasında, tavlama (annealing) işleminden de yararlanılmaktadır. Tavlama bir ısıtma işlemidir. Tavlama, bir zaman periyodunda, ısıtılan madde içinde değişiklik yaratmayı amaçlayan bir işlemdir ve yapıyı düzeltmektedir [2, 4]. Isıtma işlemi ile kristal örgüdeki zararlar onarılır ya da katkı atomlarının harekete geçirilmesi sağlanır [39].

### 3. ÖLÇÜM TEKNİKLERİ

Kaplamalı camların belirlenebilen özellikleri; kristal yapısı (stokiyometrik), kristal yönelimi, kalınlık, yoğunluk, kırılma indisi, band genişliği (saydamlık), özgül direnç (iletkenlik), sertlik, büyüme hızı şeklinde sıralanabilir [19]. Yüzey direnci dört nokta probuyla, kristal yapısı x-ışın kırınımıyla, taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ya da atomik kuvvet mikroskopisiyle (AFM), boşluk hareketliliğini ve taşıyıcı konsantrasyonu Hall-Efect ölçümleriyle, geçirgenlik görünür bölge içinde bir çift ışın demet tipli Perkin Elmer spektrometresiyle ya da UV-görünür-yakın IR spektrometresiyle, kalınlık ise stylus profilometer ya da Tencor Alpha Step 500 yardımıyla belirlenebilir [5, 8]. Bu çalışmada katkılı ITO ile kaplanan camın belirlenen özellikleri ve bunun için kullanılan aletler ayrıntılı olarak aşağıda verilmektedir.

#### 3.1. Geçirgenlik ve Yansıtma Ölçümleri

Spektrofotometre ile kaplamalı, kaplamasız camların geçirgenlik ve yansıtma değerleri ölçülmektedir. Geçirgenlik ve yansıtma değerlerinden yola çıkılarak camların optik özellikleri ve performansları hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada spektrofotometrik ölçümler, bilgisayar kontrollü çift ışınlı, çift monokromatörlü PE Lambda 900 marka spektrofotometre cihazı ile yapılmaktadır. Bu cihaz spektrumun mor ötesi (UV), görünür bölge, yakın IR bölgelerde 185-3200 nm dalgaboyu aralığında % ışık geçirgenliği, % kaplama tarafı yansımaları, % cam tarafı yansımaları ve % absorpsiyon ölçüm değerlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Geçirgenlik ya da yansıtma değeri belirlenecek cam spektrofotometrenin giriş kısmına yerleştirilir ve bilgisayar ekranından geçirgenlik ve yansıtma değerleri okunur.

#### 3.2. Kalınlık Ölçümü

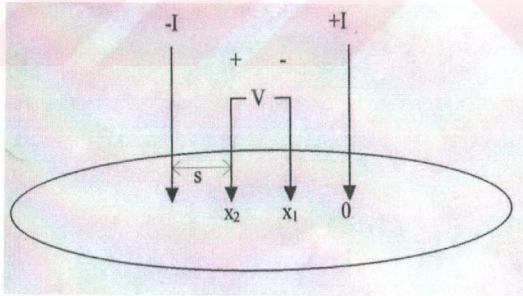
Kaplama kalınlığının ölçümünde, Tencor Alpha Step 500 marka, bilgisayar kontrollü yüzey profil cihazı kullanılmaktadır.

Bu cihaz değişik uygulamalara yönelik olarak, yüzey pürüzlülüğünü, yüzeydeki dalgalanmaları ve kaplamalı ile kaplamasız yüzeyler arasındaki adım yüksekliğinin belirlenmesinde kullanılabilir. Sistem, ana cihaz, monitör, klavye ve bilgisayar olmak üzere 4 birimden oluşur. Sistemin çalışma prensibi, iğne şeklindeki probun yüzey üzerinde yatay hareket etmesi ve yüzeyin mekanik olarak izlenmesine dayanmaktadır. Probun yatay ve aşığı yukarı hareketleri optik olarak izlenerek bilgisayarda değerlendirilmekte, grafik ve nümerik sonuçlar elde edilebilmektedir.

Yüzeyi alkolle temizlenmiş cama, kaplama yapılmadan önce keçeli kalemle bir çizik atılır, kaplama yapıldıktan sonra bu çizik silinir ve bilgisayar yardımıyla, oluşan bu derinliğin ölçülmesiyle kalınlık belirlenmiş olur.

### 3.3. Yüzey İletkenliği Ölçümü

İletkenliğin belirlenmesinde kullanılan teknikler, van der Pauw metodu, dört nokta prob metodu, TLM metodu şeklinde sıralanabilir. Bunlar arasından dört nokta probu en yaygın olarak kullanılanıdır [2]. Bu çalışmada, katkılı ITO kaplamalı camın yüzey direncinin ölçümü dört nokta probu ile yapılmaktadır.



Şekil-7

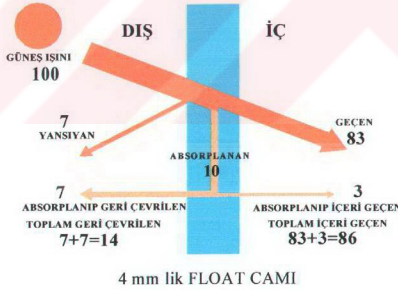
Dört nokta probu, eşit uzaklıkta dört tungsten metal uç, test altındaki malzeme ile kontak kurmak için yapılan proplar ve bunların yer aldığı sonlu bir alandan oluşur. Her bir uç ölçüm sırasında, örnek malzeme üzerinde oluşabilecek tahribatları azaltmak için yaylarla desteklenir. Tipik prop aralığı yaklaşık olarak bir milimetredir [28]. Akım kaynağı, dıştaki iki prop içinden geçecek akımı temin eder. İdeal olarak herhangi bir akım kaçağı olmadan, akım dış proplar arasından akar ve potansiyel farkı içteki iki prop arasında ölçülür. Dört nokta probu ile ölçüm metodu, direnç değerlerini belirlemek için kolay ve elverişli bir aletse de metodun doğruluğu, numunenin şekline ve boyutuna bağlıdır [2, 28].





#### 4. OPTİK ORTALAMALAR

Camin yansıtması ve geçirgenliğinin dalgaboyuna bağlı bir değişim gösterdiğini ve bunun bir spektrofotometre yardımıyla ölçüldüğü belirtilmiştir. Bir camın, ışık ve ısı ışınları üzerindeki genel etkisi söz konusu spektroskopik ölçüm değerlerinin ağırlıklı ortalamasıyla standardize edilmiştir. Bu ortalamalar, ışık için söz konusu ortalamalarda ( $T_{vis}$ ,  $R_{vis}$ ) kullanılan ağırlık katsayıları, insan gözü duyarlılığına göre belirlenmiş, 380 ile 780 nm arasındaki dalgaboylarında geçirgenlik değerleri değişen, 550 nm'de en yüksek değerini alan duyarlık fonksiyonundan alınır. Belirli dalga boyu aralığında ölçülen geçirgenlik ve yansıtma değerleri ile ISO 9050, EN 410 (Avrupa normu) standartlarının belirlediği katsayılar yardımıyla, bir yüzeyin belirli dalgaboyu aralığındaki ortalama ışık geçirgenliği ve yansıtma değerleri hesaplanabilmektedir. Standartlar tarafından belirlenen katsayılar, güneş ışığının yeryüzüne geliş açısı, havanın kütlesi ve saçılmalar hesaba katılarak belli dalgaboyu aralığındaki değerler için hesaplanmıştır.

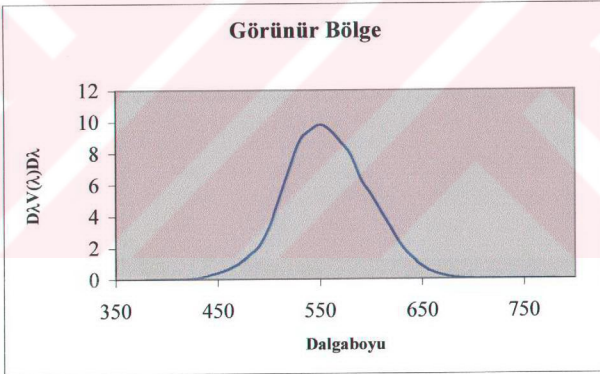


Şekil-8: Kaplanmamış düz camın (float cam) geçirgenlik ve yansıtması

CIE (International Commission on Illumination), aydınlatma ile ilgili uluslararası bir komisyon olup, ışık veren herşey ile ilgili olarak bir standart belirlerler. CIE tarafından belirlenen çeşitli standartlardan  $D_{65}$ , güneş ışığına yakın bir sıcaklıktaki aydınlatma ya da iluminant değeri olup 6500 K sıcaklıkta bir cismin verdiği aydınlatmayı ifade etmektedir.

Bu çalışmada yapılan hesaplamalarda kullanılan katsayılar,  $D_{65}$  aydınlatmasına göre alınmıştır. Aydınlanmanın bağıl spektral dağılımı  $D_\lambda$ , insan gözünün spektral duyarlılığı  $V(\lambda)$ , 380 ile 780 nm arasındaki görünür bölge dalgaboyu aralığı  $\Delta\lambda$ , camın görünür bölge geçirgenliği  $T$ , görünür bölge yansıtma değeri  $R$  olmak üzere camın, görünür bölgedeki ortalama geçirgenlik ve yansıtma ( $T_{vis}$ ,  $R_{vis}$ ) değerleri (10) ifadeleri kullanılarak hesaplanmaktadır [31,32].

$$T_{vis} = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} D_\lambda T(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda} \quad R_{vis} = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} D_\lambda R(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (10)$$



Şekil-9

ISO 9050, EN 410 standartlar tarafından belirlenen tablolardan alınan  $D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda$  değerleri, 380 ile 780 nm arasındaki görünür bölge içindeki tüm dalgaboylarında aynı değildir, uçlara doğru gidildiğinde sifıra yaklaşmaktadır (Şekil-9). Söz konusu eğri, insan gözünün ışığa duyarlılığını yansıtmaktadır. İnsan gözü, görünür bölgede, 380 ile 780 nm'lik bir dalgaboyu aralığında duyarlıdır ve en duyarlı olduğu dalgaboyu değeri ise 550 nm dir.

