

## Uydu Platformlarında Kullanılan Çok Eklemlı Güneş Hücrelerine Yönelik Yansıma Önleyici Özellikli Mikro Lens Dizilerinin Geliştirilmesi

<sup>1</sup>Ömer Faruk Keser, <sup>2</sup>Adem Yenisoy ve <sup>\*3</sup>Buğrahan İdare

<sup>1</sup>Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye  
ve TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Türkiye

<sup>2</sup>TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Optik Sistemler Grubu, Türkiye

<sup>\*3</sup>Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

### Özet

Üçüncü nesil çok eklemlı güneş hücreleri en yüksek performansa sahip güneş hücreleri olarak bilinmektedir. Güneş hücrelerinin performanslarının artırılmasında kullanılan çeşitli yöntemlerden birisi de Mikro Lens Dizileri-MLA ile yansıma önleyici yüzey kaplamalarıdır. Uydu platformlarında gerekli enerjinin yüksek verimde elde edilmesi ve ilgili kaynağın düşük kütlede olması beklenmektedir. Uzay ortamı radyasyon, atomik oksijen ve ısıl döngü gibi birbirinden farklı pek çok etkeni içermektedir. Yapılan araştırmalar güneş hücresinin performanslarının geliştirilmesinde kullanılan ışığı soğurma etkinliğinin artırıldığı MLA kaplamalarda, hücre ısısının artmadığını ve bunların hücreye yok denecek kadar az ağırlık getirdiğini göstermektedir. Ancak güneş hücrelerinin MLA ile kaplanması üzerine yapılan az sayıdaki çalışmanın uzay uygulamalarına yönelik olmadığı da tespit edilmiştir.

Bu çalışmada uydu platformlarına uygun MLA'ların geliştirilmesi süreci yönetsel olarak incelenmektedir. Bu bağlamda tasarlanacak uydu platformları için çok eklemlı güneş hücrelerinin MLA ile kaplamasına dayalı olarak geliştirilen bir yöntem sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Çok eklemlı güneş hücreleri, mikro lens dizileri, uzay kalifiye, MLA

## Development of Anti-Reflective Micro Lens Arrays for Multi Junction Solar Cells Used on Satellite Platforms

### Abstract

The third generation multi-junction solar cells are known as the ones with highest performance. One of the methods to increase the performance of the solar cells is anti-reflective surface coatings with the Micro Lens Array-MLA. It's expected that satellite platforms has high power efficiency and low mass. The space environment has many effects like atomic oxygen, radiation and thermal cycles. Researches for increasing the solar cells performance shows that MLA coated solar cell has increased light absorption performance and less cell heating with very low additional mass. However, it is established that few studies on MLA coatings of solar cells are not applicable on space platforms.

In this study, the process of development of MLA which is convenient to space platforms is investigated in a methodological way. In this context, a method which is developed based on MLA coatings of multi-junction solar cells for satellite platforms is presented.

**Key Words:** Multi-junction solar cells, micro lens arrays, space qualified, MLA

## 1. Giriş

Güneş hücreleri güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan güneş hücrelerinin tarihi 1839 yılına dayanmaktadır. İlk olarak Si hücreler uzay teknolojisinde 1958 yılında *Vanguard I* isimli uzay aracında kullanılmıştır [1]. Daha sonraları GaAs hücreler kullanılmıştır. Günümüzde ise yüksek radyasyon direnci ve radyasyon sonrası güç çıkışının iyi oluşundan dolayı çok eklemlili GaInP/GaAs/Ge hücreler kullanılmaktadır [1,2]. Güneş hücreleri yapıldığı materyale göre çeşitlenmekte ve hücrelerin performansları buna göre değişmektedir. En yüksek performans elde edilen güneş hücreleri çok eklemlili güneş hücreleridir. Güneş hücrelerinin performansları üretildikleri materyaller yanında çeşitli yöntemler ile geliştirilmektedir.

Güneş ışınımı güneş hücresinde birçok yolla yansımaya uğrayarak kaybolmaktadır. Yansıma ile kaybolan bu ışınım güneş hücresinin performansını düşürmektedir. Yüzeiden yansımaları engellemek için yüzeide düz plaka şeklinde yansıma önleyici kaplamalar yapılmaktadır. Bu kaplama sonucu yansıma kayıplarının %1'in altına indiği belirtilmektedir [3]. Düz plaka yansıma önleyici kaplama ile hücrenin performansı artırılmaktadır. Ancak ilgili literatürde yansıma önleyici kaplamanın düz olmasından ziyade bir mikro lens yüzey profiline sahip olması performansı daha da artırdığı ifade edilmektedir [3,4,5,6]. Nam ve arkadaşları yaptıkları çalışmada MLA ile kaplanan güneş hücresinin performansının düz plaka şeklindeki kaplamanın performansına göre %18,5 oranında arttığını belirtmişlerdir [4].

