

FİZİK DEĞERLENDİRMELERİ

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Osman ARMAĞAN

Fizik Değerlendirmeleri

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Osman ARMAĞAN

yaz
yayınları

2025

Fizik Değerlendirmeleri

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Osman ARMAĞAN

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5838-64-3

Ekim 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

**Neutron Transmittance of Steel, Paraffin, Polyethylene,
Iron and Epoxy Materials..... 1**
Selcen UZUN DURAN

Optisyonlikte Güncel Gelişmeler ve Yapay Zekâ..... 14
Özge ERDEM, Sümevra CAN

Ion Implantation Technology For Sensing Applications 29
Selim ÜNAL

**Optisyonlik Mesleği ve Gelişmeler Hakkında
Ayrıntılı İnceleme..... 44**
Sümevra CAN, Özge ERDEM

**Magnezyum ve Lipoik Asit ile Zenginleştirilmiş
Klorofil Kullanılarak Üretilen Au/(Mg+La)Klorofil/N-Gap
Aygıtının Optoelektronik Performansı 71**
Fikriye Şeyma KAYA

**A Mathematical Pathway From Binary Randomness to
Stationary Field Observations in Macro Universe..... 85**
Baris BAYKANT ALAGOZ, Serkan ALAGOZ

**Effect of Spray Solution Volume on the Photodetector
Properties of CdS Thin Film 104**
Serif RÜZGAR

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

NEUTRON TRANSMITTANCE OF STEEL, PARAFFIN, POLYETHYLENE, IRON AND EPOXY MATERIALS

Selcen UZUN DURAN¹

1. INTRODUCTION

As the use of radiation expands across various fields, efforts to reduce its harmful effects are becoming increasingly important. The most fundamental principle for protection against external radiation is to minimize the radiation dose received. The dose level depends on several factors, including the type of radiation, the distance from the source, the length of exposure, and the shielding surrounding the source. Understanding how radiation interacts with matter is essential for developing radiation protection strategies. When radiation passes through a material, it loses some or all of its energy. This loss of energy is known as the material's radiation shielding capability. The effectiveness of shielding varies depending on the material and the type of radiation involved. Consequently, different materials are chosen to shield against different kinds of radiation (Abdulrahman et al., 2020; Unscear, 2000). The interaction mechanism varies depending on the type and energy of the particle, as well as the number of protons and the density of the atoms in its environment. Therefore, interactions between charged particles (alpha and beta particles) and uncharged particles (photons, gamma rays and neutrons) with matter must be considered separately.

¹ Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü.
selcenduran@ktu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4943-4654.

Although different protection methods exist for different types of radiation, protection against neutron radiation is of particular importance as it is the most dangerous type of radiation. When radiation interacts with matter, various events can occur, such as scattering (elastic and inelastic), the photoelectric effect and pair production (Kaçal et al., 2019). The probability of radiation interacting with matter is defined as the cross section. Events that can occur when neutrons interact with matter include reactions such as elastic and inelastic scattering, neutron capture and the emission of charged particles. Neutrons are uncharged particles with masses close to that of a proton. Unlike charged particles, they do not encounter a Coulomb barrier when approaching the nucleus, but instead interact with the nucleus via nuclear forces. Neutrons cannot directly ionise matter. However, their interaction with the neutrons of the materials they encounter leads to the formation of secondary radiation in the form of alpha and beta particles, as well as gamma and X-rays. Since neutrons are uncharged, they can penetrate deep into matter without being affected by the Coulomb force during interaction (Shin, et al., 2014).

These properties of neutrons are exploited when changes to a material nucleus are desired. When a nucleus is bombarded with neutrons, it can absorb them and increase its mass. The atom with the increased mass becomes unstable, reaching a stable state by emitting radiation. Therefore, neutron radiation shielding requires protection against various types of radiation, especially gamma rays. Since the paths taken by alpha and beta particles resulting from nuclear reactions within the material are short, they are generally neglected in calculations. Neutrons penetrate matter more effectively than other charged particles (alpha and beta), so shielding them is equally challenging (Kaçal et al., 2019- Wang et al., 2015).

The shielding of neutron radiation occurs in three stages, depending on the energy of the neutrons. High-energy neutrons ($E > 10$ MeV) and fast neutrons (10 keV-10 MeV) are sensitive to hydrogen. In the first stage, therefore, neutrons pass through hydrogen-rich materials such as water, polyethylene and paraffin to reduce their energy, resulting in the production of epithermal neutrons (0.3 eV-10 keV) and thermal neutrons (0.01-0.3 eV). The second stage involves passing the neutrons through materials such as cadmium, boron, and lithium, which have a high absorption cross-section for slow (thermal) neutrons, in order to absorb them. In the third stage, gamma rays emitted by materials with a high cross-section for neutron absorption in the second stage are captured using gamma-absorbing materials, such as lead. Since light nuclei such as hydrogen are more effective in materials used for neutron shielding, materials such as water, concrete, and polymers are more appropriate (Kipcak et al., 2013- More et al., 2021).

Polyethylene is highly effective in neutron moderation due to its high hydrogen content. It is widely used in radiation protection applications due to its low cost and workability. In PE-based composites, the harmful effects of radiation are reduced by lowering the energy of neutrons (Zhang, et al., 2017). Furthermore, adding neutron-absorbing elements such as boron or cadmium to PE enhances both neutron moderation and absorption performance (Shultis & Faw, 2000).

Although epoxy resins have a lower hydrogen content compared to polyethylene in neutron shielding, they are used as binders in composite materials due to their superior mechanical properties and chemical resistance. In epoxy matrix composites, the distribution of boron and other neutron-capturing nanoparticles optimises both structural strength and radiation

protection (Jiao, et al., 2021). These composites are preferred in lightweight shielding applications and space technologies.

Polyethylene is more effective in rapidly reducing neutron energy, particularly due to its high pure hydrogen content. Epoxy, on the other hand, is used more as a matrix in composite materials to increase mechanical strength. Therefore, it is common practice to reinforce polyethylene-based structures with epoxy-based composites in materials intended for neutron shielding (Sukegawa et al., 2011). Paraffin, as an organic compound rich in hydrogen, is one of the materials frequently preferred in neutron shielding applications. Its richness in hydrogen atoms, which are used to effectively reduce (slow down) the energy of neutrons, makes paraffin ideal as a neutron moderator (Toyen, and Saenboonruang, 2017). In recent years, there has been an increase in research on the use of boron, barium, and tungsten, which are neutron and gamma ray absorbing elements, in paraffin-based composites. These composites have been developed as multi-layered shielding systems for both neutron moderation and high-energy radiation shielding (Zhang et al., 2019). Steel is widely used in nuclear reactor vessels and radiation shielding for both mechanical strength and neutron and gamma shielding. Furthermore, its resistance to high temperatures and wear conditions provides long-lasting shielding solutions (Aygün, 2020). Iron alloys are also being investigated to develop optimised shielding materials against neutrons at different energy levels (Levet, 2020). In neutron shielding, iron or steel is typically used as part of multi-layer shielding systems to capture moderated neutrons and absorb gamma radiation. For example, hydrogen-rich materials (such as polyethylene and paraffin) are used to reduce the energy of neutrons, while iron and steel layers are placed to absorb the secondary gamma rays caused by these slowed-down neutrons (IAEA, 2000).

This study investigates the neutron absorption properties of iron, steel, paraffin, epoxy, and high-density polyethylene, which are frequently used in radiation environments.

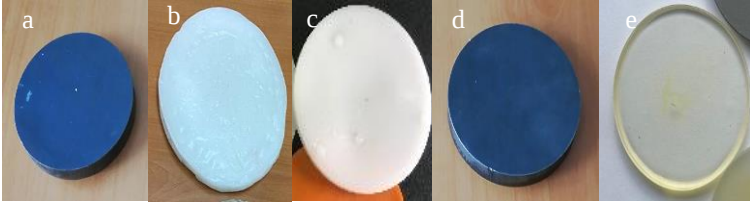
2. MATERIAL METHOD

This study investigated the interaction behaviour of materials with different physical and chemical properties with neutrons. Five samples, each with a diameter of 7 cm and a thickness of 1 cm, were prepared for this purpose. The samples that were investigated were iron, steel, paraffin, high-density polyethylene and epoxy resin. The primary objective in selecting these materials was to compare the neutron interaction behaviour of samples with different structural properties and densities, which are frequently used in radiation fields.

Iron and steel samples were obtained directly from industrial production and cut to standard dimensions, with no additional processing to prepare them for testing. The paraffin and epoxy resin samples were obtained by sourcing the raw materials separately. First, the paraffin was melted or liquefied, then poured into silicone moulds of the same dimensions and left to solidify. The epoxy resin was mixed with a hardener at a ratio of 1:4 and left to harden in the same moulds. This ensured that the samples were dimensionally compatible with each other. The high-density polyethylene sample was prepared using granular raw material. First, the granules were shaped using an extruder; then, the final product was obtained in the desired dimensions using the injection moulding method.

Each sample was produced with the same diameter and thickness to ensure comparable results in the experimental studies. These samples were tested to reveal the amount of attenuation neutrons undergo when passing through materials of different densities and atomic compositions. Figure 1

collectively shows the final state of the five different samples used in the experiments, whose neutron absorption properties were investigated.



**Figure 1. a) Steel, b) Paraffin c) High-density polyethylene
d) Iron e) Epoxy**

To determine the macroscopic neutron cross sections of the samples under investigation, a ^{239}Pu –Be neutron source with an activity of 5 Ci was used. This source had dimensions of 2.59 cm $\times$ 11.2 cm, was characterised by isotropic emission properties and was positioned within a neutron howitzer designed to guide neutrons through predefined horizontal and vertical channels. The source was enclosed by a 0.3 cm thick aluminium casing and a 2.6 cm thick Plexiglas moderator rod, which could be adjusted remotely from the upper section. The entire system was embedded inside a sealed cylindrical structure with a radius of 28.5 cm, fabricated from hydrogen-enriched paraffin (15.7 wt% H and 84.3 wt% C). The outermost layer of this configuration was a 0.3 cm thick aluminium drum. For investigations into shielding performance, channel 4 (the horizontal channel) was employed, providing a neutron flux of approximately 10^6 neutrons/cm²/s with an energy distribution extending up to 10.5 MeV, and an average kinetic energy of 4.24 MeV (Topuz and Reyhancan, 2019).

The neutron densities were measured using a Polimaster PM1401K (PM1401K-3P Multipurpose Hand, 1401) neutron detector with an energy sensitivity range of 0.025 eV–14 MeV.

After the detector was fixed in place, the reference densities (I_0) were recorded (PM1401K-3P, POLİMASTER). Then, the disk-shaped samples produced were placed in turn in the beam output and the transmitted densities (I) were determined for each one (Wang et al., 2015).

For each sample, the total neutron removal cross-section was determined using the following relationship Eq. (1):

$$T = I/I_0 = e^{-\Sigma_{\text{tot}} x} \quad (1)$$

Where Σ_{tot} is the macroscopic removal cross-section (representing the neutron shielding ability for a specific energy range), I_0 is the incident neutron intensity, I is the transmitted neutron intensity, x is the sample thickness and T is the transmission fraction defined as I/I_0 (Wang et al., 2015).

HVL is conceptualized as the thickness of the shielding material required to reduce the initial radiation intensity to 50% after penetrating through the shield (Alver et al., 2023). The formula is given as follows Eq. (2):

$$\text{HVL} = \ln(2)/\Sigma_{\text{tot}} \quad (2)$$

In this study, the neutron transmittance, macroscopic cross sections and half-value thicknesses of the samples were determined.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, samples with a thickness of 1 cm and a diameter of 7 cm were prepared to investigate the attenuation and absorption properties of different materials against neutrons. Iron, steel, paraffin, epoxy resin and high-density polyethylene samples were used in the experimental measurements. The main purpose of selecting these materials was to comparatively

evaluate the neutron interaction behaviour of samples with different structural properties and densities, which are frequently used in radiation fields.

The attenuation amount of neutrons during their passage through the material was determined for each sample, thereby quantitatively establishing the neutron absorption rates of the samples. The neutron transmittance values obtained from the measurements, i.e. the I/I_0 ratios (where I represents the neutron intensity detected after passing through the material and I_0 represents the neutron intensity before entering the material), were calculated separately for different materials.

In order to interpret the results obtained in a more comprehensible manner, a graph showing the neutron permeability ratios of the samples was prepared and presented in the study as Figure 2. This graph visually illustrates the differences in neutron permeability between the materials and clearly shows which material has a higher absorption property against neutrons.

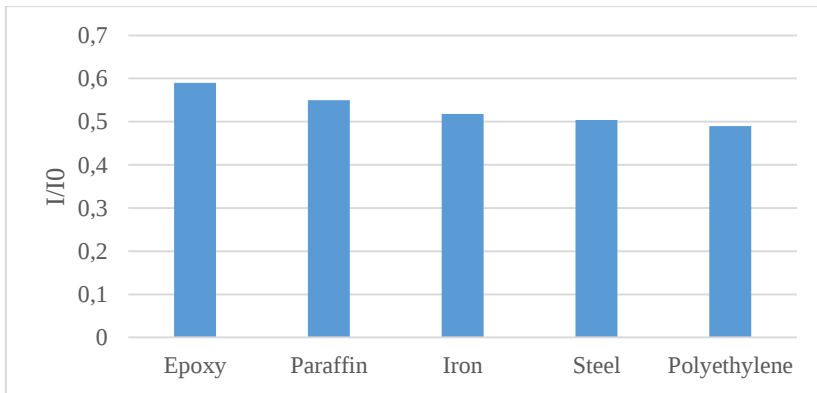


Figure 2. Neutron transmittance of steel, paraffin, polyethylene, iron and epoxy materials

The macroscopic cross-sections and half-value thicknesses of the samples are presented in Table 1.

Table 1. Neutron macroscopic cross section, half-value thickness of steel, paraffin, polyethylene, iron, epoxy material.

Samples	Macroscopic cross-sections Σ_{tot} (1/cm)	Half Value Layer (cm)
<i>Paraffin</i>	0.60±0.05	1.16
<i>Polyethylene</i>	0.71±0.07	0.98
<i>Epoxy</i>	0.53±0.07	1.31
<i>Iron</i>	0.66±0.09	1.05
<i>Steel</i>	0.69±0.13	1.00

Based on the data obtained, it was determined that the material exhibiting the highest performance in terms of neutron transmission ratio was high-density polyethylene, followed by iron, steel, paraffin, and epoxy resin. This result demonstrates that polyethylene, which is particularly rich in hydrogen, plays an effective role in neutron scattering, while metal-based materials provide significant contribution due to their density advantages, and epoxy resin has a lower but still noteworthy protection capacity compared to the others.

Furthermore, when examining half-value thicknesses, it was concluded that the material with the lowest half-value thickness absorbed neutrons most effectively. In this context, the material with the lowest half-value thickness was determined to be high-density polyethylene. This superiority of polyethylene stems from its structure containing a large amount of hydrogen atoms, which causes it to undergo strong elastic scattering interactions with neutrons. On the other hand, the epoxy-based material with the highest half-value thickness value exhibited the lowest effectiveness in terms of neutron attenuation. Therefore, when the half-value thickness parameter is examined,

the neutron absorption capacities of the materials can be directly compared, and it is evident that polyethylene is the most effective protective material.

4. CONCLUSION

This study investigated the neutron attenuation performance of various materials using a ^{239}Pu -Be neutron source, based on macroscopic cross sections and half-value thicknesses. The obtained data show that high-density polyethylene is the most effective at reducing neutron transmission, followed by iron, steel, paraffin and epoxy resin, respectively. Half-value thickness analyses also supported this result, determining that polyethylene, which has the lowest half-value thickness, offers the best performance in terms of neutron absorption. In contrast, epoxy resin, which has the highest half-value thickness, shows relatively lower effectiveness.

The superior performance of polyethylene can be explained by the strong elastic scattering interactions that the high concentration of hydrogen atoms in its structure can form with neutrons. While epoxy-based resin provides more limited protection on its own, it has significant potential as an alternative due to its structural stability, lightness and workability when enriched with different additives.

Consequently, although polyethylene is the most effective material for neutron attenuation, advanced epoxy-based composite materials are considered to be promising new-generation protective materials for nuclear technology and medical radiation applications.

REFERENCES

- Abdulrahman, S. T., Thomas, S., & Ahmad, Z. (Eds.). (2020). *Micro and nanostructured composite materials for neutron shielding applications*. Woodhead Publishing.
- Alver, Ü., Duran, S. U., Demirköz, M. B., Mucogllava, B., Aslan, M., Cava, K., ... & Dindar, O. (2023). *Ulexite/HDPE-Bi2O3/HDPE layered composites for neutron and gamma radiation shielding*. Applied Radiation and Isotopes, 200, 110940.
- Aygün, B. (2020). High alloyed new stainless steel shielding material for gamma and fast neutron radiation. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(3), 647-653.
- Jiao, L., Wang, Y., Wu, Z., Shen, H., Weng, H., Chen, H., ... & Lin, M. (2021). Effect of gamma and neutron irradiation on properties of boron nitride/epoxy resin composites. *Polymer Degradation and Stability*, 190, 109643.
- Kaçal, M. R., Akman, F., & Sayyed, M. I. (2019). Evaluation of gamma-ray and neutron attenuation properties of some polymers. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(3), 818-824.
- Kipcak, A. S., Gurses, P., Derun, E. M., Tugrul, N., & Piskin, S. (2013). Characterization of boron carbide particles and its shielding behavior against neutron radiation. *Energy conversion and management*, 72, 39-44.
- Levet, A., Kavaz, E., & Özdemir, Y. (2020). An experimental study on the investigation of nuclear radiation shielding characteristics in iron-boron alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 152946.

- More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A., & Pawar, P. P. (2021). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental chemistry letters*, 19(3), 2057-2090.
- PM1401K-3P Multipurpose Hand-Held Radiation Monitor/Identifier - POLIMASTER.
- Shin, J. W., Lee, J. W., Yu, S., Baek, B. K., Hong, J. P., Seo, Y., ... & Koo, C. M. (2014). Polyethylene/boron-containing composites for radiation shielding. *Thermochimica Acta*, 585, 5-9.
- Shultis, J. K., & Faw, R. E. (2018). Radiation shielding. In *Nuclear Energy* (pp. 369-393). Springer, New York, NY.
- Sukegawa, A. M., Anayama, Y., Ohnishi, S., Sakurai, S., Kaminaga, A., & Okuno, K. (2011). Development of flexible neutron-shielding resin as an additional shielding material. *Journal of Nuclear Science and technology*, 48(4), 585-590.
- Topuz, A. I., & Reyhancan, I. A. (2018). Neutronic Analysis of a Nuclear-Chicago NH3 Neutron Howitzer. *arXiv preprint arXiv:1806.05255*
- Toyen, D., & Saenboonruang, K. (2017). Development of paraffin and paraffin/bitumen composites with additions of B₂O₃ for thermal neutron shielding applications. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 54(8), 871-877.
- Unsear, V. I., & United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). Report to the general assembly. *Anex B: Exposures from Natural Radiation Sources*, New York.

- Wang, P., Tang, X., Chai, H., Chen, D., & Qiu, Y. (2015). Design, fabrication, and properties of a continuous carbon-fiber reinforced Sm₂O₃/polyimide gamma ray/neutron shielding material. *Fusion Engineering and Design*, 101, 218-225.
- Zhang, X., Yang, M., Zhang, X., Wu, H., Guo, S., & Wang, Y. (2017). Enhancing the neutron shielding ability of polyethylene composites with an alternating multi-layered structure. *Composites Science and Technology*, 150, 16-23.
- Zhang, Y., Chen, F., Tang, X., Huang, H., Ni, M., & Chen, T. (2018). Preparation and characterization of paraffin/nickel foam composites as neutron-shielding materials. *Journal of Composite Materials*, 52(7), 953-962.

OPTİSYENLİKTE GÜNCEL GELİŞMELER VE YAPAY ZEKÂ

Özge ERDEM¹

Sümeyra CAN²

1. GİRİŞ

Optisyenlik, temelleri fizik biliminin özellikle optik dalı üzerine kurulmuş, fizik bilgisiyle şekillenen bir mühendislik pratiği ve görme sağlığını destekleyen teknik ve uygulamalı bir sektördür. Işığın kırılması, yansıması, mercekler yardımıyla yönlendirilmesi gibi fiziksel ilkeler; optisyenlik alanında gözlük camı tasarımı, lens üretimi ve görsel düzeltme yöntemlerinde kullanılır. Son yıllarda optisyenlik-fizik eksenine yapay zekâ da eklenmiştir. Karmaşık veri analizi, örüntü tanıma ve otomatik karar destek sistemleri gibi becerilere sahip olan yapay zekâ, optik sistemlerin hem üretiminde hem de uygulanmasında giderek daha fazla yer almaktadır.

Geleneksel optik ölçüm yöntemlerinde insan gözüne dayalı tahmin ve manuel hesaplamalar yapılmakta iken, yapay zekâ destekli sistemler optik verileri fiziksel parametrelerle analiz ederek çok daha hassas sonuçlara ulaşır. Özellikle ışığın davranışını anlamaya ve modellemeye yönelik fizik tabanlı simülasyonların yapay zekâ ile birleşmesi (wavefront

¹ Doç. Dr., Bayburt Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, ozgeerdem@bayburt.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-4542-941X.

² Dr. Öğr. Üyesi, Bayburt Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, sumeyrasacakli@bayburt.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-2471-5786.

teknolojisi gibi), bireyselleştirilmiş optik çözümler üretilmesini mümkün kılar.

Bu bölümde, teknolojik gelişmelerin optisyenlik alanına etkileri ile yapay zekâ teknolojilerinin optisyenliğin bilimsel temellerine entegrasyonu fiziksel prensipler ve pratik uygulamalar çerçevesinde ele alınmaktadır.

2. OPTİSYENLİK ALANINDAKİ GELİŞMELER

Dijitalleşme ve ileri malzeme mühendisliği alanlarında yaşanan teknolojik gelişmelerin, optisyenlik sektörüne olan etkileri ve bu gelişmelerin sektörel uygulamalara yansımaları bu başlık altında incelenmektedir.

2.1. Hafif ve Dayanıklı Çerçeve Malzemeleri

Gözlük çerçevesi üretiminde esneklik, ısı ve darbe dayanımı, hafiflik ve kullanıcının estetik tercihleri gibi faktörler göz önüne alınır. Tüm bu özellikleri bünyesinde barındıran bir gözlük çerçevesi tasarımı için kolay şekil verilebilen, hafif ve dayanıklı malzemelere ihtiyaç vardır. Çerçeve üretiminde kullanılan titanyum, alüminyum, karbon fiber gibi malzemelere 2000’li yılların başında TR90 (*Grilamid*) ve ULTEM (*Polyetherimide-PEI*) de katılmıştır.

TR90, İsviçre merkezli bir firmanın geliştirdiği naylon bazlı bir termoplastiktir^[1]. Alerjik reaksiyon riski düşük, kimyasallara (ter, saç spreyi vb.) karşı dayanıklı, esnek, çok hafif (yoğunluğu $\sim 1.14 \text{ g/cm}^3$), uzun süreli kullanımda şekil bozulmasına ve kırılmaya karşı dirençlidir. Özellikle sporcu ve çocuk gözlüklerinde darbe dayanımı ve esneklik özellikleri nedeniyle tercih edilir.

ULTEM amorf termoplastik polieterimid bir malzemedir ve yüksek sıcaklığa dayanıklıdır^[2]. TR90’dan daha hafiftir, termal ve termooksidatif dayanımı yüksektir,

kimyasallara ve UV'ye karşı dirençli ve biyouyumludur. Başlangıçta elektronik ve havacılık gibi yüksek ısı ve basıncın olduğu alanlarda ve endüstriyel koruyucu gözlüklerde kullanılan teknik çerçevelerdir. 2005 sonrasında özellikle Japonya ve Güney Kore menşeli markalar ile ULTEM çerçeveler öne çıkmıştır.

2.2. Yeni Nesil Optik Lens Malzemeleri

Gözlük camlarında (optik lenslerde) kullanılan malzemeler, hem optik performans hem de fiziksel özellikler açısından çeşitlilik göstermektedir. Bu malzemelerin sadece kırma kusurlarını düzeltmesi değil; aynı zamanda incelik, darbe dayanımı, hafiflik, UV koruması ve düşük maliyet yüksek optik kalite gibi özelliklere sahip olması ve kullanıcı ihtiyaçlarını karşılaması önemlidir.

Günümüzde en kaliteli gözlük camları denince akla polikarbonat ve trivex lensler gelir. Polikarbonat malzeme, termoplastik polimerden üretilir ve $\sim 1.20 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir. Polikarbonat lensler 1958'de ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1970'lerde uzay ve vizör uygulamaları için etkili bir materyal olarak değerlendirilmiş ve 1980'lerde darbe dayanıklılıkları nedeniyle askeri gözlüklerde ve güvenlik gözlüklerinde kullanımı yaygınlaşmıştır^[3]. Günümüzde popülerliğini koruyan bu lens türü sporcu gözlükleri ile çocuk gözlüklerinde de kullanılmaktadır.

Trivex hammaddeli lensler, polikarbonat lenslere göre daha hafiftir ve optik netliği daha iyidir. Polikarbonat ve trivex lensler mineral ve organik lenslere göre kırılma ve çatlamalara karşı daha dayanıklıdır. Özellikle trivex lensler çerçevesiz (faset) gözlüklerde kullanım için idealdir. Yüksek kırıcılık indeksli plastik lensler ise, diğer iki malzemeye kıyasla biraz daha ağırdır ve darbe dayanımı çok daha düşüktür. Fakat kırıcılık indeksi daha yüksek olduğundan yüksek dereceli göz

bozuklukları olan kullanıcılar için daha ince ve estetik lens yapımına imkân tanır.