Isı için söz konusu ortalamalarda ( $T_s$ ,  $R_s$ ) kullanılan ağırlık katsayıları için birden fazla fonksiyon tanımlanmıştır. Atmosferik koşullara bağlı çeşitlilik gösteren 300 ile 2500 nm dalgaboyu aralığındaki solar bölgede (güneş enerjisi aralığı), geçirgenlik ve yansıtma değerleri için iki tane ISO 9050 Tablo-2 ve Tablo-3 ile bir EN 410 standart tabloları bulunmaktadır [31, 32]. Solar radyasyonun spektral dağılımı  $S_\lambda$ , solar bölge dalgaboyu aralığı  $\Delta\lambda$ , solar bölge geçirgenliği T, solar bölge yansıtma değeri R olmak üzere, camın solar bölgenin ortalama geçirgenlik ve yansıtma değerleri ( $T_s$ ,  $R_s$ ) denklem 11 ile ifade edilmektedir [31, 32].

$$T_s = \frac{\sum_{\lambda=300}^{2500} S_\lambda T(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300}^{2500} S_\lambda \Delta\lambda} \quad R_s = \frac{\sum_{\lambda=300}^{2500} S_\lambda R(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300}^{2500} S_\lambda \Delta\lambda} \quad (11)$$

Kaplamalı camın bir diğer optik özelliği ise kaplanan maddeye bağlı olarak bir renge sahip olmasıdır. Aydınlanmanın bağlı spektral gücü  $S_\lambda$ , renk uyum fonksiyonları  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ , yansıtma değeri  $R_\lambda$ , normalizasyon katsayısı k olmak üzere, belirli bir aydınlatma değeri esas alınarak görünür bölge içindeki renk koordinatlarının hesaplanması 12 denklemi ile ifade edilmektedir[35]. Yansıtma yerine geçirgenlik değeri de alınabilir. Spektrumda yer alan her rengin bir RGB (red, green, blue) kodu ve mutlak koordinatları (x, y, z) vardır. Örneğin bir bilgisayar içinde, renk vericiden alacağımız renklerin koordinatları başka bilgisayarda farklı tanıtılmıştır.

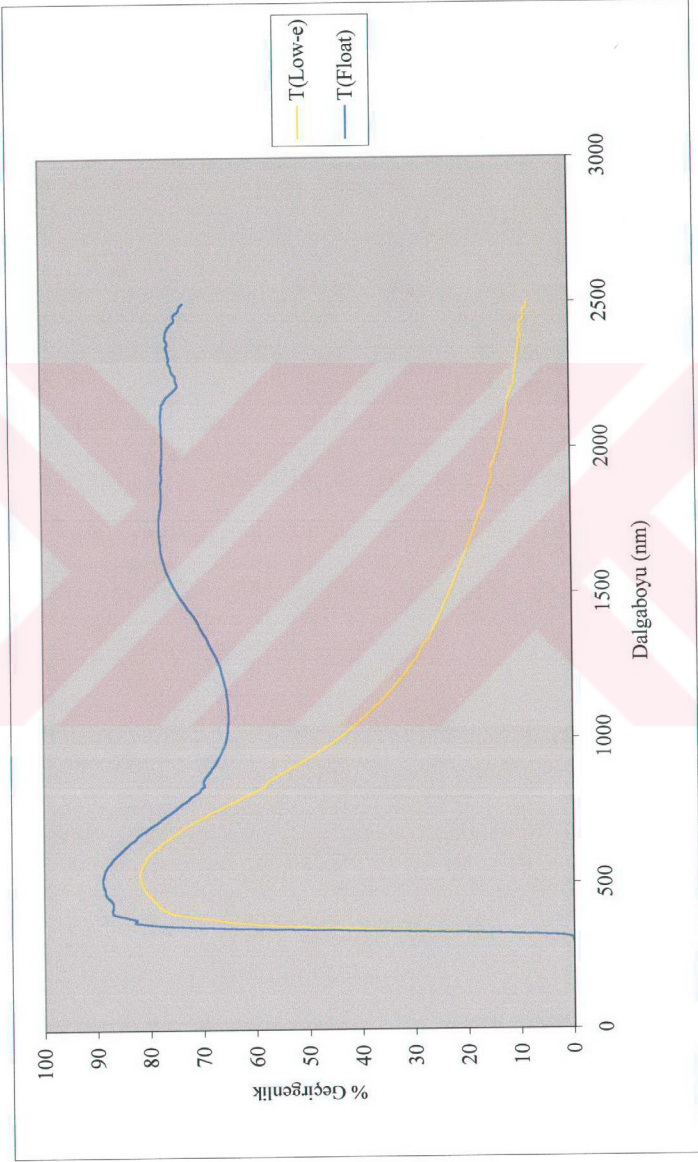
$$\begin{aligned} X &= k \sum_{380}^{780} R_{(\lambda)} S_{(\lambda)} \bar{x}_{(\lambda)} \\ Y &= k \sum_{380}^{780} R_{(\lambda)} S_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} \\ Z &= k \sum_{380}^{780} R_{(\lambda)} S_{(\lambda)} \bar{z}_{(\lambda)} \\ k &= 100 / \sum_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} \end{aligned} \quad (12)$$

Türkiye Şişe Cam İşletmelerine ait Trakya Cam Fabrikalarında üretilen, 8 mm kalınlığındaki Tr- Clear cam olarak adlandırılan kaplanmamış float cam üzerine toplam kalınlığı yaklaşık 80 nm tutan, kalay, nikel-krom, gümüş, kalay olarak sıralanan katmanların kaplanmasıyla oluşturulan, yine bir şişe cam ürünü olan low-e camın 300 ile 2100 nm arasındaki dalgaboylarındaki geçirgenlik ve yansıtma değerleri Şekil-10 ve 11 de karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Bu karşılaştırma ile cam üzerine yapılan kaplamanın etkisi ortaya konmaktadır.

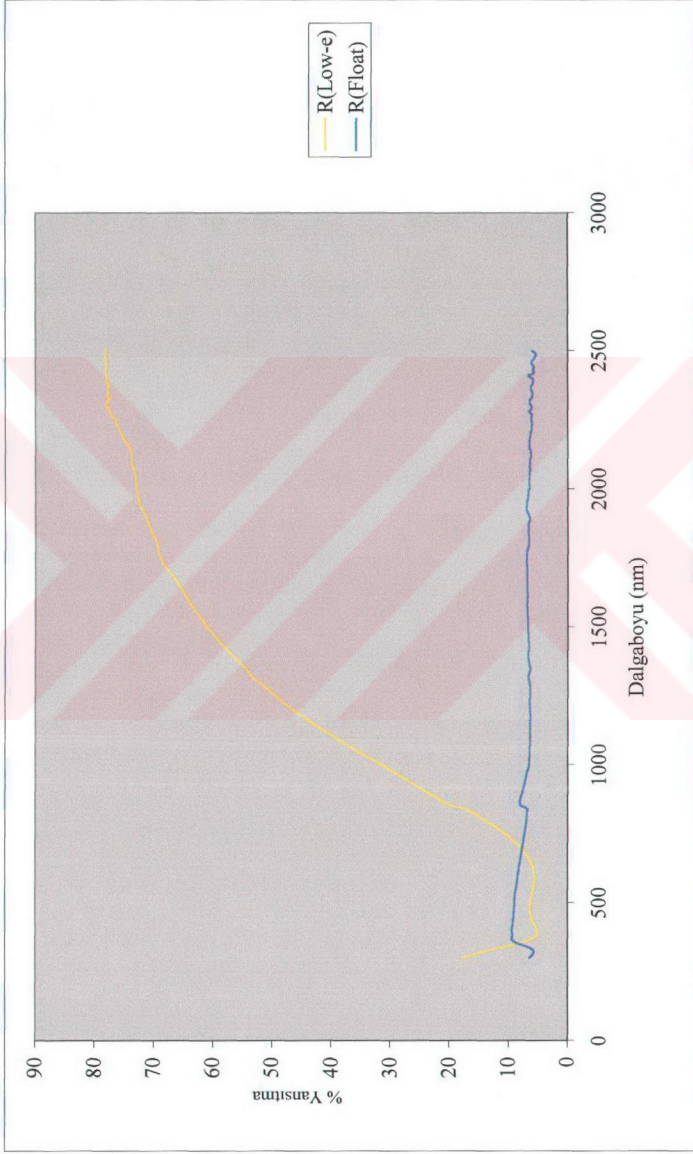
Grafiklerden görüldüğü gibi, kaplamalı camın % geçirgenliği kırmızı-altı bölgede büyük ölçüde azalmaktadır. Böylece ısıya karşı camın geçirgenliği düşürülmüş olmaktadır. Isı geçirgenliğinde sağlanan bu düşüş, görünür bölge ışık geçirgenliği de 8 birimlik bir düşüşe yolaçmaktadır. Ancak bu geçirgenlik kabul edilebilir bir değerdir.

Tablo-1: 8 mm kalınlığındaki TR-Clear cam ile kaplamalı Low-e cama ait görünür ve solar bölge % ortalama geçirgenlik ve yansıtma değerleri.

Görünür Bölge		$T_{Tr-Clear}$	$T_{low-e}$	$R_{Tr-Clear}$	$R_{low-e}$
		87,65	80,98	8,67	5,84
Solar Bölge	ISO 9050 Tablo-2	76,68	57,65	7,73	23,11
	ISO 9050 Tablo-3	77,73	61,47	7,73	19,98
	EN 410	77,52	60,51	7,79	20,30



Şekil-10: Float ile low-e camin geçirgenliğinin dalgaboyu ile değişimleri.



Şekil-11: Tr-clear ile low-e camın yansıtmasının dalgaboyu ile değişimleri.

## 5. SAYDAM İLETKENLER

### 5.1. Saydam İletkenler

Saydam iletkenler ile ilgili ilk çalışma, 1907 yılında kadmiyum oksitin incelenmesi ile başlamıştır [1]. Bugün bilinen saydam iletkenler, atomik düzeni belli olmayan kalay, indium, çinko vb. oksitler ve onların çeşitli alaşımlarıdır [2]. Alüminyum çinko oksit, indium kalay oksit, kalay oksit gibi metal oksitler düşük elektrik direncine, metalik iletkenliğe yakın bir iletkenliğe, 400 ile 700 nm arası görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahip yarıiletkenlerdir. Saydam iletken malzemeler, elektrik iletken ve optik geçirgen yapıya sahiptirler. Genelde iletkenler saydam değildir, saydamlar da iletken değildir. Enerji skalasında, fotonların absorplanabileceği düşük enerji aralığına sahip olan maddelere iletken, enerji aralığı geniş olan, fotonların absorplanmadan geçtiği maddelere ise saydam denir. Saydam iletkenlerde iletkenlik ( $>10^3 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) ve geçirgenlik, katkılama yapıldığında yerine geçen vericilerle ya da mevcut girişler sayesinde dejenere olan, geniş bandaralıklı ( $>3 \text{ eV}$ ) yarıiletken oksitlerin seçimi ile sağlanmaktadır [1].