Mikro lensler 1 mm'den küçük genellikle 10 µm civarında çapa sahip olan küçük lenslerdir [7]. MLA kaplamanın bu küçüklüğü güneş hücresinin kütesini ihmal edilebilecek seviyede artırmaktadır [8]. Hücrede meydana gelen yüksek sıcaklıklar, hücrelerin etkinliğini azaltmakta ve bozulmayı hızlandırmaktadır [9]. MLA kaplama güneş ışığını yüksek seviyelerde yoğunlaştırma yapmasından ziyade güneş hücresinin ışığı soğurma etkinliğini artırmasından dolayı hücre ısısını da artırmamaktadır. Hücrenin ısısının artmaması ise soğutma sistemine ihtiyaç duyulmaması anlamına gelmektedir.

Uydu platformlarında kullanılacak olan her sistemin hafif olması beklenmektedir [10]. Güneş hücrelerinden verimlerinin yüksek ve güç çıkışının istikrarlı olması da ayrıca beklenmektedir [2]. Aksi takdirde hücrelerdeki verim kaybı, güç çıkışının istikrarsızlığı ve güneş hücresinin arızası uydunun görevini tamamlayamamasına sebebiyet verecektir [11]. Uyduların ömrünün 3-15 yıl arasında olduğu düşünülürse güneş hücrelerinin bu süreçte yüksek verimli olması ve istikrarlı güç çıkışını sağlaması için uzay ortamına dayanıklı olmaları gerekmektedir [12].

Uzay ortamı birbirinden farklı etkenlerden oluşmaktadır [12]. Uzay ortamındaki optik kaplamaların maruz kaldığı bu etkilerin çalışmamıza konu olan MLA'lar üzerinde de etkili

olması beklenmektedir. Bu etkiler özetle ifade edilecek olursa;

Yeryüzünden uzaklaştıkça vakum seviyesi artmaktadır. Tipik bir uydunun Alçak Dünya Yörüngesi/Low Earth Orbit-LEO'da bulunduğu düşünülürse  $10^{-7}$  torr vakuma maruz kalmaktadır. Daha uzak yörüngelerde ise vakum daha da artmaktadır. Bu vakum, malzeme içerisindeki uçucu kimyasalların yüzeye çıkmasına sebep olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar da yüzeye çıkan kimyasalların ince kirletici tabaka olarak güneş hücreleri ve optik parçalar gibi hassas yüzeyler üzerine birikerek üzerine düşen ışığın geçişine yönelik olumsuz bir etki oluşturduğu belirtilmektedir [12].

Uzay şartlarındaki etkenlerden birisi de yörüngedeki uyduların hareketlerine bağlı olarak sıcaklığın sürekli değişimidir. LEO yörüngede bulunan bir uydu için termal döngü  $-50^{\circ}\text{C}$  ile  $125^{\circ}\text{C}$  arasında değişmektedir. Ayrıca bu döngü yıl içerisinde ortalama olarak 5000 kere gerçekleşmektedir. Vakum altında gerçekleşen bu termal döngünün yüzeylerde çatlak oluşturabildiği ve yüzey şeklinin değişmesine sebep olabildiği belirtilmektedir [12].

Uzay ortamındaki  $1367 \text{ W/m}^2$ 'lik enerjiye sahip olan güneş ışınımı AM0 olarak tanımlanmaktadır. Dünyadaki güneş ışınımı için bu değer genel olarak  $1000 \text{ W/m}^2$ 'lik enerji seviyesine karşılık gelecek şekilde AM1,5 olarak tanımlanmıştır. AM0 aynı zamanda içerisinde yüksek enerjili Ultraviyole-UV dalgalar içermektedir. Bu UV dalgalar optik yüzeylerde renk öbeklerinin oluşmasına ya da yüzeyde biriken kirletici tabakadan dolayı kararmaya neden olmaktadır [12].

Uzay ortamında bulunan bir diğer etken olan parçacık radyasyonu ise yüksek enerjili protonlar, elektronlar, ağır iyonlar ve nötronlar gibi parçacıklardan oluşmaktadır. Parçacık radyasyonunu oluşturan parçacıklar diğer yüzeylere etkidikleri gibi uydunun dışında bulunan optik yüzeylere de etkimektedirler. Farklı enerjilerde ve farklı akıcılıklarda olan protonlar optik malzemeler üzerinde birikebilmekte ya da bir atom çekirdeği ile çarpışması sonucu malzemenin yapısını bozabilmektedir. Bozunma sonucu optik malzemenin geçirme ve yansıtma özellikleri değişebilmektedir. Aynı enerjilerde elektronlar da aynı bozunmaya sebep olabilmektedirler. Güneş hücrelerinin bozunma değerlerini test etmek için genellikle  $1 \text{ MeV}$  enerjili ve  $2,5 \times 10^{14}$ ,  $5 \times 10^{14}$ ,  $1 \times 10^{15} \text{ e/cm}^2$  akıcılıklarda protonlar kullanılması önerilmektedir [13].