Günümüzde, malzeme bilimi ve mikroelektronik teknolojilerindeki ilerleme sayesinde optik lens tasarımı yeni bir çağ başlatan akıllı lens malzemeleri geliştirilmektedir. Yeni nesil akıllı lens malzemeleri odak uzaklığını otomatik ayarlayabilen elektrokromik veya sıvı kristal yapı içerir. Elektromik lenslerde, uygulanan düşük voltajlı elektrik sinyalleri ışık geçirgenliğini veya optik özellikleri değiştirir. Sıvı kristallerde ise, moleküler yönelim sayesinde ışığın kırılma açısı kontrol edilir. Ar-Ge aşamasında olan bu elektronik lensler, malzeme mühendisliğinde devrim niteliğindedir ve giyilebilir optoelektronik sistemler alanında büyük bir potansiyele sahiptir.

2.3. İnce Film Teknolojisindeki Gelişmeler

Gelişen ince film teknolojisiyle günümüzde nanopartiküller ile çok fonksiyonlu AR kaplamalar ve aerojel bazlı sol-jel AR kaplamalar yapılmakta ve yeni ürünler elde edilmektedir. Yapılan bir çalışmada, silisyumdioksit (SiO_2) ve titanyumdioksit (TiO_2) nanopartikülleri kullanılarak sol-gel yöntemiyle üretilen çok katmanlı filmler, normal cam üzerinde ışık geçişini %92'den tek taraf kaplamada %95'e, çift taraf kaplamada ise %97 üzeri seviyelere çıkarmıştır [4]. Buna ek olarak, UV emilimi, su ve yağ iticilik, çizilmeye karşı direnç gibi ek avantajlar da sağlamaktadır. Başka bir çalışmada ise, polikarbonat ince film, bir tarafı dayanıklı alüminyum oksit (Al_2O_3 , alümina) ile diğer tarafı ise ışığı optimize eden silika (SiO_2) ile kaplanarak çift taraflı antirefle kaplama yapılmıştır. Böylece, hem mekanik dayanıklılık hem de esneklik özellikleri arttırılmıştır^[5].

Dijital ekran kullanımının artması ile yüksek enerjili görülebilir ışık (özellikle mavi ışık) maruziyetinin göz yorgunluğu, göz sulanması, retinada oksidatif stres, makula

dejenerasyonu ve uyku bozuklukları gibi biyolojik etkileri artmıştır. Bu nedenle, 2000’li yılların başlarında göz koruma teknolojileri üzerine çalışmalar yaygınlaşmıştır. İlk mavi ışık filtreli lensler, 2010’lu yılların başında dijital göz yorgunluğunu azaltma amacıyla piyasaya sürülmüştür ve 2015 sonrasında, özellikle pandemi döneminde uzaktan eğitim ve çalışma nedeniyle popüler hale gelmiştir. Son yıllarda gerçekleştirilen bir patent çalışmasında, mimari ve otomotiv uygulamaları için geliştirilen ultraviyole (UV) ve mavi ışık engelleyici filmler tanımlanmıştır^[6]. Bu filmler, 100–380 nm aralığındaki UV ışınlarını ve 380–400 nm aralığındaki kısa dalga boylu mavi ışığı %100 oranında engelleme kapasitesine sahiptir. Yapısal olarak, şeffaf bir taban katmanı üzerine RF/DC sputtering yöntemiyle kaplanmış UV engelleyici bir tabakadan oluşmaktadır. Bu çok katmanlı yapı, görünür ışık geçirgenliğini korurken zararlı kısa dalga boylu ışınların etkin biçimde filtrelenmesini sağlar^[6].

Önceleri lens üzerine mavi ışık yansımaları engelleyen kaplamalar yapılırken, günümüzde filtre daha çok lens materyaline entegre şekilde üretilmektedir. Böylece, dijital ekranlardan gelen titreşim (flicker) etkileri ve renk sapmaları azaltılarak görüntü kalitesi artırılır.

İç mekânda şeffaf (veya şeffafa yakın) olan ve güneş ışığına maruz kalındığında otomatik olarak kararan ışığa duyarlı ve değişken renkli gözlük camları fotokromik lensler olarak adlandırılır. Fotokromik lenslerin kararmasına neden olan moleküller, güneşin ultraviyole ışınlarıyla aktif hale gelir. Bu lensler, hem UV hem de mavi ışığı filtreleme özelliği gösterir. Fotokromik lensler yüksek indisli camlar, bifokal camlar ve progresif camlar gibi neredeyse tüm cam malzemelerin tasarımında kullanılabilir.

Teknolojinin ilerlemesi ile fotokromik lenslere yansıtıcı olmayan kaplamalar eklenerek performansı arttırılmıştır. Yansıtıcı olmayan kaplama, gece sürüşü gibi düşük ışık koşullarında daha keskin görüş için daha fazla ışığın fotokromik lenslerden geçmesine izin verir ve parlak koşullarda ise güneş ışığının rahatsız edici yansımalarını ortadan kaldırır^[7]. Piyasada yer alan fotokromik güneş gözlüklerinden olan Transitions, Hoya Sensity, Corning SunSensor gibi markalar fotokromik alanda renk, değişim hızı ve polikromatik özellikler açısından farklı modeller sunar. Son yıllarda geliştirilen Zeiss PhotoFusion X lensler, hızlı tepki süresine sahiptir. Bu lenslerin tam aktif (koyu) durumdan %80 şeffaflığa dönüş hızı, ISO 8980-3 standartları çerçevesinde iyileştirilmiştir^[8].

2.4. 3D Yazıcı Teknolojisindeki Gelişmeler

3D yazıcı teknolojisi, son yıllarda optisyenlik alanında bireyselleştirilmiş optik ürünlerin üretimi açısından önemli bir dönüşüm sürecine girmiştir. Bu teknoloji sayesinde, yüz yapısı, kulak konumu, burun köprüsü yüksekliği gibi bireyin yüz anatomisine dayalı olarak kişiye özgü gözlük çerçeveleri tasarlanmakta ve üretilebilmektedir. Üretimde genellikle poliamid türevleri (PA11, PA12) gibi esnek ve yüksek darbe dayanımına sahip malzemeler tercih edilmekte; ayrıca seçici lazer eritme (SLM) yöntemiyle titanyum tozu kullanılarak hipoalerjenik ve yüksek mukavemetli lüks çerçeveler üretilebilmektedir. Çevresel sürdürülebilirlik açısından ise, biyobazlı asetatlar (bio-acetate) giderek daha fazla kullanılmaktadır. Şekil 1, kişiye özel ve tek parça gözlük tasarımı yapan Alvaro Planchart Eyewear firması tarafından tasarlanan ve üretilen Fuse 1+30W yazıcıda 3 boyutlu yazdırılan gözlük çerçeveleri ve saplarını göstermektedir.



Şekil 1. Alvaro Planchart tarafından tasarlanan ve üretilen Fuse 1+30W yazıcıda 3 boyutlu yazdırılan gözlük çerçeveleri ve saplar^[9]

Gözlük camı üretiminde ise, özellikle torik, prizmatik ve progresif gibi kompleks yüzey geometrilerine sahip lensler için 3D yazıcılar kalıp üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Bu sayede serbest biçimli (freeform) lens üretimi daha hassas ve bireysel ihtiyaçlara uygun biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bu alandaki öncü girişimlerden biri olan Luxexcel, özel reçine bazlı malzemeler kullanarak doğrudan 3D baskı yöntemiyle reçeteli gözlük camı üretimini başarıyla gerçekleştiren ilk firma olmuştur. Günümüzde bu teknolojinin artırılmış gerçeklik (AR) gözlükleri için reçeteli cama uyarlanması hedeflenmektedir.

3. OPTİSYENLİK VE YAPAY ZEKÂ

Yapay zekâ, optisyenlik alanına giderek daha fazla entegre edilen bir teknoloji olup, hem görsel sağlık hizmetlerinin kalitesini hem de optik ürünlerin kişiselleştirilmesini önemli ölçüde geliştirmektedir. Optisyenlik uygulamalarında yapay zekâ; görme analizi, dijital ölçüm sistemleri, kişiye özel lens tasarımı, çerçeve seçimi ve sanal deneme uygulamaları ile satış ve danışmanlık süreçleri gibi birçok alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu başlık altında, yapay zekânın optisyenlik alanına getirdiği yeniliklerden bahsedilmektedir.

3.1. Otomatik Ölçüm Cihazları ve Yapay Zekâ

Otomatik ölçüm cihazlarında yaşanan teknolojik gelişmeler hem klinik hem de endüstriyel optik uygulamalar açısından dikkate değer bir ivme kazanmıştır. Bu alandaki en çarpıcı ilerlemelerden ikisi, otomatik refraktometrelerde yapay zekâ ile daha isabetli ölçümler yapılması ve wavefront analizörlerde görüntü işleme algoritmalarına dayalı daha işlevsel sistemlerdir.

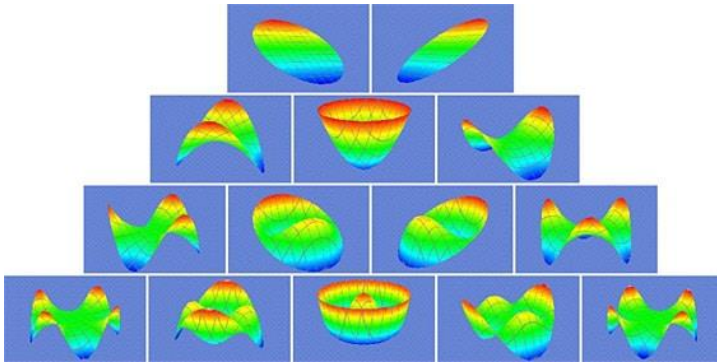
Otomatik refraktometreler, refraktif kusurların objektif olarak ölçülmesinde kullanılan temel araçlar olup, gözlük camı reçetelerinin belirlenmesinde kritik rol oynarlar. Geliştirilen yeni nesil refraktometreler, otomatik göz algılama ve hizalama (auto-alignment) sistemleriyle donatılmıştır. Bu sistemler, göz merkezini otomatik olarak tespit ederek ölçüm süresini önemli ölçüde kısaltmakta ve kullanıcı kaynaklı hataları en aza indirmektedir.

Bazı gelişmiş refraktometre modelleri yalnızca refraksiyon ölçümüyle sınırlı kalmayıp; kornea eğriliği (keratometri), pupil mesafesi, göz içi lens parametreleri gibi biyometrik ölçümleri gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca retina düzeyinde retrospektif refleksiyon analizleri ve non-kontakt tonometri (göz içi basınç ölçümü) gibi ileri düzey tanısal işlemleri de entegre olarak sunabilmektedir (örneğin Visionix VX 120+). Bununla birlikte, temassız başlatma, otomatik mesafe ayarı ve UV sterilizasyon modülü gibi hijyen ve kullanıcı güvenliği odaklı yenilikler de cihazlara entegre edilmiştir. Bazı cihazlar doğrudan hasta raporu oluşturma ve klinik yazılımlarla veri paylaşımı gibi dijital sağlık entegrasyonlarına da imkân sağlamaktadır.

Bahsedilen gelişmeler ile modern otomatik refraktometreler yalnızca kırma kusurlarını değerlendiren cihazlar olmaktan çıkarak; çoklu biyometrik ölçüm, entegre

görüntüleme, temassız kullanım, 3D oküler tarama ve gelişmiş retina analizleri gibi işlevleri bir arada sunan çok amaçlı tanı platformlarına dönüşmüştür. Ayrıca Retinomax K-Plus 5 gibi taşınabilir, el tipi modeller; mobil tarama hizmetleri, kırsal sağlık uygulamaları ve saha bazlı görme taramaları için ideal çözümler sunmaktadır.

Wavefront teknolojisi ise, gözün optik sisteminde yalnızca düşük dereceli refraktif kusurları (miyopi, hipermetropi, astigmatizma) değil, aynı zamanda yüksek dereceli aberasyonları da (koma, küresel aberasyonlar gibi kompleks optik bozukluklar) hassas biçimde tespit etmeye yönelik ileri düzey bir görüntüleme ve ölçüm yöntemidir. Bu sistemde sıklıkla kullanılan Hartmann-Shack sensörü, gözden yansıyan ışık dalgalarının ideal düzlemden sapmalarını analiz ederek bireyin göz optiğine özgü bir dalga cephesi haritası (wavefront map) oluşturur. Şekil 2, görme kusuruna sahip gözden ışık dalgası geçmesi ile oluşan yaygın sapma şekillerini (Zernike polinomlarını) gösterir. Bu şekiller astigmatizm, koma, alan eğriliği, defokus aberasyonu gibi farklı görme kusurlarını temsil eder. Böylece bireydeki görme kusurunu tanımlamaya yarar. Elde edilen veriler lazer sisteme işlenerek kişiye özel düzeltmeye imkân tanır.



Şekil 2. Kusurlu görüşe sahip gözlerden ışık dalgasının geçmesiyle oluşan yaygın sapma şekilleri (Zernike polinomları)^[10]

Wavefront teknolojisi, özellikle kişiselleştirilmiş refraktif cerrahi uygulamalarında (örneğin wavefront-guided LASIK) optik düzeltme hassasiyetini artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Son beş yıl içerisinde bu teknoloji alanında önemli gelişmeler yaşanmıştır. Bunlardan ilki, adaptif optik sistemlerle entegrasyonun sağlanmasıdır. Bu entegrasyon sayesinde wavefront verilerine dayanarak gerçek zamanlı optik düzeltmeler mümkün hale gelmiştir. Ayrıca, wavefront-guided refraktif cerrahi sistemleri her bireyin aberasyon haritasına göre özelleştirilmiş tedavi planları oluşturarak, görsel sonuçlarda daha yüksek kalite ve hasta memnuniyeti sağlamaktadır. Ayrıca, bazı modern otomatik refraktometre modellerine wavefront analiz yetenekleri entegre edilmiştir. Bu cihazlar, klasik refraksiyon ölçümlerinin ötesine geçerek yüksek dereceli aberasyonların da analizini gerçekleştirebilmektedir. Bununla birlikte, yapay zekâ destekli algoritmaların wavefront haritalama süreçlerine entegrasyonu ile patolojik aberasyon örüntülerinin (örneğin keratokonus, korneal skar dokuları, lens dislokasyonları vb.) daha erken ve güvenilir bir şekilde tanılanması mümkün hale gelmiştir.

3.2. Müşteri Analizinde Yapay Zekâ ve Yüz Tanıma Sistemleri

Yüz tanıma sistemlerinde yapay zekâ, kullanıcının yüz yapısı, görsel ihtiyaçları, stil tercihleri ve alışveriş davranışları gibi çeşitli verileri analiz ederek en uygun çerçeve ve lens seçiminin yapılmasına olanak tanır. Bu sistemlerde genellikle 3D yüz tarama teknolojisi, derin öğrenme algoritmaları, görüntü işleme teknikleri ve gerçek zamanlı hizalama sistemleri birlikte çalışır. Özellikle yüz tanıma teknolojisiyle entegre çalışan yapay zekâ sistemleri, çerçeve uyumluluğu analizinde önemli bir rol oynar.

Gelişmiş 3D yüz tarayıcılar, derin öğrenme algoritmaları sayesinde kullanıcının yüz hatlarını ayrıntılı biçimde analiz ederek yüz şekli (oval, yuvarlak, kare vb.), göz hizası, kulak konumu ve burun köprüsü yüksekliği gibi anatomik özelliklere göre çerçeve önerileri sunar. Bu alandaki ileri teknolojilere örnek olarak Zeiss Visufit 1000 ve Essilor Visioffice 3 gibi yapay zekâ ve 3D tarayıcı entegrasyonuna sahip sistemler gösterilebilir. Ayrıca, FittingBox, QG Optique ve GlassesUSA AI gibi platformlar da, yapay zekâ tabanlı analizle kullanıcı ihtiyaçlarına en uygun çerçeve alternatiflerini önerir. YOU MAWO gibi markalar da, kullanıcıdan elde edilen yüz tarama verilerine dayanarak 3D yazıcı ile kişiye özel çerçeve üretimi gerçekleştirir.

Yapay zekâ yalnızca çerçeve uyumluluğunda değil, aynı zamanda cam ve lens tasarımı konusunda da kişiselleştirilmiş çözümler sunar. Kullanıcının bakış yönü, görme bozukluğu türü (miyopi, hipermetropi, astigmatizm, presbiyopi vb.) ve yaşam tarzı (ekran kullanım süresi, araç sürme alışkanlığı vb.) gibi faktörleri birlikte analiz eden sistemler, bireye en uygun cam türü ve tasarımını belirlemektedir. Bu alanda öne çıkan bir örnek, Essilor Varilux XR Serisi'dir. Bu sistem, bir milyondan fazla kullanıcı verisini işleyerek, yapay zekâ destekli progresif cam önerileri sunmakta ve kullanıcıya özel çözümler geliştirmektedir. Öte yandan, Luxexcel firması, reçeteli gözlük camlarını doğrudan 3D yazıcı ile üretme hedefiyle yapay zekâ tabanlı lens tasarımı entegrasyonu üzerinde çalışmaktadır. Bu teknoloji özellikle artırılmış gerçeklik (AR) gözlüklerinde reçeteli cam kullanımını mümkün kılacak şekilde geliştirilmektedir.

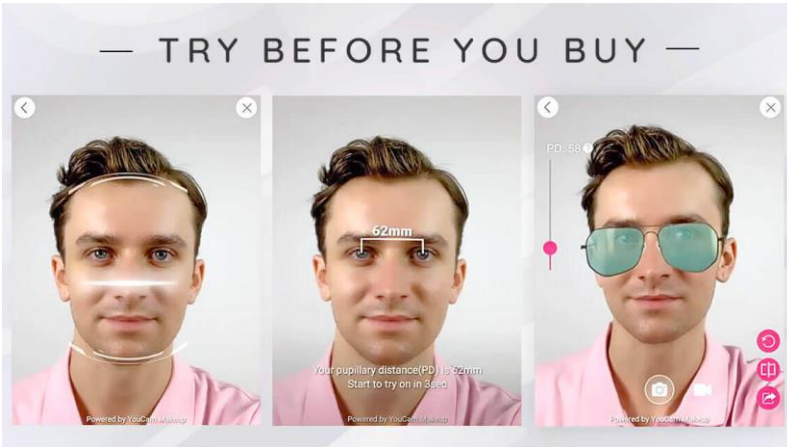
3.3. Sanal Deneme Kabinleri

Sanal deneme kabinleri (Virtual Try-On Systems), kullanıcının gerçek zamanlı yüz görüntüsünü analiz eden ve

buna uygun farklı gözlük çerçevelerinin dijital ortamda denenmesine olanak tanıyan sistemlerdir. Bu uygulamalarda, kullanıcının yüzü bir kamera aracılığıyla taranır; ardından göz, burun, kulak gibi referans noktaları yapay zekâ ve bilgisayarlı görü (computer vision) teknikleri ile algılanır. Seçilen çerçeve, 3D modelleme aracılığıyla sanal olarak yüze yerleştirilir. Şekil 3, çevrimiçi sanal gözlük denemesini göstermektedir.

Sanal deneme kabinleri özellikle hijyen, zaman tasarrufu ve kullanıcıya en uygun alternatifleri hızlı bir şekilde sunabilme avantajları sayesinde hem fiziksel mağazalarda hem de online platformlarda yaygın olarak tercih edilir.

Sanal deneme kabinleri alanında öne çıkan sistemlerden biri olan Zeiss Visufit 1000, yüksek çözünürlüklü 3D yüz modelleme ile kullanıcıya sanal çerçeve deneyimi sunar. Ayrıca, Lenskart 3D Try-On, mobil uygulama üzerinden yüz tanıma ve artırılmış gerçeklik (AR) desteğiyle kullanıcıların sanal gözlük denemesi yapabilmesini sağlayan yenilikçi çözümler arasında yer alır.



Şekil 3. Çevrimiçi sanal olarak gözlük deneme^[11]

3.4. Giyilebilir Yapay Zekâ Destekli Gözlükler

Giyilebilir yapay zekâ gözlükleri (*smart glasses*), dışarıdan bakıldığında sıradan bir gözlük gibi görünse de, içerisinde mikrofön, kamera, hareket algılayıcılar, sensörler, ekran ve yapay zekâ yazılımı barındıran gelişmiş cihazlardır. Sesli komutlara yanıt verirler, canlı çeviri yapabilir, görülen nesneleri tanıyabilir, fotoğraf ve video çekebilirler. Ayrıca yüz tanıma ve metin okuma gibi özellikleri vardır. Bu teknolojinin öncülerinden biri, Google tarafından 2013 yılında tanıtılan “Google Glass” olmuştur. Şekil 4, reçeteli lens için siyah çerçeveli bir Google Glass göstermektedir. Gizlilik endişeleri, kısa pil ömrü, yüksek fiyatı ve alışılmadık tasarımı nedeniyle Google Glass beklenen ilgiyi görmemiş ve proje 2023 yılında tamamen sonlandırılmıştır.

Günümüzde akıllı gözlük teknolojisi önemli ölçüde ilerlemiştir. Ray-Ban Meta gözlükleri kamera, sesli asistan ve yapay zekâ desteğiyle öne çıkarken, yeni modellerinde ekran ve artırılmış gerçeklik (AR) özellikleri üzerinde çalışmalar sürmektedir. Samsung, Google Gemini destekli yapay zekâ gözlükler geliştirmektedir. Öte yandan, Brilliant Labs firmasının Frame AI akıllı gözlüğü yalnızca 40 gram ağırlığıyla dünyanın en ince yapay zekâ gözlüğü olarak tanıtılmıştır^[12]. İçerisinde ekran, canlı çeviri ve hafıza özellikleri barındırır.



Şekil 4. Reçeteli lens için siyah çerçeveli bir Google Glass^[13]

AR (*Artırılmış Gerçeklik*) destekli gözlükler ise, gerçek dünya üzerine dijital bilgileri yansıtabilen akıllı cihazlardır. Ortamı analiz ederek kullanıcıya çeviri, yol tarifi, hava durumu gibi bilgiler sunabilir. Göz takibi ve baş hareketi algılama gibi özelliklerle kullanıcının baktığı yere göre bilgi gösterme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, kemik iletimli ses teknolojisi ile kulaklık kullanmadan ses iletimi sağlar. Brilliant Labs Halo, micro OLED ekranı, kemik iletimli ses yapısı ve son derece hafif çerçevesiyle dikkat çeker. Solos AirGo V ise, sporcular için tasarlanmış özel bir çerçeveye sahiptir; içerisinde fitness sensörleri ve ChatGPT desteği bulunur.

Sonuç olarak, akıllı gözlük çerçeveleri artık sadece bir gözlük değil, yapay zekâ destekli, sensörlerle donatılmış ve çevreyle etkileşim kurabilen mini bilgisayarlar haline gelmiştir. AR teknolojisi ile birleştiğinde ise, kişisel bir asistan haline gelir.

3.5. Yapay Zekâ Uygulamalarını Kullanan Başlıca Optik Firmalar

EssilorLuxottica, dünya genelinde gözlük camı, çerçeve ve görsel sağlık çözümleri sunan lider firmalardan biridir. Şirket, progresif cam tasarımı, 3D yüz taraması ve AR destekli sanal deneme sistemleri gibi uygulamalarda yapay zekâ teknolojilerinden aktif olarak yararlanmaktadır.

ZEISS, optik teknolojiler alanında küresel düzeyde öncü bir konuma sahiptir. Firma, görsel analiz, medikal görüntüleme ve kişiye özel lens tasarımı gibi alanlarda yapay zekâ teknolojilerini yoğun şekilde kullanmaktadır. Özellikle kişiye özel lens üretimi, 3D yüz modelleme ve stil önerisi sistemleri gibi uygulamalarla kullanıcı deneyimini özelleştirmektedir.

HOYA ve Luxexcel firmaları da yapay zekâ tabanlı çözümler geliştiren önemli firmalar arasında yer alır. HOYA, kişiselleştirilmiş yaşam tarzı analizine dayalı cam tasarımı ve

kullanıcı deneyimi optimizasyonu gibi alanlarda yapay zekâ uygulamalarını kullanır. Luxexcel ise, özellikle 3D baskı ile reçeteli gözlük camı üretimi ve AR/VR gözlük sistemleriyle entegrasyon üzerine odaklanan bir firmadır. Yapay zekâ destekli lens tasarımı entegrasyonlarıyla dijital üretim ve optik teknolojileri bir araya getirir.

4. SONUÇ

Optisyenlik mesleği, gelişen teknolojiler ve yapay zekâ uygulamalarıyla entegre hâle gelerek hızla dönüşmektedir. Kişiye özel çerçeve ve lens tasarımlarında, bireysel biyometrik verilerin analizine dayalı olarak geliştirilen yapay zekâ algoritmaları kullanılmakta; bu sayede hem optik uyum hem de kullanıcı konforu üst düzeye çıkarılmaktadır.

Dijital ölçüm sistemlerinin yapay zekâ ile bütünleştirilmesi ölçüm doğruluğunu arttırmakta ve manuel hataları en aza indirmektedir. Ayrıca, 3D yazıcılar ve modelleme teknolojileri aracılığıyla hızlı, esnek ve stoksuz üretim süreçleri mümkün hâle gelmiştir.

Yüz tanıma sistemleri ve sanal deneme ortamları, çerçeve ve lens seçiminde hem hijyenik hem de kişiselleştirilmiş deneyim sunarak, kullanıcı odaklı hizmet anlayışını güçlendirmektedir. Tüm bu gelişmeler, optisyenlik alanını yalnızca görsel düzeltme sağlayan bir uygulama olmaktan çıkarır. Optisyenlik alanı artık yüksek teknolojiye entegre bir sağlık hizmeti olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] LookPolymers. (n.d.). *EMS-Grivory Grivory® TR 90 NZZ nat PAMACM12-I*. Retrieved August 23, 2025, from https://www.lookpolymers.com/polymer_EMS-Grivory-Grivory-TR-90-NZZ-nat-PAMACM12-I.php.
- [2] Siviour, C. R., Rae, P. J., & Palmer, S. J. P. (2015). The Hugoniot and strength of Ultem 1000 polyetherimide. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 1(1), 112–119. <https://doi.org/10.1007/s40870-015-0029-z>.
- [3] EDC Magazine. (n.d.). *What are safety glasses made of? (According to ANSI & OSHA)*. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.edcmag.com/what-are-safety-glasses-made-of>.
- [4] Hendrick, T. (2019, January 2). *Thin-film coatings: Nanoparticles enhance performance of optical coatings*. Laser Focus World. Retrieved from <https://www.laserfocusworld.com/optics/optics-design/article/16556274/thin-film-coatings-nanoparticles-enhance-performance-of-optical-coatings>.
- [5] Jang, H. J., Jeon, J., Kim, S., Park, Y., & Lee, D. (2024). Dual-coated antireflective film for flexible and robust multi-environmental optoelectronic applications. *Biomimetics*, 9(10), 644. <https://www.mdpi.com/2313-7673/9/10/644>.
- [6] Mun, J. H., & Kim, H. T. (2025). *UV-blocking film for architectural and automotive use with 100% UV and blue light blocking*. U.S. Patent Application No. 20250123423. Justia. Retrieved September 23, 2025, from <https://patents.justia.com/patent/20250123423>.