Teknolojide önemli bir yere sahip olan saydam iletkenlerin tipik uygulamaları; yansımaz (anti-reflect) kaplamalar, saydam elektrotlar, görüntü sensörleri, düz panel görüntü aletleri, foto diodlar, foto transistörler, laserler, sıvı kristal ekranlar, güneş pilleri, LCD (likit kristal görüntüleme) ve elektrokromik (gerilime bağlı renk değiştirici) görüntüler, plazma görüntüleme, ısı yansıtıcı aynalar, enerji tasarruflu mimari pencereler, buhu giderici uçak ve araba camları, ısı yansıtan kaplamalar, ışıklı ampül etkinliğini artırmak için gaz sensörleri, sıvı kristal ekranların piksel elektrotları, OLED (Organik Light Emitting Diod) ve piezoelektrik aletler şeklinde sıralanabilir [2, 3, 5, 17, 30].

Bu çalışmada kullanılan kaplama malzemesi ITO olduğundan daha ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Ayrıca bir alternatif olan AZO içinde ayrıntılı bilgi verilmiştir.

## 5.2. ITO

İndium kalay oksit (ITO), indium oksitin kalayla katkılanırılması sonucu oluşur. Kırılğan, pahalı, az zehirli ve saydam iletkenler içinde oldukça iletken bir maddedir [29]. 1960'lardan bu yana incelenen ITO, n-tipi, geniş band aralıklı, dejenere bir yarıiletken oksittir [1, 3, 5, 6, 29, 38].

Tablo-2

ITO' nun Özellikleri	
Optik band genişliği	(3.3-4.3) eV
Düşük elektriksel özgül direnç	$(2 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4}) \Omega \text{cm}$
Yüksek optik geçirgenlik	$\geq \% 85$
Görünür soğurma katsayısı	$\sim 0,04$
Erime Noktası	$\sim 1900 \text{ }^\circ\text{C}$
Renk	$\sim$ Parlak sarıdan griye, oksitlenme derecesine bağlı
Kristal Yoğunluk	$\sim 7.14 \text{ g/cm}^3$

Yarıiletkenlere, eşit sayıda iletim elektronu ve boşluk (hole) içeren saf yarıiletken katılarak bant yapılarının ve dirençlerinin değiştirilmesi işlemine katkılama denir. Katkılama, malzeme yapımında ve farklı iletkenlik bölgelerine sahip yarıiletkenler oluşturmada önemlidir. Çok küçük bir miktarda katkı, bir yarıiletkenin iletkenliğini büyük ölçüde değiştirebilir. Yarıiletken malzemelerden, örneğin  $10^9$  kısım germanyumda bir verici katkı, iletkenliği yaklaşık olarak  $10^3$  çarpanıyla artırır [24].

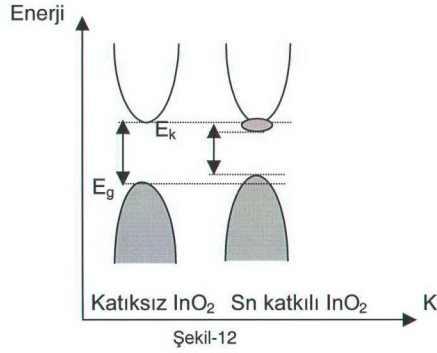


Elektron vericiliğinin baskın olduğu, elektron sayısının boşluk sayısını aştığı katkılı iletkenlere n-tipi yarıiletken adı verilir. ITO'nun elektriksel iletkenliği, indium oksit örgüsü içindeki indiuma kalay katkılanmasına bağlıdır, katkılama ile indium oksitin elektrik iletkenliği büyük ölçüde iyileştirilir [17]. Bunun nedeni, katkılama yapıldığında indiumun örgü yapısı üzerinde, kalayla indiumun yerdeğiştirmesi sonucu oluşan serbest elektronlardır. İndium oksitle kalay katkılı olduğunda kalay, normalde yasak olan iletim bandının hemen altında enerji düzeyleri oluşturur. Bu düzeylere verici düzeyler, iyonlaşmış durumdayken iletkenlik bandına bir elektron veren kalaya verici atom, katkılama sonucu oluşan ITO'ya ise n-tipi yarıiletken adı verilir.

ITO içinde elektriksel iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları genelde iki mekanizma sonucu oluşmaktadır. Bunlardan birincisi, oksijen boşluklarının taşıyıcı olarak iki elektron oluşturması, diğeri ise kalay atomunun indium'un yerine geçmesiyle ekstra bir elektron daha oluşturmasıdır. İndium oksite kalay katkılı olduğunda indium oksit (3)'ün kübik yapısından dolayı  $In^{+3}$  atomlarının yerdeğiştirdiği kalay, oksijenle bağ yapar ve  $SnO$  ya da  $SnO_2$  oluşur [2, 7]. Kalay sırasıyla +2 ya da +4 valans elektronuna sahiptir, değeri ITO'nun ( $In_2O_3:Sn$ ) iletkenliği üzerinde doğrudan etkilidir. İletkenliği azaltan ve bir tuzak gibi davranan bir boşluk yaratıldığı için düşük valans değeri, taşıyıcı konsantrasyon içinde net bir azalma meydana getirir [2, 7]. Diğer taraftan  $SnO_2$  seviyesinin üstünlüğü, iletkenlik bandına elektron veren n-tipi verici gibi davranmasındandır, bu durumda kalayın dört, indiumun üç tane valans elektronu vardır. Kristal örgüsü bozulmadan, kalayın dört elektronundan üçü, kovalent bağlanma yaparak dengeyi sağlarlar, artan bir elektron boşta kalır [25]. Aynı şekilde kalayın çekirdek yükü, indiumdan bir fazla olduğu için, çekirdekte de fazladan bir yük artışı olacaktır.

Kristal örgü içinde bağlanma sırasında bir elektronu artan kalaya, bağlı olan  $\text{Sn}^{+4}$  iyonudur. Bu valans elektronuna hidrojen türü bir iyon gibi bakılıp bağlanma enerjisi hesaplandığında bu değer çok küçük olduğu anlaşılmaktadır [26]. Bu durumda dördüncü elektron, kalay atomuna çok zayıf bağlıdır. Oda sıcaklığında bir katı içindeki atomların ıssal titreşim hareketi, bu enerjiden daha büyük bir enerjiye sahip olduğundan zayıf bağlı elektron kolayca serbest duruma geçerek katı içinde hareket edebilmektedir [25, 26]. Böylece katkı atomlarından birer elektron katının iletkenlik bandına geçer. Bir n-tipi yarıiletkende iletkenlik, saf kristalin elektron yapısına uymayan katkı bandına çıkan fazla elektronların bir vericiden diğerine atlamasıyla sağlanmaktadır.

İletkenlik bandının hemen altında verici düzeylerin bulunması fermi enerjisini, değerlik ve iletim bantları arasındaki yasak bandın ortasının üzerine çıkarır. Fermi enerjisi, N elektronlu sistemin taban durumunda, en yüksekteki dolu olan yörünge nin enerjisi olarak tanımlanır. Elektron boşlukları elektron yoğunluğuna katkıda bulunduğu için ITO dejenere bir yarıiletken ve fermi enerji seviyesi iletkenlik bandının içerisinde yer alır, genellikle geniş bir sıcaklık aralığı üzerinde metal gibi davranır [6]. ITO'nun iletken olabilmesi için yük taşıyıcıların (serbest elektron ve oksijen boşlukları) yüksek yoğunluğunu içermek zorundadır, Şekil-12 de gösterildiği gibi değerlik bandının tepesine ve iletkenlik bandının altına yakın yerlerde elektronlar hakimdir. Enerjinin maksimumuna veya minimumuna yakın yerlerde ilgilendiğimiz ITO için dağılım eğrisini iyi bir yaklaşıklıkla parabolik olarak ifade edilir [2].



ITO, görünür ve yakın kırmızı-altı bölgede yüksek optik geçirgen bir malzemedir [5]. ITO'nun temel absorpsiyon şiddeti, genelde spektrumun mor ötesi bölgesinde yer alır ve taşıyıcı konsantrasyonun artmasıyla daha kısa dalgaboyuna doğru yönelir [2]. Saydam iletken oksitler, amorf, kristal ya da ikisinin karışımı bir yapıya sahip olabilir, bu yapı kaplama sıcaklığı ve ortam özelliklerine bağlıdır. ITO genelde oda sıcaklığında amorf, daha yüksek sıcaklıklarda kristal yapıya sahip olur [4]. ITO biriktirme şartlarına bağlı olarak kristal yönelimi gösterir, bu yönelim yapıdaki kalay konsantrasyonuna bağlıdır [9].

ITO'nun özgül direnci, hedef içindeki kalay miktarına bağlıdır. Düşük dirençli ITO elde etmeyi denerken, kalay katkılanması kontrollü olarak yapılmalıdır. Kalay, indiumun yerine geçtiğinde bir iletkenlik elektronu serbest kalır, aynı zamanda kirlilik saçılma merkezlerinin oluşmasına neden olur [9]. Bu durum taşıyıcılığın azalmasından dolayı direnç artışına neden olur. Kristal içindeki düzensizlikler (kusurlar) ve yığıntılardan dolayı saçılmalar oluşur [21].

ITO içindeki oksijen boşlukları (oksijenin bulunmadığı durumlar) ile kalayın, indiumun kristal yapısı içindeki ara bir bölgede sıkışıp kalması, kristal içinde düzensizlik yarattığından saçılmalara neden olur. En önemli saçılma merkezleri, parça-kenar (grain-boundaries), nötr ve iyonize durum kusurları (iyonize point defect) ve örgü titreşimleridir [22]. Teorik hesaplamalarla deneysel olanların uyuşması için iyonize kusurların yanında nötr durum kusurları da olmalıdır [22].

İletkenlik, elektronlarının saçılma frekansı ile ters orantılı olduğu için daha kalın kaplamaların iletkenliği, ince olanlarından daha yüksektir [20]. Serbest elektronların parça-kenar saçılmaları kalın kaplamada, ince kaplamaya oranla daha az gözlenir. Elektro-optik özellikler, metalin kristalliğinin bir fonksiyonudur [4]. Kaplamanın kristal büyüklüğü, kaplama kalınlığına bağlıdır [20]. Daha kalın kaplama, daha büyük kristal ölçülerine sahiptir. Maksimum iletkenlik ve en yüksek taşıyıcılık maksimum kristal büyüklüğünde gözlenir [21].

Vakumda çok ince kaplanan ITO, kolay çizilen bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı ITO kaplamalı bölge, bir yüzey ile temas halinde bulundurulmamalıdır [38]. Bir yüzey üzerinde ITO kaplamanın kayması da oluşan kaplamanın çizilmesine neden olmaktadır. ITO genellikle cam yada polyster altlıklar üzerine kaplanır.

