

# Ardışık Düşük Doz $\gamma$ -Işınlarının c-Si Güneş Hücresi Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Ismail KABACELİK <sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Bartın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Bartın, Turkey

## Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 05/11/2022  
Düzeltilme: 01/12/2022  
Kabul: 07/12/2022

## Anahtar Kelimeler

<sup>60</sup>Co  
Gama Işıması  
Güneş Hücresi  
Elektriksel Karakterizasyon

## Article Info

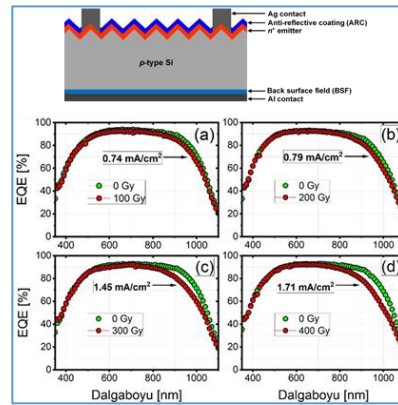
Research article  
Received: 05/11/2022  
Revision: 01/12/2022  
Accepted: 07/12/2022

## Keywords

<sup>60</sup>Co  
Gamma Irradiation  
Solar Cell  
Electrical Characterization

## Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışmada, düşük dozlu ardışık gama ( $\gamma$ ) ışınlarının tek kristalli Silikon (c-Si) güneş hücrelerinin elektriksel ve spektral özellikleri üzerindeki etkisi, karanlık ve AM1.5G ışık altında akım-gerilim (I-V), dışsal kuantum verimliliği (EQE), kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/ $\omega$ -V) ölçümleri kullanılarak radyasyon öncesi ve sonrasında incelendi. / In the study, the effect of sequential low-dose gamma ( $\gamma$ ) rays on electrical and spectral properties of mono-crystalline Silicon (c-Si) solar cells were investigated via dark and AM1.5G light current-voltage (I-V), external quantum efficiency (EQE), capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G/ $\omega$ -V) measurements before and after irradiation.



**Şekil A:** Üretilen c-Si güneş hücresinin yapısı ve ışınlanmamış ve ışınlanmış hücrelerin dışsal kuantum verimliliği (EQE) ölçümleri. / **Figure A:** Structure of fabricated c-Si solar cell and external quantum efficiency (EQE) measurements of un-irradiated and irradiated cells.

## Önemli noktalar (Highlights)

- Bu çalışma, c-Si güneş hücrelerinde gama ışınlanmanın neden olduğu etkileri bildirmektedir. / This study reports gamma irradiation induced effects on c-Si solar cells.
- Gama ışınlama dozlarının artmasıyla birlikte c-Si güneş hücrelerinin elektriksel özellikleri ve spektral tepkisi daha da etkilenmiştir. / The electrical properties and spectral response of c-Si solar cells were further influenced by increasing gamma irradiation doses.
- Güneş hücrelerinin çıkış parametrelerinin bozulması, azınlık taşıyıcı ömürleriyle ilişkilidir. / The degradation of output parameters of solar cells is related to the minority carrier lifetimes.

**Amaç (Aim):** Çalışma, düşük dozlu ardışık  $\gamma$ -ışınlarına maruz kalan güneş hücrelerinin elektriksel ve spektral özelliklerini inceledi. / The study examined the electrical and spectral characteristics of solar cells that were exposed to low-dose sequential  $\gamma$ -rays.

**Özgünlük (Originality):** Bu çalışma, uygulanan radyasyon dozu ile hücrelerde kaybedilen akım miktarı arasında bir bağlantı kurmuştur. / This study established a correlation between the applied radiation dose and the amount of lost current in the cells.

**Bulgular (Results):** Araştırma, hücrelerin elektriksel ve spektral özelliklerinin radyasyon dozuna orantılı olarak bozulduğunu ortaya çıkardı. / The research revealed that the electrical and spectral properties of the cells deteriorated in proportion to the radiation dose.

**Sonuç (Conclusion):** Çalışma, uygulanan sıralı radyasyon miktarı ile  $J_{sc}$  değerindeki azalma arasında doğrudan bir ilişki olmadığını gösterdi. Bu durum, hücrelerin inceltmesinin radyasyon kaynaklı bozulmayı azaltabileceğini ve hücre ömrünü artırdığını göstermektedir. / The study showed that there was no direct correlation between the quantity of sequential radiation applied and the reduction in  $J_{sc}$  value. This highlights the possibility that thinning the cells may reduce radiation-induced degradation and enhance the cells' lifetime.



## Ardışık Düşük Doz $\gamma$ -Işınlarnın c-Si Güneş Hücresi Üzerine Etkisinin İncelenmesi

İsmail KABACELİK <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Bartın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Bartın, Turkey

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 05/11/2022  
Düzeltilme: 01/12/2022  
Kabul: 07/12/2022

### Anahtar Kelimeler

<sup>60</sup>Co  
Gama Işıması  
Güneş Hücresi  
Elektriksel  
Karakterizasyon

### Öz

Çalışmada, ardışık düşük doz gama ( $\gamma$ ) ışınlarının mono-kristal Silisyum (c-Si) güneş hücresinin elektriksel ve spektral özellikleri üzerine etkisi incelendi.  $\gamma$ -ışını kaynağı olarak <sup>60</sup>Co kullanıldı. c-Si güneş hücresinin performansı, radyasyon öncesi ve sonrası karanlık ve AM1.5G ışık koşullarında alınan akım-voltaj (I-V), dışsal kuvantum verimlilik (EQE), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ $\omega$ -V) ölçümleri ile belirlendi. Deneysel sonuçlar, radyasyona maruz kaldıktan sonra hücrelerin idealite faktörlerinin arttığını göstermektedir. Doz miktarı arttıkça kısa devre akımı (I<sub>SC</sub>) ve verim ( $\eta$ ) değerleri azalırken, açık devre voltajı (V<sub>OC</sub>) ve doluluk faktörü (FF) değerleri ise yaklaşık sabit kaldığı görüldü. EQE ölçümlerinden elde edilen sonuçlar, radyasyon kaynaklı hasarın güneş hücresinin taban katmanında (p-tipi) oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca, aygıt performansındaki değişim C-V ve G/ $\omega$ -V ölçümleri ile de doğrulandı. Deneysel sonuçlar, radyasyon öncesi ve sonrası karşılaştırılarak tartışıldı.