- [7] Heiting, G. (2021, February 17). *Photochromic lenses: Transitions and other light-sensitive eyeglass lenses*. All About Vision. Retrieved from <https://www.allaboutvision.com/tr/gozluk/gozlukler/lensler/fotokromik-lensler/>.
- [8] ZEISS. (t.y.). *ZEISS PhotoFusion X lenses*. ZEISS. Retrieved from <https://www.zeiss.com.tr/vision-care/yeni-gozluk-ihitiyaci/photofusion-x.html>.
- [9] Formlabs. (n.d.). *A guide to 3D printed glasses and eyewear frames*. Formlabs. Retrieved from <https://formlabs.com/blog/3d-printed-glasses-frames-eyewear/?srsltid=AfmBOoqELiH754sM6G6Wui2SGRP1dzhMUhj3u73Y02KEsMa2P6EX3SzS>.
- [10] Vessel, M. (2019, February 27). *Wavefront technology and its use in eye examinations*. All About Vision. Retrieved from <https://www.allaboutvision.com/eye-care/eye-exam/types/wavefront/>.
- [11] Skwiot, S. (2022, September 1). *How eyewear brands can help customers virtually try on glasses online*. Perfect Corp. Retrieved from <https://www.perfectcorp.com/business/blog/commerce/how-eyewear-brands-can-help-customers-virtually-try-on-glasses-online>.
- [12] Sin, B. (2024, July 31). *Brilliant Labs' Frame AI smart glasses review: The future of personal computing*. Forbes. Retrieved from <https://www.forbes.com/sites/bensin/2024/07/31/brilliant-labs-frame-ai-smart-glasses-review-future-of-personal-computing/>.
- [13] Wikipedia contributors (2025, August 25). *Google Glass*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Glass.

ION IMPLANTATION TECHNOLOGY FOR SENSING APPLICATIONS

Selim ÜNAL³

1. INTRODUCTION

The ion implantation technique involves bombarding a solid target with an energetic ion beam, which can reveal modern materials engineering and high-volume manufacturing. Patented by William Shockley in the 1950s and adapted for semiconductor fabrication (Fair 2000). The method introduces dopant atoms into silicon to modify its electrical properties (Larson, Williams, and Current 2011). It enables the physical placement of ions into a host lattice, where the dopant concentration, depth, and lateral distribution are controlled at the atomic level. The technique can be applied to semiconductor, wide-bandgap materials, functional polymers, and two-dimensional materials, enabling the improvement of cutting-edge CMOS image sensors and high-performance quantum sensors (Current 2019; Larson et al. 2011; Namba 1975).

The desired effect of ion bombardment characterizes the development and application of ion implantation for sensing, thereby reducing detrimental side effects (Das and Basak 2021). The implantation introduces a dopant to establish a p-n junction, which may result in lattice damage, degrading device performance by increasing leakage currents or reducing carrier mobility (Chhokkar 2014; Huang et al. 2024; Paliwal, A., & Tomar n.d.). Unwanted metallic contamination is also damaging

³ Dr. Öğr. Üyesi, Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, sunal@kastamonu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1521-3327.

to image sensors, where a pixel might be defective due to a single stray atom (Haque and Sumaiya 2017; Teranishi, Fuse, and Sugitani 2018b). Enhancing precision and minimizing unintended defects plays a critical role, leading to novel designs and processing techniques that enable unavoidable implantation damage to serve as a valuable tool for materials engineering (Mayer 1973).

This chapter provides an overview of ion implantation in sensor technology. Fundamental principles of the implantation process, ion-solid interactions, and lattice damage. Applications of image sensors and MEMS pressure sensors, and how these technologies have driven the development of the field. Emerging areas of chemical and temperature sensors, as well as two-dimensional materials, where implantation is used to enable new functionalities, highlight key challenges that are driving the research and future aspects.

2. ION IMPLANTATION PROCESS

An ion implanter with a high vacuum introduces impurity atoms into a solid substrate. A specific ion species is selected, generated, and delivered to a target wafer. The ion source includes a source material, usually a gas containing the desired dopant, which is ionized to create a plasma. An extraction electrode with a voltage applied to it pulls the positive ions out of the source, forming an ion beam. The extracted beam is targeted into a mass analyzer magnet, which bends the ion beam and the radius of the bend curvature, R . The ion's trajectory depends on its mass-to-charge ratio (m/q), velocity (v), and the magnetic field (B). It can be explained with the Lorentz force,

$$qvB = \frac{mv^2}{R} \quad (1)$$

by rearranging this with $E = \frac{mv^2}{2} = qV$ where V is the acceleration voltage, the bending radius is

$$R = \frac{\sqrt{2mV}}{qB}. \quad (2)$$

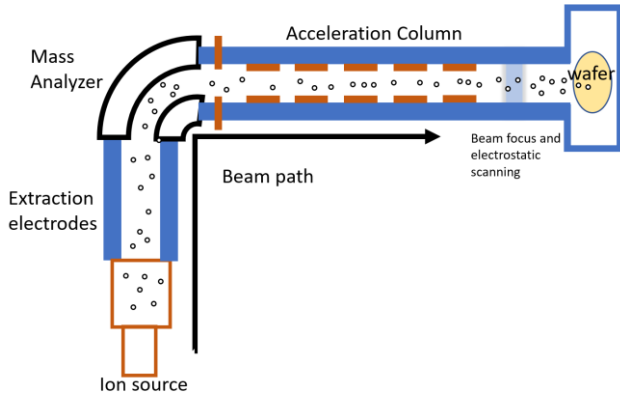


Figure 1. Schematic of an ion implanter.

An aperture, or slit, is placed along the curved path, allowing only desired ions to pass through and obtain a pure beam of the selected dopant (Teranishi et al. 2018b). Purified ion beams enter the main acceleration column, where a strong electric field is applied to the ions. This determines how deep the ions will penetrate the target substrate. Implanter energy can range from a few hundred electron volts (eV) for shallow implantation to several million electron volts (MeV) for deep implantation. Finally, a high-energy beam enters the end station, where it is scanned across the surface of the target wafer to ensure uniform implant. For high-current implants, the wafer is mounted on a rotating disk to distribute the beam and facilitate heat dissipation (Mack et al. 1985).

3. ION-SOLID INTERACTIONS

When an energetic ion penetrates a solid target, it loses energy through a series of ion-solid interactions with the target's atoms and electrons until it stops. The total energy loss per unit path length, stopping power (S), is the sum of nuclear stopping and electronic stopping (Ziegler and Iafrate 1980).

$$S = \frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{nuclear}} + \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{electronic}} \quad (3)$$

Nuclear Stopping occurs when the projectile of ions collides elastically with the nuclei of the target atom. This collision causes deflection of the ion's path and can knock target atoms out of their lattice sites. Nuclear stopping is dominant at lower ion energies (<20 keV), causing crystallographic damage.

Electronic Stopping results from inelastic interactions between mobile ions and the electron clouds of the target atoms. A continuous drag force on the ion causes energy loss through excitations and ionizations within the target's electronic system. Electronic stopping occurs highly at higher ion energies, as energy transferred via electronic stopping is dissipated as heat (Fu et al. 2022).

A characteristic depth profile for the ion-implanted ions is a Gaussian function, defined by the projected range, the average penetration depth of the ions, and straggle, the standard deviation of the distribution. If an ion enters the target aligned with a major crystallographic axis or plane, it can travel through the open channels of the lattice and experience fewer nuclear collisions. This phenomenon is known as ion channeling, which can lead to deep, uncontrolled dopants in the dopant profile. To avoid ion channeling, the wafers are tilted by approximately 7° and twisted with respect to the ion beam during implantation.

Another method is to use pre-amorphization implantation, where a non-dopant species is implanted at a high dose first to destroy the target crystal structure. The subsequent dopant implant is then performed into the amorphous layer, eliminating the channeling (Lu et al. 2025).

4. ION IMPLANTATION IN SENSOR TECHNOLOGIES

4.1. Image Sensors

Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) image sensors are among the most complex semiconductor devices, whose performance relies on generating, storing, and transferring a tiny packet of electrons with high efficiency and low noise. Ion implantation enables the establishment of the advanced pixel architectures, defining imaging performance. A pinned photodiode (PPD) is a p⁺/n/p⁻ junction, fabricated using multiple ion implantation steps (White, Sandall, and Chee Hing Tan 2014). A potential well collects photogenerated electrons while depleting the surface. Surface depletion is achieved by the shallow p⁺ pinning layer, which passivates surface states and avoids dark current due to the thermal generation of electrons in the absence of light (Stefanov et al. 2018). The PPD has a low dark current, high quantum efficiency (Teranishi, Fuse, and Sugitani 2018a). A PPD requires multiple implants with different species, doses, and energies to shape the doping profiles of the p⁺ pinning layer and the n-type charge collection region. For prolonged wavelength sensitivity, high-energy implants might be necessary (Teranishi et al. 2018a).

4.2. Piezoresistive Pressure and Strain Sensors

Ion implantation is used to fabricate the active sensing elements for micro-electromechanical system (MEMS) pressure

sensors (Misuraca, Kevin Range, and Mc 2009). A silicon diaphragm in the sensors deflects under an applied pressure. The mechanical stress is measured by piezoresistors placed on the diaphragm's surface (Li et al. 2025). The process involves implanting a p-type dopant into an n-type silicon substrate or diaphragm to form the resistive elements of the Wheatstone bridge circuit (Meng et al. 2021). Ion implantation eliminates any adhesive or interface layer, thereby establishing an integral part of the single-crystal silicon diaphragm, which results in long-term stability and repeatability (Li et al. 2025).

4.3. Chemical and Gas Sensors

The performance of chemical and gas sensors depends on the surface properties of the sensing material, surface area, defect density, and catalytic activity. Ion implantation can modify these properties, improving the sensitivity and selectivity of the sensor (Okamura et al. 2007). In metal oxide semiconductors, the sensing mechanism is based on changes in electrical conductivity due to the adsorption and reaction of gas molecules on the surface. Ion implantation can introduce dopants or oxygen vacancies and lattice defects, serving as charge carriers or adsorption sites, which can enhance the material's reactivity with target gases. For example, implanting ions into ZnO can alter its electrical and optical properties, thereby enhancing its sensitivity (Krajewski et al. 2022; Veletić et al. 2022).

4.4. Temperature Sensors

Metal nanoparticles can be implanted on a substrate to use them as a surface plasmon resonance (SPR) optical sensor (Rabbani et al., 2024). Ions of a metal, such as gold (Au⁺) or silver (Ag⁺), are accelerated and bombarded into a dielectric substrate similar to glass or a polymer. The ions get embedded just below the surface, shown in Figure 2a. A subsequent heat

treatment (annealing) causes the implanted metal atoms to move together and form stable spherical nanoparticles in the substrate. SPR formation, depending on the implantation dosage, is shown in Figure 2c. When light hits the embedded nanoparticles, it excites the surface plasmons on their surface. The specific wavelength or angle of light resonates, resulting in a SPR signal detected. Temperature sensing is a physical process that requires no molecules to change the SPR signal. The temperature change alters the volume thermal expansion of nanoparticles, forming an SPR signal (Unal, 2021). For molecular detection, if a target molecule binds to the sensor's surface, it changes the local refractive index, resulting in a shift (Butt, 2025).

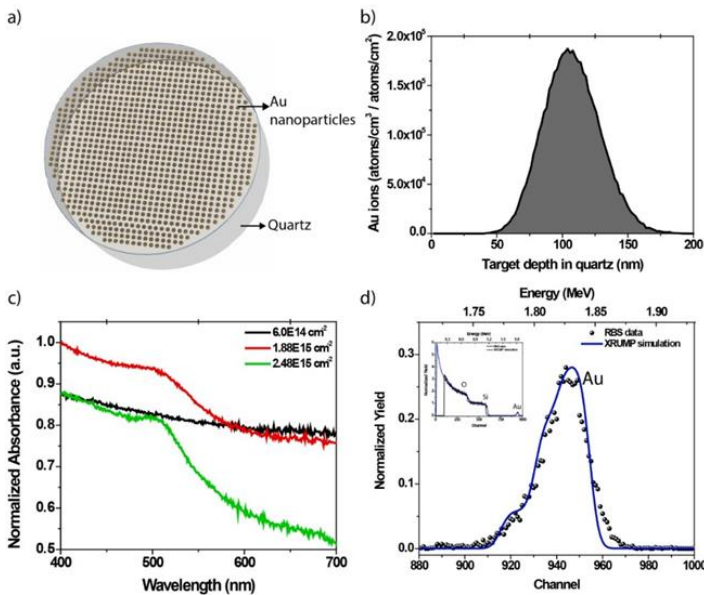


Figure 2. a) Schematic of ion implantation into a dielectric substrate. b) SRIM depth analysis of the implanted ions. c) SPR evolving depending on the implant dosage. d) Rutherford backscattering analysis of the implanted sensor. Figure reproduced from: (Unal 2021). Ion implanted Au nanoparticles in surface plasmon temperature sensing. Materials Letters, 305, 130793. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130793>. Reproduced with permission from Elsevier (License No. 6118941479172).

5. TWO-DIMENSIONAL (2D) MATERIALS

Applying ion implantation without causing significant damage to 2D materials presents a challenge, as they have only a one or a few-atom-thick structure. By using ion beams with low kinetic energies, around 20-50 eV, ions can have sufficient energies to displace a lattice atom (e.g., a carbon atom in graphene) and take its place, but not enough to penetrate the material or cause damage (Ren et al., 2021). Another approach with high-energy implanters is to coat the 2D material with a thin, sacrificial protective layer, such as polymethylmethacrylate (PMMA) (He et al., 2025; Hidaka et al., 2022; Zhao et al., 2023). The high-energy ion beam from the implanter first passes through the PMMA, losing energy, and then it hits the 2D material with the optimal energy for implantation. The PMMA layer can be removed easily after the implant, leaving a doped 2D material with minimal damage. This method requires the ability to adjust the optimal energy, sacrificial layer density, and thickness.

6. CONCLUSION

Ion implantation has a unique capability for precisely modifying materials at the atomic level. It is an essential tool in the design and fabrication of state-of-the-art materials and advanced sensors. The controlled introduction of dopants and defects is desired to functionalize materials using the unavoidable damage. The successful navigation of the trade-off between modification and damage is still a challenge, driving innovation in the field. The future of ion implantation for sensing applications lies in the necessity of contamination control to build high-performance sensor arrays, design pure beamlines, eliminate contaminants, and implement damage control to achieve more precise atomic-level dopant placement.

In summary, ion implantation has moved beyond to become a cornerstone of modern sensor technology. Atomic-scale precision and material purity drive its evolution, enabling science and technology.

REFERENCES

- Chhokkar, Preeti. 2014. "Future Perspective of Ion Implantation: A Review." *International Journal of Recent Research Aspects* 1(2):231–35.
- Current, Michael I. 2019. "The Role of Ion Implantation in CMOS Scaling: A Tutorial Review." *AIP Conference Proceedings* 2160(April 1991). doi: 10.1063/1.5127674.
- Das, Amaresh, and Durga Basak. 2021. "Efficacy of Ion Implantation in Zinc Oxide for Optoelectronic Applications: A Review." *ACS Applied Electronic Materials* 3(9):3693–3714. doi:10.1021/acsaelm.1c00393.
- Fair, R. B. 2000. "A Historical View of the Role of Ion-Implantation Defects in PN Junction Formation for Devices." *MRS Proceedings* 610:B4.1. doi:10.1557/PROC-610-B4.1.
- Fu, Yan-Long, Zhong-Zheng Tang, Wei Cheng, Jia-Yong Zhong, and Feng-Shou Zhang. 2022. "Electronic Stopping Power and Electronic Energy-Loss Mechanism for a Low-Energy Ion in TiN under Channeling Conditions." *Physical Review A* 105(4):042818. doi:10.1103/PhysRevA.105.042818.
- Haque, Ariful, and Sharaf Sumaiya. 2017. "An Overview on the Formation and Processing of Nitrogen-Vacancy Photonic Centers in Diamond by Ion Implantation." *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 1(1):1–16. doi:10.3390/jmmp1010006.
- Huang, Liqiu, Hengyi Wu, Guangxu Cai, Shixin Wu, Derun Li, Tao Jiang, Biyan Qiao, Changzhong Jiang, and Feng Ren. 2024. "Recent Progress in the Application of Ion Beam Technology in the Modification and Fabrication of

- Nanostructured Energy Materials.” *ACS Nano* 18(4):2578–2610. doi: 10.1021/acsnano.3c07896.
- Krajewski, Tomasz A., Renata Ratajczak, Serhiy Kobaykov, Wojciech Wozniak, Krzysztof Kopalko, and Elzbieta Guzewicz. 2022. “Electrical Properties of ZnO Films Implanted with Rare Earth and Their Relationship with Structural and Optical Parameters.” *Materials Science and Engineering: B* 275:115526. doi:10.1016/j.mseb.2021.115526.
- Larson, Lawrence A., Justin M. Williams, and Michael I. Current. 2011. “Ion Implantation for Semiconductor Doping and Materials Modification.” *Reviews of Accelerator Science and Technology* 04(01):11–40. doi:10.1142/S1793626811000616.
- Li, Fengchao, Shijin Yan, Cheng Lei, Dandan Wang, Xi Wei, Jiangang Yu, Yongwei Li, Pengfei Ji, Qiulin Tan, and Ting Liang. 2025. “Design and Fabrication of Silicon Pressure Sensors Based on Wet Etching Technology.” *Micromachines* 16(5). doi: 10.3390/mi16050516.
- Lu, Hao, Xiaorun Hao, Yichi Zhang, Ling Yang, Bin Hou, Meng Zhang, Mei Wu, Xiaohua Ma, and Yue Hao. 2025. “Recent Progress of Ion Implantation Technique in GaN-Based Electronic Devices.” *Micromachines* 16(9). doi:10.3390/mi16090999.
- Mack, M. E., G. Ryding, D. H. Douglas-Hamilton, K. Steeples, M. Farley, V. Gillis, N. White, A. Wittkower, and R. Lambracht. 1985. “Wafer Charging and Beam Interactions in Ion Implantation.” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 6(1–2):405–11. doi: 10.1016/0168-583X(85)90665-2.

- Mayer, J. W. 1973. "Ion Implantation in Semiconductors." Pp. 3–5 in *1973 International Electron Devices Meeting*. IRE.
- Meng, Qinggang, Yulan Lu, Junbo Wang, Deyong Chen, and Jian Chen. 2021. "A Piezoresistive Pressure Sensor with Optimized Positions and Thickness of Piezoresistors." *Micromachines* 12(9). doi: 10.3390/mi12091095.
- Misuraca, &. Moore Hendrix Abernethy Sloane, and Darrin M. York Adam Moser Kevin Range, and Mc. 2009. "Review: Semiconductor Piezoresistance for Microsystems." *Proceedings of the IEEE* 97(3):513–52. doi: 10.1109/JPROC.2009.2013612.
- Namba, Susumu, ed. 1975. *Ion Implantation in Semiconductors*. Boston, MA: Springer US.
- Okamura, K., T. Ishiji, M. Iwaki, Y. Suzuki, and K. Takahashi. 2007. "Electrochemical Gas Sensor Using a Novel Gas Permeable Electrode Modified by Ion Implantation." *Surface and Coatings Technology* 201(19–20):8116–19. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.065.
- Paliwal, A., & Tomar, M. n.d. "Ion Implantation – Semiconductor Material and Devices." in *Semiconductor material and devices*. INFLIBNET Centre.
- Stefanov, Konstantin D., Andrew S. Clarke, James Ivory, and Andrew D. Holland. 2018. "Design and Performance of a Pinned Photodiode Cmos Image Sensor Using Reverse Substrate Bias." *Sensors (Switzerland)* 18(1). doi: 10.3390/s18010118.
- Teranishi, Nobukazu, Genshu Fuse, and Michiro Sugitani. 2018a. "A Review of Ion Implantation Technology for Image Sensors." *Sensors (Switzerland)* 18(7). doi: 10.3390/s18072358.

- Teranishi, Nobukazu, Genshu Fuse, and Michiro Sugitani. 2018b. “A Review of Ion Implantation Technology for Image Sensors †.” *Sensors* 18(7):2358. doi:10.3390/s18072358.
- Unal, Selim. 2021. “Ion Implanted Au Nanoparticles in Surface Plasmon Temperature Sensing.” *Materials Letters* 305(August):130793. doi: 10.1016/j.matlet.2021.130793.
- Veletić, Mladen, Ehsanul Hoque Apu, Mitar Simić, Jacob Bergsland, Ilangko Balasingham, Christopher H. Contag, and Nureddin Ashammakhi. 2022. “Implants with Sensing Capabilities.” *Chemical Reviews* 122(21):16329–63. doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00005.
- White, Benjamin S., Ian Sandall, and Chee Hing Tan. 2014. “Planar InAs P-i-n Photodiodes Fabricated Using Ion Implantation.” Pp. 352–53 in *2014 IEEE Photonics Conference*. IEEE.
- Ziegler, J. F., and G. J. Iafrate. 1980. “The Stopping of Energetic Ions in Solids.” *Radiation Effects* 46(3–4): 199–219. doi: 10.1080/00337578008209171.

OPTİSYENLİK MESLEĞİ VE GELİŞMELER HAKKINDA AYRINTILI İNCELEME

SümeYra CAN¹

Özge ERDEM²

1. GİRİŞ

OptisYenlik programları tipik olarak optik, lens tasarımı ve hasta etkileşimi gibi alanlara odaklanan teorik bilgi ve pratik becerilerin bir kombinasyonunu kapsamaktadır. Müfredat, öğrencileri gözlüklerin takılması ve potansiyel göz sağlığı sorunlarının belirlenmesi de dahil olmak üzere sahada karşılaşacakları çeşitli zorluklara hazırlamak için tasarlanmıştır (King ve ark., 2023; Ho ve ark., 2019). Ayrıca teknoloJideki ilerlemeler ve sağlık uygulamalarındaki değişiklikler, yetkinliği korumak için devamlı eğitim gerektirdiğinden, sürekli mesleki gelişim şarttır (Ho ve ark., 2019).

OptisYenler, optometristler ve oftalmologlar arasındaki iş birliği, etkili göz bakımı sunmak için hayati önem taşımaktadır. Bu profesyoneller arasında açık iletişim ve tanımlanmış roller, hasta bakımını geliştirebilir ve sevk sürecini kolaylaştırabilir (Yu ve ark., 2023; Abu-Amara ve ark., 2019). OptisYenler genellikle göz bakımı arayan hastalar için ilk temas noktasıdır ve bu da göz rahatsızlıklarının erken teşhisinde rollerini kritik hale getirmektedir. Araştırmalar optisYenlerin diyabetik

¹ Dr. Öğr. Üyesi., Bayburt Üniversitesi, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, OptisYenlik Programı, sumeyrasacakli@bayburt.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2471-5786

² Doç. Dr., Bayburt Üniversitesi, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, OptisYenlik Programı, ozgeerdem@bayburt.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4542-941X.

retinopati ve glokom dahil olmak üzere çeşitli göz hastalıklarını etkili bir şekilde tarayabildiğini ve böylece gerektiğinde optometristlere veya oftalmologlara zamanında yönlendirmeleri kolaylaştırdığını göstermektedir (Milutinović ve ark., 2017; Moyegbone, 2024). Örneğin, optisyenler ön değerlendirmeler yaparak ve hasta geçmişlerini toplayarak optometristlere yardımcı olabilir ve bu da göz muayenelerinin verimliliğini artırabilir (Mathan, 2024). Bu proaktif yaklaşım yalnızca hasta sonuçlarını iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda uzman göz sağlığı hizmeti sağlayıcılarının üzerindeki yükü hafifleterek daha karmaşık vakalara odaklanmalarını sağlamaktadır (Chaturvedi ve ark., 2020). Ayrıca, meslekler arası eğitim girişimleri, her mesleğin katkılarının daha iyi anlaşılmasını teşvik edebilir ve sonuçta hasta deneyimlerinin ve sonuçlarının iyileştirilmesine yol açabilir (Şengör ve ark., 2018).

Teknolojinin optisyenlik mesleği üzerindeki etkisi göz ardı edilemez. Dijital araçların ve tele-sağlık platformlarının ortaya çıkışı, optisyenlerin hastalarla etkileşim kurma ve bakım sunma biçimlerini dönüştürmüştür. Örneğin, tele-optometri kullanımı optisyenlerin sanal konsültasyonlar yapmasına olanak tanıyarak, özellikle yetersiz hizmet alan bölgelerde göz sağlığı hizmetlerine erişimi genişletmektedir (Ferrety ve ark., 2022; Ramamurthy, 2024). Ayrıca görüntüleme teknolojisindeki gelişmeler, optisyenlerin görme sağlığına ilişkin daha doğru değerlendirmeler yapmasına olanak tanıyarak katarakt ve makula dejenerasyonu gibi durumların daha erken tespit edilmesini kolaylaştırmaktadır (Anjou ve ark., 2013). Teknoloji gelişmeye devam ettikçe, optisyenlerin rollerinde etkili olmaya devam edebilmeleri için bu değişikliklere uyum sağlamaları gerekmektedir.