### 5.3. AZO

K. Wasa tarafından 1971 yılında, r. f. magnetron sıçratma tekniği uygulamalarında kullanılan alüminyum çinko oksit (AZO), çinko oksitin alüminyumla katkılanması sonucu oluşmaktadır [16]. AZO, düşük maliyetli ve zehirleyiciliği olmaması gibi özgün özelliklerinden dolayı indium kalay oksite alternatif olarak endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [14]. Geniş band aralıklı, n-tipi, dejenere bir yarıiletken oksit olan AZO, görünür ve yakın infrared bölgede optik geçirgendir [10, 11, 29]

Tablo-3

AZO' nun Özellikleri
Yüzey Direnci $(2.10^{-4} - 4.10^{-4}) \Omega\text{cm}$
Yüksek optik geçirgenlik $> \% 85$
Optik band genişliği $(3,4-3.9) \text{ eV}$
Görünür Soğurma Katsayısı $\sim 0,05$

Çinko oksitin alüminyumla katkılanmasıyla alüminyum atomu, çinko ile yer değiştirir, oksijenle bağlanır ve iletkenliği sağlayan bir elektron açığa çıkar [12]. Diğer iletkenlik elektronları, kristal içinde oksijen atomu yokluğundan dolayı çinkonun, oksijenle bağ yapmayı taşıyıcı olarak elektron oluşturmasıyla ve çinko ya da alüminyum atomlarının kristal içinde ara bir bölgeye (interstitial) sıkışmasıyla oluşmaktadır [12]. Çinko oksit katıksız olduğunda, zayıf n-tipi bir yapıya sahiptir [14]. Çinko oksitin alüminyumla katkılanmasıyla alüminyum, iletim bandının hemen altında verici düzeyler oluşturur.

Çinko oksitin alüminyumla katkılanması sonucu, elektrik iletkenliği büyük ölçüde iyileştirilir [14]. Bunun nedeni, katkılanma yapıldığında çinko örgü yapısı üzerinde, alüminyumla yapılan birleşme sonucu oluşan serbest elektronlardır. Katkılama ile AZO, tipik olarak oda sıcaklığındaki yaklaşık olarak  $10^{20}\text{cm}^{-3}$  serbest elektron konsantrasyonu ile kuvvetli bir n-tipi yarıiletken yapısına sahip olur [14]. Alüminyum katkılama konsantrasyonu, yapı içindeki Al ve Zn belirleyicilerinin molar oranlarının değiştirilmesiyle ayarlanabilir [15]. Katkılama etkisi, AZO içindeki serbest elektronların alüminyum konsantrasyonuna oranıdır ve kaplama içinde elektrikçe aktif olan alüminyum atomlarının miktarını ifade eder [20]. En yüksek taşıyıcı hareketlilik değerleri, yaklaşık olarak % 2-3 alüminyum katkılamada gözlenmektedir, bu durum ZnO örgüsü içinde alüminyumla yapılan birleşmenin limitlendirilmesiyle açıklanmaktadır [21].

Düşük dirençli AZO elde etmeyi denerken, alüminyum katkılaması kontrollü olarak yapılmalıdır. AZO içindeki yüksek alüminyum konsantrasyonu, serbest elektron konsantrasyonunu daima artırmaz. Fazla miktardaki Al atomları, ZnO içindeki alüminyumun çözünübilirliğinin sınırlanmasından dolayı, kalay oksit kristali içinde doğru yerleri işgal etmeyebilir ve kristal yapıda biçimsizliklere neden olur. Alüminyum, çinkonun yerine geçtiğinde bir iletkenlik elektronu serbest kalır, aynı zamanda kirlilik saçılmalarının oluşmasına neden olur. Nötr ve iyonize durum saçılmaları, AZO'nun serbest elektron sayısını azaltır [22].

AZO, polykristal altigen wurtzite kristal yapısına sahiptir [12]. Wurtzite yapı, çinko sülfid (ZnS), yaygın olmayan bir mineral olup koyu kahveden siyaha doğru bir renktedir. AZO, biriktirme şartlarına bağlı olarak kristal yönelim gösterir. C eksen yönelimli AZO'nun kristal yönelimi, c ekseni boyunca altlık yüzeyine diktir [12].

AZO'nun elektrik özellikleri, alüminyum katkılama konsantrasyonuna, oksijen boşluklarına, Al ve Zn atomlarının yapı içinde ara bir yerde (interstitial) sıkışıp kalmalarına, parça-kenar (grain-boundary), iyonize kirlilik saçılmalarına ve kristal yapısına bağlıdır [12, 15, 23].

AZO yüksek hızlı, tek tip, geniş bölgeler üzerinde fiyat azaltması gibi özelliklerden dolayı sıçratma tekniği kullanılarak cam, soda-kireç cam, polyester gibi altlıklar üzerine kaplama yapılır [13]. AZO ile yapılan kaplamaların yapısı çok düz ve yumuşaktır [11].

## 6. DENEY

### 6.1. Amaç

Deneyin amacı, yüksek optik geçirgenliği ve yüksek elektrik iletkenliği birlikte sağlayan bir kaplamanın, üretim parametrelerini belirlemektir. Bu çalışmada görünür bölge geçirgenliği  $T_{vis}$ , yüzey direnci  $R$ , özgül direnç olarak da  $\rho$  kullanılmıştır. Bu optik ve elektrik parametrelerinin bağlı olduğu üretim parametreleri ise 2.2 de belirtildiği gibi hedef altlık uzaklığı, geçiş sayısı, hız, güç, argon ve oksijen gazı debileridir.

### 6.2. Uygulama

Bu çalışma, katkılı ITO hedef kullanılarak sürdürülmekte olan deneysel çalışmaların ön çalışması olarak yapılmış, toplam 62 değişik kaplama içeren deneylerle ilgili sonuçları içermektedir. Deneyler, reaktif dc magnetron sıçratma tekniğinin uygulandığı Balzers marka kaplama cihazı ile yapılmıştır.

Deneylerde geçiş hızı, geçiş miktarı, argon debisi, oksijen debisi ve güç parametrelerinden ilk üçü sabit tutulmuştur. Tüm deneyler, argon debisi 30 sccm'de, taşıyıcı geçiş hızı 0,2 m/dak da sabit tutularak, dört geçiş sonucunda elde edilmiştir. Standart akışı ifade eden sccm (standart cubic centimeters per minute) birimi, 0 °C da, atmosferik basınçta, dakika başına, 1 cm<sup>3</sup> hacmindeki gaz akışına eşittir [46]. Ölçülerde güç, 0.5 kW dan 1 kW ta kadar 0,1 kW lık artışlarla artırılmış, bazı örnekler için 1 kW dan büyük güçler de kullanılmıştır.

Deneylerde, oksijen debisininin 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, ile 2,5 sccm değerlerinin herbiri için güç, 0.5 kW dan başlayarak 1 kW a kadar 0,1 kW lık artışla değerler seçilerek toplam 25 deney yapılması planlanmış, daha sonra bazı oksijen debilerinde, daha yüksek güç değerleri için de deney yapılarak, deney sayısı 45 e ulaştırılmıştır.



Elde edilen kaplamaların tüme yakınının yüzey dirençleri için deneyin ilk ölçümünden yaklaşık 100 saat sonra bir kez daha ölçüm yapılmıştır. Kaplamalı camın geçirgenlik ölçümü, 380 ile 780 nm arası görünür bölge içinde 10 nm lik artışlarla izlenmiştir. Üretim parametrelerinin kalınlık, geçirgenlik ve dirençle olan ilişkisi belirlendikten sonra geçirgenlik ve direnç değerlerinin kalınlığa nasıl bağlı oldukları incelenmiştir.

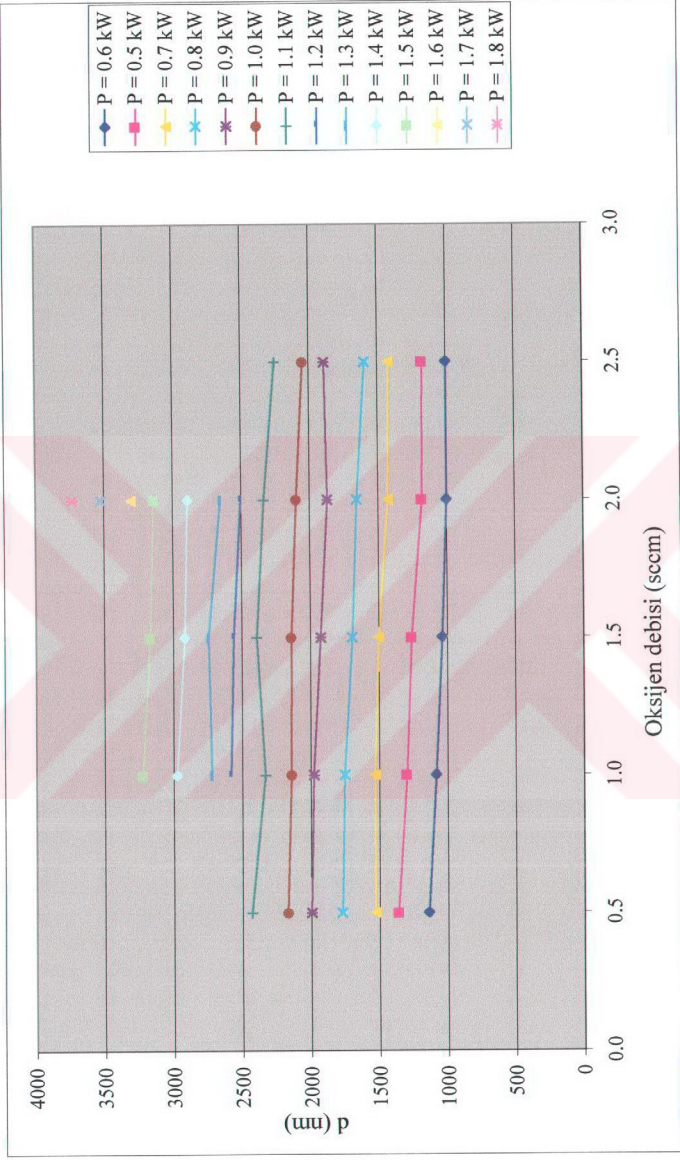


Tablo-4: Deneylerde elde edilen kaplamaların, oksijen debisi ve güç değerleri.