## Investigation of the Effect of Successive Low-Dose $\gamma$ -Rays on c-Si Solar Cell

### Article Info

Research article  
Received: 05/11/2022  
Revision: 01/12/2022  
Accepted: 07/12/2022

### Keywords

<sup>60</sup>Co  
Gamma Irradiation  
Solar Cell  
Electrical  
Characterization

### Abstract

In the study, the effect of sequential low-dose gamma ( $\gamma$ ) rays on electrical and spectral properties of mono-crystalline Silicon (c-Si) solar cells were investigated. <sup>60</sup>Co was used as the  $\gamma$ -ray source. Performance of c-Si solar cells was determined via dark and AM1.5G light current-voltage (I-V), external quantum efficiency (EQE), capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G/ $\omega$ -V) measurements before and after irradiation. Experimental results show that ideality factors of cells increase after exposure to radiation. As the dose increased, the short-circuit current (I<sub>SC</sub>) and efficiency ( $\eta$ ) values decreased, while the open-circuit voltage (V<sub>OC</sub>) and fill factor (FF) values remained approximately constant. EQE measurements show that radiation-induced damage occurs in the base layer (p-type) of the solar cell. In addition, the change in device performance was confirmed by C-V and G/ $\omega$ -V measurements. Experimental results are discussed by comparing before and after radiation.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş hücreleri, güç kaynağı olarak çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzay uygulamalarında da önemli bir yere sahip olan güneş hücrelerinin kararlı ve uzun süreli kullanımları hücrelerin radyasyon dayanıklılığı ile yakından ilişkilidir. Güneş hücreleri uzay ortamında gama, elektron ve proton gibi çeşitli radyasyon tiplerine maruz kalmaktadır [1–4]. Bu durum güneş hücresinin performansını etkileyen önemli bir faktördür. Enerjik radyasyonun hedef malzeme ile etkileşmesi ile oluşan kusurlar, örgü atomlarının elektriksel olarak aktif oldukları konumdan ayrılarak inaktif oldukları konumlara yerleşmesi

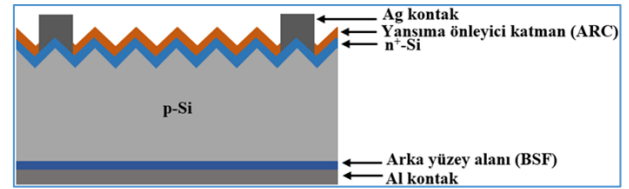
sonucu oluşmaktadır [5]. Bu kusurlar azınlık yük taşıyıcıların yarı ömrünü veya difüzyon uzunluğunu etkileyerek güneş hücresinin elektriksel ve optik özelliklerinin bozulmasına neden olmaktadır [6]. Boşluklardan ve atomlar arası konumlara yerleşmelerden (elektriksel olarak aktif olmayan atomlar) kaynaklanan bu hasarlar, yarıiletken malzemenin band aralığı içerisinde yeni enerji düzeylerinin oluşmasına neden olmaktadır [7,8]. Radyasyon indüklü yeni enerji düzeyleri, tuzak enerji düzeyleri olarak davranarak, yük taşıyıcılarının difüzyon uzunluğunun veya yarı ömrünün azalmasına neden olmaktadır [9–11]. Azınlık taşıyıcısı yeniden birleşme merkezleri, güneş hücresinin foton soğurması sonucunda oluşan elektronların ve deşiklerin yeniden birleşmesine

neden olurlar. Bu durum, p-n eklemine taban katmanındaki (base layer) azınlık yük taşıyıcılarının azalmasına neden olduğu için güneş hücresinin çıkış performansının kötüleşmesi ile sonuçlanır [12–14]. Diğer taraftan, çoğunluk yük taşıyıcısı tuzak merkezleri, çoğunluk yük taşıyıcılarını yakalayıp (n-tipi bölgede elektronlar, p-tipi bölgede deşikler) malzemenin iletkenliğinin azalmasına neden olur [15]. Güneş hücresinin çok fazla radyasyona maruz kalması malzemenin iletkenliğini kaybederek oldukça dirençli bir yapıya dönüşmesine neden olur. Çalışma ortamı genellikle güneş hücrelerinin bakımını engellediğinden, hücrelerin radyasyon dayanıklılığının belirlenmesi için test edilmeleri gerekmektedir. Literatürde farklı dozlarda  $\gamma$ -ışınlarına maruz kalmış güneş hücresi ile ilgili çalışmalar mevcut olup, bu çalışmalarda güneş hücreleri daha çok yüksek dozlarla maruz bırakılmıştır [1–7]. Düşük dozlarda ve ardışık değerlerde  $\gamma$ -ışınlarına maruz bırakılmış c-Si güneş hücreleri ile ilgili detaylı çalışmalar ise tespit edilememiştir. Çalışmada, ardışık düşük doz  $\gamma$ -ışınlarına maruz kalan güneş hücrelerinin elektriksel ve spektral özelliklerinin yanı sıra radyasyon sonrası kayıp akım miktarı ile uygulanan doz miktarı arasındaki ilişki incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Güneş hücreleri, Czochralski yöntemiyle büyütülmüş kalınlığı 160  $\mu\text{m}$ , direnci 1-3  $\Omega\cdot\text{cm}$ , kristal doğrultusu (100), boyutları 156 mm  $\times$  156 mm olan p-tipi Si pul kullanılarak yapılmıştır. Yayıcı katmanı ( $n^+$ ), p-tipi Si pul içine fosfor difüzyonu ile oluşturuldu. Eklem derinliği  $\sim 500$  nm'dir. Bor (p-tipi) ve fosfor ( $n^+$ -tipi) konsantrasyonları sırasıyla  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ve  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  dir. Güneş hücresi yapımı ile ilgili detaylara referans [16] ve [17] den ulaşılabilir. Üretilen güneş hücresi lazer ile boyutları 2.8 x 2.8  $\text{cm}^2$  olan küçük hücrelere bölündü. Üretilen güneş hücresinin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Her bir güneş hücresinin elektriksel karakteristikleri ve spektral tepkileri  $\gamma$ -radyasyonu öncesi ve sonrası ayrı ayrı ölçülmüştür. Karanlık I-V ölçümleri Keithley 2440 akım-gerilim kaynağı kullanılarak gerçekleştirildi. Işık altındaki I-V ölçümleri ise AM1.5G koşulları altında Newport güneş benzetici kullanılarak elde edildi. c-Si güneş hücrelerin EQE ölçümleri monokromatör, dilici, davranış ile benzerlik göstermektedir [18]. Doz miktarı arttıkça karanlık akımdaki artış, tuzak enerji seviyelerinin artması sonucu azınlık yük taşıyıcılarının yarı ömürlerinin azalması ile ilişkilendirilmektedir [19,20]. Tablo 1'de ise c-Si hücrelerin radyasyon öncesi ve sonrası ölçülen yarı-

kenetlemeli yükselteç ve kalibre edilmiş ışık dedektörü ile donatılmış bir sistem kullanılarak 300-1100 nm dalgaboyu aralığında 10 nm dalgaboyu adımlarla ölçülmüştür. Güneş hücrelerin C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümleri HP4192A LF empedans analizörü ile 100 kHz frekansta karanlık koşullarda gerçekleştirildi. Güneş hücrelerinin radyasyon dayanıklılığını belirlemek için hücreler farklı dozlarda enerjisi 1.25 MeV olan  $\gamma$ -ışınlarına maruz bırakılmıştır.  $\gamma$ -ışını kaynağı olarak  $^{60}\text{Co}$  kaynağı kullanıldı. Her bir hücre sırasıyla 100, 200, 300 ve 400 Gy doz miktarlarına ayrı ayrı maruz bırakıldı. Doz miktarı 10 Gy/dakika olarak sabit tutulmuştur. Işınlama ve ölçümler oda sıcaklığında ve normal atmosferik koşullarda gerçekleştirildi. Elektriksel ve spektral ölçümler, güneş hücreleri  $\gamma$ -ışınına maruz kaldıktan bir gün sonra elde edilmiştir.