Ayrıca, optisyenlik mesleği halkın farkındalığı ve bakıma erişimi ile ilgili zorluklarla karşı karşıyadır. Araştırmalar, birçok bireyin optisyenler tarafından sağlanan

hizmetlerden habersiz olduğunu ve bunun yerine genellikle pratisyen hekimlerden bakım istediğini göstermektedir (Boadi-Kusi ve ark., 2021; Xulu-Kasaba ve ark., 2021). Bu farkındalık eksikliği, uygun göz bakımının alınmasında gecikmelere yol açabilir ve mevcut görme bozukluklarını daha da kötüleştirebilir. Bu sorunu ele almak için, düzenli göz muayenelerinin önemi ve optisyenlerin sağlık sistemindeki rolü hakkında halkı eğitmek için hedefli halk sağlığı kampanyaları ve topluma erişim girişimleri gereklidir (Motowa ve ark., 2014; Baig, 2023).

Optisyonluk mesleği kapsamlı göz bakımının sağlanmasının ayrılmaz bir parçasıdır. Optisyonler, eğitim hazırlıkları, iş birliğine dayalı uygulamaları ve teknolojik gelişmelere uyumları sayesinde, sağlık hizmetleri ortamının artan taleplerini karşılamak için iyi bir konuma sahiptir. Kamu bilincini artırarak ve meslekler arası iş birliğini teşvik ederek optisyonluk mesleği, farklı nüfuslar için göz sağlığı sonuçlarının iyileştirilmesinde hayati bir rol oynamaya devam edebilir.

2. OPTİSYENLİĞİN GELECEĞİ

Optisyonluk mesleği hastalar ile optometristler ve oftalmologlar tarafından sağlanan uzmanlaşmış hizmetler arasında bir köprü görevi görerek daha geniş göz bakımı alanında çok önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle yaşlanan nüfus ve kronik göz hastalıklarının artan prevalansı nedeniyle göz sağlığı hizmetlerine olan talep artmaya devam ederken, optisyonlerin sağlık sistemi içindeki yeni rol ve sorumluluklara uyum sağlama ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu sentez teknolojik yenilikler, işgücü dinamikleri, tele-sağlık ve yapay zekanın (AI) göz bakımı uygulamalarına entegrasyonu da dahil olmak üzere optisyonliğin geleceğini etkileyen çeşitli faktörleri araştırmaktadır.

Optisyenlik mesleği, etkinliğini ve sürdürülebilirliğini etkileyen çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Önemli sorunlardan biri, mesleki ilişkilerde karşılaşılan, strese yol açabilen ve halkın refahını etkileyebilen etik ikilemlerdir (Faucher, 2022). Buna ek olarak, optisyenler genellikle, özellikle sosyo-ekonomik açıdan yoksun bölgelerde, hizmet maliyetlerini yeterince karşılamayan bir finansal model içinde faaliyet göstermektedir; bu da muayenehane açılmasını caydırabilir ve gerekli göz bakımına erişimi sınırlandırabilir (Shickle ve ark., 2014). Ayrıca, farmakolojik ve cerrahi prosedürlerin entegrasyonu da dahil olmak üzere gelişen uygulama kapsamı, sürekli adaptasyon ve eğitim gerektirmekte, bu da kaynakları ve mesleki gelişimi zorlayabilmektedir (Goss, 2024). Türkiye'de optisyenler, operasyonel kapasitelerini ve hasta bakımını engelleyen sistemik sorunlarla karşı karşıyadır (Şenay, 2024). Bu zorluklar bir araya geldiğinde, optisyenlik mesleğinin eğitimini, etik standartlarını ve finansal desteğini geliştirmek için ortak bir çaba gösterilmesi gerekmektedir.

Optisyenliğin karşı karşıya olduğu en önemli zorluklardan biri göz sağlığı hizmetlerine yönelik artan taleptir. Katarakt, glokom ve yaşa bağlı makula dejenerasyonu (YBMD) gibi yaşa bağlı hastalıklar daha yaygın hale geldikçe, yaşlanan nüfus bu talebin başlıca itici gücü olmaktadır. Projeksiyonlar göz bakımına ihtiyaç duyan bireylerin sayısının mevcut kaynakları önemli ölçüde aşacağını ve göz bakımının nasıl sağlandığının ve kimin sağladığının yeniden değerlendirilmesini gerektirdiğini göstermektedir (Jørgensen, 2024; MacLennan ve ark., 2014). Ayrıca diyabet gibi kronik hastalıklardaki artışın, özellikle diyabetik retinopati gibi durumlar için göz bakım hizmetlerine olan talebi daha da artırması beklenmektedir (MacLennan ve ark., 2014; Hemmerich ve ark., 2023).

Bu zorluklara yanıt olarak, optometri iş gücünün gelişmesi gerekmektedir. Araştırmalar optometrist ve

oftalmolog arzının göz sağlığı hizmetlerine yönelik artan talebe ayak uyduramayabileceğini göstermiştir (Ansah vd., 2015; Sayal vd., 2022). Bu tutarsızlık, göz bakımına erişimi iyileştirmek için optisyenler de dahil olmak üzere çeşitli sağlık çalışanlarının becerilerinden yararlanabilen görev paylaşımı ve entegre bakım yaklaşımları gibi yenilikçi bakım modellerine duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır (Tahhan ve ark., 2020; Yip ve ark., 2018). Örneğin teleoftalmolojinin uygulanması, optisyenlerin uzaktan konsültasyon ve tarama yapmasına ve böylece yetersiz hizmet alan nüfuslara ulaşmasına olanak tanıyarak hizmet sunumunu geliştirme potansiyelini ortaya koymuştur (Pidgeon ve ark., 2022; Nikolaidou ve Tsaousis, 2021; Walsh ve ark., 2021).

Teknolojik gelişmeler optisyenlik alanını da yeniden şekillendirmektedir. Yapay zekâ ve makine öğreniminin göz sağlığı uygulamalarına entegrasyonunun, teşhis süreçlerinde ve tedavi seçeneklerinde devrim yaratması beklenmektedir. Yapay zekâ algoritmaları, göz hastalıklarının erken tespitine yardımcı olabilir, hasta sonuçlarını iyileştirebilir ve sağlık hizmeti sağlayıcıları üzerindeki yükü azaltabilir (Li ve ark., 2021; Alnahedh, 2024). Ayrıca, tele-sağlık teknolojilerinin kullanımı, özellikle COVID-19 salgını sırasında ilgi görmüştür ve muhtemelen gelecekteki göz bakımı sunum modellerinde temel bir unsur olmaya devam edecektir (Pidgeon vd., 2022; Nikolaidou ve Tsaousis, 2021). Bu teknolojiler yalnızca bakımın verimliliğini artırmakla kalmıyor, aynı zamanda konsültasyonlar ve takipler için daha erişilebilir seçenekler sunarak hasta katılımını ve memnuniyetini de artırıyor (Pidgeon ve ark., 2022; Walsh ve ark., 2021).

Optisyenlere yönelik eğitim ve öğretim yolları da bu değişikliklere uyum sağlamalıdır. Optisyenlerin rolü, gelişmiş tanı araçlarının ve tele-sağlık platformlarının kullanımı da dahil olmak üzere daha fazla sorumluluğu kapsayacak şekilde genişledikçe, bu yeni yetkinlikleri yansıtan güncellenmiş

müfredata acil ihtiyaç duyulmaktadır (Bharadwaj, 2024). Eğitim programları, teknolojinin uygulamaya entegrasyonunun yanı sıra kapsamlı göz bakımı sağlamada meslekler arası iş birliğinin önemini vurgulamalıdır (Kitema ve ark., 2023). Bu yaklaşım, optisyenlerin sağlık hizmetleri ortamının değişen taleplerini karşılamak için iyi donanımlı olmalarını sağlayacaktır.

Ayrıca, optisyenliğin geleceği, sağlık eşitliğine ve bakıma erişime odaklanmayı gerektirecektir. Göz bakımı kullanımındaki eşitsizlikler, özellikle marjinalleşmiş popülasyonlar arasında devam etmektedir (Gupta ve ark., 2020; Halawa ve ark., 2022). Bu eşitsizliklerin giderilmesi, sosyoekonomik durum veya coğrafi konumdan bağımsız olarak tüm bireylerin gerekli göz sağlığı hizmetlerine erişimini sağlamak için hedefli sosyal yardım çabaları ve toplum katılım stratejileri gerektirecektir (Lu ve Lee, 2022). Optisyenler, toplum sağlığı girişimlerine katılarak ve göz bakımına eşit erişimi teşvik eden politikaları savunarak bu çabalarda önemli bir rol oynayabilir.

Özetle, optisyenliğin geleceği teknolojik gelişmeler, demografik değişimler ve gelişen sağlık hizmetleri ihtiyaçlarının bir araya gelmesiyle şekillenmektedir. Göz sağlığı hizmetlerine olan talep artmaya devam ettikçe, optisyenler hizmet sunumunu geliştirmek için teknolojiden ve meslekler arası iş birliğinden yararlanarak yeni rol ve sorumlulukları benimsemelidir. Optometri mesleği, eğitim yollarını uyarlayarak ve sağlık eşitliğine odaklanarak geleceğin zorluklarını etkili bir şekilde karşılamak için kendini konumlandırabilir.

3. OPTİSYENLİĞİN OPTOMETRİ ÜZERİNE ETKİSİ

Optisyenliğin optometri üzerindeki etkisi, eğitim çerçevelerini, profesyonel iş birliğini ve hasta bakımının geliştirilmesini kapsayan çok yönlüdür. Optometri ve optisyenlik alanları gelişmeye devam ettikçe, birbirleriyle olan ilişkilerini anlamak, göz bakımı sunumunu optimize etmek ve nüfusun artan taleplerini karşılamak için çok önemlidir. Bu sentez, optisyenliğin optometri üzerindeki eğitimsel etkilerini, her iki mesleğin hasta bakımında oynadığı işbirlikçi rolleri ve gelecekteki uygulamalar için çıkarımları araştıracaktır.

Eğitim hem optisyenliğin hem de optometrinin temel taşıdır ve her disiplin etkili göz bakımı için gerekli yetkinliklerin geliştirilmesine katkıda bulunur. Optisyenlik programlarında kullanılan eğitim yöntemleri, optometri öğrencilerinin eğitimini önemli ölçüde etkiler. Örneğin, Güney Afrika'daki Free State Üniversitesi Optometri Bölümü, öğrenme deneyimini geliştirmek için çeşitli pedagojik yaklaşımlar kullanmakta ve öğrencilerin mesleki kurullar tarafından belirtilen gerekli becerileri edinmelerini sağlamaktadır (Kempen & Kruger, 2019). Eğitim uygulamalarının bu entegrasyonu, optometri öğrencilerini klinik zorluklara hazırlamakla kalmaz, aynı zamanda optometristler ve optisyenler arasında işbirlikçi bir ruhu teşvik eder ve sonuçta hasta sonuçlarına fayda sağlar.

Ayrıca optisyenlerin diyabet gibi sistemik hastalıkların taranmasındaki rolü, optometri ve optisyenlik arasındaki iş birliği potansiyelini vurgulamaktadır. Araştırmalar, optometri muayenelerinde diyabet taramasının hem kabul edilebilir hem de diyabetik retinopati riski taşıyan bireylerin erken teşhis edilmesine olanak tanıdığı için faydalı olduğunu göstermektedir (Howse ve ark., 2011). Bu uygulama, kapsamlı göz muayeneleri için optometristlere sevkleri kolaylaştırabilecekleri için

optisyenlerin daha geniş sağlık hizmetleri ortamındaki öneminin altını çizmektedir. Optisyenler ve optometristler birlikte çalışarak hasta bakımına daha entegre bir yaklaşım oluşturabilir ve göz sağlığı hizmetlerinin genel etkinliğini artırabilirler.

Optisyoneliğin tarihsel bağlamı, optometri üzerindeki mevcut etkisi hakkında da bilgi verir. Optisyonelikten optometriye geçiş yapan profesyonellerin kişisel anlatıları, uygulayıcıların bakış açılarını şekillendiren çeşitli deneyimleri göstermektedir (Pol, 2020). Bu tür anlatılar, optometride klinik uygulamayı geliştirebilecek optisyonelikte kazanılan temel bilgilerin önemini vurgulamaktadır. Bu geçiş sadece optometri mesleğini zenginleştirmekle kalmaz, aynı zamanda uygulayıcılar kapsamlı bakım sağlamak için çeşitli deneyimlerinden yararlandıklarından, iki alanın birbirine bağıllığını da güçlendirir.

Ayrıca, her iki mesleği de yöneten düzenleyici çerçeveler, etkileşimlerini şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin Güney Afrika'da, optometride mesleki ve düzenleyici kurumların algılanan rolleri ve uygunluğu incelenmiş, optisyenler ve optometristler arasındaki ilişkide iyileştirilmesi gereken alanlar ortaya çıkarılmıştır (Maluleke & Moodley, 2022). Bazı uygulayıcıların üyelik ücretleri ve düzenleyici kurumların etkinliği konusunda dile getirdiği memnuniyetsizlik, iki meslek arasında daha fazla iş birliği ve iletişim ihtiyacını vurgulamaktadır. Bu endişeleri ele alarak hem optisyenler hem de optometristler, ortak hedeflerini destekleyen daha uyumlu ve etkili bir düzenleyici ortam için çalışabilirler.

Araştırma ve sürekli eğitimin yaygınlaştırılması, optisyoneliğin optometriyi etkilediği bir diğer kritik alandır. Optometriye adanmış profesyonel dergiler, optometristlerin alandaki en son gelişmelerden haberdar olmalarını sağlayarak

araştırma ve uygulama arasındaki boşluğu doldurmada hayati bir rol oynamaktadır (Elliott & Handley, 2015). Optisyenler ve optometristler arasında bu bilgiye erişme ve uygulama konusundaki iş birliği, hasta bakımının ve sonuçlarının iyileştirilmesine yol açabilir. Sürekli öğrenme ve mesleki gelişim kültürünü teşvik ederek, her iki meslek de göz sağlığına katkılarını artırabilir.

Sonuç olarak, optisyenliğin optometri üzerindeki etkisi, eğitimsel etkileri, işbirlikçi uygulamaları ve düzenleyici hususları kapsayan önemli ve çok yönlüdür. Her iki meslek de gelişmeye devam ettikçe, güçlü bir ortaklığın teşvik edilmesi, göz bakımının artan taleplerini karşılamak için gerekli olacaktır. Optisyenler ve optometristler, kendi güçlü yönlerinden yararlanarak ve birlikte çalışarak hasta bakımını geliştirebilir ve gelecekte göz sağlığı hizmetlerinin sürdürülebilirliğini sağlayabilirler.

4. DÜNYA'DA OPTİSYENLİK PROGRAMI

Dünya çapında optisyenlerin eğitimi, göz sağlığı sisteminin kritik bir bileşenidir ve yalnızca hastalara sağlanan bakımın kalitesini değil, aynı zamanda sağlık sisteminin genel etkinliğini de etkiler. Bu sentez, eğitim programlarının yapısı, uygulama için gerekli yetkinlikler, eğitimde teknolojinin rolü ve farklı bölgelerde optisyenlik eğitiminin karşılaştığı zorluklar da dahil olmak üzere, optisyenlik eğitiminin çeşitli yönlerini küresel olarak araştıracaktır.

Optisyenlik eğitimi, farklı sağlık sistemlerini, kültürel bağlamları ve mesleki standartları yansıtarak ülkeler arasında önemli farklılıklar gösterir. Birçok gelişmiş ülkede optisyenlik eğitimi tipik olarak teorik bilgiyi pratik deneyimle birleştiren akredite programlar aracılığıyla verilmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde optisyenler, optik, lens tasarımı

ve hasta bakımı derslerini içeren iki yıllık bir ön lisans programını veya optisyenlik alanında bir lisans derecesini tamamlayabilirler (Saito ve ark., 2020; Butt, 2023). Bu programlar, öğrencileri gözlük takma, kontakt lens dağıtma ve ön göz değerlendirmeleri yapma gibi görevleri yerine getirmek için gerekli becerilerle donatmak üzere tasarlanmıştır.

Buna karşılık, bazı ülkelerde optisyenler için daha az resmleştirilmiş eğitim yolları olabilir. Örneğin, Afrika'nın bazı bölgelerinde optisyenlik eğitimi kısa kurslarla veya iş başında eğitimle sınırlı olabilir ve bu da sağlanan bakım kalitesinde değişkenliğe neden olabilir (Siddharthan ve ark., 2016; Withers ve ark., 2016). Afrika genelinde yeni optometri programları oluşturmaya yönelik son çabalar, optisyenlerin eğitim ortamını iyileştirmeyi, eğitimin uluslararası standartları karşılamasını ve yerel sağlık hizmeti ihtiyaçlarını karşılamasını sağlamayı amaçlamaktadır (Abu, 2020). Bu girişim, yetersiz hizmet alan nüfuslarda göz sağlığı hizmetlerine erişimin iyileştirilmesinde iyi eğitilmiş optisyenlerin önemini giderek daha fazla kabul gördüğünü yansıtmaktadır.

Optisyenler için gereken yetkinlikler de teknolojiye ilerlemelere ve hasta bakım uygulamalarındaki değişikliklere yanıt olarak gelişmektedir. Modern optisyenlerin, göz değerlendirmeleri için dijital araçları kullanma yeterliliği ve tele-sağlık platformlarına aşinalık da dahil olmak üzere bir dizi beceriye sahip olmaları beklenmektedir (Castillo vd., 2010; Yadav ve Mishra, 2019). Teknolojinin optisyenlik eğitime entegrasyonu, mezunları sağlık hizmetlerinin giderek dijitalleşen ortamında gezinmeye hazırlamak için gereklidir. Örneğin, bazı eğitim programları, göz sağlığı hizmetlerinin verimliliğini ve erişilebilirliğini artıracak akıllı telefon tabanlı teşhis araçlarıyla ilgili eğitimleri içermeye başlamıştır (Bolster ve ark., 2015).

Dahası, optisyenlerin sağlık sistemindeki rolü genişlemekte ve daha geniş bir uygulama kapsamı gerektirmektedir. Optisyenler, kapsamlı göz bakımı sağlamak için optometristler ve oftalmologlarla birlikte çalışarak iş birliğine dayalı bakım modellerine giderek daha fazla dahil olmaktadır (Jones ve ark., 2017; Redwood-Campbell ve ark., 2011). Bu işbirlikçi yaklaşım, optisyenlerin multidisipliner ekipler içinde etkili bir şekilde çalışmayı öğrendikleri meslekler arası eğitimin önemini vurgulamaktadır. Bu tür bir eğitim, iletişim becerilerini geliştirebilir ve farklı sağlık hizmeti sağlayıcılarının rol ve sorumluluklarının daha iyi anlaşılmasını sağlayarak sonuçta hasta sonuçlarını iyileştirebilir (Sells ve ark., 2011; Carman ve John, 2017).

Optisyonlik eğitimindeki ilerlemelere rağmen, çeşitli zorluklar devam etmektedir. Önemli sorunlardan biri, özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde kaliteli eğitim programlarına erişimdeki eşitsizliktir. Sınırlı kaynaklar, yetersiz altyapı ve nitelikli eğitmen eksikliği, sağlam optisyonlik eğitim sistemlerinin geliştirilmesini engelleyebilmektedir (Keralis vd., 2018; Kaur vd., 2017). Ayrıca, farklı bölgelerde standartlaştırılmış müfredatın olmaması, optisyonlerin yetkinliklerinde tutarsızlıklara yol açarak göz sağlığı hizmetlerinin genel kalitesini etkileyebilir (Harris, 2023; Dixon ve ark., 2013).

Ayrıca, COVID-19 salgını optisyonlik eğitimi için ek zorluklar yaratmış, geleneksel eğitim yöntemlerini bozmuş ve uyarlanabilir öğrenme çözümlerine duyulan ihtiyacı vurgulamıştır. Birçok eğitim kurumu, optisyonlikte gerekli olan uygulamalı eğitim için zorluklar yaratabilecek çevrimiçi öğrenme formatlarına geçmiştir (Jimenez-Gomez ve ark., 2019; Henry ve ark., 2022). Meslek bu değişikliklere uyum sağladıkça, çevrimiçi ve yüz yüze eğitimi birleştiren karma öğrenme

modellerini içeren eğitim yaklaşımlarını yenileme fırsatı ortaya çıkmaktadır (Bahattab ve ark., 2021; Asao ve ark., 2017).

Sonuç olarak, dünya çapında optisyenlerin eğitimi, göz sağlığı hizmetlerinin sunulmasında hayati bir rol oynayan dinamik ve gelişen bir alandır. Örgün eğitim programlarının oluşturulmasında ve teknolojinin eğitime entegre edilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş olsa da kaliteli eğitime eşit erişimin sağlanmasında zorluklar devam etmektedir. Bu zorlukları ele alarak ve sağlık çalışanları arasında iş birliğini teşvik ederek, optisyenlik mesleği küresel göz sağlığına katkılarını artırmaya devam edebilir.

4.1. Türkiye’de Optisyenlik Programı

Türkiye’de optisyenlik eğitimi, ülkenin daha geniş sağlık hizmetleri ortamını ve göz sağlığı hizmetlerine yönelik artan talebi yansıtan, gelişmekte olan bir alandır. Meslek geliştikçe, eğitim programlarının yapısını, uygulama için gerekli yetkinlikleri ve Türkiye’deki optisyenlerin karşılaştığı zorlukları incelemek çok önemlidir. Bu sentez, ilgili referanslarla desteklenerek bu hususları ayrıntılı olarak inceleyecektir.

Türkiye’de optisyenlik eğitiminin çerçevesi, öncelikle ülke genelindeki eğitim programları için standartları belirleyen Yükseköğretim Kurulu tarafından yönetilmektedir. Tipik olarak, optisyenlik eğitimi, öğrencilerin optisyenlik veya ilgili alanlarda ön lisans veya lisans derecelerini takip edebilecekleri meslek yüksekokullarında ve üniversitelerde sunulmaktadır. Bu programlar, optik, lens tasarımı ve hasta bakımı gibi temel konuları kapsayan teorik bilgi ve pratik becerilerin bir karışımını kapsar Brumfield (2023) Emekli ve diğerleri, (2022). Müfredat, öğrencileri gözlüklerin takılması ve potansiyel göz sağlığı sorunlarının belirlenmesi de dahil olmak üzere sahada karşılaşacakları çeşitli zorluklara hazırlamak için tasarlanmıştır.

Son yıllarda, Türkiye'de optisyenlik eğitiminin kalitesinin artırılmasına yönelik artan bir vurgu söz konusudur. Çeşitli girişimler, eğitim programlarını uluslararası standartlarla uyumlu hale getirmeyi ve mezunların yüksek kaliteli bakım sağlamak için gerekli yetkinliklere sahip olmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Örneğin, göz değerlendirmeleri için dijital araçlar ve tele-sağlık platformları gibi modern teknolojilerin müfredata entegrasyonu giderek daha önemli hale gelmektedir (Atlar ve Uzuner, 2023; Çağlayan vd., 2014). Bu değişim, sağlık hizmetlerinde hizmet sunumunu ve hasta sonuçlarını iyileştirmek için teknolojiyi dahil etme yönündeki daha geniş eğilimi yansıtmaktadır.

Dahası, optisyenlerin sağlık sistemindeki rolü genişlemekte ve daha geniş bir uygulama kapsamı gerektirmektedir. Optisyenler, kapsamlı göz bakımı sağlamak için optometristler ve oftalmologlarla birlikte çalışarak iş birliğine dayalı bakım modellerine giderek daha fazla dahil olmaktadır (Tolu ve ark., 2019; Yakar ve ark., 2020). Bu işbirlikçi yaklaşım, optisyenlerin multidisipliner ekipler içinde etkili bir şekilde çalışmayı öğrendikleri meslekler arası eğitimin önemini vurgulamaktadır. Bu tür bir eğitim, iletişim becerilerini geliştirebilir ve farklı sağlık hizmeti sağlayıcılarının rol ve sorumluluklarının daha iyi anlaşılmasını sağlayarak nihayetinde hasta sonuçlarını iyileştirebilir (Valizadeh, 2019; Bayramov ve ark., 2023).

Bu ilerlemelere rağmen, Türkiye'de optisyenlik eğitiminde çeşitli zorluklar devam etmektedir. Önemli sorunlardan biri, özellikle kırsal alanlarda kaliteli eğitim programlarına erişimdeki eşitsizliktir. Sınırlı kaynaklar, yetersiz altyapı ve nitelikli eğitmen eksikliği, sağlam optisyenlik eğitim sistemlerinin geliştirilmesini engelleyebilmektedir (Şenol & Işıktaş, 2022; Petröcz, 2024). Ayrıca, farklı bölgelerde standartlaştırılmış müfredatın olmaması, optisyenlerin

yetkinliklerinde tutarsızlıklara yol açarak göz sağlığı hizmetlerinin genel kalitesini etkileyebilir (Onat vd., 2019; Bakner vd., 2022).

Ayrıca, COVID-19 salgını optisyenlik eğitimi için ek zorluklar yaratmış, geleneksel eğitim yöntemlerini bozmuş ve uyarlanabilir öğrenme çözümlerine olan ihtiyacı vurgulamıştır. Birçok eğitim kurumu, optisyenlikte gerekli olan uygulamalı eğitim için zorluklar yaratabilecek çevrimiçi öğrenme formatlarına geçmiştir (Inci & Yıldız, 2019; Özerdoğan et al., 2017). Meslek bu değişikliklere uyum sağladıkça, çevrimiçi ve yüz yüze eğitimi birleştiren harmanlanmış öğrenme modellerini içeren eğitim yaklaşımlarını yenileme fırsatı vardır (Demirci ve ark., 2017; “undefined”, 2014).

Sonuç olarak, Türkiye’de optisyenlik eğitimi, göz sağlığı hizmetlerinin sunulmasında hayati bir rol oynayan dinamik ve gelişen bir alandır. Örgün eğitim programlarının oluşturulmasında ve teknolojinin eğitime entegre edilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş olsa da kaliteli eğitime eşit erişimin sağlanmasında zorluklar devam etmektedir. Bu zorlukları ele alarak ve sağlık çalışanları arasında iş birliğini teşvik ederek, optisyenlik mesleği Türkiye’de göz sağlığına katkılarını artırmaya devam edebilir.