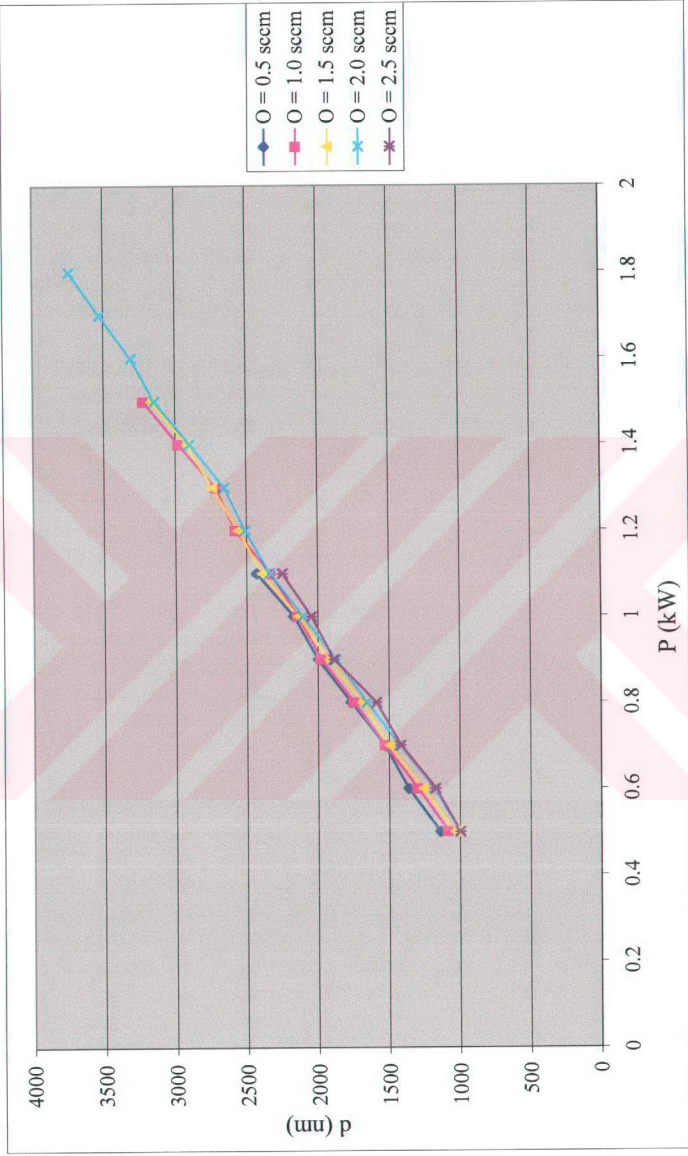
Deney Kodları	Güç (kW)													
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
0,5	2460	2461	2462	2463	2464	2465	2491							
1	2466	2467	2468	2469	2470	2471	2492	2507	2509	2510	2523			
1,5	2472	2473	2474	2475	2476	2477	2490	2501	2502	2506	2515			
2	2478	2479	2480	2481	2482	2483	2493	2508	2511	2512	2513	2514	2524	2525
2,5	2484	2485	2486	2487	2488	2489	2494							

Tablo-5: Kalınlığın, güç ve oksijen debisine göre değişimi.

Kalınlık (mm)	Güç (kW)													
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
0,5	1140	1363	1530	1768	1999	2170	2430							
1	1084	1300	1530	1748	1979	2143	2330	2580	2717	2979	3224			
1,5	1036	1262	1500	1691	1927	2140	2391	2560	2740	2920	3169			
2	1000	1181	1426	1653	1872	2100	2334	2504	2650	2894	3140	3304	3525	3736
2,5	1000	1175	1419	1590	1891	2047	2250							

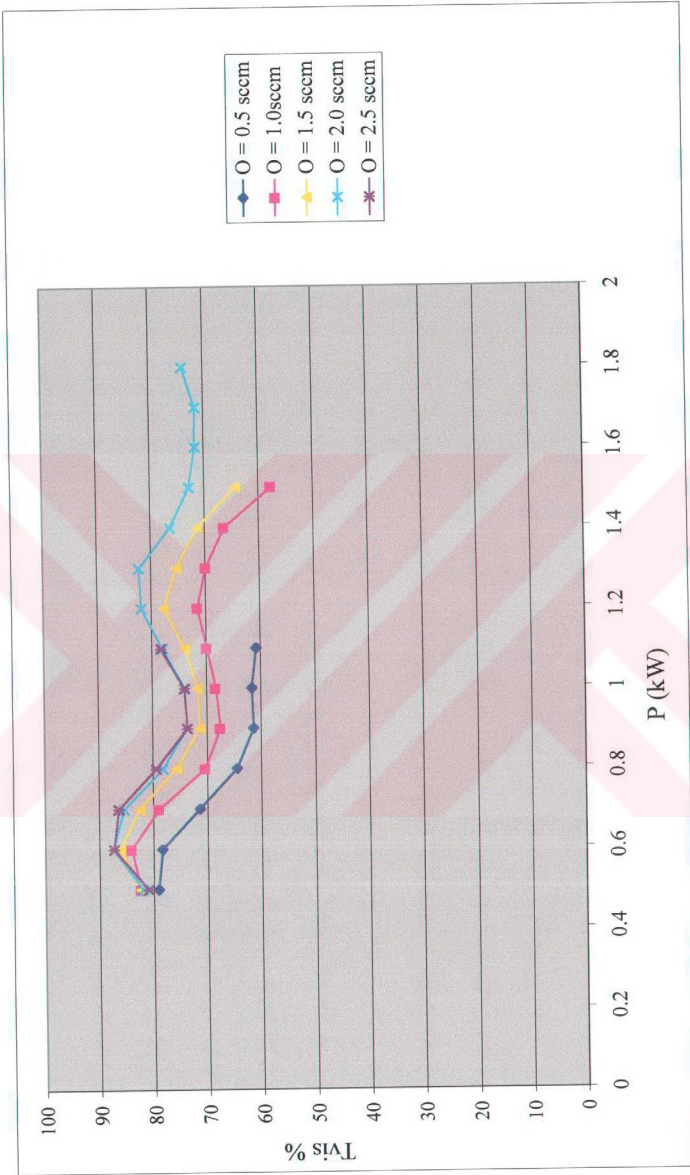


Şekil-13a: Güç sabitken, kaplama kalınlığının oksijen debisi ile değişimi.

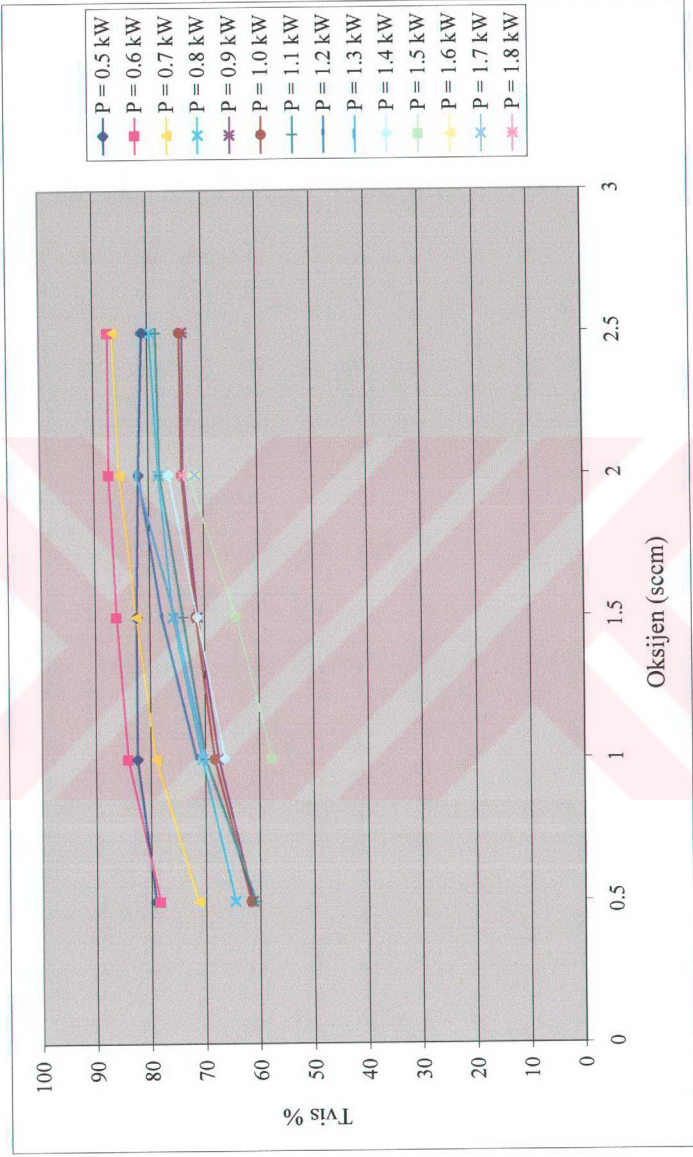


Şekil-13b: Oksijen debisi sabitken, kaplama kalınlığının güç ile değişimi.





Şekil-14a: Oksijen debisi sabitken, geçirgenliğin güç ile değişimi.



Şekil-14b: Güç sabitken, geçirgenliğin oksijen debisi ile değişimi.



Tablo-7: Yüzey dirençlerinin, oksijen debisi ve güce göre değişimi.

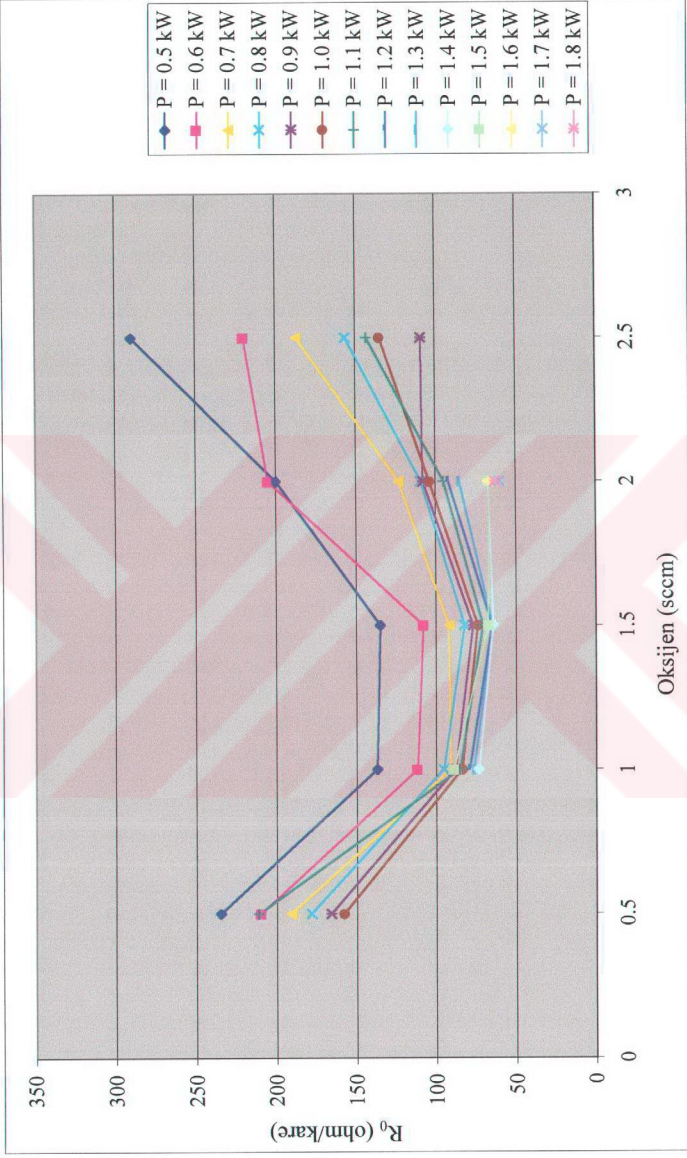
R <sub>0</sub> (ohm/kare)	Güç (kW)													
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
0,5 235	210	191	178	166	158	211								
1 137	112	91	95	88	84	85,2	79,1	76,3	73,7	89				
1,5 135	108	92	82	77	74	70,7	65	64,5	64,5	67,3				
2 200	205	123	109	108	104	95	92	85	67,5	67	67,6	60	63	
2,5 290	220	187	156	109	135	143								