Şekil 1. Üretilen güneş hücresinin şematik görünümü (The schematic view of the fabricated solar cell)

Çalışmada, düşük doz  $\gamma$ -radyasyonunun c-Si güneş hücrelerinin elektriksel karakterizasyonu ve spektral tepkisi üzerine etkisi, radyasyon öncesi ve sonrası karanlık ortamdaki I-V, AM1.5G koşullarında I-V, C-V,  $G/\omega$ -V ve EQE ölçümleri alınarak incelendi. Deneysel sonuçlar analiz edilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

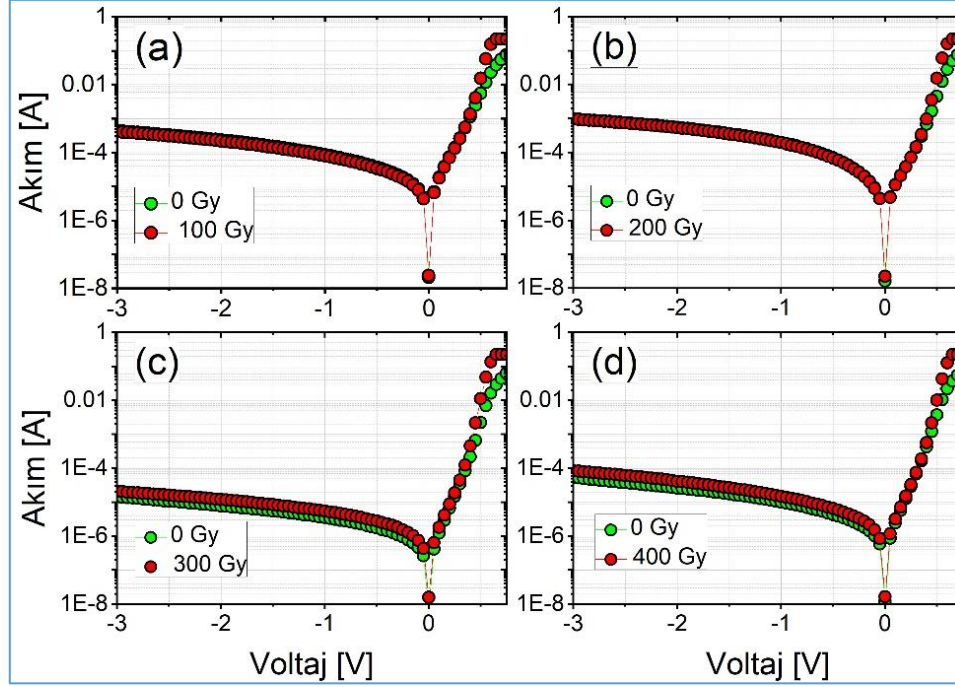
## 3. BULGULAR (RESULTS)

Şekil 2'de ardışık doz  $\gamma$ -ışınlarına maruz kalan güneş hücrelerinin radyasyon öncesi ve sonrası karanlık koşullarda ve oda sıcaklığında ölçülen I-V karakteristikleri verilmiştir. Ters besleme bölgesinde doz miktarına bağlı olarak karanlık akımın arttığı görülmektedir. Düşük doz  $\gamma$ -radyasyonuna maruz kalan güneş hücrelerinin I-V karakteristiklerinin ters besleme bölgesi karanlık akımındaki davranış, kGy mertebesinde  $\gamma$ -radyasyonuna maruz kalan hücrelerde de gözlenen

logaritmik I-V eğrilerinin lineer kısmının eğiminden hesaplanan idealite faktörü değerleri verilmiştir. Güneş hücreleri  $\gamma$ -ışınlarına maruz kaldıktan sonra idealite faktöründe artmanın olduğu görülmektedir. İdealite faktörü 2'ye eşit olduğunda tükenme bölgesinde elektron ve deşiklerin üretim

ve yeniden birleşmesi baskın iken, 1'e eşit olduğunda ise difüzyon akımı baskın durumdadır [21]. Güneş hücresi iç parametresi olan idealite faktörü,  $\gamma$ -ışınlarının etkisi sonucu azınlık yük taşıyıcılarının yarı ömrünün azalmasına bağlı olarak artmaktadır. Ters besleme bölgesinden de

görüleceği üzere radyasyon doz miktarı arttıkça üretim akımı da artmakta, bu durum ise artan idealite faktörü ile tutarlı olarak yeniden birleşme merkezleri olarak işlev gören kusurların artması ile ilişkilidir.



**Şekil 2.** Farklı dozlara maruz kalan c-Si güneş hücrelerinin karanlık koşullarda alınan I-V karakteristiği (I-V characteristics of c-Si solar cells exposed to different doses under dark conditions)

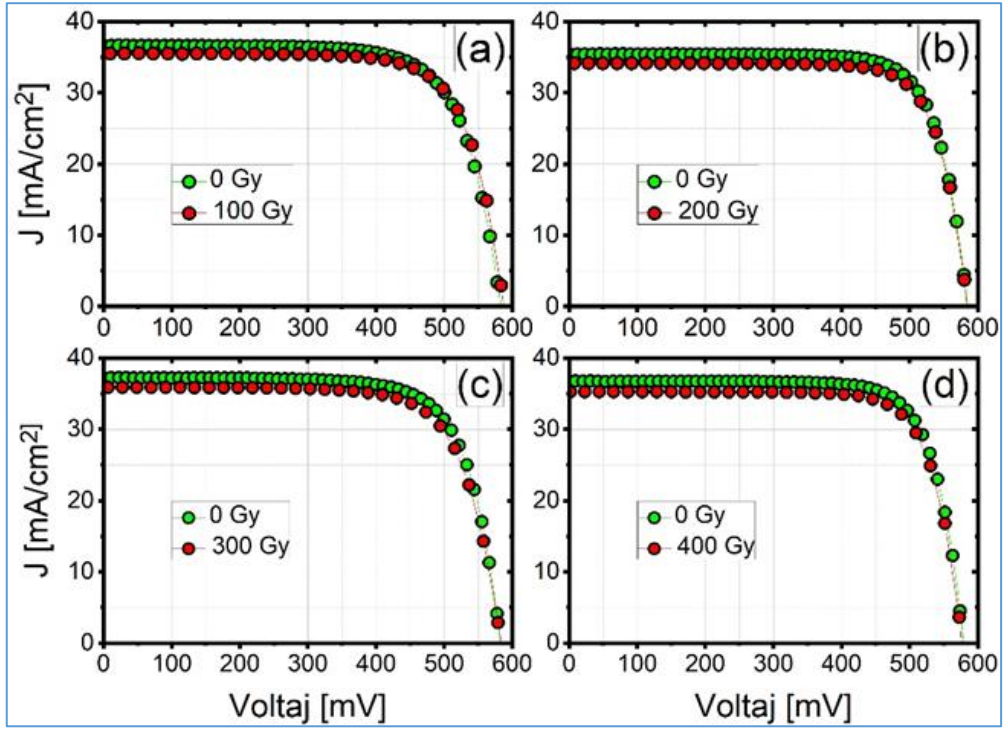
**Tablo 1.** c-Si güneş hücrelerinin radyasyon öncesi ve sonrası idealite faktörü (n) değerleri (Ideality factor (n) values of c-Si solar cells before and after radiation)

	100 Gy	200 Gy	300 Gy	400 Gy
<b>İşinlanmamış</b>	1,57	1,50	1,39	1,42
<b>İşinlanılmış</b>	2,38	2,03	1,79	1,99

Şekil 3'te, farklı dozlarda  $\gamma$ -ışınlarına maruz kalmış dört farklı güneş hücrelerinin AM1.5G aydınlatma koşullarında ve oda sıcaklığında ölçülmüş I-V karakteristikleri verilmiştir. Doz etkisini görmek için radyasyona maruz kalmamış her bir hücrenin I-V grafikleri de karşılaştırma için birlikte verilmiştir. I-V grafiklerinden de görüldüğü üzere radyasyonun

etkisi ile her bir hücrenin  $I_{sc}$  değeri azalmaktadır. Doz miktarı arttıkça  $I_{sc}$  değerindeki azalma daha da belirgin hale gelmektedir.  $I_{sc}$  değerindeki azalma, ışık ile oluşan azınlık yük taşıyıcıları için yeniden birleşme merkezleri olarak davranan  $\gamma$ -indüklü kusurlardan kaynaklanmaktadır [2,19].





**Şekil 3.** Doz miktarına bağlı olarak c-Si güneş hücrelerinin AM1.5G koşullarında oda sıcaklığında alınan I-V grafikleri (I-V curves of c-Si solar cells under AM1.5G conditions at room temperature, depending on the dose level)

Şekil 3'te verilen I-V eğrilerinden açık devre voltajı ( $V_{OC}$ ), kısa devre akımı ( $I_{SC}$ ), doluluk faktörü (FF) ve verim ( $\eta$ ) gibi temel güneş hücresi parametreleri hesaplanabilir.

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (1)$$

$V_{MP}$  ve  $I_{MP}$  sırasıyla maksimum güç noktasındaki voltaj ve akımı göstermektedir.

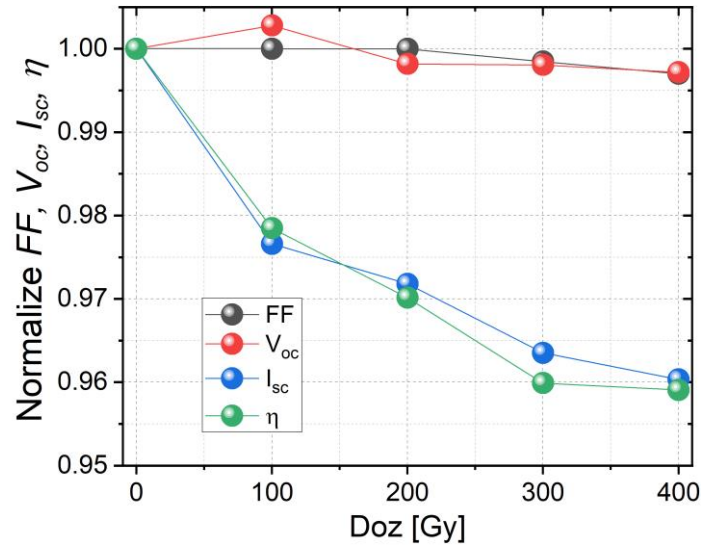
Güneş hücresi için  $\eta$  ise Eş. 2 ile verilmektedir.

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (2)$$

$P_{in}$  güneş hücresi üzerine gelen ışık gücüdür.

AM1.5G ışık koşulları altında alınan I-V eğrilerinden elde edilen normalize edilmiş güneş hücresi parametrelerinin uygulanan ardışık düşük doz miktarına göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Normalizasyon işlemi, her bir hücrenin radyasyona maruz kalmamış ilk durumundan elde edilen hücre

parametreleri ile karşılaştırılarak elde edilmiştir. Şekil 4'ten de görüleceği üzere, doz miktarından bağımsız olarak  $V_{OC}$  ve FF değerlerinde önemli bir değişimin olmadığı ve eğilimin yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. Fakat, doz miktarı arttıkça  $I_{SC}$  ve  $\eta$  değerlerindeki değişim ise azalma yönündedir.  $\eta$  değerindeki azalma  $I_{SC}$  değerindeki azalma ile yakından ilişkilidir. Düşük dozda gözlenen azalma, azınlık yük taşıyıcılarının yaşam süreleri veya difüzyon uzunluğundaki azalma ile ilişkilendirilmektedir [9,22,23]. Radyasyon indüklü oluşan kusurlar yarıiletken malzemenin band aralığı içerisinde yeni tuzak enerji seviyeleri oluşturarak azınlık yük taşıyıcılarının ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır [24]. Bu nedenle, azınlık yük taşıyıcılarının yaşam süreleri  $\gamma$ -indüklü kusurlara duyarlı olup, bu durum güneş hücrelerinin elektriksel özelliklerini olumsuz etkilemektedir [25]. Düşük doz miktarlarında bile gözlenen bu etki, yüksek doz miktarlarında daha da artarak güneş hücresinin çıkış performansını çok fazla etkilemektedir [19].



**Şekil 4.** Farklı dozlarda c-Si güneş hücrelerinin çıkış parametrelerindeki değişim (Variation in output parameters of c-Si solar cells at different doses)

Tablo 2’de radyasyon öncesi ve sonrası farklı doz miktarlarına karşılık gelen hücrelerin seri direnç ( $R_s$ ) değerleri verilmiştir. Güneş hücreleri radyasyona maruz kaldıktan sonra seri dirençlerde artmanın olduğu görülmektedir. Güneş hücresi iç parametresi olan  $R_s$  değerindeki artma, radyasyon indüklü oluşan yeniden birleşme merkezleri ile ilişkilidir. Bu kusurlar azınlık yük taşıyıcılarının

yarı ömürlerinde veya difüzyon uzunluğunda azalmaya neden olarak, taban katmanının (p-tipi) direncinin artması şeklinde etki etmektedir [2]. Radyasyon sonrası güneş hücresi iç parametresi olan  $n$  ve  $R_s$  değerlerindeki artış, çıkış parametreleri  $J_{sc}$  ve  $\eta$  değerleri üzerine olumsuz yönde yansıdığı Şekil 4’ten de görülmektedir [26].

**Tablo 2.** c-Si güneş hücrelerinin radyasyon öncesi ve sonrası seri direnç ( $R_s$ ) değerleri (Pre- and post-radiation series resistance ( $R_s$ ) values of c-Si solar cells)

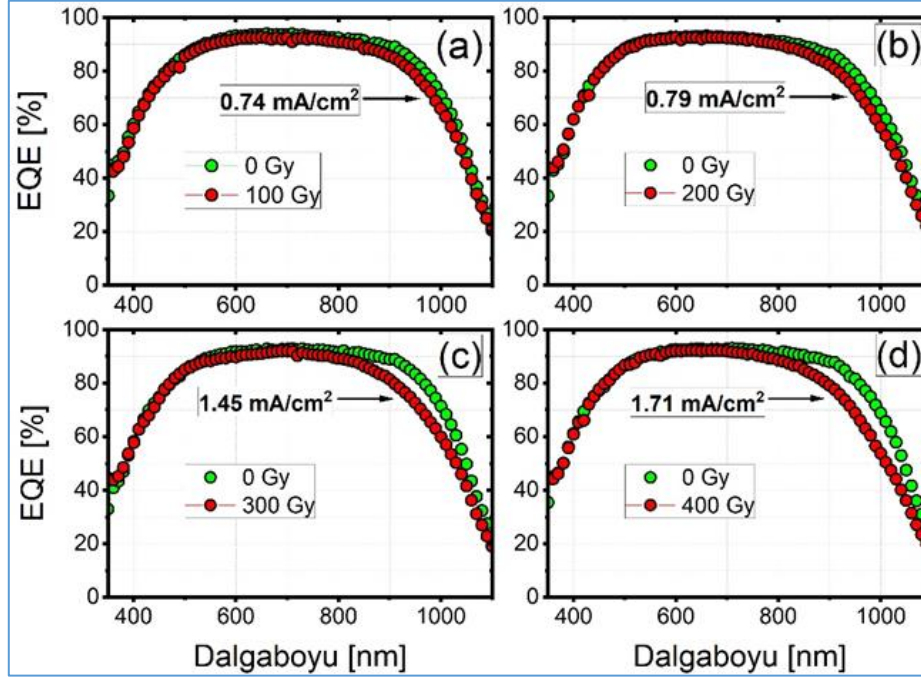
	100 Gy	200 Gy	300 Gy	400 Gy
<b>Işınlanmamış</b>	0,46	0,55	0,67	0,58
<b>Işınlanmış</b>	0,54	0,64	0,73	0,69

EQE ölçümleri, foton dalgaboyuna göre güneş hücresinin davranışını anlamak için kullanılan önemli bir ölçüm yöntemidir. Şekil 5’te her bir örneğin ayrı ayrı radyasyon öncesi ve sonrası EQE ölçümlerinin karşılaştırılması verilmiştir. EQE spektrumlarına bakıldığında, uygulanan doz miktarından bağımsız olarak elektromanyetik spektrumun kısa dalgaboyu bölgesinde değişimin olmadığı, spektrumunun uzun dalgaboyu bölgesinde ise radyasyonun etkisi ile azalmanın olduğu görülmektedir. Spektrumun kısa dalgaboyu bölgesi yüksek enerjiye sahiptir, bu da düşük soğurma derinliği anlamına gelmektedir. Kısa dalgaboyu bölgesinde önemli bir değişimin olmaması güneş hücresinin yayıcı katmanının (n-tipi)  $\gamma$ -radyasyonundan etkilenmediğini ya da ihmal

edilebilir seviyede etkilendiğini göstermektedir. Bu durum, tükenme bölgesi civarında yüksek enerjili fotonlar tarafından uyarılan yük taşıyıcıları yeniden birleşme olmaksızın ilgili bölgeye rahatlıkla geçebileceğine işaret etmektedir. Ancak, spektrumun uzun dalgaboyu ( $750 \text{ nm} < \lambda < 1100 \text{ nm}$ ) bölgesinde ise EQE değerlerinde azalmanın olduğu görülmektedir. Bu azalma, radyasyon doz miktarı arttıkça da artmaktadır. Uzun dalgaboyu bölgesindeki fotonlar güneş hücresinin soğurucu katmanında (p-tipi) soğurulmaktadır. Radyasyon dozuna bağlı olarak uzun dalgaboyu bölgesindeki kayıplar Şekil 3’te verilen  $J_{sc}$  değerlerindeki azalma ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Uzun dalgaboyu bölgesindeki kayıpların temel nedeni, radyasyon sonrası güneş

hücresinin taban katmanında (p-tipi) kusur oluşumudur [19,27]. Ayrıca, doz miktarı arttıkça oluşan kusurların miktarı da artmaktadır. Bu kusurlar, yarıiletken malzemenin band aralığı içerisinde tuzak enerji seviyeleri oluşmasına neden olmaktadır. Taban katmanında oluşan kusurlar

azınlık yük taşıyıcıların yaşam sürelerinin veya difüzyon uzunluğunun kışalmasına neden olur [19,20]. Böylelikle, foton ile oluşturulan taşıyıcılar tuzak enerji seviyesi merkezlerinde yeniden birleşerek güneş hücresinin performansını olumsuz etkilemektedir.



**Şekil 5.**  $\gamma$ -ışınlarına maruz kalmış c-Si güneş hücrelerinin radyasyon öncesi ve sonrası EQE spektrumları. Her bir hücre için Eş. 3 yardımı ile hesaplanan kayıp  $J_{SC}$  değerleri spektrumlar üzerinde gösterilmiştir (Pre- and post-radiation EQE spectra of c-Si solar cells exposed to  $\gamma$ -rays. The loss in  $J_{SC}$  values calculated with Eq. 3 for each cell is shown on the spectra)

Güneş hücrelerinin  $J_{SC}$  değeri I-V ölçümlerinden elde edilebileceği gibi EQE spektrumundan da hesaplanabilir. Çünkü, EQE foto-akımın spektral dağılımıdır. Her bir hücrenin radyasyon öncesi ve sonrası  $J_{SC}$  değerleri Eş. 3'te verilen denklem yardımıyla hesaplanmıştır. Eşitlikte verilen  $J_{\gamma,AM1.5G}(\lambda)$ , ASTM G173-03 referans spektrumundan alınan AM1.5G verilerinden türetilen, dalgaboyu aralığı başına gelen foton akım yoğunluğudur.

$$J_{SC} = \int EQE(\lambda) J_{\gamma,AM1.5G}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

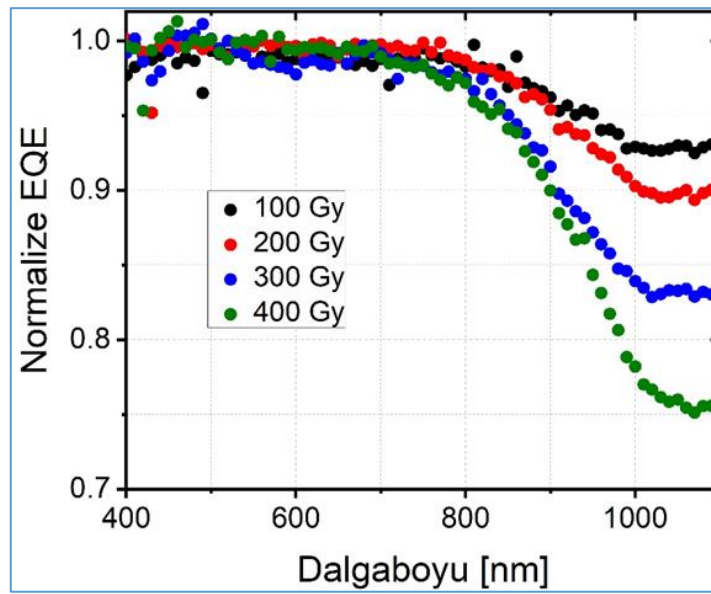
Eş. 3 ile hücrelerin  $J_{SC}$  değerleri hesaplanarak radyasyonun etkisi ile oluşan kayıp  $J_{SC}$  miktarı elde edilmiştir. Kayıp  $J_{SC}$  miktarı, radyasyon öncesi ve sonrası EQE spektrumlarından hesaplanan  $J_{SC}$  değerlerinin farkı alınarak bulunmuştur. Şekil 5'te verilen kayıp  $J_{SC}$  değerleri doz miktarı arttıkça artmaktadır. Şekil 5'te verilen grafikler üzerinde yazılan doz miktarına bağlı olarak her bir hücreye ait kayıp  $J_{SC}$  miktarı 0.74 mA/cm<sup>2</sup> ile 1.71 mA/cm<sup>2</sup>

arasında değişmektedir. Doz miktarı arttıkça kayıp  $J_{SC}$  miktarındaki artma, taban katmanında (p-tipi) oluşan kusurların sayısının artması ile ilişkili olup, bu durum azınlık yük taşıyıcıların elektrotlara ulaşmadan yeniden birleşme merkezlerinde birleşerek kaybolmasına atfedilmektedir [27]. Şekil 5'te verilen kayıp akım miktarları ile uygulanan ardışık doz miktarları arasındaki ilişki incelendiğinde, doz miktarı ile kayıp akım miktarı arasında lineer bir ilişki olmadığı görülmektedir. Bu durum, doz miktarı arttıkça örgü noktalarındaki atomlara enerji aktarılması sonucu oluşan kusurlarında kazandıkları kinetik enerji ile yeni kusurlar oluşturduklarına işaret etmektedir.

Farklı dozlara maruz kalmış c-Si güneş hücrelerinin normalize edilmiş EQE spektrumları Şekil 6'da verilmiştir. Radyasyona maruz kalmış her bir hücrenin EQE değerleri radyasyona maruz kalmamış değerine göre ayrı ayrı normalize edilmiştir. Normalize EQE spektrumdan da açıkça görüleceği gibi kısa dalgaboyu bölgesinde

değişimin olmadı, uzun dalgaboyu bölgede ise doz miktarına bağlı olarak spektrumda düşmenin olduğu görülmektedir. EQE sonuçlarına göre yayıcı (n-tipi) katmanın uygulanan doz miktarına göre etkilenmediği görülmektedir. Deneysel sonuçlar, radyasyon etkisinin taban (p-tipi) katmanında oluştuğunu ve bu kusurların da azınlık yük taşıyıcıların yaşam sürelerini veya difüzyon uzunluğunun azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, azınlık yük taşıyıcılarının elektrotlar tarafından toplanmadan yeniden birleşme merkezlerinde birleşerek güneş hücresinin elektriksel özelliklerini olumsuz etkilemesine neden olmaktadır. Böylece, güneş hücresinin kalınlığı

radyasyon direnci açısından önem kazanmaktadır. Çalışmada kullanılan güneş hücresinin kalınlığı 160  $\mu\text{m}$  dir. Radyasyonun etkisini azaltmak veya güneş hücresinin ömrünü uzatmak için hücrelerin daha ince yapılması büyük önem kazanmaktadır. Bu şekilde, güneş hücresinin çıkış parametreleri uzun süre kararlı kalabilir. Ayrıca, hücrelerde oluşan bozulmanın zaman içerisinde tersinir olarak iyileştiğine dair literatürde çalışmalar görülmemiştir. Fakat, ısıl işlem uygulanarak güneş hücresinin çıkış parametrelerinde radyasyona uğradığı duruma göre iyileşmelerin olduğu gözlenmiştir [7,8].

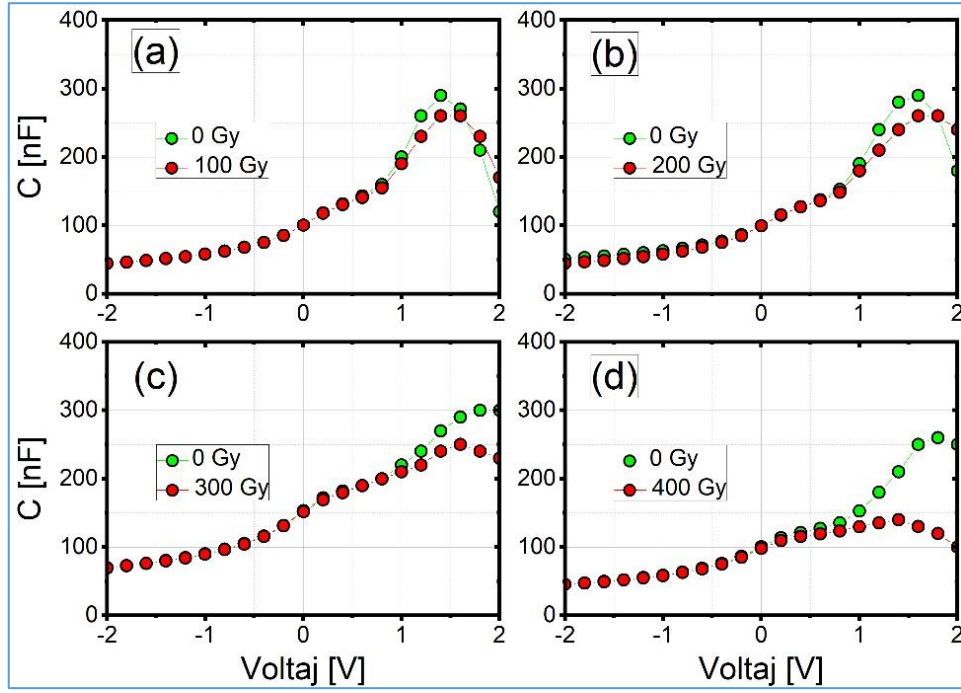


**Şekil 6.** Her bir güneş hücresinin normalize edilmiş EQE spektrumları (Normalized EQE spectra of each solar cell)

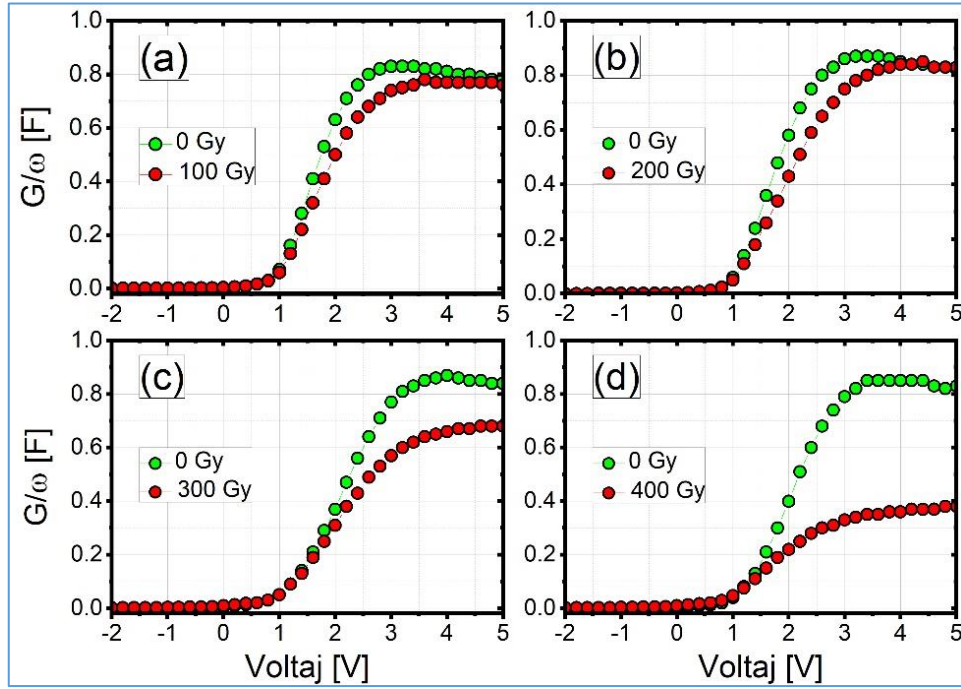
$\gamma$ -radyasyonu öncesi ve sonrası hücrelerin karanlık koşullarda ve oda sıcaklığında alınan C-V ve  $G/\omega$ -V karakteristikleri Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Ölçümler 100 kHz AC sinyal kullanılarak alınmıştır. Radyasyona maruz kalmamış tüm hücreler için kapasitanslar, tükenme bölgesinin genişliği azaldıkça ve iletkenlikte ihmal edilebilir bir değişiklikte birlikte ters bayastan (bias) ileri bayasa doğru gidildikçe artmaktadır. İletkenliğin hızla arttığı bayas voltajı başlangıcında hücrelerin kapasitansı da hızla artmaktadır. Bunun nedeni, iletkenliğin hızla arttığı bayas voltajında, azınlık yük taşıyıcısı enjeksiyonunun bir tepe değerine kadar depolama (difüzyon) kapasitansı nedeniyle hücrelerin kapasitansı hızla artmakta, daha sonra

çok yüksek taşıyıcı enjeksiyon rejiminde ise kapasitans azalırken iletkenlikte de küçük bir azalma gerçekleşir. Hücreler  $\gamma$ -ışınlarına maruz kaldıktan sonra, ters bayas durumunda kapasitans ve iletkenlikte değişiklik gözlenmez iken, ileri bayas durumunda ise hem kapasitans hem de iletkenlik ışınlanmamış durumlarına göre daha düşük değere sahiptir. Azınlık yük taşıyıcısı enjeksiyon veriminin radyasyon tarafından oluşturulan kusurlardan dolayı yeniden birleşmesi yoluyla azalması hem difüzyon kapasitansının hem de iletkenliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, doz miktarı arttıkça hücrelerin  $J_{SC}$  ve  $\eta$  değerlerindeki azalma ile de uyumlu görünmektedir.





Şekil 7. Radyasyon öncesi ve sonrası hücrelerin kapasitans-voltaj karakteristiği (Pre- and post-radiation capacitance-voltage characteristics of the cells)



Şekil 8. Radyasyon öncesi ve sonrası hücrelerin iletkenlik-voltaj karakteristiği (Pre- and post-radiation conductivity-voltage characteristics of the cells)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

c-Si güneş hücrelerinin performansı ardışık düşük doz gamma ışınlarına maruz bırakılarak incelenmiştir. Hücrelerin elektriksel ve spektral özelliğinin doz miktarına bağlı olarak kötüleştiği görülmüştür. Çıkış parametreleri olan FF ve  $V_{oc}$  yaklaşık sabit kalırken,  $J_{sc}$  ve  $\eta$  ise doza bağlı olarak azalmaktadır.  $J_{sc}$ 'ye bağlı olarak  $\eta$  değerindeki azalma, azınlık yük taşıyıcılarının yarı

ömürlerindeki veya difüzyon uzunluğundaki azalma ile ilişkilidir. EQE ölçümlerinde uzun dalga boyunda gerçekleşen bozulma, radyasyonun hücrenin taban katmanını etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, uygulanan ardışık düşük miktarı ile  $J_{sc}$  değerindeki azalma arasında lineer bir ilişki olmadığı görülmüştür. Bu, hücrelerin daha ince yapılması durumunda radyasyon kaynaklı bozulmanın azalacağını ve hücrelerin kullanım sürelerinin artacağına dikkat çekmektedir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazar, güneş hücresi karakterizasyonları için Orta Doğu Teknik Üniversitesi Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulamaları Merkezi'ne (ODTÜ-GÜNAM) ve ışınlama tesisi için Akdeniz Üniversitesi Nükleer Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne (NUBA) teşekkür eder. / The author acknowledges the Middle East Technical University Solar Energy Research and Applications Center (ODTÜ-GÜNAM) for solar cell characterizations and the Akdeniz University Nuclear Research and Application Center (NUBA) for the irradiation facility.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Ismail KABACELİK:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Hamache, N. Sengouga, A. Meftah, M. Henini, Modeling the effect of 1MeV electron irradiation on the performance of n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup> silicon space solar cells, Radiat. Phys. Chem. 123 (2016) 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.02.025>
- [2] D. Nikolić, A. Vasić-Milovanović, M. Obrenović, E. Dolićanin, Effects of successive gamma and neutron irradiation on solar cells, J. Optoelectron. Adv. Mater. 17 (2015) 351–356.
- [3] C. Pellegrino, A. Gagliardi, C.G. Zimmermann, Difference in space-charge

recombination of proton and electron irradiated GaAs solar cells, Prog. Photovoltaics Res. Appl. 27 (2019) 379–390. <https://doi.org/10.1002/pip.3100>.

[4] S.-S. Yang, X. Gao, Y.-F. Wang, Z.-Z. Feng, Displacement Damage Characterization of Electron Radiation in Triple-Junction GaAs Solar Cells, J. Spacecr. Rockets. 48 (2011) 23–26. <https://doi.org/10.2514/1.48873>.

[5] Y. Zhang, C. Qi, T. Wang, G. Ma, H.S. Tsai, C. Liu, J. Zhou, Y. Wei, H. Li, L. Xiao, Y. Ma, D. Wang, C. Tang, J. Li, Z. Wu, M. Huo, Electron Irradiation Effects and Defects Analysis of the Inverted Metamorphic Four-Junction Solar Cells, IEEE J. Photovoltaics. 10 (2020) 1712–1720. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3025442>.

[6] A. Vasić, P. Osmokrović, M. Vujisić, Č. Dolićanin, K. Stanković, Possibilities of improvement of silicon solar cell characteristics by lowering noise, J. Optoelectron. Adv. Mater. 10 (2008) 2800–2804.

[7] K. Ali, S.A. Khan, M.Z. MatJafri, Improved radiation resistant properties of electron irradiated c-Si solar cells, Radiat. Phys. Chem. 125 (2016) 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.04.015>

[8] D. Nikolić, K. Stanković, L. Timotijević, Z. Rajović, M. Vujisić, Comparative study of gamma radiation effects on solar cells, photodiodes, and phototransistors, Int. J. Photoenergy. 2013 (2013) 843174. <https://doi.org/10.1155/2013/843174>.

[9] P.S. Bhat, A. Rao, S. Krishnan, G. Sanjeev, S.E. Puthanveetil, A study on the variation of c-Si solar cell parameters under 8 MeV electron irradiation, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 120 (2014) 191–196. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.043>.

[10] G. Yan, J. ling Wang, J. Liu, Y. yu Liu, R. Wu, R. Wang, Electroluminescence analysis of VOC degradation of individual subcell in GaInP/GaAs/Ge space solar cells irradiated by 1.0 MeV electrons, J. Lumin. 219 (2020) 116905. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116905>.

[11] M.R. Zdravković, A.I. Vasić, R.L. Radosavljević, M.L. Vujisić, P. V. Osmokrović, Influence of radiation on the properties of solar cells, Nucl. Technol. Radiat. Prot. 26 (2011) 158–163. <https://doi.org/10.2298/NTRP1102158Z>.

- [12] T. Hisamatsu, O. Kawasaki, S. Matsuda, T. Nakao, Y. Wakow, Radiation degradation of large fluence irradiated space silicon solar cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 50 (1998) 331–338. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00163-3).
- [13] X.B. Shen, A. Aierken, M. Heini, J.H. Mo, Q.Q. Lei, X.F. Zhao, M. Sailai, Y. Xu, M. Tan, Y.Y. Wu, S.L. Lu, Y.D. Li, Q. Guo, Degradation analysis of 1 MeV electron and 3 MeV proton irradiated InGaAs single junction solar cell, *AIP Adv.* 9 (2019) 075205. <https://doi.org/10.1063/1.5094472>.
- [14] C. Weiss, S. Park, J. Lefèvre, B. Boizot, C. Mohr, O. Cavani, S. Picard, R. Kurstjens, T. Niewelt, S. Janz, Electron and proton irradiation effect on the minority carrier lifetime in SiC passivated p-doped Ge wafers for space photovoltaics, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 209 (2020) 110430. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110430>.
- [15] J.R. Hauser, S.E. Kerns, Circuit related issues due to radiation in hostile environments, *J. Electron. Mater.* 19 (1990) 671–688. <https://doi.org/10.1007/BF02655236>.
- [16] F. Es, M. Kulakci, R. Turan, An Alternative Metal-Assisted Etching Route for Texturing Silicon Wafers for Solar Cell Applications, *IEEE J. Photovoltaics.* 6 (2016) 440–446. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2520207>.
- [17] M. Kulakci, F. Es, B. Ozdemir, H.E. Unalan, R. Turan, Application of si nanowires fabricated by metal-assisted etching to crystalline si solar cells, *IEEE J. Photovoltaics.* 3 (2013) 548–553. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2228300>.
- [18] Y. Zhang, H. Zhang, B. Yu, W. Wang, R. Hou, B. Chen, Q. Xu, Y. Zhou, G. Qin, Gamma-ray irradiation hardness of arrayed silicon microhole-based radial p-n junction solar cells, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 47 (2014) 065101. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/6/065101>.
- [19] D.M. Tobnaghi, A. Rahnamaei, M. Vajdi, Experimental Study of Gamma Radiation Effects on the Electrical Characteristics of Silicon Solar Cells, *Int. J. Electrochem. Sci.* 9 (2014) 2824–2831.
- [20] A.M. Saad, Effect of cobalt 60 and 1 MeV electron irradiation on silicon photodiodes/solar cells., *Can. J. Phys.* 80 (2002) 1591–1599. <https://doi.org/10.1139/p02-037>.
- [21] V. Aubry, F. Meyer, Schottky diodes with high series resistance: Limitations of forward I-V methods, *J. Appl. Phys.* 76 (1994) 7973–7984. <https://doi.org/10.1063/1.357909>.
- [22] M. Ashry, S. Fares, Diffusion length analysis and measurement in the base region of photodiodes, *J. Phys. Chem. Solids.* 64 (2003) 2429–2431. [https://doi.org/10.1016/S0022-3697\(03\)00285-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3697(03)00285-3).
- [23] J. Kuendig, M. Goetz, A. Shah, L. Gerlach, E. Fernandez, Thin film silicon solar cells for space applications: Study of proton irradiation and thermal annealing effects on the characteristics of solar cells and individual layers, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 79 (2003) 425–438. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00486-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00486-5).
- [24] D.M. Tobnaghi, R. Madatov, Recovery in the electrical parameters of the aging silicon solar cells by annealing, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 16 (2014) 764–768.
- [25] Y. Morita, T. Ohshima, I. Nashiyama, Y. Yamamoto, O. Kawasaki, S. Matsuda, Anomalous degradation in silicon solar cells subjected to high-fluence proton and electron irradiations, *J. Appl. Phys.* 81 (1997) 6491–6493. <https://doi.org/10.1063/1.364437>.
- [26] A. Vasić, M. Vujisić, B. Lončar, P. Osmokrović, Aging of solar cells under working conditions, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 9 (2007) 1843–1846.
- [27] D. Nikolic, A. Vasic-Milovanovic, Comparative study of gamma and neutron irradiation effects on the silicon solar cells parameters, *FME Trans.* 44 (2016) 99–105. <https://doi.org/10.5937/fmet1601099N>.