5. SONUÇ

Simülasyon ve modelleme yöntemleri malzeme biliminin ayrılmaz bir parçasıdır ve araştırmacıların malzemelerin çeşitli koşullar altındaki davranışlarını keşfetmelerini ve tahmin etmelerini sağlar. MD, FEA, Monte Carlo simülasyonları ve DFT’nin bir kombinasyonunu kullanarak, bilim insanları malzeme özellikleri hakkında değerli bilgiler edinebilir ve sonuçta çok çeşitli uygulamalar için gelişmiş malzemelerin tasarlanmasına yol açabilir.

KAYNAKLAR

- Abu, S. (2020). History and current status of optometric education in africa. *Hindsight Journal of Optometry History*, 51(4), 84-92. <https://doi.org/10.14434/hindsight.v51i4.31557>
- Abu-Amara, T., Rashed, W., Khandekar, R., Qabha, H., Alosaimi, F., Alshuwayrikh, A., ... & Alfari, A. (2019). Knowledge, attitude and practice among non-ophthalmic health care providers regarding eye management of diabetics in private sector of riyadh, saudi arabia. *BMC Health Services Research*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12913-019-4216-9>
- Alnahedh, T. (2024). Role of machine learning and artificial intelligence in the diagnosis and treatment of refractive errors for enhanced eye care: a systematic review. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.57706>
- Anjou, M., Boudville, A., & Taylor, H. (2013). Local co-ordination and case management can enhance indigenous eye care – a qualitative study. *BMC Health Services Research*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/1472-6963-13-255>
- Ansah, J., Korne, D., Bayer, S., Pan, C., Jayabaskar, T., Matchar, D., ... & Quek, D. (2015). Future requirements for and supply of ophthalmologists for an aging population in singapore. *Human Resources for Health*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s12960-015-0085-4>
- Asao, S., Lewis, B., Harrison, J., Glass, M., Brock, T., Dandu, M., ... & Le, P. (2017). Ethics simulation in global health training (esight). *Mededportal*. https://doi.org/10.15766/mep_2374-8265.10590

- Atlar, H. and Uzuner, Y. (2023). Supporting teacher development about early literacy in children with hearing loss: an action research in turkey. *European Journal of Special Education Research*, 9(2). <https://doi.org/10.46827/ejse.v9i2.4832>
- Bahattab, A., Linty, M., Trentin, M., Truppa, C., Hubloue, I., Corte, F., ... & Ragazzoni, L. (2021). Availability and characteristics of humanitarian health education and training programs: a web-based review. *Prehospital and Disaster Medicine*, 37(1), 132-138. <https://doi.org/10.1017/s1049023x21001333>
- Baig, A. (2023). Vision screening in older adults admitted with a fragility hip fracture: a healthcare quality improvement report. *British and Irish Orthoptic Journal*, 19(1), 96-107. <https://doi.org/10.22599/bioj.331>
- Bakner, N., Pittman, H., Shields, R., Wood, J., Morales, N., Rumble, J., ... & Leal, A. (2022). Characteristics, attitudes, and motivations of hunting mentors in florida. *Wildlife Society Bulletin*, 46(2). <https://doi.org/10.1002/wsb.1275>
- Bayramov, T., Çetingök, H., & Talu, G. (2023). Assessment of factors affecting the preference of pain medicine subspecialty choices and training course in turkey: a cross-sectional survey study. *Turkish Journal of Anaesthesiology and Reanimation*, 51(4), 311-317. <https://doi.org/10.4274/tjar.2023.221071>
- Bharadwaj, S. (2024). A century's worth of optometry in india: growth, present status, and the future. *Optometry and Vision Science*, 101(3), 131-133. <https://doi.org/10.1097/opx.0000000000002120>

- Boadi-Kusi, S., Kyei, S., Ocansey, S., Ntodie, M., Ofori-Agyei, D., & Mashige, K. (2021). Assessment of infection prevention and control measures adopted by eye care practitioners in ghana and south africa against covid-19. *Scientific African*, 12, e00766. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00766>
- Bolster, N., Giardini, M., & Bastawrous, A. (2015). The diabetic retinopathy screening workflow. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 10(2), 318-324. <https://doi.org/10.1177/1932296815617969>
- Brumfield, R. (2023). Ten years of empowering turkish women farmers. *Horttechnology*, 33(4), 389-390. <https://doi.org/10.21273/horttech05225-23>
- Butt, S. (2023). The need for a structured pathway to facilitate perfusionist mobility across borders. *Journal of Extracorporeal Technology*, 55(3), 155-156. <https://doi.org/10.1051/ject/2023030>
- Carman, A. and John, C. (2017). The benjamin h. kean travel fellowship in tropical medicine: assessment of impact at 15 years. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 97(3), 958-963. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.17-0120>
- Castillo, J., Goldenhar, L., Baker, R., Kahn, R., & DeWitt, T. (2010). Reflective practice and competencies in global health training: lesson for serving diverse patient populations. *Journal of Graduate Medical Education*, 2(3), 449-455. <https://doi.org/10.4300/jgme-d-10-00081.1>
- Chaturvedi, R., Ku, J., Zhu, W., & Dhawahir-Scala, F. (2020). Impact of the covid-19 pandemic on emergency eye care provision: a perspective from the manchester royal eye hospital.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-63535/v1>

- Çağlayan, H., Ege, F., Baştan, B., Yalçın-Çakmaklı, G., Çapraz, İ., Arsava, E., ... & Uluç, K. (2014). Türkiye’de asistan bakış açısıyla nöroloji eğitiminin durumu: ulusal anket. *Turkish Journal of Neurology*, 20(3), 72-75. <https://doi.org/10.4274/tnd.26576>
- Demirci, H., Ocakoglu, G., Ardiç, A., Karayürek, Y., Yalçıntaş, E., Ciftci, F., ... & Gömleksiz, M. (2017). Current opinions on family medicine residency training: part-time vs full-time education. *Turkish Journal of Family Medicine & Primary Care*, 221-226. <https://doi.org/10.21763/tjfmpe.358812>
- Dixon, C., Castillo, J., Castillo, H., Hom, K., & Schubert, C. (2013). Global health opportunities within pediatric subspecialty fellowship training programs: surveying the virtual landscape. *BMC Medical Education*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/1472-6920-13-88>
- Elliott, D. and Handley, N. (2015). A historical review of optometry research and its publication: are optometry journals finally catching up?. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 35(3), 245-251. <https://doi.org/10.1111/opo.12211>
- Emekli, E., Coşkun, Ö., Budakoğlu, I., & Cerit, M. (2022). Obstetric ultrasonography in postgraduate radiology training. *Ultrasound Quarterly*, 38(4), 297-303. <https://doi.org/10.1097/ruq.0000000000000629>
- Faucher, C. (2022). The inevitable challenge of ethical dilemmas in optometry, part 2: professional relationships and practices in the spotlight. *Canadian Journal of Optometry*, 84(2), 7-12. <https://doi.org/10.15353/cjo.v84i2.4973>

- Ferrey, A., Moore, L., & Jolly, J. (2022). ‘it was like being hit with a brick’: a qualitative study on the effect of clinicians’ delivery of a diagnosis of eye disease for patients in primary and secondary care. *BMJ Open*, 12(7), e059970. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-059970>
- Goss, D. (2024). A history of scope expansion in optometry and its impact on the profession. *Hindsight Journal of Optometry History*, 55(1). <https://doi.org/10.14434/hindsight.v55i1.40250>
- Gupta, D., Ehrlich, J., Newman-Casey, P., Stein, J., Kawamoto, K., & Hess, R. (2020). Evaluation for disparities in experience with internet-based health care among us patients with chronic eye diseases. *Jama Ophthalmology*, 138(10), 1097. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2020.3016>
- Halawa, O., Kolli, A., Oh, G., Mitchell, W., Glynn, R., Kim, D., ... & Zebardast, N. (2022). Racial and socioeconomic differences in eye care utilization among medicare beneficiaries with glaucoma. *Ophthalmology*, 129(4), 397-405. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2021.09.022>
- Harris, J. (2023). Interest in global surgery rotations among oral and maxillofacial surgical residents in the united states. *Journal of Dental Education*, 88(1), 30-41. <https://doi.org/10.1002/jdd.13394>
- Hemmerich, C., Jones, G., Staggs, J., Anderson, R., Bacani, R., & Vassar, M. (2023). Inequities and research gaps in ophthalmology. *Jama Ophthalmology*, 141(1), 63. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2022.5237>

- Henry, A., Ingles, D., Du, L., Vermund, S., Heimburger, D., & Aliyu, M. (2022). Expanding global health engagement through fogarty fellowship programs. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 106(2), 419-423. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.21-0311>
- Ho, K., Stapleton, F., Wiles, L., Hibbert, P., Alkhawajah, S., White, A., ... & Jalbert, I. (2019). Systematic review of the appropriateness of eye care delivery in eye care practice. *BMC Health Services Research*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12913-019-4493-3>
- Howse, J., Jones, S., & Hungin, A. (2011). Screening for diabetes in optometry practices: acceptability to users. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 31(4), 367-374. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2011.00826.x>
- Inci, S. and Yildiz, S. (2019). Perceptions of english teachers in turkey and germany. *Universal Journal of Educational Research*, 7(2), 436-449. <https://doi.org/10.13189/ujer.2019.070216>
- Jimenez-Gomez, A., Stowe, R., Balasa, A., Castillo, J., & Lotze, T. (2019). Global health education in child neurology and neurodevelopmental disabilities training programs in the united states: a national survey. *Journal of Child Neurology*, 34(8), 452-457. <https://doi.org/10.1177/0883073819837466>
- Jones, D., Dicker, R., Fontaine, R., Boore, A., Omolo, J., Ashgar, R., ... & Baggett, H. (2017). Building global epidemiology and response capacity with field epidemiology training programs. *Emerging Infectious Diseases*, 23(13). <https://doi.org/10.3201/eid2313.170509>

- Jørgensen, E. (2024). Implementing teleophthalmology services to improve cost-effectiveness of the national eye care system. *Eye*, 38(14), 2788-2795. <https://doi.org/10.1038/s41433-024-03156-4>
- Kaur, G., Tabaie, S., Brar, J., Tangel, V., & Pryor, K. (2017). Global health education in united states anesthesiology residency programs: a survey of resident opportunities and program director attitudes. *BMC Medical Education*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12909-017-1056-3>
- Kempen, E. and Kruger, S. (2019). Kolb's learning styles of optometry students at the university of the free state, south africa. *African Vision and Eye Health*, 78(1). <https://doi.org/10.4102/aveh.v78i1.454>
- Keralis, J., Riggini-Pathak, B., Majeski, T., Pathak, B., Foggia, J., Cullinen, K., ... & West, H. (2018). Mapping the global health employment market: an analysis of global health jobs. *BMC Public Health*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-018-5195-1>
- King, A., Hudson, J., Azuara-Blanco, A., Kirwan, J., Goyal, S., Ks, L., ... & MacLennan, G. (2023). Effects of socioeconomic status on baseline values and outcomes at 24 months in the treatment of advanced glaucoma study randomised controlled trial. *British Journal of Ophthalmology*, 108(2), 203-210. <https://doi.org/10.1136/bjo-2022-321922>
- Kitema, G., Laidlaw, A., O'Carroll, V., Sagahutu, J., & Blaikie, A. (2023). The status and outcomes of interprofessional health education in sub-saharan africa: a systematic review. *Journal of Interprofessional Care*, 38(1), 133-155. <https://doi.org/10.1080/13561820.2023.2168631>

- Li, J., Liu, H., Ting, D., Jeon, S., Chan, R., Kim, J., ... & Ting, D. (2021). Digital technology, tele-medicine and artificial intelligence in ophthalmology: a global perspective. *Progress in Retinal and Eye Research*, 82, 100900. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2020.100900>
- Lu, R. and Lee, C. (2022). Geographic distribution of visual impairment and access to ophthalmologists. *Jama Ophthalmology*, 140(6), 585. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2022.1222>
- MacLennan, P., McGwin, G., Searcey, K., & Owsley, C. (2014). A survey of alabama eye care providers in 2010–2011. *BMC Ophthalmology*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2415-14-44>
- Maluleke, S. and Moodley, V. (2022). The perceived role and relevance of south african optometric professional and regulatory bodies. *African Vision and Eye Health*, 81(1). <https://doi.org/10.4102/aveh.v81i1.730>
- Mathan, Z. (2024). Optometrists need to incorporate their understanding of the impact of dry eye disease in their patient management. *Optometry and Vision Science*, 101(1), 55-61. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000002077>
- Milutinović, D., Cvijanovic, D., Ciric, Z., Jovanović, G., & Andrijevic, A. (2017). Eye care in mechanically ventilated critically ill adults-nursing practice analysis. *Medicinski Pregled*, 70(11-12), 377-383. <https://doi.org/10.2298/mpns1712377m>
- Motowa, S., Khandekar, R., & Al-Towerki, A. (2014). Resources for eye care at secondary and tertiary level government institutions in saudi arabia. *Middle East African Journal of Ophthalmology*, 21(2), 142. <https://doi.org/10.4103/0974-9233.129761>

- Moyegbone, J. (2024). Eye health seeking behavior and its associated factors among adult population in mangu lga, plateau state, nigeria. *JOAR*, 1-9. <https://doi.org/10.46889/joar.2024.5102>
- Nikolaidou, A. and Tsaousis, K. (2021). Teleophthalmology and artificial intelligence as game changers in ophthalmic care after the covid-19 pandemic. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.16392>
- Onat, L., Hancı, V., Özbilgin, Ş., Boztaş, N., Taşdöğen, A., Yurtlu, S., ... & Arkan, A. (2019). Anaesthesiology and reanimation education in turkey: residents' views. *Turkish Journal of Anaesthesiology and Reanimation*, 47(6), 496-502. <https://doi.org/10.5152/tjar.2018.34437>
- Özerdoğan, N., Şahin, B., Köşgeroğlu, N., Çulha, İ., Çelik, N., Sayiner, F., ... & Özalp, S. (2017). Educational study to increase breast cancer knowledge level and scanning participation among women working at a university. *European Journal of Breast Health*, 13(3), 113-116. <https://doi.org/10.5152/ejbh.2017.3457>
- Petröcz, J. (2024). Turkish army and military industry presence in africa. *JCEEAS*, 3(1), 76-100. <https://doi.org/10.59569/jceas.2023.3.1.226>
- Pidgeon, J., Bhardwaj, M., Titterington, P., Latulippe, K., Roh, S., & Ramsey, D. (2022). Assessing optometric care delivered by telehealth during the covid-19 public health emergency. *Therapeutic Advances in Ophthalmology*, 14. <https://doi.org/10.1177/25158414221123526>
- Pol, C. (2020). Experiences in army optometry. *Hindsight Journal of Optometry History*, 51(3), 76-78. <https://doi.org/10.14434/hindsight.v51i3.31068>

- Ramamurthy, D. (2024). Smart devices in optometry: current and future perspectives to clinical optometry. *Clinical Optometry*, Volume 16, 169-190. <https://doi.org/10.2147/opto.s447554>
- Redwood-Campbell, L., Pakes, B., Rouleau, K., MacDonald, C., Arya, N., Purkey, E., ... & Pottie, K. (2011). Developing a curriculum framework for global health in family medicine: emerging principles, competencies, and educational approaches. *BMC Medical Education*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/1472-6920-11-46>
- Saito, H., Funaki, T., Kamata, K., Ide, K., Nakamura, S., Ichimura, Y., ... & Asanuma, K. (2020). Infectious disease emergency specialist (ides) training program in japan: an innovative governmental challenge to respond to global public health emergencies. *Global Health & Medicine*, 2(1), 44-47. <https://doi.org/10.35772/ghm.2019.01032>
- Sayal, A., Ahmed, Y., Popović, M., Schlenker, M., Campbell, R., Kantarevic, J., ... & El-Defrawy, S. (2022). Supply and demographic characteristics of ontario's ophthalmologists from 2010 to 2019: a population-based analysis. *Cmaj Open*, 10(4), E1067-E1078. <https://doi.org/10.9778/cmajo.20210319>
- Sells, J., Tan, A., Brogan, J., Dahlen, U., & Stupart, Y. (2011). Preparing international counselor educators through online distance learning. *International Journal for the Advancement of Counselling*, 34(1), 39-54. <https://doi.org/10.1007/s10447-011-9126-4>

- Shickle, D., Davey, C., & Slade, S. (2014). Why is the general ophthalmic services (gos) contract that underpins primary eye care in the uk contrary to the public health interest?. *British Journal of Ophthalmology*, 99(7), 888-892. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2014-305345>
- Siddharthan, T., North, C., Attia, E., Christiani, D., & West, T. (2016). Global health education in pulmonary and critical care medicine fellowships. *Annals of the American Thoracic Society*, 13(6), 779-783. <https://doi.org/10.1513/annalsats.201601-028ps>
- Şenay, M. (2024). A field research on the problems experienced by opticians and optical stores. *Bingöl Üniversitesi Sağlık Dergisi*, 5(2), 284-292. <https://doi.org/10.58605/bingolsaglik.1514944>
- Şengör, T., Alkibay, S., Sertoğlu, A., & Kurna, S. (2018). Survey to determine perceptions and practices in contact lens use and identify key features of safe use education. *Turkish Journal of Ophthalmology*, 48(6), 288-294. <https://doi.org/10.4274/tjo.60465>
- Şenol, H. and Işıktaş, S. (2022). Need for enriching school principal training programs in light of total quality management - a case of turkey.. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107282>
- Tahhan, N., Ford, B., Angell, B., Liew, G., Nazarian, J., Maberly, G., ... & Keay, L. (2020). Evaluating the cost and wait-times of a task-sharing model of care for diabetic eye care: a case study from australia. *BMJ Open*, 10(10), e036842. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-036842>

- Tolu, S., Rezvani, A., Atçi, A., Şendur, Ö., Kuran, B., Ataman, Ş., ... & Doğan, D. (2019). Factors influencing subspecialty training and career choices: a national survey of physical and rehabilitation medicine residents. *Archives of Rheumatology*, 34(1), 26-33. <https://doi.org/10.5606/archrheumatol.2019.6742>
- Valizadeh, M. (2019). Efl teachers' writing assessment literacy, beliefs, and training needs in the context of turkey. *Advances in Language and Literary Studies*, 10(6), 53. <https://doi.org/10.7575/aiac.all.v.10n.6p.53>
- Walsh, L., Hong, S., Chalakkal, R., & Ogbuehi, K. (2021). A systematic review of current teleophthalmology services in new zealand compared to the four comparable countries of the united kingdom, australia, united states of america (usa) and canada. *Clinical Ophthalmology*, Volume 15, 4015-4027. <https://doi.org/10.2147/opth.s294428>
- Withers, M., Press, D., Wipfli, H., McCool, J., Chan, C., Jimba, M., ... & Samet, J. (2016). Training the next generation of global health experts: experiences and recommendations from pacific rim universities. *Globalization and Health*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s12992-016-0162-z>
- Xulu-Kasaba, Z., Mashige, K., & Naidoo, K. (2021). An assessment of human resource distribution for public eye health services in kwazulu-natal, south africa. *African Vision and Eye Health*, 80(1). <https://doi.org/10.4102/aveh.v80i1.583>
- Yadav, S. and Mishra, S. (2019). Global variations in curriculum and syllabus for endocrine surgery training programs: a report. *Journal of Endocrine Surgery*, 19(1), 18. <https://doi.org/10.16956/jes.2019.19.1.18>

- Yakar, F., Hanahioğlu, Ş., Şahin, B., Egemen, E., Dere, U., KİRAZ, İ., ... & Kahiloğulları, G. (2020). Academic performance after neurosurgery residency training in turkey: a national survey. *Neurosurgical Focus*, 48(3), E8. <https://doi.org/10.3171/2019.12.focus19825>
- Yip, J., Bright, T., Ford, S., Mathenge, W., & Faal, H. (2018). Process evaluation of a national primary eye care programme in rwanda. *BMC Health Services Research*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12913-018-3718-1>
- Yu, M., Keel, S., Mariotti, S., Mills, J., & Müller, A. (2023). Development of the who eye care competency framework.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2588327/v1>

MAGNEZYUM VE LİPOİK ASİT İLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ KLOOROFİL KULLANILARAK ÜRETİLEN Au/(Mg+LA)Klorofil/n-GaP AYGITININ OPTOELEKTRONİK PERFORMANSI

Fikriye Şeyma KAYA¹

1. GİRİŞ

Optoelektronik aygıtlar yarıiletken teknolojisinin gelişmesiyle araştırmalarda birçok farklı malzemeler kullanılmaya başlamıştır. Özellikle çevreci bir yaklaşımla üretilen organik ara yüzeyli aygıtlar optoelektronik aygıtlar için birçok pigment ve bileşiği literatüre kazandırmıştır. Organik malzemelerin birçok tercih edilme sebebi vardır. Bunların içerisinde en önemlileri temiz çevre, düşük maliyet ve kolay üretim yer almaktadır. Bu özellikleri göz önünde bulundurulduğunda gelecek için birçok kolaylık ve tasarruf sağlayacağı düşünülmektedir. Organik malzemeler birçok yarıiletken tabanlı aygıtta kullanılmaktadır. Schottky diyotlar (Vearey-Roberts ve Evans, 2005; Zahn, Kampen, ve Méndez, H. 2003; Wang, Hsu, Yang, ve Yu, 2016; Gupta ve Singh, 2005; Ahmad ve Sayyad, 2009) transistörler (Xu, Sun, ve Noh, 2017; Di, Liu, Yu, ve Zhu, 2009; Chen ve ark., 2020; Qiu, ve ark., 2025) fotovoltaiik aygıtlar (Huang ve ark., 2011; Chen, ve ark., 2025; Antolin, Urieta-Mora, Molina-Ontoria, ve Martín, 2025; Hong, ve ark., (2025); Lee, ve ark., 2025) ve bunun gibi birçok alanda kullanılarak aygıt optimizasyonu sağlanmaya çalışılmıştır.

¹ Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Çaldıran Meslek Yüksekokulu, fikriyeseymakaya@yyu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3602-2282.

Doğadan ilham alınarak üretilen aygıtlar gün geçtikçe daha da ilgi çekmekte ve araştırmacılar bu alanda daha fazla yayın yapmaya başlamıştır. Özellikle biyo-uyumlu malzemelerin aygıt fiziğinde genişçe yer kapladığı görülmektedir. Bu aygıtların içerisinde de en fazla araştırma konusu olan fotovoltaiik aygıtlardır. Fotovoltaiik aygıtlar ışığı doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Işığın en etkin biçimde soğrulması fotovoltaiik aygıtlar için kritik öneme sahiptir. Işık yakalama özelliği denilince ilk aklımıza gelen doğada çokça var olan bir molekül olan klorofildir. Doğada bulunan tek organik yarıiletken Klorofiller sadece güneş ışığından fotonları soğurmakla kalmayıp, aynı zamanda serbest yük taşıyıcılarının oluşumuna katılıp elektrotlara yönlendirilme yeteneğini ifade eder (Koifman, Stuzhin, Travkin, ve Pakhomov, 2021). Bitkilerdeki klorofil miktarı üretilen aygıtlar için oldukça önemlidir. Yapılan çalışmalarda Lipoik asit ve Magnezyum moleküllerinin klorofil miktarını artırdığı görülmüştür (Cakmak ve Kirkby, 2008; Gorcek, 2013; Storm ve Muller, 2012). Bu çalışmada laboratuvar ortamında LA ve Mg uygulamaları yapılarak büyütülmüş fasulye bitkisinden sentezlenen klorofillerin kullanıldığı Au/klorofil (LA+Mg) /n-GaP aygıtının karanlık ortamda ve farklı ışık şiddetleri altındaki elektriksel parametreleri incelenmiştir.

2. MATERYAL METOT

Galyum Fosfat (GaP), periyodik tablonun III. grubunda yer alan Galyum (Ga) ile V. grupta bulunan Fosfor (P) elementlerinden oluşan bir III–V grubu bileşik yarıiletken malzemedir (Coluzza ve ark. 1996). 300 K sıcaklıkta yasak enerji aralığı 2,26 eV olan GaP, çinko blend kristal yapısına ve tetrahedral koordinasyon geometrisinde indirekt bant geçişine sahip bir yarıiletken olarak sınıflandırılmaktadır (Yiğit, 2011). [100] kristal yöneliminde büyütülmüş, n-tipi ile

katkılandırılmış ve 400 μm kalınlığında ve öz direnci 1,95 $\Omega\cdot\text{cm}$ olan n -tipi GaP kristali kullanılarak, Au/klorofil (LA+Mg)/ n -GaP yapısında bir aygıt üretilmiştir.

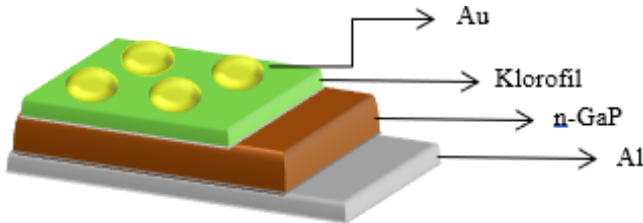
Yapının istenen kalitede olabilmesi için numune yüzeyinin hem organik hem de mekanik kirlerden tamamen arındırılması gereklidir. Numunenin yüzey parlatma işlemi üretim aşamasında gerçekleştirildiğinden, ek bir mekanik temizlik uygulanmamıştır. Bunun yerine, yüzeydeki organik kalıntıların giderilmesi amacıyla kimyasal temizlik yöntemi tercih edilmiştir. Kimyasal temizleme süreci şu adımlarla yürütülmüştür: Öncelikle numuneler sırasıyla triklor etilen, aseton ve metanol içinde ultrasonik banyoda beşer dakika tutulmuş, ardından deiyonize su (18 M Ω) ile durulanmıştır. Sonrasında, 1 dakika süreyle $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (5:1:1) karışımında bekletilmiş ve tekrar deiyonize suyla yıkanmıştır. Daha sonra 30 saniye boyunca $\text{H}_2\text{O} + \text{HF}$ (10:1) çözeltisiyle muamele edilip deiyonize suyla durulanmış ve N_2 gazı akışı altında kurutulmuştur. Bu işlemlerin ardından yüzey, yarıiletken aygıt üretimi için uygun hâle getirilmiştir. (Kaya, 2023).

Yeryüzündeki yaşamın temel enerji kaynağı Güneş'tir. Bitkiler, Güneş'ten gelen ışık enerjisini kloroplastlarında bulunan klorofil pigmenti aracılığıyla soğurarak kimyasal enerjiye dönüştürür. Klorofil, farklı dalga boylarındaki ışığı soğurarak fotosentezin gerçekleşmesini sağlayan yeşil renkli bir pigmenttir. Güneş, elektromanyetik spektrumun tamamını yaymasına rağmen, atmosfer yalnızca görünür ışığın geçişine izin verir. Işık maddelerle karşılaştığında yansıtılabilir, geçirilebilir ya da soğrulabilir. Klorofil ve diğer pigmentler fotonları soğurduğunda, bu fotonlara karşılık gelen dalga boylarındaki renkler artık yansıtılan ya da iletilen ışık spektrumunda görünmez hale gelir. Ancak bu süreçte enerji kaybolmaz, yalnızca biçim değiştirir. Bir pigment molekülü bir fotonu soğurduğunda, o fotonun enerjisi moleküldeki bir

elektronu daha yüksek potansiyel enerji seviyesine taşır. Elektron bu uyarılma gerçekleşmeden önce bulunduğu yörüngede kaldığında, molekül “temel durumda” kabul edilir.

Çeşitli araştırmacılar, güneş pillerinin arayüzey tabakasında farklı malzemeler kullanarak üretim süreçlerini kolaylaştırmayı ve maliyetleri azaltmayı hedeflemişlerdir. Bu bağlamda klorofil, görünür bölgede yer alan güneş spektrumuna uygun optik soğurma özellikleri, fotovoltaiik performansa katkısı ve düşük maliyetli oluşu nedeniyle güneş pili uygulamaları için dikkat çeken bir materyal haline gelmiştir.

n-GaP yarıiletkeni metaller temizlendikten sonra kirlilik oluşmaması için hemen omik kontak yapılmıştır. *n*-GaP numunelerinin mat tarafına gelecek şekilde molibden ısıtıcıya yerleştirilen alüminyum (Al) vakum kazanı içindeki basınç değeri 10^{-5} Torr basınca ulaşınca buharlaştırılarak yarıiletkenin mat tarafı Al metali ile kaplanmıştır. Laboratuvar ortamında yetiştirilen Mg+LA uygulaması yapılmış mısır bitkisinden metanol çözücüsüyle sentezlenen klorofil numunenin parlak yüzeyi üzerine damlatılmış ve 3000 rpm'de 25 s döndürülerek ince film klorofil tabakası oluşturulmuştur. Daha sonra numuneler buharlaştırma ünitesinde 1 mm yarıçaplı bir maske üzerine yerleştirilmiş Altın (Au) buharlaştırılarak Au/Klorofil(Mg+LA)/*n*-GaP/Al yapısı elde edilmiştir. Şekil 1'de aygıtın yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. Au/Klorofil (Mg+LA) /*n*-GaP/Al yapısının şematik gösterimi

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu bölümde Au/Klorofil (Mg+LA)/*n*-GaP/Al yapısının *I*–*V* ölçümlerinden elde edilen grafikler ve bu grafikler yardımıyla hesaplanan bazı diyot karakteristik parametreleri ve fotovoltaiik parametreleri hesaplamalarına yer verilmektedir. Bu ölçümler, oda sıcaklığında ve farklı ışık şiddetlerinde alınmış ve değerlendirilmiştir.

Aygıtın karakteristik parametrelerin termoyonik emisyon teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Diyotların davranışını en iyi tanımlayan temel parametrelerden biri, boyutsuz bir büyüklük olan ve "n" harfiyle simgelenen idealite faktörüdür. Bu faktör 1'e ne kadar yakınsa, diyot o kadar ideal özellik gösterir. Ancak idealite faktörü 1'in üzerine çıktıkça, diyotun davranışı idealden sapmaya başlar (Tung, 1991).

İdealite faktörü değeri (*n*), Doyma akımı (*I*₀) ve engel yüksekliği (*Φ*_b) değerleri sırasıyla

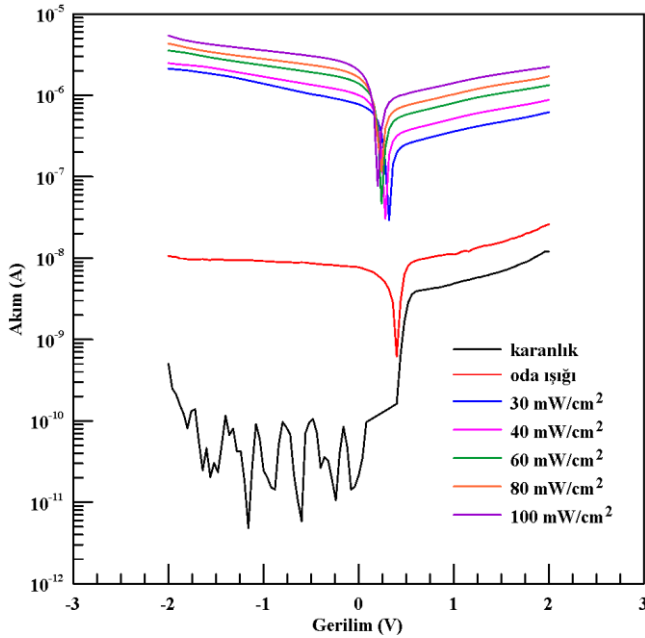
$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (1)$$

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2)$$

$$\Phi_b = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (3)$$

şeklinde verilmektedir. *ln(I)*–*V* grafiği, *I*–*V* ölçümleri sonucunda elde edilir ve doğru besleme bölgesinde bu veriye lineer bir uyum (fit) uygulanır. Uygulanan bu doğrunun eğiminden $\frac{dV}{d(\ln I)}$ değeri hesaplanır. Bu değerden yararlanılarak, ilgili denkleme sabitler yerleştirilmek suretiyle diyodun idealite faktörü belirlenir (Kaya, Duman, Orak, Barış 2021).

Diyotların elektriksel özelliklerini tanımlamada bir diğer önemli parametre ise engel yüksekliği (ϕ_b) olarak bilinir. Engel yüksekliğinin hesaplanabilmesi için, doğru besleme bölgesine ait fit doğrusunun $V=0$ noktasında düşey eksenini kestiği yerden doyma akımı I_0 elde edilir. Bu doyma akımı değeri, ϕ_b hesaplamasında kullanılır. Şekil 2’de Au/Klorofil (Mg+LA) /n-GaP/Al aygıtının I-V grafiği gösterilmiştir. Karanlık ve farklı ışık şiddetlerinde alınan ölçümlerden n ve ϕ_b değerleri hesaplanmıştır. Işık şiddeti arttıkça idealite faktörü değerinin arttığı ve engel yüksekliği değerinin azaldığı görülmüştür. İdealite faktörü değeri karanlık ortamda 4,94 ve engel yüksekliği değeri 0,916 eV olarak hesaplanmıştır. Işığa maruz bırakılarak alınan ölçümlerde ise idealite faktörü değeri azalarak 1,43 değerine kadar düşmüştür. Işık şiddetinin etkisiyle ideale daha yakın davranış sergilemiştir.



Şekil 2. Au/Klorofil (Mg+LA) /n-GaP/Al aygıtının karanlık ve farklı ışık şiddeti altındaki I-V grafiği

Schottky diyotlardan elde edilen I–V karakteristiklerinin, bazı durumlarda (özellikle idealite faktörünün yaklaşık 1,03’ün üzerinde olduğu koşullarda) klasik termiyonik emisyon modeliyle tam olarak açıklanamadığı bilinmektedir. Bu durum, Schottky engel yüksekliğinin uygulanan gerilime bağlı olarak değiştiği varsayımıyla yorumlanmaktadır. Ayrıca idealite faktörünün 1’den büyük çıkması, imaj kuvvet etkisi, jenerasyon–rekombinasyon akımları, arayüzey durumları ve tünelleme mekanizmaları gibi farklı fiziksel etkilere bağlanmaktadır. Bu bağlamda, yüksek idealite faktörü değerleri; ince doğal oksit tabakalarının, seri dirençlerin ve arayüzeydeki homojen olmayan engel dağılımının varlığıyla ilişkilendirilmektedir (Gupta ve Yakuphanoglu, 2012). Bunun yanı sıra, idealite faktörünün artması; arayüzey tabakasındaki potansiyel düşüşe, aşırı akım etkisine ve yarıiletken–yalıtkan sınırında meydana gelen rekombinasyon süreçlerine de atfedilebilir (Reddy, 2014).

Genellikle düşük ileri besleme gerilimlerinde elde edilen I–V karakteristikleri, yarı-logaritmik (log I–V) ölçekte doğrusal bir davranış sergiler. Ancak uygulanan gerilim yükseldikçe, arayüzey halleri, ince yalıtkan tabaka ve seri direnç etkileri doğrusal eğriden belirgin sapmalara yol açar. Seri direnç, I–V karakteristiğinin yüksek gerilim bölgesindeki (doğrusal olmayan) kavislenmede etkiliyken; arayüzey halleri ve yalıtkan tabaka hem doğrusal hem de doğrusal olmayan bölgelerde belirleyici rol oynar. Arayüzey hal yoğunluğunun ve seri direncin düşük olması, I–V eğrisinin daha geniş bir gerilim aralığında doğrusal kalmasını sağlar. Buna karşılık, lineer bölgenin daralması engel yüksekliği ve idealite faktörünün belirlenme hassasiyetini azaltır (Karataş ve Altındal, 2005).

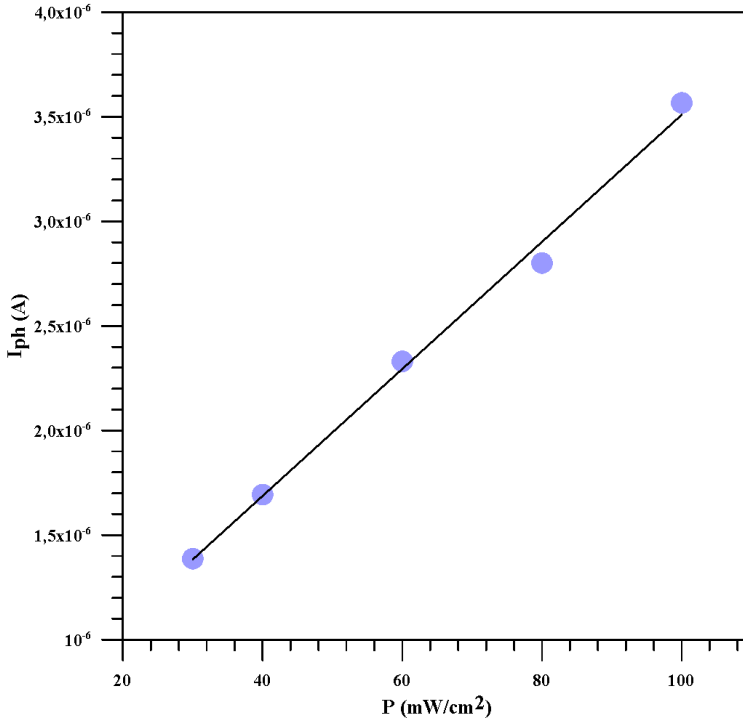
Fotovoltaik aygıtlarda önemli parametrelerden biri olan fotoduyarlılık (RR), ışık duyarlılığının ve ışık enerjisini elektrik

enerjisine dönüştürmenin bir ölçüsü olarak tanımlanır (Bıyıklı, 2004).

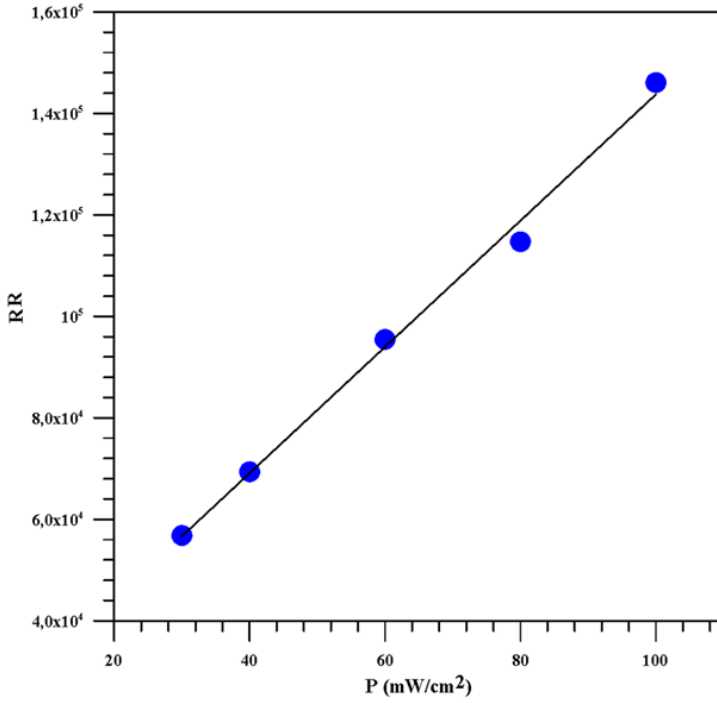
$$RR = \frac{I_{ph} - I_{dark}}{I_{dark}}$$

şeklinde hesaplanır (Yıldırım, 2018).

Au/Klorofil (Mg+LA) /n-GaP/Al aygıtının ışık şiddetine karşı fotoakım (I_{ph}) grafiği Şekil 3'te fotoduyarlılık (P-RR) grafiği ise Şekil 4'te verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi üretilen Au/Klorofil (Mg+LA) /n-GaP/Al aygıtının artan ışık şiddetiyle foto akım ve fotoduyarlılığı artmıştır. Elde edilen bu sonuç ise aygıtın ışık etkileşiminin olduğunu ve optoelektronik cihazlar için klorofil ince filminin kullanılabilirliğini göstermiştir.



Şekil 3. Au/Klorofil (Mg+LA) /n-GaP/Al aygıtının P- I_{ph} grafiği



Şekil 4. Au/Klorofil (Mg+LA) /n-GaP/Al aygıtının P-RR grafiği

Mg ve LA ile zenginleştirilmiş klorofil kullanılarak üretilen Au/(Mg+LA)Klorofil/n-GaP yapısı karanlık ve farklı ışık şiddetlerinde gerçekleştirilen I-V ölçümleri, aygıtın ışığa duyarlı bir davranış sergilediğini göstermiştir. Karanlıkta 4,94 olan idealite faktörünün aydınlatma altında 1,43'e düşmesi, yapının aydınlık koşullarda daha ideal diyot karakteri gösterdiğini ortaya koymuştur. Artan ışık şiddetiyle birlikte fotoakım ve fotoduyarlılık değerlerinin yükselmesi, aygıtın fotodetektör ve güneş pili uygulamalarına uygunluğunu doğrulamaktadır. Elde edilen bulgular, Mg ve LA katkılarının klorofilin elektronik özelliklerini iyileştirerek çevre dostu, düşük maliyetli ve ışığa duyarlı organik yarıiletken aygıtların geliştirilmesine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, Z., & Sayyad, M. H. (2009). Electrical characteristics of a high rectification ratio organic Schottky diode based on methyl red. *Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications*, 3(5), 509–512.
- Antolin, E., Urieta-Mora, J., Molina-Ontoria, A., & Martín, N. (2025). Organic solar cells: Principles, materials, and working mechanism. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 76, 101893.
- Bıyıklı, N. (2004). *High-performance Al_xGa_{1-x} N-based UV photodetectors for visible/solar-blind applications* (Doktora tezi). Bilkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Cakmak, I., & Kirkby, E. A. (2008). Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 692–704.
- Chen, H., Zhang, W., Li, M., He, G., & Guo, X. (2020). Interface engineering in organic field-effect transistors: Principles, applications, and perspectives. *Chemical Reviews*, 120(5), 2879–2949.
- Chen, X., Jia, Z., Chen, Z., Zhou, C., Huang, S., Xia, X., ... & Yang, Y. (2025). Efficient perovskite/organic tandem photovoltaic devices and large-area modules featuring thick-film organic solar cells. *Advanced Materials*, 2500190.
- Coluzza, C., Almeida, J., Orto, T., Barbo, F., Bertolo, M., Bianco, A., ... & Courjon, D. (1996). Spatially resolved internal and external photoemission of Pt/n-GaP Schottky barrier. *Applied Surface Science*, 104–105, 196–203.

- Di, C. A., Liu, Y., Yu, G., & Zhu, D. (2009). Interface engineering: An effective approach toward high-performance organic field-effect transistors. *Accounts of Chemical Research*, 42(10), 1573–1583.
- Görçek, Z. (2013). *Buğdayda tuz stresi kaynaklı oksidatif hasarın yatıştırılması üzerine lipoik asitin moleküler ve biyokimyasal etkilerinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Gupta, R. K., & Singh, R. A. (2005). Fabrication and characteristics of Schottky diode based on composite organic semiconductors. *Composites Science and Technology*, 65(3–4), 677–681.
- Gupta, R. K., & Yakuphanoglu, F. (2012). Photoconductive Schottky diode based on Al/p-Si/SnS₂/Ag for optical sensor applications. *Solar Energy*, 86(5), 1539–1545.
- Hong, J., Lee, Y. K., Shin, S., Whang, D. R., Chang, D. W., & Park, H. J. (2025). Organic interlayer for enhanced buried interfaces in wide-bandgap perovskite solar cells. *ChemSusChem*, 18(16), e202500543.
- Huang, D. M., Mauger, S. A., Friedrich, S., George, S. J., Dumitriu-LaGrange, D., Yoon, S., & Moulé, A. J. (2011). The consequences of interface mixing on organic photovoltaic device characteristics. *Advanced Functional Materials*, 21(9), 1657–1665.
- Karataş, Ş., & Altındal, Ş. (2004). İdeal olmayan Schottky diyotlarının temel parametrelerinin akım-voltaj (I–V) karakteristiklerinden hesaplanması. *Journal of Science and Engineering*, 7(2), 45–53.
- Kaya, F. Ş. (2023). Cr/Klorofil-a/n-GaP/Ag aygıtının akım-gerilim karakteristiklerinin incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(4), 1996–2005.

- Kaya, F. Ş., Duman, S., Orak, İ., & Barış, Ö. (2021). Effect of illumination on the electrical characteristics of Au/n-GaP/Al and Au/Chlorophyll-a/n-GaP/Al structures. *Materials Science and Engineering: B*, 265, 114980.
- Koifman, O. I., Stuzhin, P. A., Travkin, V. V., & Pakhomov, G. L. (2021). Chlorophylls in thin-film photovoltaic cells: A critical review. *RSC Advances*, 11(25), 15131–15152.
- Lee, Y., Biswas, S., Nam, D. H., Park, J. W., Jang, H., Choi, H., ... & Kim, H. (2025). Functionalized interlayers in self-powered organic photodiodes for enhanced near-infrared sensing. *Advanced Energy Materials*, 15(16), 2403532.
- Nodari, D., Qiao, Z., Furlan, F., Sandberg, O. J., Vandewal, K., & Gasparini, N. (2025). Towards high and reliable specific detectivity in visible and infrared perovskite and organic photodiodes. *Nature Reviews Materials*, 1–15.
- Qiu, J., Sheng, Q., Qian, X., Yao, J., Zhao, Y., Zhang, X., ... & Du, M. (2025). Vertically phase-separated PEDOT:PSS film via solid–liquid interface doping for flexible organic electrochemical transistors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(11), 17202–17216.
- Reddy, V. R. (2014). Electrical properties of Au/polyvinylidenefluoride/n-InP Schottky diode with polymer interlayer. *Thin Solid Films*, 556, 300–306.
- Storm, J., & Muller, S. (2012). Lipoic acid metabolism of *Plasmodium* – A suitable drug target. *Current Pharmaceutical Design*, 18(24), 3480–3489.
- Tung, R. T. (1991). Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers. *Applied Physics Letters*, 58(24), 2821–2823.

- Vearey-Roberts, A. R., & Evans, D. A. (2005). Modification of GaAs Schottky diodes by thin organic interlayers. *Applied Physics Letters*, 86(7), 072105.
- Wang, H., Hsu, J. H., Yang, G., & Yu, C. (2016). Novel organic Schottky barrier diode created in a single planar polymer film. *Advanced Materials*, 28(43), 9545–9549.
- Xu, Y., Sun, H., & Noh, Y. Y. (2017). Schottky barrier in organic transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 64(5), 1932–1943.
- Yıldırım, M. (2018). Characterization of the framework of Cu doped TiO₂ layers: An insight into optical, electrical and photodiode parameters. *Journal of Alloys and Compounds*, 773, 890–904.
- Zahn, D. R., Kampen, T. U., & Méndez, H. (2003). Transport gap of organic semiconductors in organic modified Schottky contacts. *Applied Surface Science*, 212, 423–427.

A MATHEMATICAL PATHWAY FROM BINARY RANDOMNESS TO STATIONARY FIELD OBSERVATIONS IN MACRO UNIVERSE

Baris BAYKANT ALAGOZ¹

Serkan ALAGOZ²

1. INTRODUCTION

A path for the unification of physics theories depends on gaining scale-consistent theoretical understanding for the constitution of the spacetime fabric by digging into the world of the smallest until reaching “undividable building elements” of the spacetime fabric (if they exist). Their interactions or behavioral dynamics of the building elements of spacetime can help developing the theory of everything, which can explain action of universe in all scales and all dimensions. Through conceptual journey of human mind from the macro universe to the micro universe, several concepts were emerged in physics and philosophy. However, recent progress in technology and observation indicated a need for new physics concepts that can bridge the theoretical gaps.

The biggest mystery of humankind is to understand the universal fabric that constitutes everything in the universe. In a work, for mathematical consistency, the fabric of the spacetime has been conjectured as short-distance structures at the Planck scale and sub-Planck scale (Kempf, 1998). Kempf used linear

¹ Prof. Dr., Inonu University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, baykant.alagoz@inonu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5238-6433.

² Doc. Dr., Inonu University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Physics, serkan.alagoz@inonu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2642-8462.

operator for encoding spacetime information based on the conjecture that the fundamental theory of quantum gravity encodes spacetime information using the linear and symmetric operator. He considered the minimal elements as classes of short-distance structures. It is also reasonable for the geometrical aspect of the spacetime because curvatures of the spacetime can be geometrically approximated by a collection of the short-distance curves (curves can be approximated by gathering of enough small unit line elements. Similar techniques are known as linearization and the linearization has been widely used in engineering and mathematics to model systems in small ranges of nonlinear parameters. In the current study, we used the concept of linearization for the mathematical modeling for local-weak measurement apertures that can receive signals from the minimal element collection of the space fabric.

There have been ongoing discussions on the formation of spacetime fabrics in the geometric aspects. Einstein remarked in his speech that “It is true that this proposed physical interpretation of geometry breaks down when applied immediately to spaces of sub-molecular order of magnitude. But nevertheless, even in questions as to the constitution of elementary particles, it retains part of its significance.” (Einstein, 1995; Kuzemsky, 2023). He highlight importance of the observation scales while explaining the universe. In geometrical interpretation of macroscopic universe, the Minkowski’s spacetime manifold has significance in both special and general relativity (Minkowski, 2010). However, these concepts begin losing generality when going to micro universe. Kuzemsky pointed out Blokhintsev’s idea (Blokhintsev, 2012) that had been indicated the lack of the “abstract constructions”, which is helpful to explain the fabric of the spacetime. The observation scale problem comes to rise. Closing the gap between macroscopic concepts of spacetime

(x, y, z, t) and its constitution in the quantum field theory is very import to bridge disparity in realms of macroscopic and microscopic universes (Kuzemsky, 2023). Kuzemsky raised doubts on constitution of spacetime on components of sub-atomic particles; even one cannot surely define the spacetime coordinates for the particles themselves. Today, the majority of physicists agree that it is almost impossible to directly observe or collect data from the fundamental elements that build sub-atomic particles. The problem may not be only technological barriers; instead the fabric itself may involve inaccessible state, namely hidden states or hidden dimensions. A way to deal with such uncertainty may start with following abstract and simplistic paths of mathematical concepts in order to demonstrate possibilities and options for theoretical interpretation of relations between the spacetime constitution and its macro aspects.

In the aspect of quantum mechanics, Wheeler used the term Quantum Foam (or Spacetime Foam) to explain the turbulent, probabilistic structure of spacetime at very small scales (Wheeler,1982; Misner, Thorne, & Wheeler, 1999). Quantum effects indicate stochastic nature of a spacetime near the Planck scale, and the random fluctuations of the metrics usually referred to as spacetime foam. Quantum foam concept presumes the quantum fields as cumulative effect of random fluctuating quantum foams. In the current work, we theoretically demonstrated that even randomly and independently changes in states of discrete minimal elements (quantum foams) may establish a stationary field value with slight noise in local observations. It makes possible Miller's consideration of the Planck-Wheeler quantum foam as the white noise (Miller, 2000). In aspect of holographic universe, holographic quantum foam is also discussed and observability of clues of holographic quantum foams in Telescope Interferometers is considered in terms of infinite statistics (Ng, 2012).

In the current study, we investigated consequences of stochastic field elements in macroscopic view of the field, and numerically demonstrated that a measurement from randomly distributed states of minimal element collection of the space fabric can be yield relatively stationary field value with lower uncertainly. It implies that even fully random fluctuation of states on minimal constitutional elements can be observed as a stationary field value with a mean value in long time window and small random deviations (noise signal) in short time windows. Therefore, the stationary view of macroscopic universe should not be necessarily built by deterministic elements and dynamics (state transitions). Fully random (maximum information entropy) and statistically independent (no interaction between elements) changes on the minimal element states can produce a view of stationary macroscopic world.

2. METHODOLOGY

To avoid relying on previous physical concepts as much as possible, we put our fundamental assumptions quit simple and abstract, which consider the lowest level of information (binary state) with the highest uncertainty when getting through the world of the smallest in the space-fabric (microscopic universe). We illustrated mathematically that even highest uncertainty and randomness in our microworld concept may allow establishing a steady and predictable macroscopic world constitutions. In other words, construction of a deterministic and almost steady macroscopic worlds from fluctuating fields, which are highly uncertain and contains the lowest level of information, can mathematically possible. The abstract findings indicated that the space of the macroworld can be closely related with the limited nature of interaction with the field elements (the locality in measurement) and the time of microworld can be

related with performing subsequent interactions with the field elements (repeated measurements). Spacetime in macroscopic world may manifest itself with the subsequent bounded interactions with the field elements. (For instance, the quantum information is hidden and processes in the quantum field (Zizzi, 2020)) This study does not directly claim this situation. We rather aim a mathematical abstraction that if there is theoretical possibility that even random state and independent field elements in micro universe can be observed stationary average field values in macro universe scales.

Let's assume the simplest case that expresses the ultimate randomness of the field fluctuations under the following basic assumptions:

- (i) The field state (e.g., the quantum field) spreads over the spacetime fabric,
- (ii) The field in the spacetime fabric is assumed to be composed of states of discrete minimal field elements, (discrete spacetime microstructures)
- (iii) Each minimal element takes a random binary states $\{0,1\}$, which depends on the distribution function, (the lowest level of information)
- (iv) The states of minimal elements can be represented by statistically independent random variables, and there may be no correlation between the values of these minimal elements. (the highest uncertainty)

These suppositions offer mathematically fundamental abstraction for the field constitution in terms of mathematical relations and modeling. These assumptions indeed imply the case that the macro universe observers do not much know about the constitution of the field and its dynamics that acts on the field fluctuation (if such interpretable dynamics exists).

Local measurements can be carried out over quantum fields (Fewster & Verch, 2020). We presume an observer that is capable of performing local-weak measurements from a collection of minimal constitutional elements of the field. The “local-weak measurement” phrase implies the case that observers can sense the cumulative impacts from states of the minimal element collection of the field section. The term “weak” implies amplifying and detecting weak effects, and this implies reducing impacts of the observer on the observed system (Story, Ritchie & Hulet, 1991) For this reason, the local-weak measurement aperture is modeled with the weighted sum of all states of the minimal element collection. Figure 1 depicts this conceptualization that involves a local measurement aperture for interacting with the state of minimal elements of the field.

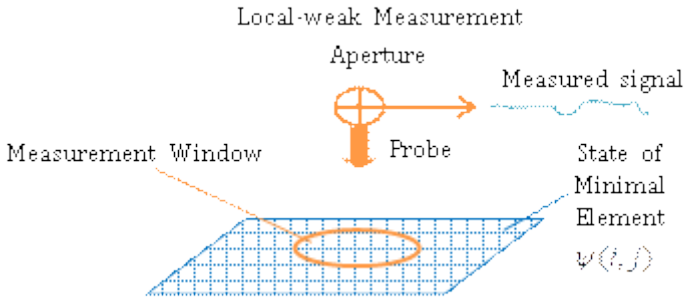


Figure 1. A conceptualization for local-weak measurement aperture that weakly interacts with states of minimal element group of the field section

Let denote binary states of the minimal elements of the 2D field by binary random variables as $\psi(i, j) \in \{0,1\}$. Thus, one assumes that the state of the minimal element has the lowest information load under one-bit quantization for values of 0 and 1. For the sake of simplify, we assumes a 2D field plane that represent the positional spreading of the minimal elements in the

space fabric. The measurement window shows the interaction region of the field with the measurement aperture. Then the local-weak measurement Ψ can be expressed as sum of the amplified interaction with minimal element states in a measurement window Ω

$$\Psi = \sum_{\psi(i,j) \in \Omega} w_{i,j} \psi(i,j) \quad (1)$$

where $w_{i,j}$ denotes the amplification factor of the measurement apertures in order to sense the state of the minimum element $\psi(i,j)$ of the field constitution. (We refer the distribution of coefficients as the locality lens of measurement aperture.) This formulation shows similarity with the flow phenomenon in the non-equilibrium statistical mechanics (The flow (heat, matter etc) is written in form of $J_i = \sum_j L_{i,j} X_j$, where $L_{i,j}$ is phenomenological transport coefficients and X_j is are generalized driving forces for vector transport processes). It is similar to, Kempf's linear approach (Kempf, 1998). The measurement window Ω also implies a locality in the field measurement. The Ψ denotes a single local-weak measurement from states of accessible minimal elements group in the locality window Ω . However, assuming $w_{i,j} = 0$ for $\psi(i,j) \notin \Omega$ also mathematically implies a measurement window to represent locality of minimal element interactions with the measurement aperture. For unlimited formulation of the measurement aperture, one can consider the following formulation

$$\Psi = \sum_{\forall(i,j) \in \mathbb{R}^2} w_{i,j} \psi(i,j) \quad (2)$$

In the current study, we considered the local-weak measurements that are localized in the space and the time. To

make measurements local for time, the observer samples the field interaction in time, and the local-weak measurements express a sampled time series signal in the form of

$$\Psi(n) = \sum_{\psi(i,j) \in \Omega} w_{i,j} \psi(i, j, n) \quad (3)$$

where the measured time can be expressed as $t = n\Delta t$ and the parameter Δt is the sampling period of the measurement aperture. The interacted element indices i and j are correspond to space elements $x = i\Delta x$ and $y = j\Delta x$ in the macroscopic world. The distance concept may emerges with the value of the amplification factor $w_{i,j}$. High value $w_{i,j}$ implies the near elements because of its stronger interaction with the measurement aperture. Consequently, the spacetime parameterization (x, y, z, t) in macroscopic sense can inherently emerge with the subsequent local interaction with the field elements in the microscopic universe.

Uncertainty in information, which is received from a information source, is considered by the using information entropy (Shanon entropy), which is expressed for a random variable X as,

$$H(X) = \sum_{x \in X} p_x \log_2 \left(\frac{1}{p_x} \right) \quad (4)$$

where the random variable X takes discrete values of x with a probability of p_x . The information entropy can be used to estimate level of the uncertainty in receiving a specific value of x from a reading. Since the state ψ takes binary values ($\psi \in \{0,1\}$), $p_0 = P(\psi = 0)$ and $p_1 = P(\psi = 1)$ are probabilities of being the state 0 and being the state 1. For discrete random

variable ψ , the probability distribution function can be expressed as $f(\psi=0)=p_0$ and $f(\psi=1)=p_1$ and the information entropy of the minimal element states can be written as

$$H(\psi) = -f(\psi=0)\log_2(f(\psi=0)) - f(\psi=1)\log_2(f(\psi=1)) \quad (5)$$

When the property of probability distribution function $f(\psi=0) + f(\psi=1) = 1$ is considered, the information entropy of the binary states can be reorganized depending $f(\psi=1)$ as follows:

$$H(\psi) = -(1-f(\psi=1))\log_2(1-f(\psi=1)) - f(\psi=1)\log_2(f(\psi=1)) \quad (6)$$

The maximum entropy is equal to 1, when $p_0=0.5$ and $p_1=0.5$, which also implies the maximum uncertainty for the minimal element state. One can expect to sense one of states 0 and 1 from the minimal element at each measurement.

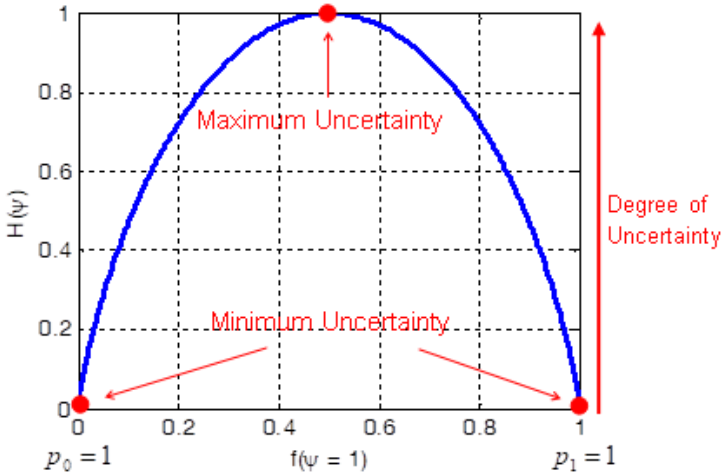


Figure 2. Information entropy of minimal element states versus the distribution function value

3. NUMERICAL SIMULATIONS FOR LOCAL-WEAK MEASUREMENT

This section presents results of numerical experiments of the local-weak measurement model from discrete minimal elements of the conceptual field. Figure 3 shows a snapshot from 100×100 element field states. The minimum element states of 2D field plane (the field membrane) has the maximum information entropy. This implies that one simulates 10000 minimal elements with the state probabilities of $p_0 = 0.5$ and $p_1 = 0.5$, and this field section produces 2^{10000} different binary state configurations. (Since the information entropy of each element is 1 (maximum entropy or maximum uncertainty), the total information entropy in this field section becomes 2^{10000} , theoretically) Figure 3(a) illustrates a sample for binary state configuration $(\psi(i, j))$ from the discrete field elements. Figure 3(b) illustrates locality lens that shows the distribution of the coefficients $w_{i,j}$. To implement locality lens nonlinearly on 2D the field, we used a Gaussian function in the following from

$$w_{i,j} = e^{-\gamma((i-i_a)^2 + (j-j_a)^2)/(i_m j_m)} \quad (7)$$

where the (i_a, j_a) represents spatial indices of the minimum element, where the measurement aperture is the most strongly interact with. (It can be related to position of the aperture in the space of the macro universe). The parameters (i_m, j_m) determine the size of the 2D field plain. The number of minimum element states, which is considered in the simulation, is calculated by $i_m j_m$. In this equation, the factor $\frac{\gamma}{i_m j_m}$ adjusts size of locality zone and the γ is referred to as the locality factor of the locality lens. The locality lens, which is modeled by equation (7), is

useful for a nonlinear and symmetrical realization of the measurement window Ω for the local-weak measurement in the simulation.

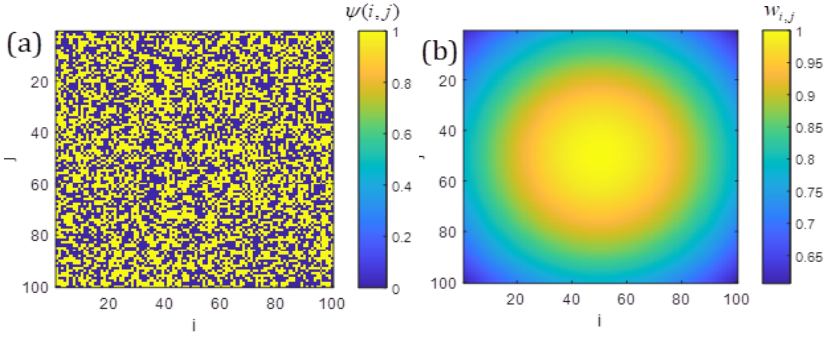


Figure 3. (a) A binary state configuration ($\psi(i, j)$) view from the field plane, b) locality lens (the distribution of the coefficients $w_{i,j}$)

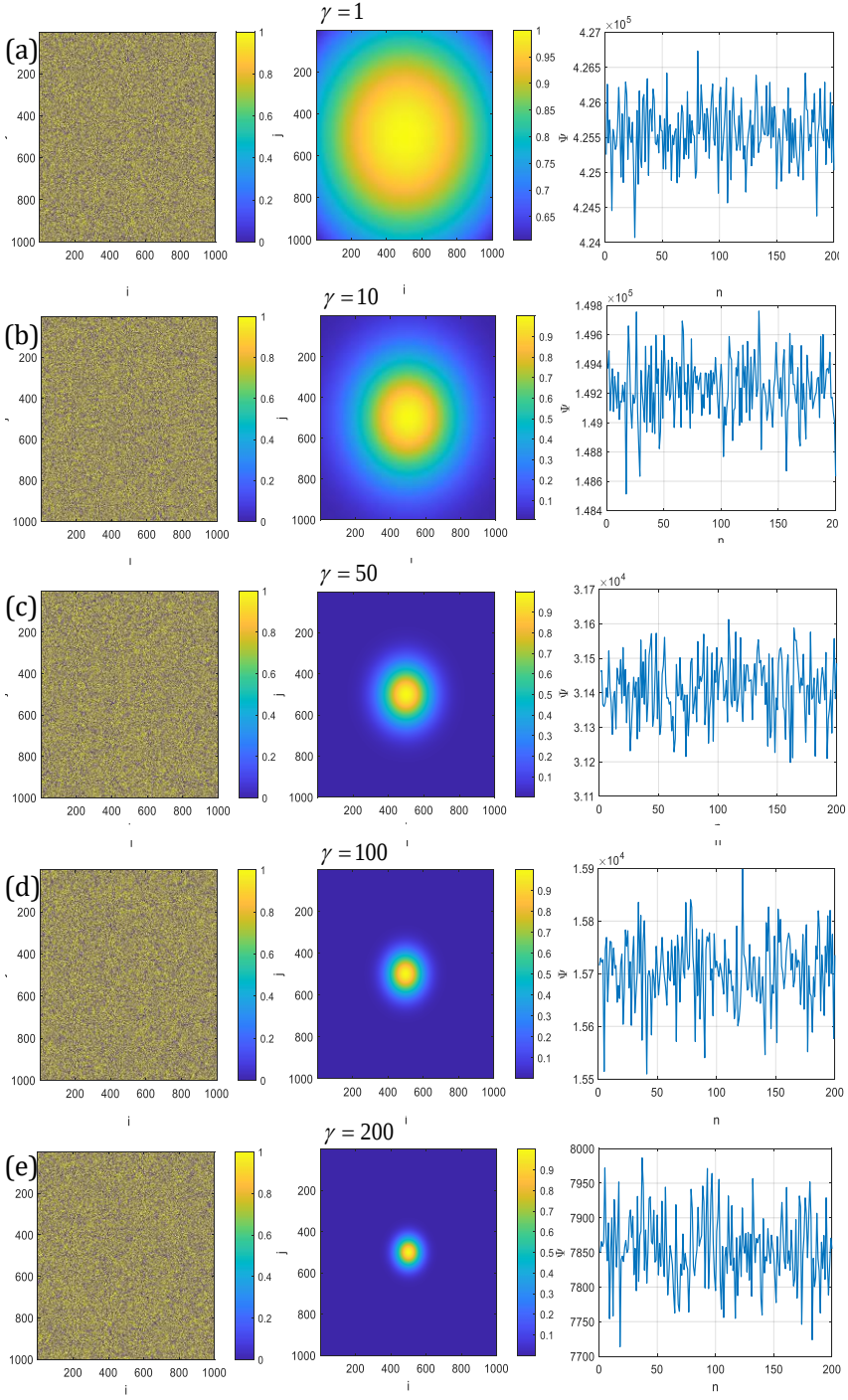
To make simulation results more consistent, we increased the simulated field a size of 1000×1000 element states that infer $2^{1.000.000}$ different state configurations and the total information entropy in the following simulations. Then, 200 samples of the field state configuration are randomly generated with the state probabilities of $p_0 = 0.5$ and $p_1 = 0.5$ (for maximum entropy of minimal element states), and we computed a time series of local-weak measurements with 200 samples. These samples are considered as the measured signal. The Coefficient of Variation (CV) index is used to evaluate the variability in the measured signal. The CV can also be used to express the level of fluctuations in measurements and it can be calculated statistically by using the standard deviation σ and the mean value μ of the signal as follows:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (8)$$

The mean value μ of the signal is accounted as the most likely average magnitude in the weak measurements, the variance σ^2 of the signal can be considered as the power of noise in the measurement, in this assumption, the signal-to-noise ratio can be written as,

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (9)$$

To see effects of narrowing the measurement window Ω (narrowing the locality lens), the locality factor γ was increased and the simulation is repeated. We observed the local-weak measurement signals. Figure 4 shows useful images from simulations and the measured signals for locality factor values (γ) ranging from 1 to 5000. The first image group (on the left) shows the first sample of binary state distributions in the field. The second image group (in the middle) shows locality lenses in the measurements, which are adjusted by using the γ . The third plot (on the right) is the local-weak measurement signals from 200 sampling of the field states in time. Based on these simulation results, Table 1 reports some measured parameters to evaluate magnitude and variability (noise) of the measured signal. Figure 5 graphically illustrate the change of CV and SNR_{dB} depending on the locality factor values (γ).



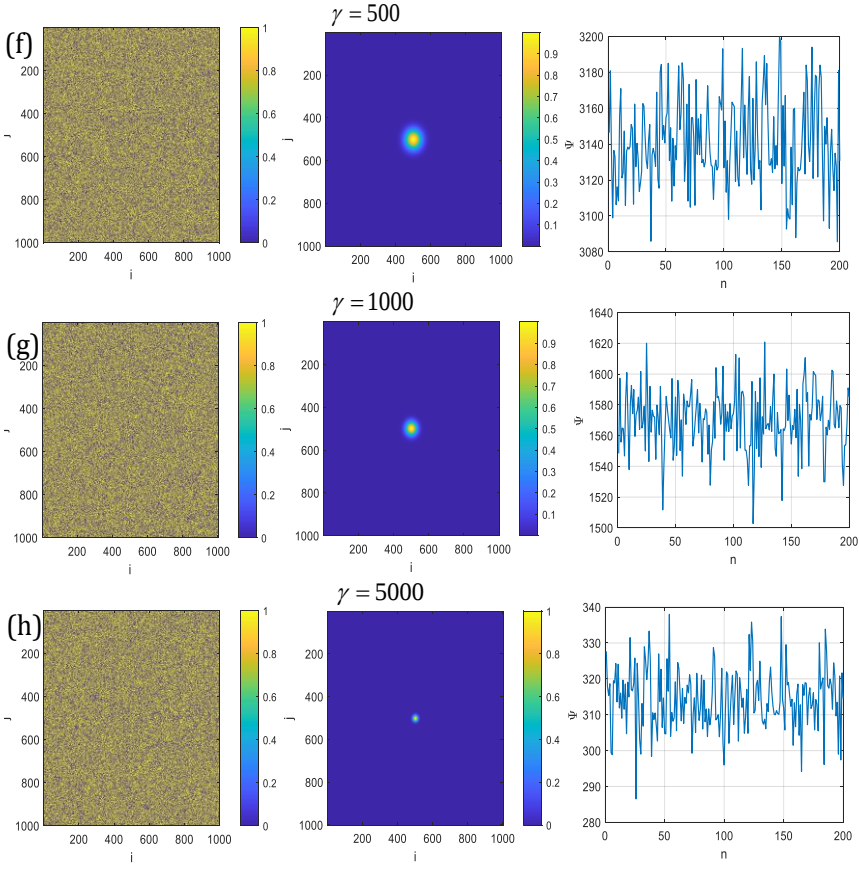


Figure 4. Simulation results for various setting of the locality factor values (γ) The left images are the first sample of binary state distribution in the field. The middle images are the locality lenses of the measurements that are adjusted by the γ . The right plots are the measured signals from 200 sampling the field in time

Table 1. Some statistical parameters to evaluate the magnitude and variability (noise) of the measured signals from the simulations.

Subfigures	γ	μ	σ	CV	SNR_{dB}
(a)	1	$4.25 \cdot 10^5$	$4.34 \cdot 10^2$	$1.02 \cdot 10^{-3}$	59.82
(b)	10	$1.49 \cdot 10^5$	$2.10 \cdot 10^2$	$1.41 \cdot 10^{-3}$	56.99
(c)	50	$3.14 \cdot 10^4$	$8.94 \cdot 10^1$	$2.84 \cdot 10^{-3}$	50.90
(d)	100	$1.57 \cdot 10^4$	$6.53 \cdot 10^1$	$4.16 \cdot 10^{-3}$	47.61
(e)	200	$7.85 \cdot 10^3$	$5.13 \cdot 10^1$	$6.54 \cdot 10^{-3}$	43.68
(f)	500	$3.14 \cdot 10^3$	$2.47 \cdot 10^1$	$7.88 \cdot 10^{-3}$	42.06
(g)	1000	$1.57 \cdot 10^3$	$2.02 \cdot 10^1$	$1.29 \cdot 10^{-2}$	37.78
(h)	5000	$3.14 \cdot 10^2$	8.55	$2.72 \cdot 10^{-2}$	31.30

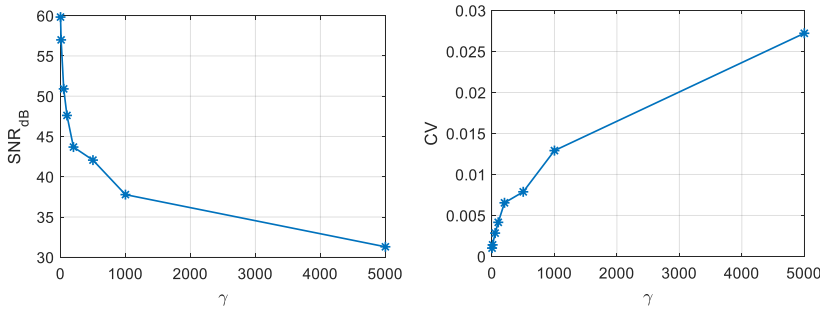


Figure 5. The change of CV and SNR_{dB} for locality factor values (γ) from 1 to 5000

The simulation results reveal the following remarks:

(i) Although states of minimal elements change randomly and independently (Maximum information entropy and no relation), local-weak measurements (equation (1)) yield a signal that has a steady mean magnitude (mean value) with noise disturbance (variance) around. It indicates the possibility that even the states of minimal elements are fully random

(maximum information entropy) and locally independent (no interactions with other elements), the local-weak measurements can still appear steadily in time and therefore, the signal value is expectable and predicable through time (the signal looks almost deterministic). This effect may reveal that high uncertainty in subatomic realm or random nature of spacetime foam may not be a contradiction for the steady and average characteristics in the macroscopic universe observations. If the macroscopic universe looks steady and deterministic, the microscopic world does not necessarily be steady and deterministic. In the mathematical point of view, stochastic behavior in the microscopic universe may look rather deterministic in macroscopic scales in the case of the local-weak measurements.

(ii) Spacetime conceptualization of macroscopic universe may be closely related with the bounded interaction strength (locality lenses) of measurements and the subsequent sampling in measurements. Consequently, extending space and time concept into microscopic universe may be necessary. On the other hand, the spacetime concept in the macroscopic universe may be a consequence of the subsequent bounded interactions with the field elements in our measurement efforts. Hence, the locality of measurement apertures may result in the perception of the space in macroscopic universe, and subsequent measurements may result in perception of the time. By assuming the random changing states with the maximum uncertainty, the field elements are modeled statistically independent (none-local and timeless) because there is no the state trajectory and the time is not a necessary component in this assumption. Therefore, when an observer can measure a steady signal (steady mean value with noise variation) in macroscopic scales, micro universe constitution of this system may not necessarily obey the locality and the time arrow rules because simulation results

reveal that random and independent element states may produce steady macroscopic observations.

(iii) In the case of the maximum information entropic discrete elements (maximum uncertainty), as the locality lens of the local-weak measurement is narrowed (it implies using a higher resolution measurement aperture to observe deeper into microscopic universe), fluctuating and uncertainty in local-weak measurements increase. This effect can contribute to the white-noise signals in real world measurements. In fact, these findings are expectable results in the aspects of the law of large numbers and the central limit theorem. Similar theoretical aspects were suggested by Pathirana at al. for observations of quantum process with noise. They concluded that repeated iterations of a quantum operation with noise can generalize independent quantum processes via a convergence to equilibrium (Pathirana & Schenker, 2023).

4. CONCLUSIONS

This study draws a theoretical pathway for the possibility that the randomness in the spacetime fabric dynamics may still produce a stationary observation in the macroscopic universe. A steady field observation is possible by means of local-weak measurements in the case of random state transitions in minimum field elements. Therefore, a local-weak measurement may be responsible from appearance of a stationary macroscopic universe in time.

Another interesting theoretical possibility is that local-weak measurement efforts may result in a perception of space and time dimension through the macroscopic universe. The locality lens of the measurement may produce the space perception in macroscopic scales and repeated measurement signal may produce a time perception.

REFERENCES

- Blokhintsev, D. I. (2012). *Space and Time in the Microworld*. Springer Science & Business Media.
- Einstein, A. (1995). *Geometry and Experience*, in Ideas and Opinions. New York: Crown Press.
- Fewster, C. J., & Verch, R. (2020). Quantum fields and local measurements. *Communications in Mathematical physics*, 378(2), 851-889.
- Kempf, A. (1998). On the structure of spacetime at the Planck scale. arXiv preprint hep-th/9810215.
- Kuzemsky, A. L. (2023). Temporal behavior of complex systems: From microworld to macroworld. *Physics of Particles and Nuclei*, 54(5), 843-868.
- Miller, S. D. (2000). Planck—Wheeler Quantum Foam as White Noise: Metric Diffusion and Congruence Focussing for Fluctuating Spacetime Geometry. *General Relativity and Gravitation*, 32(7), 1217-1240.
- Minkowski, H. (2010). *Spacetime: A Hundred Years Later*, Ed. by V. Petkov. Berlin: Springer.
- Misner, C. W. Thorne, K. S. & Wheeler J. A. (1973) *Gravitation* San Francisco: Freeman.
- Ng, Y. J. (2012). *Holographic quantum foam*. In The Twelfth Marcel Grossmann Meeting: On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories, (In 3 Volumes) (pp. 2435-2437).
- Pathirana, L., & Schenker, J. (2023). Law of large numbers and central limit theorem for ergodic quantum processes. *Journal of Mathematical Physics*, 64(8), 082201.

- Story, J. G., Ritchie, N. W. M., & Hulet, R. G. (1991). Weak measurements. *Modern Physics Letters B*, 5(26), 1713-1725.
- Wheeler, J. A. (1982). The computer and the universe. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6), 557-572.
- Zizzi, P. (2020). Quantum information hidden in quantum fields. *Quantum Reports*, 2(3).

EFFECT OF SPRAY SOLUTION VOLUME ON THE PHOTODETECTOR PROPERTIES OF CdS THIN FILM¹

Serif RUZGAR²

1. INTRODUCTION

There is considerable demand within the optoelectronics industry for advanced semiconducting materials to be used in photodetection applications (Devi vd., 2020; Gant vd., 2019; Qi vd., 2019; Vrijen & Yablonovitch, 2001). Such photodetectors are critical for numerous fields, including space technology, photonics, and optical communications. Thin-film based photodetectors are optoelectronic devices composed of sub micrometer-thick semiconductor layers that detect light and convert it into electrical signals. They are typically fabricated using various semiconductor materials, such as amorphous silicon, organic materials, perovskites and sulfides. These detectors offer cost advantages because they can be fabricated at low temperatures and over large areas, and they can be easily integrated into flexible surfaces such as glass and plastic. These features offer solutions in many new areas where traditional photodetectors cannot be used. Thin-film photodetectors are widely used in digital cameras, medical imaging systems (e.g., digital X-ray devices), environmental light sensors, and wearable electronics. Their flexible and lightweight structure makes them particularly popular in wearable health monitoring

¹ This study is supported by Batman University Scientific Research Project Commission under grant no. BTÜBAP-2024-EKOM-06.

² Dr. Department of Opticianry Program, Vocational School of Health Services, serif.ruzgar@batman.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4964-2202

devices and foldable displays. Furthermore, because they can be specifically tailored to specific wavelengths, they are also used in special-purpose applications such as ultraviolet (UV) or infrared (IR) light detection. The importance of this technology is growing not only for its functionality but also for the opportunities it offers for future technological advancements. Advancing materials science allows for the development of detectors with higher sensitivity, faster speeds, and lower energy consumption. This paves the way for more effective and portable solutions in both healthcare and communication technologies. In this context, cadmium sulfide (CdS) has emerged as a promising material, with current research focused on fabricating CdS-based devices that possess superior performance metrics such as high detectivity, responsivity, and quantum efficiency (Deng & Li, 2014; Shuai vd., 2020; Wu vd., 2012; Ye vd., 2010). CdS is a II-VI group semiconducting metal chalcogenide that possesses numerous advantageous properties. These include high stability, a moderate direct band gap of 2.42 eV at 300 K, high optical transparency, and good electrical conductivity. Furthermore, CdS exhibits a refractive index that decreases from 2.58 to 2.55 over the 350–1600 nm wavelength interval. In the same spectral range, its extinction coefficient decays from 0.7 to a near-zero value with increasing wavelength (Al-Ahmad, Hassan, Badran, & Hussain, 2012; Mohamed, 2013; Yılmaz, Polat, Tomakin, & Bacaksız, 2020). Collectively, these attributes render CdS an indispensable semiconductor in the landscape of optoelectronic technologies, enabling the fabrication of diverse devices including light-emitting diodes (LEDs), transistors, and photodetectors (Li vd., 2018; Wondmagegn vd., 2016). Several research groups have documented the key characteristics of CdS films, which exhibit a range of structural variations and are fabricated using diverse deposition techniques (Hakami, 2022). These methods encompass pulsed laser deposition (B. Liu vd., 2016),

magnetron sputtering (Rondiya vd., 2017), chemical bath deposition (CBD) (F. Liu vd., 2010), spin-coating (Patel, Mighri, Ajji, Tiwari, & Chaudhuri, 2014), the sol-gel process (Munirah, Shahid Khan, Aziz, Abdul Rahman, & Raza Khan, 2013), nebulizer spray pyrolysis (NSP) (Sathish Kumar, Valanarasu, Vimala Juliet, Rimal Isaac, & Ganesh, 2025), among others. While each of these fabrication techniques offers distinct advantages and disadvantages, nebulizer spray pyrolysis (NSP) possesses a notable benefit: it is a low-cost, non-vacuum method well-suited for large-area applications and time-saving. Furthermore, NSP can yield high-quality thin films while requiring only a minimal volume of precursor solution. The formation of the solution into a fine mist enhances film quality and promotes uniform growth by facilitating gradual nucleation with minimal material wastage (Thirumoorthi & Thomas Joseph Prakash, 2016). The available literature presents a scarcity of studies specifically investigating the influence of spray solution volume on the properties of deposited films. Consequently, this research focuses on the fabrication of CdS thin films utilizing the NSP technique, systematically varying the precursor solution volume to assess its effect on photo-sensing characteristics.

2. MATERIALS AND METHODS

This study successfully produced a series of four CdS thin films on thoroughly cleaned glass substrates. The films were deposited via the nebulizer spray pyrolysis method. The precursor solutions were 0.1 M very pure Cadmium Chloride (CdCl_2) and 0.1 M thiourea ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$), both sourced from Sigma Aldrich. Glass slides measuring $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ were chosen as the substrates. Before deposition, these slides were subjected to a rigorous cleaning technique that included consecutive washing with acetone, isopropanol, ethanol, and deionized water. The CdS films were applied to the pre-cleaned

substrates by systematically adjusting the total precursor solution volume in increments of 2 mL: specifically, 2 mL, 4 mL, 6 mL, and 8 mL. The deposition procedure was executed under optimum conditions, with the nozzle-to-substrate distance set at 5 cm and the substrate temperature maintained at 450 °C. After the spraying procedure was completed, all created samples were taken off the hot plate and permitted to cool to room temperature. The crystallographic quality of the produced CdS thin films was evaluated using XRD using a Rigaku Miniflex-II X-ray diffractometer, utilizing CuK α radiation ($\lambda=1.5418$ Å) over a 2θ range of 20° to 70°. The optical characteristics were analyzed with a UV–visible spectrophotometer across a wavelength range of 300 nm to 900 nm. The responsivity and photo-sensitivity of the CdS thin films were quantitatively assessed using a Keithley source meter system (model 4200).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Examining the crystal structure of thin-film semiconductors is crucial for understanding the electronic, optical, and structural properties of the material. The crystal structure determines the arrangement of atoms, the presence of defects (vacancies, dislocations, etc.), and grain boundaries. These properties directly affect the semiconductor's electrical conductivity, carrier mobility, energy band structure, and light absorption efficiency. The performance of devices such as photodetectors, solar cells, and transistors is closely related to the crystalline quality of the thin film used. Therefore, crystal structure analysis (e.g., using techniques such as X-ray diffraction, TEM, and AFM) can facilitate material optimization and increase device efficiency. These analyses also play a critical role in identifying and eliminating defects in the manufacturing process. Figure 1 depicts the XRD patterns obtained for the CdS films. The analysis of these patterns

verifies the successful establishment of the hexagonal phase of cadmium sulfide, corresponding to the standard data recorded under JCPDS card No. 41-1049. The diffraction spectra display six primary peaks, sequentially indexed to the crystallographic planes: (1 0 0), (0 0 2), (1 0 1), (1 0 2), (1 1 0), and (1 1 1). This structural observation aligns with analogous findings in the literature, including those reported by RAO et al. (Rao, Kumar, Reddy, & Rao, t.y.). The XRD pattern of the films displays two significant peaks with 2θ values of 28.94° and 52.60° . The peaks correspond to the (101) and (111) crystallographic planes of hexagonal CdS, respectively. Moreover, the intensity of all peaks markedly escalates with an increase in the volume of the spray solution. The Williamson-Hall (W-H) analysis was utilized to ascertain the crystallite size and inherent film strain. This technique use the full width at half maximum (FWHM) of the principal XRD peaks to disentangle the influences of size and strain-induced widening (Kathalingam, Valanarasu, Ahamad, Alshehri, & Kim, 2021).

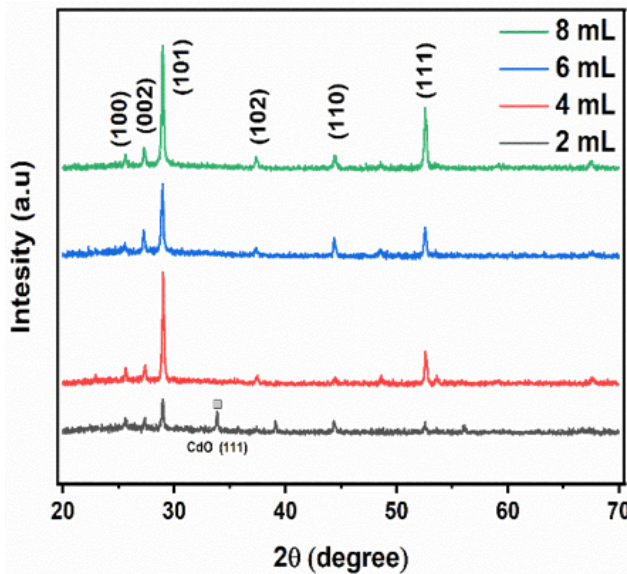


Figure 1. XRD pattern of the CdS thin films

The Debye-Scherrer formula, which alone accounts for the influence of crystallite size (D), is articulated in Equation (1).

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

The parameters in this equation denote the Scherrer constant ($k = 0.94$), the X-ray wavelength (λ), the full width at half maximum (β), and the diffraction angle (θ). A related microstructural parameter, the internal strain (ϵ) caused by crystalline disorder, can be derived from Equation (2).

$$\epsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (2)$$

The calculated crystallite size and strain values of CdS thin films are shown in Table 1. A complex relationship between spray solution volume and microstructure was observed: increasing volume from 2 mL to 4 mL enhanced the crystallite size while reducing strain, whereas a further increase to 4 mL had the opposite effect. Additionally, the dislocation density (δ) of the films was calculated via the Williamson and Smallman relation, shown in Equation (3).

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3)$$

A negative correlation between the calculated dislocation density values and the crystalline size is evident, as detailed in Table 1. Studying the optical properties of thin-film semiconductors is essential for understanding their interactions with light and maximizing their use in optoelectronic applications. Optical parameters such as absorption coefficient, refractive index, light transmittance, and band gap determine how well a semiconductor absorbs or transmits light. This information is particularly critical for the design of devices such

as photodetectors, solar cells, and LEDs. For example, a photodetector's sensitivity to light at a specific wavelength depends on the optical properties of the thin film used. Similarly, in solar cells, the goal is to maximize light absorption to achieve higher efficiency. Therefore, detailed analysis of optical properties offers significant advantages in both material selection and improving device performance.

Table 1. Variation of crystal properties parameters of CdS thin films with changing spray solution volume

Samples	FWHM	D (nm)	Strain (10^{-4})	Dislocation Density (10^{14} m^{-2})
2 mL	0.2514	33	10.6	9.37
4 mL	0.2206	37	9.3	7.21
6 mL	0.2696	30	11.4	10.77
8 mL	0.2398	34	10.1	8.52

The optical properties of the spray-coated cadmium sulfide thin films were systematically investigated via optical absorption spectroscopy across the 300-900 nm wavelength range. The ultraviolet-visible-infrared (UV-Vis-IR) transmittance spectra for CdS films, deposited under varying spray solution volume, is presented in Figure 2 (a). In particular, the film produced with a 6 mL spray solution volume exhibited maximum optical transmittance compared to samples prepared at other volumes. This increase is assumed to be due to the growth of smoother, more homogeneous grains and smaller crystallite sizes at this specific spray volume; this structural observation was independently confirmed by XRD analysis. Furthermore, the UV-Vis-IR transmittance spectra reveal a band-edge shift depending on the applied sputter volume. This shift suggests a modulation of the films' electronic band gap with the solution volume, and the sputter volume serves as an

effective parameter for tuning the optical and electronic properties of CdS thin films.

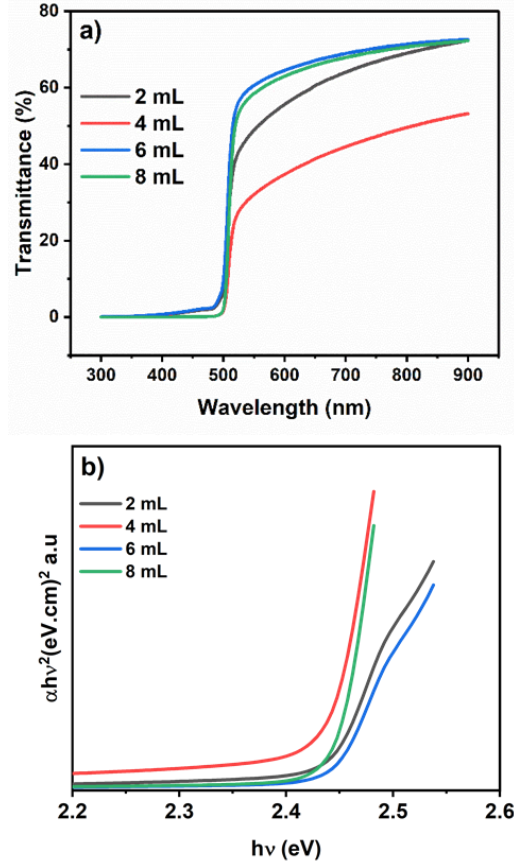


Figure 2. (a) Transmittance and (B) Tauc plots for CdS thin films as a function of spray solution volume

Determining a semiconductor's optical band gap (band gap) is crucial for understanding how a material interacts with light and what wavelengths (or energies) of light it can absorb. Accurately measuring the band gap is the first step in determining whether a material is suitable for use in optoelectronic devices such as solar cells, photodetectors, LEDs, and lasers. The optical band gap indicates the minimum

photon energy a material can absorb. For example, for a photodetector detecting visible light, the appropriate band gap should be between 1.5 and 3 eV. If a material's band gap is not within this range, the device may not operate within the expected light range. Furthermore, the band gap affects other optical and electronic properties of the material, such as conductivity, transparency, and photoresponse time. Therefore, determining the optical band gap plays a critical role in many stages, from material selection to device performance prediction. The determination of the CdS films' bandgap and the comprehensive understanding of their optical nature necessitated the application of the Tauc method. Specifically, the quantity $(\alpha h\nu)^2$ was plotted against the incident photon energy ($h\nu$) for each distinct CdS sample. Crucially, the absorption coefficient (α)—a prerequisite for the Tauc analysis—was first calculated from the measured transmittance values. The electronic bandgap (E_g) values for the cadmium sulfide (CdS) films were quantitatively extracted from the linear extrapolation of the Tauc plot, specifically the graph of $(\alpha h\nu)^2$ against photon energy ($h\nu$). This analysis is grounded in the Tauc relationship (Equation (3), as referenced in (Kathalingam, Valanarasu, Ahamad, Alshehri, & Kim, 2021):

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (3)$$

The exponent n in this equation is an integer whose value is determined by the kind of electronic transition (direct transition $n=1/2$, indirect transition $n=2$), and A is a proportionality constant. Tauc plots of CdS films deposited with varying solution contents are shown in Figure 2(b). These figures' linear behavior amply illustrates the material's direct electrical band gap nature. The linear segments of the Tauc plots were extrapolated to the x-axis (photon energy axis) in order to quantitatively determine specific E_g values. For films

deposited at 2 ml, 4 ml, 6 ml, and 8 ml, the observed band gaps were 2.43 eV, 2.43 eV, 2.44 eV, and 2.44 eV, respectively. Changes in crystal quality brought on by the quantity of the deposition solution can be directly connected to the observed band gap fluctuation.

Investigating the optoelectronic properties of CdS thin films is crucial for understanding the material's interaction with light and its electrical behavior, enabling its optimal use in various applications. Because CdS is a wide-bandgap semiconductor, it is frequently used as a buffer layer in solar cells, photodetectors, and photosensitive resistors (LDRs). Investigating the optoelectronic properties of CdS in thin-film form—such as bandgap, carrier density, conductivity, photoresponse rate, and light absorption capacity—reveals significant effects on device performance. This analysis can optimize material synthesis methods, improve film quality, and produce more effective CdS layers suitable for targeted applications. Consequently, the optoelectronic characterization of CdS is a critical step in both material development and the design of high-efficiency optoelectronic devices. The photoelectric properties of the fabricated CdS devices were comprehensively examined under excitation by visible light sources. The I-V curves—detailing current response under dark conditions and 100 mW/cm^2 light incidence—are displayed in Figure 3. Photocurrent measurements were conducted by sweeping the potential from -2 V to $+2 \text{ V}$ under a consistent 100 mW/cm^2 illumination intensity across the visible domains. The significant enhancement of current upon light exposure, relative to the baseline dark current, validates the UV-Vis photosensitivity of the devices. The linear and mirrored I-V characteristics confirm the existence of ideal Ohmic contacts at the film-electrode interface. The figure of merit for the photodetectors, expressed as the ON/OFF ratio (the ratio of

photo-to-dark current), exhibited a strong dependence on the film preparation spray solution volume. The measured ratios were 2.7×10^3 , 39, 11, and 7.5 corresponding to films prepared at 2 mL, 4 mL, 6 mL and 8 mL, respectively. This data clearly establishes that the photodetector synthesized at 2 mL achieves the peak operational efficiency, demonstrating a superior On/Off ratio of 2.7×10^3 .

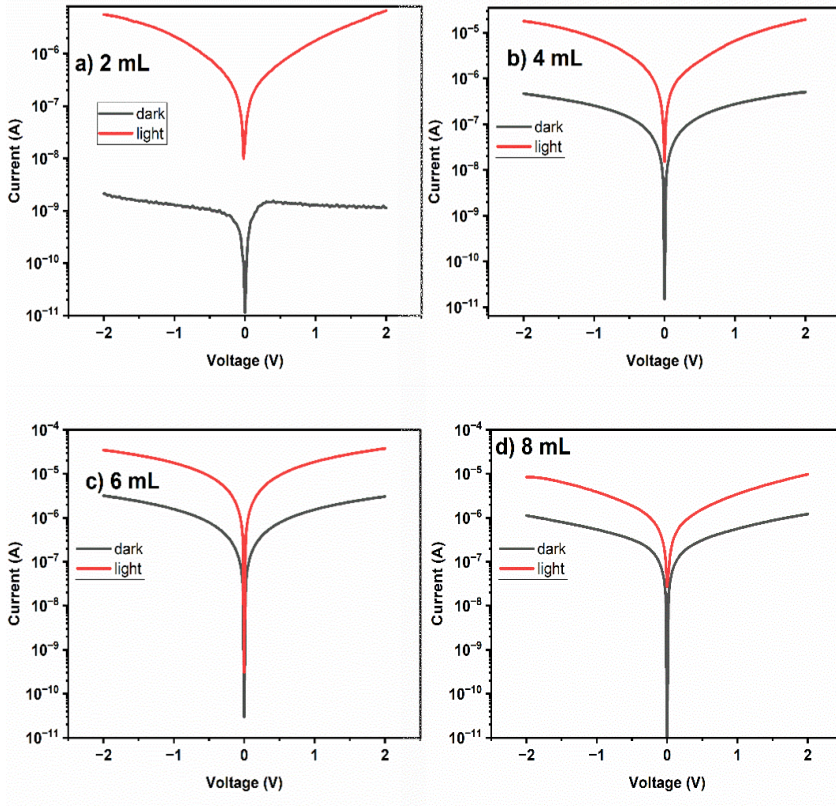


Figure 3. The I-V characteristics of CdS thin films prepared at different spray solution volume

4. CONCLUSIONS

This investigation delineates the successful fabrication of Cadmium Sulfide (CdS) thin films via an economical nebulized spray pyrolysis technique. The study systematically elucidates the impact of varying precursor solution volumes (2, 4, 6, and 8 mL) on the resultant films' structural and optoelectronic characteristics. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that all deposited films were polycrystalline, adopting a hexagonal wurtzite crystal lattice with a strong preferential growth orientation along the c-axis. Among the series, the film derived from a 6 mL spray solution exhibited superior optical transparency. However, the functional performance as a photodetector, quantified by the light-to-dark current (ON/OFF) ratio, was found to be critically dependent upon the precursor volume. The ratios were measured to be 2.7×10^3 , 39, 11, and 7.5 for the 2, 4, 6, and 8 mL precursor volumes, respectively. These results unequivocally demonstrate that the film synthesized with a 2 mL precursor volume possesses unparalleled operational efficiency, achieving a remarkable ON/OFF ratio of 2.7×10^3 . In conclusion, the judicious manipulation of precursor volume presents a straightforward yet powerful pathway for tailoring the material's properties for specific applications.

The exceptional photo-responsive performance of the CdS film fabricated from a 2 mL solution renders it a highly promising candidate for integration into advanced photodetector systems. These findings accentuate the pivotal role of precursor volume in modulating not only the microstructural integrity but also the functional efficacy of CdS thin films. This ability to fine-tune film characteristics through such a readily controllable synthesis parameter offers a scalable and versatile strategy for incorporating CdS materials

into next-generation optoelectronic devices. Future research avenues could involve exploring the influence of strategic doping, substrate temperature modulation, and post-deposition thermal annealing to further optimize the performance metrics of CdS-based photodetectors across a broader spectral domain.

REFERENCES

- Al-Ahmad, A. Y., Hassan, Q. M. A., Badran, H. A., & Hussain, K. A. (2012). Investigating some linear and nonlinear optical properties of the azo dye (1-amino-2-hydroxy naphthalin sulfonic acid-[3-(4-azo)]-4-amino diphenyl sulfone). *Optics & Laser Technology*, 44(5), 1450-1455. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.12.019>
- Deng, K., & Li, L. (2014). CdS Nanoscale Photodetectors. *Advanced Materials*, 26(17), 2619-2635. <https://doi.org/10.1002/adma.201304621>
- Devi, M. D., Juliet, A. V., Hari Prasad, K., Alshahrani, T., Alshehri, A. M., Shkir, Mohd., & AIFaify, S. (2020). An effect of precursor concentrations on the photodetection capabilities of CdS thin films for high-efficiency visible-light photodetector applications. *Applied Physics A*, 126(12), 960. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04067-3>.
- Gant, P., Huang, P., Pérez de Lara, D., Guo, D., Frisenda, R., & Castellanos-Gomez, A. (2019). A strain tunable single-layer MoS2 photodetector. *Materials Today*, 27, 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.04.019>
- Hakami, J. (2022). Highly induced photosensing behavior of Erbium (Er), Yttrium (Y) and Terbium (Tb) doped nanostructured Cadmium Sulphide (CdS) thin films prepared by nebulizer spray pyrolysis method. *Journal of Alloys and Compounds*, 924, 166577. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166577>
- Kathalingam, A., Valanarasu, S., Ahamad, T., Alshehri, S. M., & Kim, H.-S. (2021). Spray pressure variation effect on the properties of CdS thin films for photodetector applications. *Ceramics International*, 47(6), 7608-7616. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.100>

- Li, F., Nie, C., You, L., Jin, X., Zhang, Q., Qin, Y., ... Li, Q. (2018). White light emitting device based on single-phase CdS quantum dots. *Nanotechnology*, 29(20), 205701. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aab18e>
- Liu, B., Luo, R., Li, B., Zhang, J., Li, W., Wu, L., ... Wu, J. (2016). Effects of deposition temperature and CdCl₂ annealing on the CdS thin films prepared by pulsed laser deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 654, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.247>
- Liu, F., Lai, Y., Liu, J., Wang, B., Kuang, S., Zhang, Z., ... Liu, Y. (2010). Characterization of chemical bath deposited CdS thin films at different deposition temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 493(1), 305-308. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.12.088>
- Mohamed, H. A. (2013). Dependence of efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cell on optical and recombination losses. *Journal of Applied Physics*, 113(9), 093105. <https://doi.org/10.1063/1.4794201>
- Munirah, Shahid Khan, Mohd., Aziz, A., Abdul Rahman, S., & Raza Khan, Z. (2013). Spectroscopic studies of sol-gel grown CdS nanocrystalline thin films for optoelectronic devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16(6), 1894-1898. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2013.07.010>
- Patel, J., Mighri, F., Ajji, A., Tiwari, D., & Chaudhuri, T. K. (2014). Spin-coating deposition of PbS and CdS thin films for solar cell application. *Applied Physics A*, 117(4), 1791-1799. <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8659-x>

- Qi, Z., Yang, T., Li, D., Li, H., Wang, X., Zhang, X., ... Pan, A. (2019). High-responsivity two-dimensional p-PbI₂/n-WS₂ vertical heterostructure photodetectors enhanced by photogating effect. *Materials Horizons*, 6(7), 1474-1480. <https://doi.org/10.1039/C9MH00335E>
- Rondiya, S., Rokade, A., Funde, A., Kartha, M., Pathan, H., & Jadkar, S. (2017). Synthesis of CdS thin films at room temperature by RF-magnetron sputtering and study of its structural, electrical, optical and morphology properties. *Thin Solid Films*, 631, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.04.006>
- Sathish Kumar, S., Valanarasu, S., Vimala Juliet, A., Rimal Isaac, R. S., & Ganesh, V. (2025). Effect of coating temperature on the properties of CdS thin films coated by nebulizer spray pyrolysis method for photodetection applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 458, 115949. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.115949>
- Shuai, M., Lingmin, Y., Lei, C., Chun, L., Mingli, Y., & Xinhui, F. (2020). Resistive-type UV–visible photodetector based on CdS NWs /ZnO nanowalls heterostructure fabricated using in-situ synthesis method. *Journal of Alloys and Compounds*, 827, 154090. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154090>
- Thirumoorathi, M., & Thomas Joseph Prakash, J. (2016). Structure, optical and electrical properties of indium tin oxide ultra thin films prepared by jet nebulizer spray pyrolysis technique. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 4(1), 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2016.01.001>

- Vrijen, R., & Yablonovitch, E. (2001). A spin-coherent semiconductor photo-detector for quantum communication. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 10(4), 569-575. [https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(00\)00296-4](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(00)00296-4)
- Wondmagegn, W., Mejia, I., Salas-Villasenor, A., Stiegler, H. J., Quevedo-Lopez, M. A., Pieper, R. J., & Gnade, B. E. (2016). CdS Thin Film Transistor for Inverter and Operational Amplifier Circuit Applications. *Microelectronic Engineering*, 157, 64-70. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.02.042>
- Wu, D., Jiang, Y., Zhang, Y., Yu, Y., Zhu, Z., Lan, X., ... Luo, L. (2012). Self-powered and fast-speed photodetectors based on CdS:Ga nanoribbon/Au Schottky diodes. *Journal of Materials Chemistry*, 22(43), 23272-23276. <https://doi.org/10.1039/C2JM34869A>
- Ye, Y., Dai, L., Wen, X., Wu, P., Pen, R., & Qin, G. (2010). High-Performance Single CdS Nanobelt Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor-Based Photodetectors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2(10), 2724-2727. <https://doi.org/10.1021/am100661x>
- Yılmaz, S., Polat, İ., Tomakin, M., & Bacaksız, E. (2020). Transparent and conductive CdS:Ca thin films for optoelectronic applications. *Applied Physics A*, 126(7), 555. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03752-7>

FİZİK DEĞERLENDİRMELERİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com