Oksijen debisi (sccm)

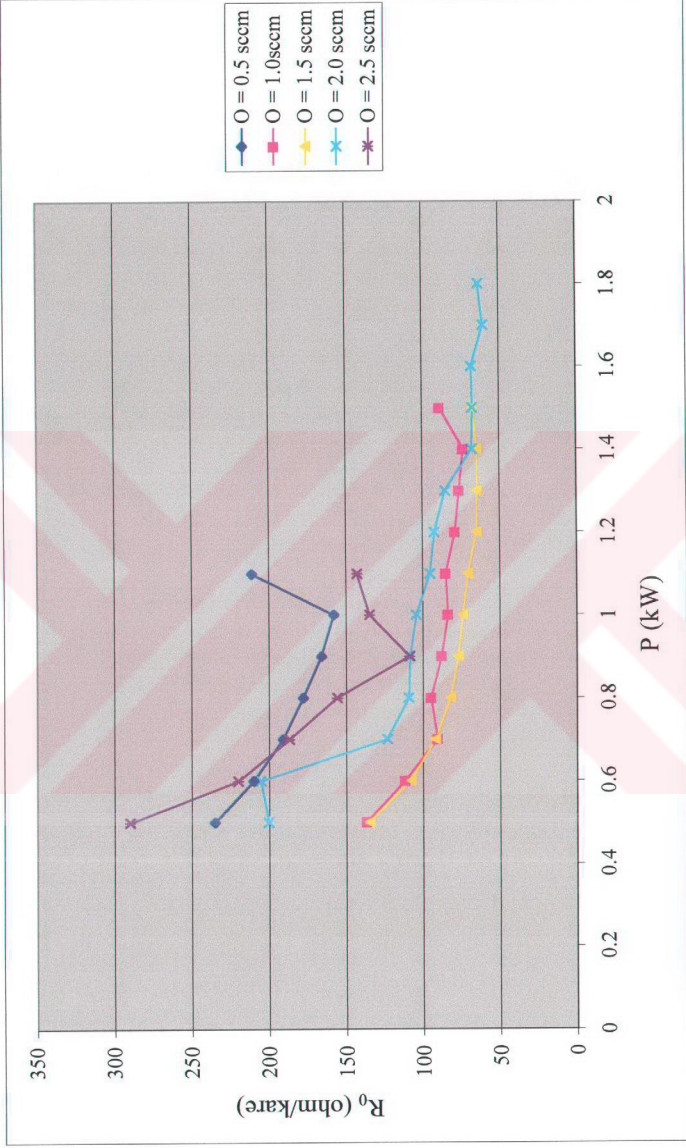
Tablo-8: Yüzey dirençlerinin 100 saat sonraki değerlerinin, güç ve oksijenle değişimi.

F <sub>1</sub> (ohm/kare)	Güç (kW)													
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
0,5	180	194	186	173	166	157	211							
1	123	105	91,7	92,4	85,3	82,2	85,7	76,3	74,5	71,7	88			
1,5	123	98,7	85,3	77	72	70	66	62	61	62	65,7			
2	177	190	113	100	100	95,8	90	88	83,5	65	65,5	65,8	0	0
2,5	230	206	174	151	102	128	135							

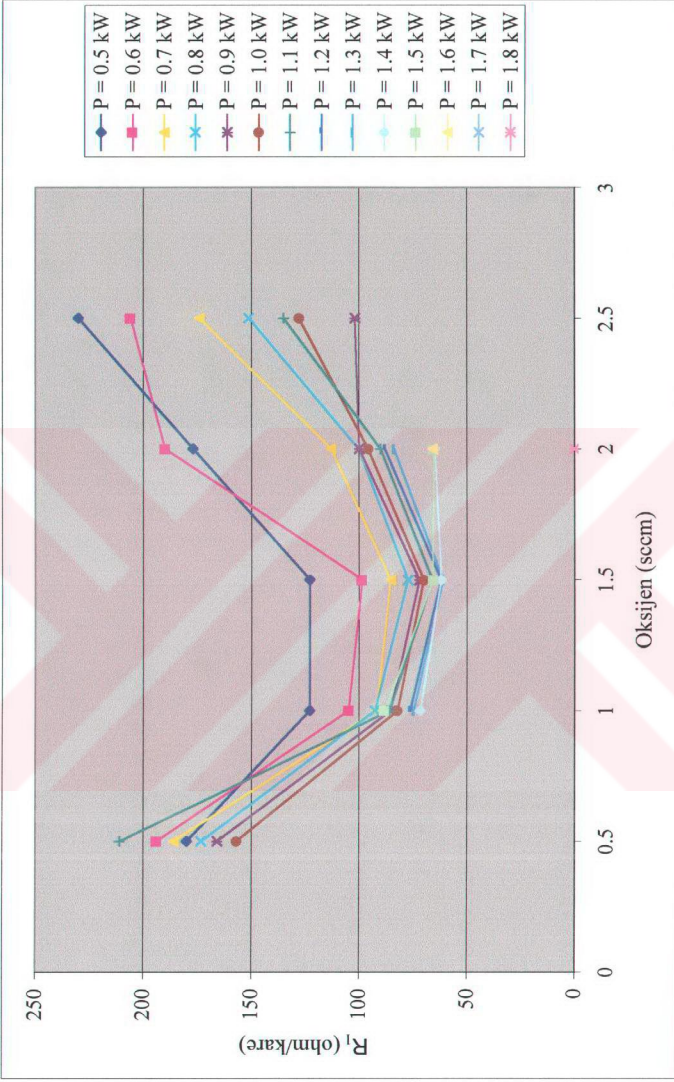
Oksijen debisi (scm)



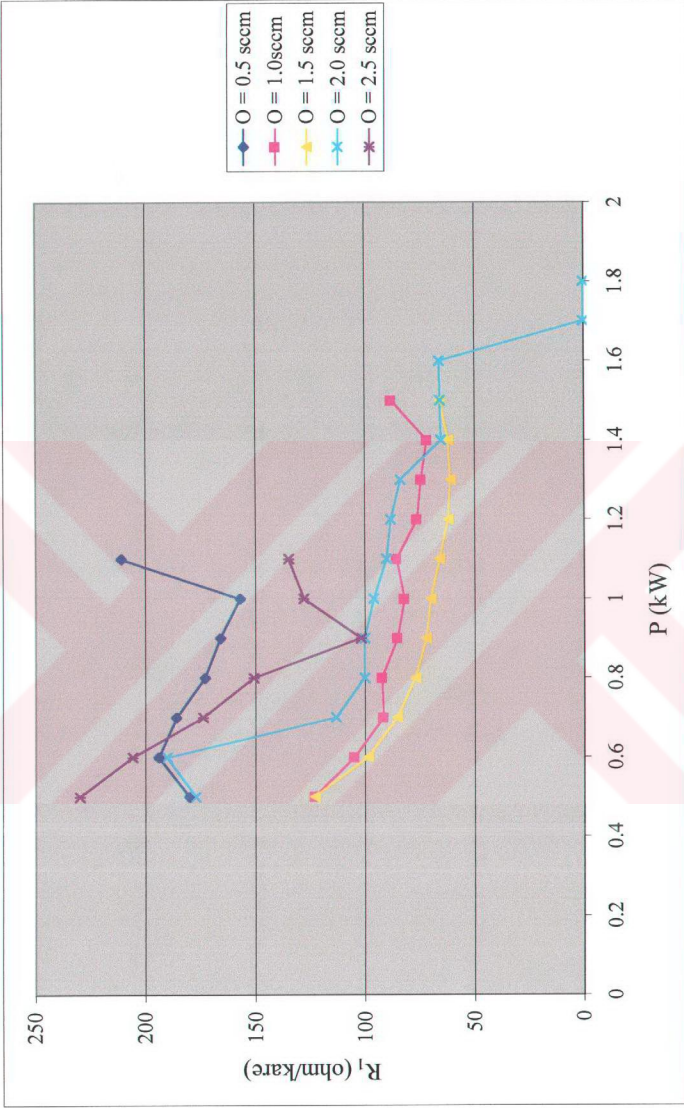
Şekil-15a: Güç sabitken, direncin oksijen debisi ile değişimi.



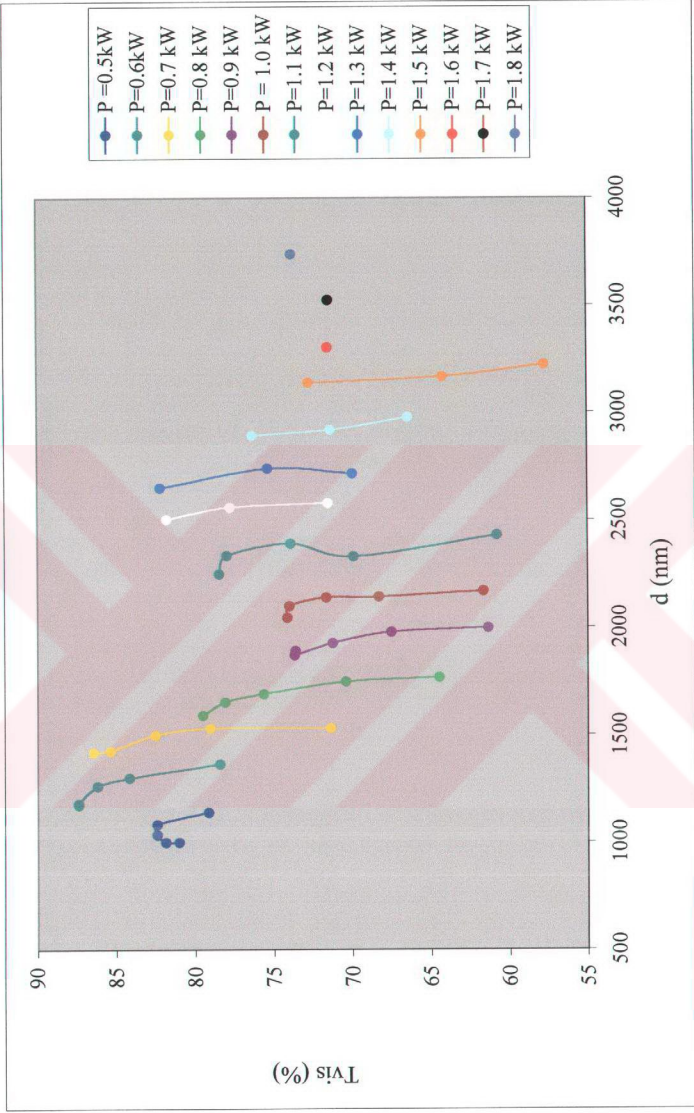
Şekil-15b: Oksijen debisi sabitken, direncin güç ile değişimi.