Atomik oksijen-ATOX ise LEO yörüngede ve  $700 \text{ km}$  altındaki mesafelerde tanımlanan uzay ortamındaki etken bileşenlerden birisidir. Atomik oksijenin ana etkileri, özellikle oksijen ile tepkimeye giren elementleri içeren yüzeylerdeki reaktif saçılma ve yüzey erozyonu şeklinde ortaya çıkar. Atomik oksijenin ana etkilerinden biri olan erozyonun sebebi uzay aracının yörüngedeki hızı ile oksijen atomlarının arasındaki yaklaşık  $8 \text{ km/s}$  hızdan kaynaklanmaktadır [12].

Yapılan literatür incelemesinde MLA'nın güneş hücreleri üzerinde kullanılması ile ilgili araştırmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Güneş hücrelerinin performansını geliştiren MLA'ların tasarımı ve üretimi için birçok yol izlenebilmektedir [3,4,5,6]. Bu çalışma kapsamında yürütülen araştırmalarda belirtilen uzay ortamı etkenlerine dayanıklı yani uydu platformlarında kullanılabilecek MLA'ların nasıl üretileceğine yönelik bilgi içeren özel bir literatür bulgusuna da

rastlanılmamıştır. Bu durum yürütülen bu çalışmanın temel problemini oluşturmaktadır.

Bu bağlamda bu çalışmanın amacı, uydu platformlarında kullanılan çok eklemli güneş hücrelerine yönelik yansıma önleyici özellikli MLA'ların üretilebilmesi için uygun bir yöntem geliştirmek ve sunmaktır.

## 2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada yapılacak bir araştırmada kullanılmak üzere uydu platformlarına uygun MLA'ların tasarımına yönelik bir yöntemin geliştirilebilirliği literatüre dayalı olarak süreçler bağlamında tartışılmaktadır. Bu kapsamda yapılan literatür incelemesinde;

- Güneş hücreleri,
- Mikro Lens Diziler/Micro Lens Arrays-MLA,
- Uydu platformları ve uzay şartları
- MLA kaplı güneş hücrelerinin test süreçleri
- Uzay ve uydu platformlarına uygunluk testleri

hakkında kapsamlı araştırmalar yapılarak değerlendirmelerde bulunulmuştur. Yapılan değerlendirmeler sonucunda literatüre dayalı olarak geliştirilen uzay kalifiye MLA'ların tasarım süreci, MLA için malzeme seçimi, MLA üretim yöntemi, MLA ile kaplı güneş hücrelerinin testleri ve uzay kalifikasyon testlerinin yapısal özellikleri uzman görüşleri ile birlikte uygulamaya yönelik olarak sunulmaktadır.

## 3. Bulgular ve Sonuç

### 3.1. MLA tasarımı

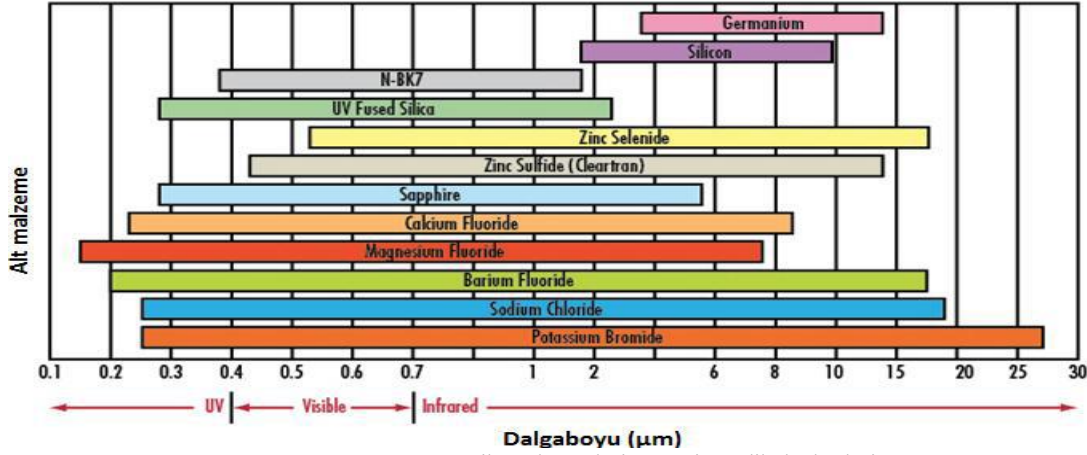
MLA tasarımına, malzeme seçimi ve yüzey profilini belirleyerek başlanır. Malzeme seçiminde uzay ortamı etkenlerine karşı dayanacak malzemeler kullanılmalıdır [1]. Yüzey profilinin belirlenmesinde güneş hücreleri üzerindeki kontakların gölgeleme etkisi ve güneş hücresi yüzeyine geniş giriş açılarında gelen ışığın yansımadan hücreye girebilmesi göz önünde bulundurulmalıdır [5]. Bu kapsamda ilgili süreçlere yönelik detaylı bilgiler aşağıda sunulmuştur.

#### 3.1.1. MLA malzemesinin seçimi

MLA'nın üzerine düşen ışığın dalga boylarına göre geçirme ve yansıtma miktarları, üretildiği optik malzemeye göre değişmektedir [14]. Bu malzeme GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin çalışma dalga boyu aralığı ile uyumlu olarak seçilmelidir. Bu sayede hücrenin elektrik enerjisine dönüştüremeyeceği dalga boylarının hücre üzerine düşmesi engellenir. Dolayısıyla hücrenin bozulması, ısınması gibi etkenler engellenmiş olur [1]. Bununla beraber malzemenin uzay ortamına dayanıklı olması göz önünde bulundurulmalıdır.

Optik verimliliği ve ultraviyole ışığa karşı filtre sağlamasından dolayı uydu platformlarında kullanılan güneş hücrelerinde standart haline gelmiş çift katmanlı kaplama olarak  $TiO_2/Al_2O_3$  tercih edilmektedir [1]. Bu çalışmada tasarım ve üretime yönelik yönetsel bir bakış açısı oluşturmak adına MLA malzemesi olarak aynı malzemeler seçilmiştir. Belirtilen kaplama malzemeleri olan  $TiO_2$  ve  $Al_2O_3$ 'ün kırılma katsayıları literatürde sırasıyla 2.3, 1.7 olarak

verilmektedir [15].



Şekil 1. Optik malzemelerin geçirgenlik bölgeleri[14]

### 3.1.2. MLA yüzey profili oluşturulması

MLA malzemesinin seçilmesinden sonra MLA'nın yüzey profili, kalınlığı gibi özellikler tasarlanmaktadır. Yüzey profili silindirik, dairesel ve altıgen gibi çeşitli geometrik şekillerde olabilmektedir. Bu tasarımda Zemax gibi kaplama ve lens programları kullanılarak lens yüzeyine düşen ışığın geçen, yansıyan miktarları ve yüzeyde oluşturduğu görüntü belirlenmektedir [16]. Güneş hücrelerinin üzerindeki kontaklar, üzerine düşen ışığı yansıtmaktadır [4]. Yüzeyde oluşan görüntünün bu kontaklar üzerinde oluşmamasına dikkat edilmelidir. Programda tasarlanan MLA profillerinden yüksek verimli olan MLA yüzey profili seçilmelidir. Seçilen yüzey profiline göre üretim sürecine geçilmelidir.

### 3.2. MLA üretim yöntemi

MLA'nın üretimi mikro elmas tekerlek ve fotolitografi teknikleri gibi çeşitli yöntemler ile yapılmaktadır [3,4,5,6]. Bu yöntemler kaplanan yüzeye, kaplanacak malzemeye ve oluşturulacak yüzey profiline göre değişmektedir. Fotolitografi teknikleri izotropik aşındırma, yeniden eritme-reflow, çok katmanlı, hibrit ve lazer ile yazma gibi farklı tekniklerdir ve MLA üretimine olanak sağlamaktadır [17]. Bu çalışmada kaplamaya dayalı üretim yapılacağından dolayı fotolitografi teknikleri ile üretim tercih edilmektedir [5]. Fotolitografi üretim yöntemleri ile hücre yüzeyine yapılacak kaplamalar, yapıştırıcıya ihtiyaç duyulmadan buharlaştırılarak yapılabilmektedir. Güneş hücresinin üzerine yapılacak kaplamalar Elektron Demeti Buharlaştırıcısı ile  $10^{-6}$  torr vakumda gerçekleştirilmelidir.

MLA üretimindeki en önemli faktörlerden bir tanesi dolgu faktörü/fill factor-FF'dir. FF, kaplanan yüzey alanının MLA alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Bir MLA'nın dolgu faktörünün %100'e yakın olması istenmektedir [17]. Ayrıca güneş hücresinin yüzeyine kaplama yapılacağından dolayı yüksek sıcaklıklara çıkılmadan yüzey şekillendirilmesi yapılmalıdır. Aksi takdirde hücre yapısı bozulmaktadır [9].

Bu çalışmada MLA kaplaması için fotolitografi tekniklerinden birisi olan izotropik aşındırma

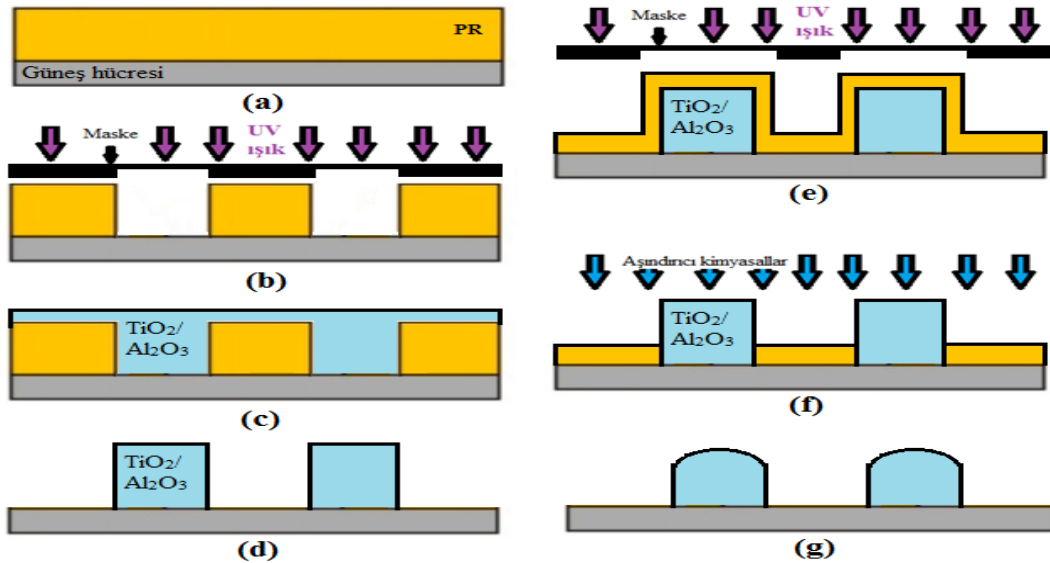
yöntemi tercih edilmektedir [17]. Bunun en önemli nedenleri nispeten ucuz olması, hücreyi yüksek sıcaklıklara maruz bırakmadan istenilen yüzey profilinin sağlanabilmesi, mükemmel küresel profili ve kaplama yoğunluğu elde edilmesi yanında lens performansının yüksek olması şeklinde sıralanabilir.

### 3.2.1. İzotropik aşındırma tekniği ile MLA üretimi

İzotropik aşındırma adından da anlaşılacağı gibi eş yönlü aşındırma demektir. Aşındırma ile üretim mantığı, aşındırılacak yüzeye açılan bir delikten veya küp bir yüzeyi izotropik aşındırma yaparak tabakanın her yönünde eşit miktarda aşındırma yapılabildiği gerçeğine dayanmaktadır [17]. Deliklerin veya kürelerin bir dizisi kullanılarak MLA oluşturulmaktadır. Hassas aşındırma işleminin zamanlaması ve sürecin köşeleri aşındırana kadar devamlılığın sağlanması ile dolgu faktörü % 100 olan MLA'lar üretilebilmektedir [17].

Öncelikle izotropik aşındırma yönteminde kullanılmak üzere tasarlanan MLA yüzey profilinin ölçülerine göre Maske Yazıcısı ile maske üretilmelidir. Daha sonra güneş hücrelerinin yüzeyi üretime göre fotorezist-PR ile kaplanmalıdır.

Şekil 2'de izotropik aşındırma tekniği ile MLA üretiminin şeması verilmektedir. Güneş hücresinin üzerine yapılacak kaplamanın kaliteli ve doğru olması, bununla birlikte sonradan oluşabilecek safsızlıkların engellenmesini sağlamak için güneş hücresinin yüzeyi temizlenmelidir. Güneş hücresinin üzerindeki yağları ve organikleri arındırmak için aseton, metanol, etanol ve deiyonize su kullanılmalıdır. Bu temizlikten sonra azot ile kurutma yapılarak PR kaplama için ideal bir alttaş-substrade elde edilir. Temizlenmiş olan alttaş üzerine Şekil 2.a'da görüldüğü gibi PR ile yatay eksende döndürülerek kaplanmalıdır. Döndürerek kaplama işleminde istenilen PR kalınlığı, döndürülme devir sayısı değiştirilerek ayarlanmalıdır [14].



Şekil 2. İzotropik aşındırma tekniği ile MLA üretimi

Kaplandıktan sonra PR'nin içerisindeki çözücü kısmın buharlaşmasını sağlamak için ön ısıtma

yapılmalıdır. Alttaş ısıtma tablasında malzemeye uygun ısıtma işlemi tabii tutulmalıdır. Daha sonra maske deseninin hücre yüzeyine aktarılması için pozlama işlemi gerçekleştirilmelidir. Maske üzerindeki desen Maske Hizalayıcı sistemi ile pozlama yapılarak PR üzerine aktarılır. Pozlama işlemi genel olarak UV kaynağı ile yapılmaktadır. Şekil 2.b'de gösterildiği gibi pozlama işlemi sonrası PR ile kaplı olan alttaş yüzeyi çözücü solüsyon ile banyo edilerek geliştirilmektedir. Bu işlem ile PR'in pozitif/negatif olmasına göre pozlamaya maruz kalan kısımları kaldırılır/sertleştirilir ve maske deseni alttaş üzerine aktarılmış olur. Desenin üzerine Elektron Demeti Buharlaştırıcısı ile Şekil 2.c'deki gibi  $TiO_2/Al_2O_3$  ile kaplanır. Daha sonra PR kaldırma işlemi ile Şekil 2.d'deki gibi kare şeklindeki kaplama elde edilmektedir. Devamında MLA'nın yüzey profilinin elde edilmesi ve diğer yüzeylerin zarar görmemesi için tekrar PR ile kaplanmalıdır. Bu işlemden sonra Şekil 2.e'deki gibi daha geniş bir maske ile pozlanarak, aşındırılacak yüzeylerden PR'nin kaldırılması sağlanmalıdır. Böylelikle MLA'nın yüzey profili izotropik olarak aşındırılarak MLA oluşturulacak yüzeyler elde edilecektir. Şekil 2.f'de  $TiO_2/Al_2O_3$  kaplama üzerindeki kimyasallar ile yapılan izotropik aşındırma görülmektedir. Aşındırma sonrası PR'nin tamamen kaldırılması ile Şekil 2.g'de görülen güneş hücresi üzerindeki kaplamanın MLA yüzey profiline sahip olması sağlanmalıdır. Tüm işlemler sonucunda bu çalışma için seçilen  $TiO_2/Al_2O_3$  malzemesinden oluşan yansımaya önleyicili MLA ile kaplı güneş hücresi elde edilecektir.

Tasarım ve üretim sürecinin ardından MLA kaplı güneş hücresine yönelik test süreçleri yürütülmelidir.

### 3.3 Test Süreçleri

Güneş hücrelerinin test edilmesi farklı şekillerde ve farklı parametrelere göre yapılabilmektedir. Bu çalışmada MLA kaplamasının güneş hücresinin performansına etkileri de göz önünde bulundurulmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada önerilen yöntemle üretilecek MLA kaplı güneş hücresi ile aynı yansımaya önleyici malzemelerle düz plaka şeklinde kaplanan uzay kalifiye güneş hücreleri karşılaştırılmalıdır. Bu sayede MLA deseninin güneş hücresinin performansına etkileri daha kapsamlı incelenebilecektir.

Bir güneş hücresinin uzay kalifikasyon testleri ise güneş hücresinin uzay ortamında maruz kalacağı radyasyon, vakum, termal döngü ve atomik oksijen gibi etkenler laboratuvar ortamlarında oluşturularak gerçekleştirileceği gibi ülkelerin alt yapı ve teknolojik imkanlarına göre uydular üzerinde doğrudan uzaya gönderilerek de yapılabilmektedir. Güneş hücrelerinin uzay kalifiye olup olmadığı bu etkenlere maruz kaldıktan sonraki davranışlarına göre belirlenmektedir. Bu testler Amerika Uzay ve Havacılık Enstitüsü-AIAA'nın belirlediği AIAA S-111A-2014 standartlara göre yapılabilmekte ve değerlendirilebilmektedir [13]. Ayrıca uydunun çalışacağı yörüngeye göre uzay ortamı etkenleri benzetilip, MLA kaplı güneş hücresi ile uzay kalifiye güneş hücresinin bu etkenler altındaki davranışları karşılaştırılarak da değerlendirilebilmektedir.

Bu çalışma içerisinde uzay kalifiye güneş hücreleri ile aynı etkenlere maruz kaldıktan sonraki performans değişimleri karşılaştırılarak değerlendirme yapılmaktadır. Her test için farklı hücre kullanılacağından yeterli sayıda hücre üretimi yapılmalıdır.

Bir güneş hücresinin performansı farklı parametrelerle tanımlanmaktadır. Bu parametreler; kısa devre akımı- $I_{SC}$ , açık devre gerilimi- $V_{OC}$ , maksimum güç noktası- $P_{mpp}$ , güneş hücresi dolum faktörü- $FF_{GH}$  ve verim- $\eta$  olarak kabul edilmektedir.

$I_{SC}$ , güneş hücresinin aydınlatılarak bağlantı uçlarının kısa devre edilmesi ile ( $V=0$ ) oluşturulan akım değeridir. Aynı zamanda güneş hücresinin ulaşabileceği maksimum akım değeridir.

$V_{OC}$ , güneş hücresinin aydınlatılarak bağlantı uçları arasında herhangi bir devre tamamlayıcı elemanın bağlanmaması durumundaki ( $I=0$ ) gerilim değeridir. Bu değer iki uç arasındaki maksimum gerilim farklılığı değeridir.

$P_{mpp}$ , güneş hücresinin  $I$  ve  $V$  değerlerinin çarpımının en büyük değerini aldığı yani gücün en yüksek olduğu zamanki noktadır. Doğal olarak  $V_{OC}$  ve  $I_{SC}$  değerlerinde güneş hücresinden güç elde edilememektedir.

$FF_{GH}$ , güneş hücresi içindeki seri dirençlerin ölçümü ve  $I-V$  eğrisinin altındaki en büyük alandır. Güneş hücresinin dolum faktörünün yüksek olması hücrenin seri direncinin az olduğu, bundan dolayı mevcut akımın az bir kısmının ısı olarak kaybolacağı anlamına gelmektedir.  $FF_{GH}$  Denklem 1'de tanımlanmaktadır.

$$FF_{GH} = \frac{P_{mpp}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (1)$$

$\eta$ , güneş hücrelerinin performans değeri olarak tanımlanmaktadır.  $P_{max}$ 'ın, güneş hücresinin üzerine düşen ışının gücü  $P_{in}$ 'e oranıdır. Denklem 2'de  $A_{Gh}$ , güneş hücresinin alanı,  $P_{ışınım}$  ise gelen ışınım şiddetidir.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100 = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{A_{Gh} \cdot P_{ışınım}} \quad (2)$$

Güneş hücreleri üzerine düşen ışının ne kadarını elektrik enerjisine dönüştürebiliyorsa o kadar verimlidir.

Öncelikle her iki güneş hücresi de AM0 şartlarına sahip güneş simülatörü altında ölçümleri yapılarak performansları hesaplanmalıdır [12,13]. Bu ikisi arasındaki fark MLA kaplamasının güneş hücresi üzerindeki etkisini gösterecektir. Ayrıca bu performans değerleri her iki hücre içinde başlangıç değeri olarak kabul edilmektedir. Uzay kalifikasyonu için yapılması öngörülen testlerin başlıca olanları ise aşağıda belirtilmektedir.

Çalışmanın giriş bölümünde belirtilen radyasyona maruz bırakma testleri proton ve elektron tanecikleri kullanılarak yapılabilmektedir. Hücrenin davranışlarının incelenmesi açısından etkisi daha büyük olan proton radyasyon testi yapılması ön görülmektedir [12,13].  $I-V$  testleri yapılan hücreler, farklı enerji seviyelerinde ve farklı akıcılıklarda olan proton demetlerine maruz bırakılmalıdır. Ardından tekrar AM0 ortamında 28 °C'de tekrar  $I-V$  testleri yapılmaktadır [13]. Hücrelerin maruz bırakıldığı proton radyasyon değerleri Tablo 1'de verilmektedir. Her hücrenin kendi içerisinde  $I-V$  değerleri karşılaştırılıp hücredeki meydana gelen tahribatın düzeyi hakkında enerji seviyelerine ve akıcılıklarına göre değerlendirilmesi yapılmalıdır. Devamında MLA ile



kaplanan hücre ile uzay kalifiye hücrenin değerleri karşılaştırılıp tartışılmaktadır.

**Tablo 1.** Hücrelerin maruz kalacağı proton radyasyon değerleri[13]

Sıra	Enerji, MeV	Akıcılık, e/cm <sup>2</sup>		
1	1	5x10 <sup>10</sup>	5x10 <sup>11</sup>	1x10 <sup>12</sup>
2	1	2,5x10 <sup>14</sup>	5x10 <sup>14</sup>	1x10 <sup>15</sup>
3	3	1x10 <sup>11</sup>	1x10 <sup>12</sup>	1x10 <sup>13</sup>

ATOX testleri ise oksijen plazması oluşturularak gerçekleştirilmelidir [18]. Öncelikle MLA ile kaplı güneş hücreleri ile uzay kalifiye hücrelerin AM0 koşullarında 28 °C'de *I-V* testleri yapılmaktadır. Daha sonra hücreler Tablo 2'de belirtilen ATOX ortamına maruz bırakıldıktan sonra tekrar AM0 altında 28 °C'de *I-V* testleri gerçekleştirilmektedir. Sonuçlar öncelikle aynı tür hücreler içerisinde daha sonra MLA ile kaplı hücre ile uzay kalifiye hücreler arasında kıyaslanıp değerlendirilmektedir.

**Tablo 2.** Hücrelerin maruz kalacağı ATOX değerleri[18]

Sıra	ATOX miktarı (atom/cm <sup>2</sup> )	Ortalama ışın hızı (km/s)	Basınç (Torr)	Sıcaklık (°C)
1	1x10 <sup>20</sup>	7	10 <sup>-4</sup>	28
2	1x10 <sup>16</sup>	7	10 <sup>-4</sup>	28
3	1x10 <sup>12</sup>	7	10 <sup>-4</sup>	28

Güneş hücrelerinin yörüngedeki sürekli değişen sıcaklıklara maruz kalması sonucu performanslarındaki değişim de incelenerek test edilmelidir. Her aşamada olduğu gibi MLA ile kaplı güneş hücresi ile uzay kalifiye hücrelerin AM0 altında 28 °C'de *I-V* testleri yapılmalıdır. Daha sonra hücreler Tablo 3'de belirtilen termal döngü ve vakum değerlerine maruz bırakılmalıdır. Hücreler tüm termal döngüye maruz kaldıktan sonra test edilebildikleri gibi belli periyotlarla belirlenecek mola noktaları ilave edilerek de test edilebilmektedirler [13]. Bu çalışma da her 10 döngü sonrası hücrelere AM0 altında 28 °C'de *I-V* testleri yapılması öngörülmektedir. Toplamda 50 döngüye maruz kalan ve 6 adet *I-V* değerleri alınan hücrelerin sonuçları öncelikle aynı tür hücreler içerisinde daha sonra MLA ile kaplı hücre ile uzay kalifiye hücreler arasında kıyaslanıp değerlendirilmesi önerilmektedir.

**Tablo 3.** Termal döngü değerleri[12]

Termal Döngü(°C)	Basınç (Torr)
-50/125	10 <sup>-5</sup>

Uzay kalifikasyon testleri hem sayısal sıklık hem de çeşitlilik açısından artırılabilir. Ayrıca uydu fırlatılmadan önce alt sistemlerinin tamamen birleştirilerek test edildiği de düşünülürse oldukça fazla test geliştirilebilir. Ancak güneş hücresinin performans gelişimi baz alındığı için öncelikle bu çalışma kapsamındaki testler önerilmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda MLA ile kaplı güneş hücresi ile uzay kalifiye güneş hücresinin değerleri birbiri ile örtüşüyorsa üretim uzay kalifiye gerçekleşmiş denebilmektedir.

Tasarlanacak uzay platformlarına yönelik uzay kalifiye MLA üretimi için bu çalışma ile önerilen sistematığın gerektirdiği test ortamları tasarlanabilir olmakta birlikte, radyasyon testi ve termal döngü testleri gibi testler için köklü alt yapılar gerekmektedir. Bu bağlamda uzay kalifiye MLA üretimi için alan uzmanları ile yapılan görüşmelerde Bilkent Üniversitesi, TÜBİTAK Uzay

Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu gibi kurumların alt yapılarından yararlanabileceği belirtilmektedir. İlgili uzmanlar tarafından ayrıca Ülkemizdeki laboratuvarların test aralıkları dışında kalan testler için yurtdışı laboratuvar imkânlarından yararlanılabileceği belirtilmektedir.

## Kaynaklar

- [1]Iles, P.A. Evolution of space solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2001;68:1-13
- [2]Iles, P.A. Photovoltaic Conversion: Space Applications. *Encyclopedia of Energy*, 2004;5: 25-33
- [3]Xie, J., Wu, K., Cheng, J., Li, P., Zheng, J. The micro-optic photovoltaic behavior of solar cell along with microlens curved glass substrate. *Energy Conversion and Management* 2015;96:315-321
- [4]Nam, M., Kim, K., Lee, J., Lee, K.K., Yang, S.S. Concentrating microlens array mounted on an InGaP/GaAs/Ge solar cell for photovoltaic performance enhancement. *Solar Energy* 2013;91: 374–380
- [5]Tseng, J.K., Chen, Y.J., Pan, C.T., Wub, T.T., Chung, M.H. Application of optical film with micro-lens array on a solar concentrator. *Solar Energy* 2011;85:2167–2178
- [6]Chen, C.H., Juan, P.C., Liao, M.H., Tsai, J.L., Hwang, H.L. The effect of surface treatment on omni-directional efficiency of the silicon solar cells with micro-spherical texture/ITO stacks. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2011;95:2545–2548
- [7]ISO 14880-1:2016, Optics and photonics - Microlens arrays - Part 1: Vocabulary
- [8]Pritchard, J., Simon, K., Dowd C., Joshi, E. Solar power concentrators for space applications. *Pam Review: Energy Science & Technology*, 2016; 3:1-26
- [9]Jakhar, S., Soni, M.S., Gakkhar, N. Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016; 60: 41-46
- [10]Menteş, E. Kompozit 3U küp uyduların yapısal analiz ve tasarımları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015
- [11]Lisbona, E.F. Calibration, testing, and monitoring of space solar cells. *Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)*, 2013; Chapter IIA-2: 502-519
- [12]D. Wernham, "Optical Coatings in Space", *Proc.. SPIE.*, 8168, 2011
- [13]Qualification and Quality Requirements for Space Solar Panels, "Standard: Qualification and Quality Requirements for Space Solar Cells (AIAA S-111A-2014)", AIAA Standards
- [14]Soykuvvet, H. İki yönlü yanal etki algılayıcı optik sistem tasarımı ve bu sistemin operasyonel kullanımı ile ışın kaynaklarının konumlarının bulunması. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015
- [15]Kanda, H., Uzum, A., Harano, N., Yoshinaga, S., Ishikawa Y., Uraoka, Y. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> double layer anti-reflection coating film for crystalline silicon solar cells formed by spray pyrolysis. *Energy Science and Engineering*, 2016; 4: 269-276
- [16]Hayashi, N., Inoue, D., Matsumoto, M., Matsushita A., Higuchi, H., Aya, Y. et al. High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics with micro-solar cells directly attached to a lens array. *Optics Express*, 2015;23:A594-A603
- [17]Akatay, A.A. Beam steering using microlens arrays. Yüksek Lisans Tezi, Koç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006
- [18]De Rooij, A. Corrosion in Space. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, 2010;1-15