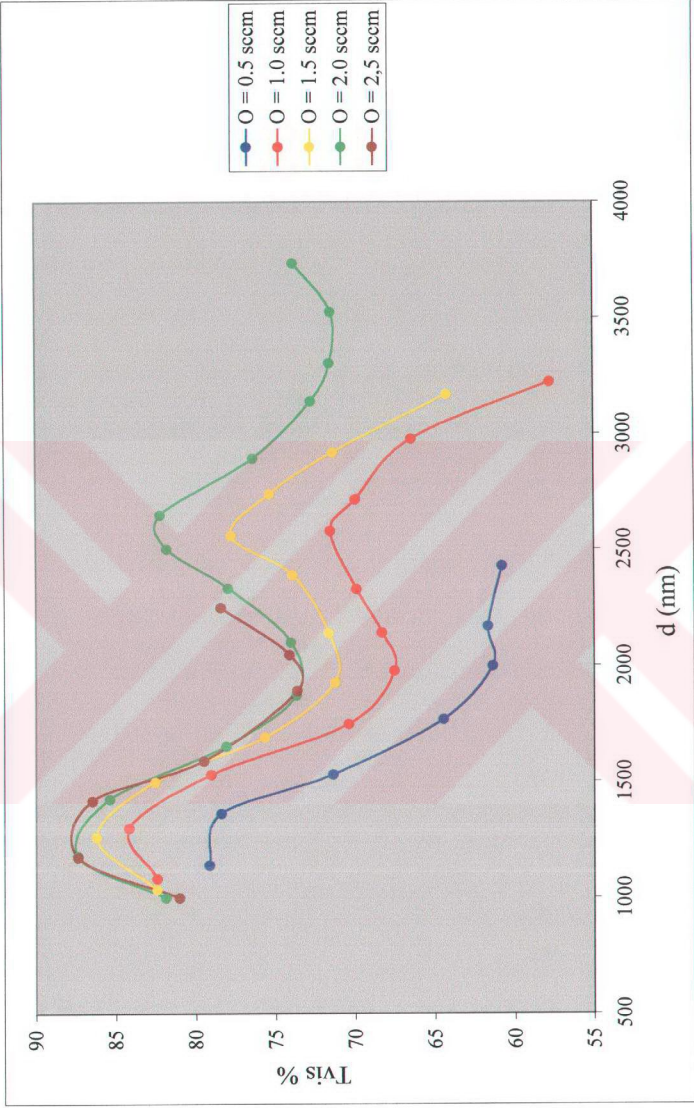


Şekil-16a: Güç sabitken, yüzey dirençlerinin 100 saat sonraki değerlerinin oksijen debisi ile değişimi.



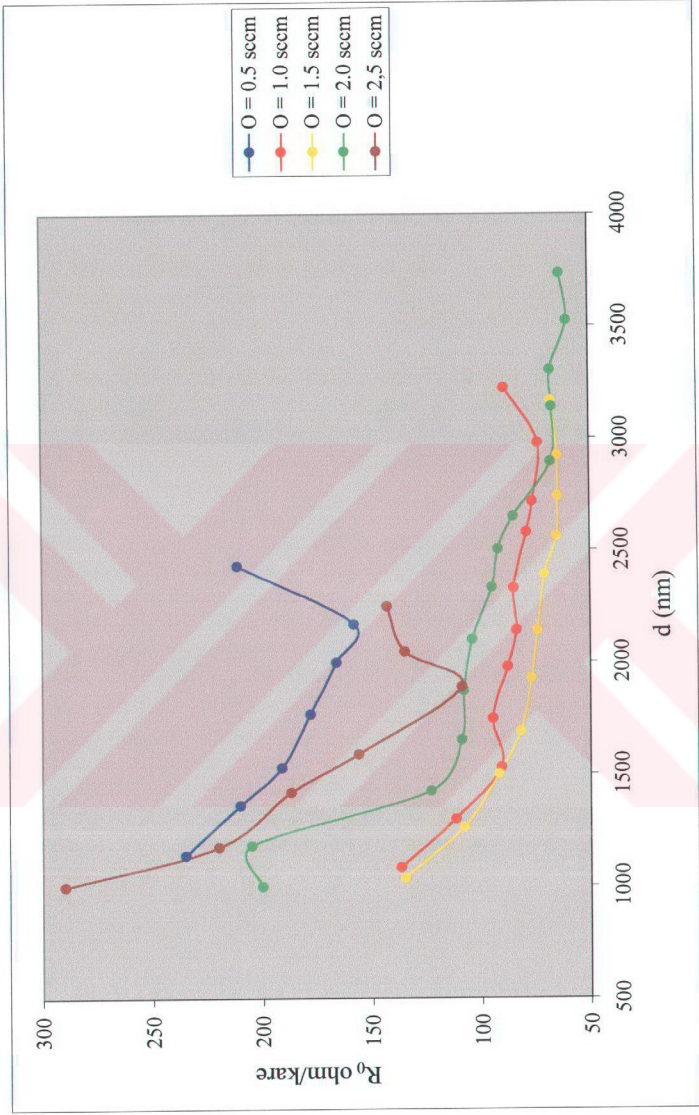
Şekil-16b Oksijen sabitken, yüzey dirençlerinin 100 saat sonraki değerlerinin güç ile değişimi.



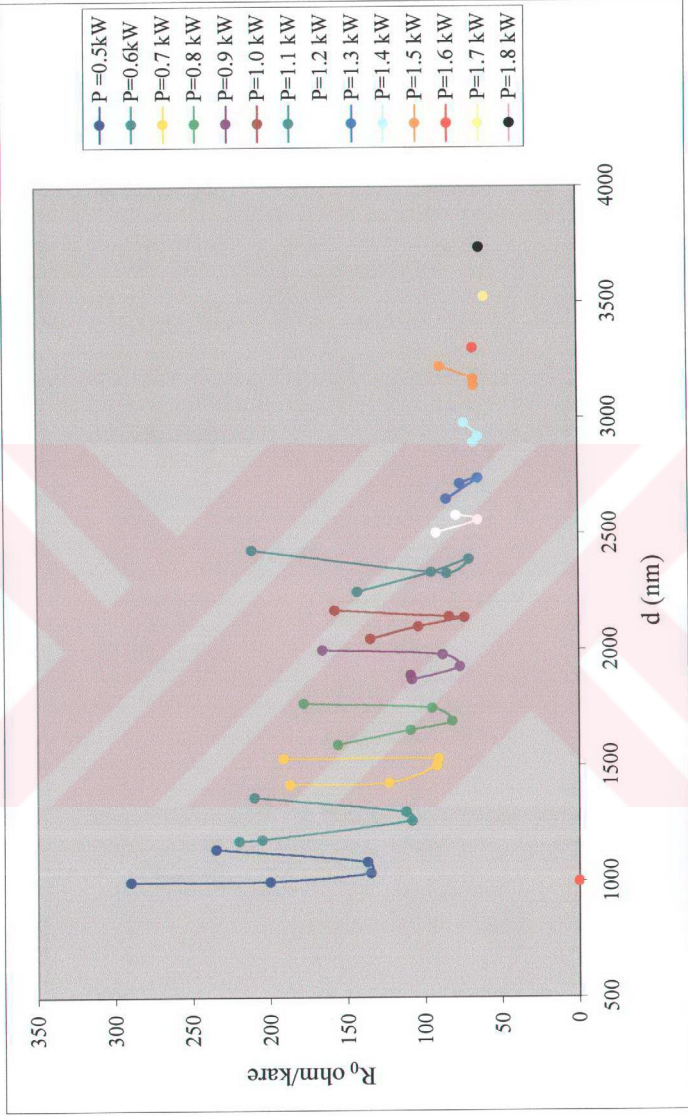


Şekil-17b: Oksijen debisi sabitken, geçirgenliğin kalınlıkla değişimi.





Şekil-18a: Oksijen sabitken, direncin kalınlıkla değişimi.



Şekil-18b: Güç sabitken, direncin kalınlıkla değişimi.

## 7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Şişe Cam İnce Film Araştırma Merkezi Laboratuvarında, farklı işlem parameterlerinde ve kalınlıklarında, katkılı ITO ile kaplanan camın, geçirgenlik, direnç ve kalınlık değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlerin birbirleriyle olan değişimleri, grafikler yardımıyla ifade edilmiştir.

### 7.1. Geçirgenlik

Geçirgenlik, sisteme verilen güç sabitken, oksijen miktarı artırıldığında, belli bir değere kadar artıp, sabit kalmaktadır (Şekil-14b). Oksijen miktarı sabit tutulup güç artırıldığında ise geçirgenlik, belli bir değere kadar artar, sonra azalır, ardından tekrar artışa geçmektedir (Şekil-14a).

Güç sabitken, kalınlık artırıldığında geçirgenlik azalmaktadır (Şekil-17a). Oksijen miktarı sabit tutulduğunda, kalınlık artırılırsa geçirgenlik, önce biraz artar, sonra azalır, ardından tekrar artar, sonra tekrar azalışa geçmektedir (Şekil-17b). Kalınlıkla geçirgenlik arası ilişkiye bakıldığında sönümlü titreşime benzeyen bir dalga hareketi gözlenmektedir. Kalınlık artışına karşılık geçirgenlik bir yerde değişim göstermez, belli bir kalınlığa kadar azalır sonra artar, sonra tekrardan bir azalma göstermektedir. Bu dalgalanma hareketi geçirgenliği küçültmekle birlikte artma ve azalma bölgeleri oluşturmaktadır. Bu dalgalanma, ince kaplamalı yapıların doğası gereği beklenen bir sonuçtur. Maksimum absorpsiyon bulunmamakla birlikte, söz konusu bu dalgalanmanın genliği azalmaktadır. Geçirgenlik değişimi, kaplamanın havaya komşu yüzündeki yansıma ile cama komşu yüzündeki yansımaların üst üste binmesinden kaynaklanan faz farkı nedeniyle gözlenmektedir. Bu iki yüz arasındaki optik yolun iki katının, dalgaboyunun tam ya da buçuklu katlarına eşit olduğu yerler, Şekil-17b deki eğrinin maksimum ve minimum bileşenlerinin olduğu bölgeye düşmektedir.

## 7.2. Direnç

Yüzey direnci, güç sabitken oksijen miktarı artırıldığında önce azalır, sonra belli bir değerde sabit kalır, ardından tekrar artışa geçer (Şekil-15a). Oksijen sabitken, güç artırılırsa direnç, belli bir değere kadar azalır, sonra tekrardan bir artış gösterir (Şekil-15b). Güç sabit tutulduğunda, kalınlık arttıkça yüzey direnci, önce belirli bir değere kadar azalır, sonra tekrar artışa geçer (Şekil-18b). Oksijen miktarı sabit kaldığında, kalınlık arttıkça dirençte belli bir noktaya kadar azalma, sonra çok az bir artış gözlenmektedir (Şekil-18a).

## 7.3. Kalınlık

Kalınlık, önemli bir kaplama parametresidir. Kaplama işleminde kullanılan üretim parametrelerinin değişimi, kalınlıkta değişikliğe neden olur. Kalınlık, oksijen miktarı sabitken, (Şekil-16b) güç ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Güç arttıkça, cam üzerine biriken malzeme de çoğalmakta ve dolayısıyla kalınlık artışı sağlanmaktadır. Güç sabit kaldığında, oksijen miktarındaki (Şekil-16a) değişim, kalınlığı çok etkilememektedir.

Elektriksel iletkenlik, kaplama kalınlığı ile artar. Bunun nedeni, oldukça ince kaplamaların dış yüzeyleri tarafından yük taşıyıcılarının dağıtılmasıdır. Kalınlık artışı, taşıyıcı konsantrasyonun ve hedef yoğunluğunun artması yüzündendir.

Grafiklerden, geçirgenlik ve yansıtma değerlerinin, kaplama malzemesinin absorpsiyonundan çok optik yol nedeniyle oluşan faz farklarına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Grafiklerden görüldüğü gibi, geçirgenlik değişimi, bir dalgalanma hareketi sergilemektedir. Kalınlık arttıkça, geçirgenliğin kendisi değil, gösterdiği değişimin genliği azalmaktadır. Bu çalışmada amaçlanan kaplamalı camın optik ve elektrik büyüklüklerinin optimumları, bu dalgalanmanın tepe değerlerini veren kalınlıklarda aranmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] "Applications and processing of transparent conducting oxide", Brian G. Lewis and David C. Paine, MRS Bulletin, Ağustos 2000.
- [2] "Study of ITO for novel optoelectronic devices", Dr. Shabbir A. Bashar's Ph. D. Thesis, university of London, 1998.
- [3] "ITO, tin-doped indium oxide for optical coating", After Cerac Corporation (2002), Ray Swati, R. Banerjee, N. Basu, A. K. Batabyal and A. K. Barua, J. Appl. Phys. 54(6), 3497, 1983.
- [4] "Investigation of amorphous to crystalline transition in indium tin oxide films", Colleen Nehl, Office of Science Energy Research Undergraduate Laboratory Fellowships (ERULF), university of California, Santa Barbara National Renewable Energy Laboratory Golden Colorado, August 23, 2000.
- [5] "Indium tin oxide thin films for organic light emitting devices", H. Kim, A. Pique, J. S. Horwitz, H. Mattoussi, H. Murata, Z. H. Kafafi and D. B. Chrisey, Appl. Phys. Letter Volume 74 number 23, 9 Nisan 1999.
- [6] "Optimisation of indium tin oxide thin films for photovoltaic applications", Thin Solid Films 269(1995)80-84, M. A. Martinez, J. Herrero, M. T. Gutierrez.
- [7] "Study of annealed indium tin oxide films prepared by rf reactive magnetron sputtering", Pergamon 0042-207X(94)00150-2, Li-Jian Meng, A. Maçarico and R. Martins, Cemop/Uninova, Quinta de Torre, 2825 Monte da Caparica, Portugal, 14 Ekim 1994.
- [8] "Morphological and electrical properties of indium tin oxide films prepared at a low processing temperature for flexible organic light-emitting device", Materials Science and Engineering B85 (2001) 114-117, Furong Zhu, Keran Zhang, Bee Ling Low, Shuang Fang Lim, Soo Jin Chua, Institute of Materials Research & Engineering, Singapore, 9 Ekim 2000.

- [9] "Origin of the crystalline orientation dependence of the electrical properties in tin-doped indium oxide films", *Thin Solid Films* 392 (2001) 265-268 Masayuki Kamei, Hiromi Enomoto, Itaru Yasui, National Institute for Research in Inorganic Materials, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106-8558, Japan.
- [10] "Transparent conducting aluminum-doped zinc oxide thin films for organic light-emitting devices", *Applied Physics Letters* Volume 76, Number 3, H. Kim and C. M. Gilmore, 17 Ocak 2000.
- [11] "Transparent conducting zinc oxide thin film prepared by off-axis rf magnetron sputtering", *Bull. Mater. Sci.* Vol.25, No.3, June 2002 Indian Academy of Sciences.
- [12] "Structural, electrical and optical properties of aluminum doped zinc oxide films prepared by radio frequency magnetron sputtering", *American Institute of Physics*, [S0021-8979(97)04312-0], 1997.
- [13] "Texture aluminum-doped ZnO thin films prepared by magnetron sputtering", *J. Physics D: Appl. Phys.* 29 (1996), 1873-1877.
- [14] "8% Efficient ZnO/c-Si heterojunction solar cells prepared by magnetron sputtering", 17 European PV Conference, Munich.
- [15] "Transparent conducting ZnO:Al films via ccvd for amorphous silicon solar cells", Z. Zhao, M. Vinson, T. Neumuller, J. E. McEntyre, F. Fortunato ve A. T. Hunt, 29<sup>th</sup> IEEE PVSC New Orleans 20-24th May 2002.
- [16] "New n-type transparent conducting oxides", Tadatsugu Minami, *MRS Bulletin*, Ağustos 2000.
- [17] "Characteristics of indium tin oxide films deposited by dc and rf magnetron sputtering", Wenli Deng, Taizo Ohgi, Hitoshi Nejo and Daisuke Fujita, National Research Institute for Metals, 1-2-1 Sengen, Tsukuba 305-0047, Japan, 15 Şubat 2000.

- [18] "An introduction to physics and technology of thin films", Alfred Wagendristel - Yuming Wang, Publishing Co. Pte. Ltd. , ISBN: 9810216165, 1994.
- [19] "Thin films by sputtering", Dr. Pierre Joun – Dr. Yves Lamac, university of Valenciennes.
- [20] "Texture aluminum -doped zinc oxide thin films from atmospheric pressure chemical-vapor deposition", Jianhua Hu and Roy G. Gordon, Departman of Chemistry, Harvard Universty, Cambridge, Massachusetts 02138, 4 Ekim 1991.
- [21] "The Electromagnetic shielding effectiveness of indium tin oxide films", Ceramics International 27 (2001) 363-365, J. L. Huang, B. S. Yau, C. Y. Chen, W. T. Lo, D. F. Lii, Departman of Materials Science and Engineering, National Cheng-Kung University, Taiwan, 19 Şubat 2000.
- [22] "Mechanism of carrier transport in aluminum-doped zinc oxide", Journal of Applied Physics Volume 92, Number 8, 15 Ekim 2002.
- [23] "Deposition of aluminum-doped zinc oxide films by rf magnetron sputtering and study of their structural, electrical and optical properties", Thin Solid Films 435 (2003) 78-82.
- [24] "Modern Fiziğin Kavramları", Arthur Beiser, (çeviren: Gülsen Öngüt) 0-07-115440-X, Aralık 1997.
- [25] "Katıhal Fiziğine Giriş" – Charles Kittel, Güven yayınları, Bekir Karaoğlu, 1996.
- [26] "Katıhal Fiziğine Giriş" –Prof. Dr. Tahsin Nuri Durlu Ankara Üniv. Fen Fak. Fizik Bölümü 1996, ISBN-975-556-000-9.
- [27] ESD Journal-The ESD elektrostastics Magazine.htm, Gene Chase, Ets, Inc.

- [28] ESD Journal-The ESD elektrostatis Magazine.htm, by James Chan Spring,1994.
- [29] "Criteria for choosing transparent conductors", Roy G. Gordon, MRS Bulletin, Ağustos 2000.
- [30] Applied Physics Letters, Volume 77, Number 11, 11 ekim 2000
- [31] International Standard ISO 9050 Glass in bulding-Determination of light transmittance, total solar energy transmittance and ultraviolet transmittance, and related glazing factors.
- [32] European standard EN 410 Glass in bulding-Determination of luminous and solar characteristics of glazing.
- [33] "İnce filmler için Spektrofotometrik Ölçümlere Dayalı Optik Karakterizasyon Yöntemleri", Prof. Dr. Ender Aktulga, MSÜ Fen Edebiyat Fakültesi Dergisi, Kasım 2000.
- [34] Kaplamalı Camlar, H. Ateş Parlar, Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü Doktora Programı.
- [35] Standart method for computing the colors of objects by using the CIE system, Designation E 308-85.
- [36] High transmission touch panel films, Mohtashim Saifand- Hassan Memarian, CPS Films, Canoga Parks USA.
- [37] ESD Journal-The ESD elektrostatis Magazine.htm, Steve Fowler.
- [38] Electric Film Technology Co. Ltd., [http:// ito. 50g. com./flex. htm](http://ito.50g.com/flex.htm).
- [39] [www.websters-online-ictionary.org/definition/english/An/Annealing.html](http://www.websters-online-ictionary.org/definition/english/An/Annealing.html), European Union.
- [40] <http://www.corrosion-doctors.org/MetalCoatings/VaporDep.htm>.
- [41] Thin Films For Optical Systems, François R. Flory, ISBN: 0-8247-9633-0,1995.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı: Arş. Gör. Ümit Özlem ARIER (AKKAYA)

Doğum Yeri: Adana

Doğum Tarihi: 16/11/1978

Uyruğu: T. C.

Adres: Küçük Bebek cad. Berkman apt. 13/25 Bebek İstanbul

Mezun olduğu

Üniversite: Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü,  
1999

Görev Yeri: MSÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü