

**TEKNOFEST**  
**HAVACILIK, UZAY VE TEKNOLOJİ**  
**FESTİVALİ**

**ÇEVRE VE ENERJİ TEKNOLOJİLERİ YARIŞMASI**  
**PROJE DETAY RAPORU**



**PROJE ADI:** GÜNEŞ YAKITI ÜRETMEK İÇİN DÜŞÜK MALİYETLİ VE FOTOKATALİTİK ÖZELLİĞE SAHİP ELEKTROT ÜRETİMİ

**TAKIM ADI:** BMFC/CZ

**TAKIM ID:** T3-17950-161

**TAKIM SEVİYESİ:** Lise

**DANIŞMAN ADI:** Onur AKPINAR

## İçindekiler

### 1. Proje Özeti (Proje Tanımı)

Günümüzde kullanılan enerjinin büyük çoğunluğunu fosil yakıtlar oluşturmaktadır. Ancak fosil yakıtların tükenmek üzere olması ve çevreye verdiği zararlardan dolayı bilim insanları alternatif enerji kaynaklarını geliştirmeye yönelmişlerdir. Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yüksek potansiyeli olan enerji kaynaklarından biridir. Güneşten elde edilen yakıtlarda hidrojen mekanizması, OER (Oxygen Evolution Reaction) tarafından sınırlandırılmaktadır. Bu sebepten güneş yakıtlarını verimli olarak elde edebilmek için oksijen eldesi reaksiyonuna uygun katalizör sentezleyebilmek ve mekanizmasını anlayabilmek büyük önem taşımaktadır. Günümüzde kullanılan elektrot malzemelerinden iridyum ve platin gibi metallerin doğada az bulunması ve bunun sonucunda maliyetinin yüksek olması nedeniyle alternatifleri araştırılmaktadır.

Bu projede güneş yakıtı adı verilen ve birbirinin yarı reaksiyonu olan hidrojen ve oksijen çıkışı reaksiyonlarına uygun katalizörler elde edilmeye çalışılmıştır. Literatürde daha önce hiçbir araya getirilmemiş Ba, Mg, Co, Zn ve Ba, Mg, Fe, Cu metal tuzlarından sırasıyla BMCZ (Ba, Mg, Co, Zn) ve BMFC (Ba, Mg, Fe, Cu) perovskitleri sol-jel yöntemiyle sentezlenmiştir. Xenon lamba ışığında AM1.5G güneş spektrumunda ölçüm yapılarak sentezlenen perovskitlerin fotokatalitik etkiye sahip oldukları gözlemlenmiştir.

Zamana bağlı amperometri ölçümleri alınarak elektrotların kararlı oldukları; döngüsel voltametri ölçümleri sonucunda katalizörlerin suyun hidrolizine uygun olduğu bulunmuştur. Endüstride hâlihazırda kullanılmakta olan iridyum oksit (IrOx) 0,32 V aşırı potansiyelle en iyi OER katalizörüdür. Ayrıca, BMFC ve BMCZ'nin aşırı potansiyelleri sırasıyla 0,34 V, 0,35 V değerleriyle IrOx'e çok yakındır. IrOx'in başlangıç potansiyeli 1,52 V, sentezlenen BMCZ ve BMFC elektrotlarının sırasıyla başlangıç potansiyelleri 1,62 V ve 1,63 V değerlerindedir. Sonuç olarak, üretilen elektrotların suyun hidrolizini, güneş yardımıyla katalizleyerek OER tepkimelerinde iridyuma alternatif olarak kullanılmaya uygun olduğu saptanmıştır.

### 2. Problem/Sorun:

Günümüzde kullanılan enerjinin büyük çoğunluğu fosil yakıtlardan elde edilmesine rağmen fosil yakıtlar dünyaya zarar verdiği ve tükendiği için insanlar yenilenebilir enerjiye yönelmiştir. Yenilenebilir enerjiler içerisinde güneş enerjisinden elde edilen hidrojen yakıtları, suyun hidrolizinden üretilebilir ancak güneş enerjisi aracılı su hidrolizinde kullanılan yüksek verime sahip platin ve iridyum gibi metaller doğada sınırlı ve dolayısıyla pahalı materyallerdir. Bu sebeple bu metaller alternatifler araştırılmasına rağmen yüksek verimli ve ekonomik elektrotlar üretilenmemiştir. Bu projede, yukarıda bahsedilen problemleri bertaraf edecek suyun hidrolizinde fotokatalitik özelliğe sahip, kolay üretilen, yüksek verimli ve ekonomik perovskitlerin üretimi ve karakterizasyonu araştırılmıştır.

### 3. Çözüm:

Hidrojen yakıtı üretiminde kullanılan iridyum ve platin gibi metallerin yerine güneş enerjisi ile fotokatalitik özellik gösteren BMCZ (Ba, Mg, Co, Zn) ve BMFC (Ba, Mg, Fe, Cu) temelli katalizörlerin sentezi amaçlanmıştır (Şekil 1). Bu katalizörlerin sentezlenmesinde dünyada bulunma yüzdesi fazla olan geçiş metalleri ve toprak alkali metalleri tercih edilerek maliyetin düşürülmesi ve sol-jel yöntemiyle kolay sentezlenmesi hedeflenmiştir.

## 4. Yöntem

### 4.1 Kimyasal Malzemeler

Perovskitlerin sentezinde  $Ba(NO_3)_2$ ,  $Mg(NO_3)_2$ ,  $Fe(NO_3)_3$ ,  $Cu(NO_3)_2$ ,  $Co(NO_3)_2$ ,  $Zn(NO_3)_2$  tuzları (ZAG Kimya, Türkiye),  $NH_4OH$  (Tekkim, Türkiye), EDTA ( $C_{10}H_{16}N_2O_8$ ) (Sigma Aldrich, Almanya), sitrik asit ( $C_6H_8O_7$ ) (ZAG Kimya, Türkiye) kullanıldı. Sentezlenen maddelerin mürekkep haline getirilmesinde etanol ( $C_2H_5OH$ ) (Tekkim, Türkiye), nafyon ( $C_7HF_{13}O_5S \cdot C_2F_4$ ) (Sigma Aldrich, Almanya), karbon siyahı (Tekkim, Türkiye) ve sentezlenen perovskitler kullanıldı. Elektrokimyasal ölçümlerde elektrolit çözeltisi olarak potasyum hidroksit (KOH) (Tekkim, Türkiye) kullanılmıştır.

### 4.2 Perovskit Sentezi

BMCZ ve BMFC perovskitlerinin sentezinde sol-jel yöntemi tercih edilmiştir.

1) Amonyum hidroksitten ( $NH_4OH$ ) 1M 40 mL (1,402 g) 2 adet çözelti hazırlandı. Hazırlanan  $NH_4OH$  çözeltisine, 0,04 M (11,68 g) EDTA ( $C_{10}H_{16}N_2O_8$ ) eklendi (Zhou ve ark., 2006).

2) Hazırlanan  $NH_4OH$  ve EDTA çözeltileri içinde 0,02 M  $Ba(NO_3)_2$  tuzu (5,2268 g) çözünene kadar 450 rpm (dk/ dönme sayısı) ve 50 °C'de karıştırıldı (Zhou ve ark., 2006).

3) Sentezleyeceğimiz perovskit tozlar için Mg (0,02 M), Co (0,03 M), Zn (0,008 M) ve Mg (0,02 M), Fe (0,008 M), Cu (0,003 M) nitrat tuzlarından stokiometrik oranlarda yüzer ml saf su içerisinde iki ayrı kapta 450 rpm ve 50 °C de karıştırılarak çözünmesi sağlandı (Zhou ve ark., 2006) (Şekil 2).

4) Hazırlanan  $NH_4OH$ -EDTA çözeltisi nitrat tuzları çözeltisiyle karıştırıldı (Zhou ve ark., 2006).

5) Her iki çözeltiye de 0,04 M sitrik asit eklendi. Çözeltilerin pH 5'e ayarlandı.

6) Karışımlar jel haline gelene kadar 80 °C de manyetik karıştırıcısıyla karıştırıldı (Zhou ve ark., 2006) (Şekil 3).

7) Jel haline getirildikten sonra 24 saat 240 °C de yakıldı (Zhou ve ark., 2006).

8) Yakıldıktan sonra öğütülerek yüzey alanının artması sağlanan tozlar 850°C kalsinlendi (Zhou ve ark., 2006).

9) Fırından alındıktan sonra karışımlar tekrar öğütüldü (Cheng ve ark., 2018).

### 4.3 Mürekkep ve Elektrot Yapımı

1) Mürekkep haline getirilmek üzere 10 mg karbon siyahı ve 10 mg hazırlanan BMCZ ve BMFC perovskit tozları hassas terazide tartıldı (Cheng ve ark., 2018).

2) 100 µl nafyon ve 1 mL etanol tartılan tozların üzerine eklendi (May ve ark., 2012).

3) Hazırlanan mürekkepler nikel köpüğü üzerine mikropipet yardımıyla 100 µl damlatıldı. Aynı örneklerden üçer adet hazırlandı (May ve ark., 2012).

4) Elektrotlar 80 °C de bir gece boyunca bekletildi (Cheng ve ark., 2018).

### 4.4 Elektrolit Çözeltisinin Hazırlanması

Elektrolit çözeltisi için KOH kullanıldı. 250 mL 1 M KOH çözeltisi hazırlamak için 14,025 gram KOH tuzu 250 mL saf su içinde çözüldü (McCroly ve ark., 2013).

### 4.5 Karakterizasyon ve Elektrokimyasal Ölçümler

#### 4.5.1 Karakterizasyon

##### 4.5.1.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)



Elektron mikroskobu görüntülerinin alınması için İYTE Malzeme Araştırma Merkezinde bulunan SEM Philips XL 30S FEG cihazı kullanılmıştır. Görüntüler 7 kV voltajda 100 µm – 1 µm arasında alınmıştır. Örnekler toz halinde çift taraflı karbon bant üzerine uygulanarak incelenmiştir. Görüntü toplamada cihazın ikincil elektron dedektörü kullanılmıştır (Zhou ve ark., 2006) (Şekil 4 ve 5).

#### 4.5.1.2 XRD (X Işını Kırılımı)

XRD sentezlenen malzemenin kristal yapısının incelenmesi amacıyla kullanılmıştır (Philips X'Pert Pro). 10-90° açı arasında orta hızda 0,08 derece/sn bakılmıştır (Cheng ve ark., 2018).

#### 4.5.1.3 Optik Mikroskop

Sentezlenen perovskit yapıların nikel köpük üzerinde nasıl dağıldığını incelemek için optik mikroskop görüntüleri alınmıştır (Şekil 6).

#### 4.5.2 Elektrokimyasal Ölçümler

Döngüsel voltammetri ve kronoamperometri ölçümleri Metrohm PG-208 cihazı ile 3 tekrarlı olacak şekilde yapıldı. Referans elektrot Ag/AgCl, karşıt elektrot olarak platin kullanıldı.

##### 4.5.2.1 Döngüsel Voltammetri

Sentezlenen elektrotların OER (Oxygen Evolution Reaction) aktivitelerinin ölçümü için döngüsel voltammetri yöntemi kullanıldı (May ve ark., 2012). Döngüsel voltammetriler 0,018 V ve 0,8 V potansiyeller arasında 30 döngü olacak şekilde ölçüldü. Sistemin hızı 0,01 V/s olarak ayarlandı. Elektrolit çözeltisi olarak 1 M KOH kullanıldı.

##### 4.5.2.2 Işıklı Döngüsel Voltammetri

Sentezlenen perovskit tozlarının ışık altındaki aktivitelerini ölçmek için 0,1 – 1,8 V arasında Xenon lamba ışığında AM1.5G güneş spektrumunda 30 döngü alındı (Şekil 7). Ölçümlerin tarama hızı olarak 0,01 V/s belirlendi. 10 mA denk gelen volt miktarı kullanılarak zamana bağlı ölçümler yapıldı (McCroory ve ark., 2013). Daha önceki döngüsel voltammetri ölçümlerine dayanarak BMFC'nin daha yüksek performans sergilediği sonucuna varıldı. Bu sebepten dolayı BMFC'nin ışık altındaki katalizör performansı ölçüldü.

#### 4.5.3 Zamana Bağlı Amperometri Ölçümü

Zamana bağlı amperometri (kronoamperometri) ölçümü sentezlenen maddelerin dayanıklılığını ölçmek için kullanılmıştır. Kronoamperometri yönteminde sabit 0,8 V uygulanarak 5 saat boyunca akımdaki değişim ölçülmüştür (Cheng ve ark., 2018).

### 5. Yenilikçi (İnovatif) Yönü

Endüstride hâlihazırda hidrojen yakıtı elde etmekte kullanılan iridyum oksit (IrOx) 0,32 V aşırı potansiyelle en iyi OER katalizörüdür. Sentezlediğimiz elektrotlardan BMFC ve BMCZ'nin dünyada bulunma yüzdesi yüksek olan metaller kullanılmış ve maliyeti düşürülmüştür. BMFC ve BMCZ'nin aşırı potansiyelleri sırasıyla 0,34 V, 0,35 V değerleriyle IrOx'e çok yakındır. IrOx'in başlangıç potansiyeli 1,52 V, sentezlenen BMCZ ve BMFC elektrotlarının sırasıyla başlangıç potansiyelleri 1,62 V ve 1,63 V değerleridir (McCroory ve ark., 2013). Bu değerler IrOx ile rekabet edebilecek değerlerdir. IrOx doğada kısıtlı bulunan metallerden biri olduğu için maliyeti çok yüksektir fakat sentezlenen BMFC ve BMCZ elektrotlar IrOx oranla maliyetleri çok düşüktür. Ayrıca üretilen iki perovskit araştırdığımız

kadarıyla hem literatürde hem de patentlerde hidrojen yakıtı üretiminde kullanılmadığı ve bu projede ilk defa üretilmiş ve ilk defa hidrojen yakıtı eldesinde kullanılmıştır.

## 6. Uygulanabilirlik

Projemizde üretilen perovskit temelli elektrotlar, herhangi bir temel kimya laboratuvarına sahip bir kurumda kolay ve çokça üretilebilir. Ayrıca bu projede üretilen elektrotlar, doğrudan güneş enerjisinden katalitik özellik göstermesi ile çevreci ve yenilenebilir, substrat olarak suyu kullanmasıyla sürdürülebilir, elektrokimyasal verilere göre en iyi OER katalizör özelliği gösteren IrOx ile rekabet edebilir niteliktedir. Ayrıca doğada bulunma yüzdesi yüksek olan metaller kullanılmasıyla ekonomik, literatür ve patent araştırmalarında daha önceden bir araya getirilmemiş metallere oluşmasıyla özgündür. Her iki perovskit de yukarıdaki özellikleri göz önüne alındığında kimya ve enerji endüstrisinde ticari ürüne dönüştürülebilir.

## 7. Tahmini Maliyet ve Proje Zaman Planlaması

Bu proje kapsamında kullanılan tüm kimyasal malzemelerin (Bölüm 4.1 Kimyasal Malzemeler) büyük çoğunluğu Türkiye’de üretilen teknik saflıkta materyaller olduğundan oldukça ekonomiktir. Proje kapsamında yapılan tüm karakterizasyon testleri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE)’nde hizmet alımı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projede satın alınan tüm kimyasal malzemeler ve hizmet alımlarının toplam maliyeti 2000 Türk Lirasıdır. Bununla birlikte, üretilen BMFC ve BMCZ elektrotlarının her birinin maliyeti 2 Türk Lirasıdır. Kimyasal malzemeler Eylül 2019 tarihinde sipariş ve tedarik edilmiş olup karakterizasyon işlemleri için Ocak 2020 tarihinde İYTE’de hizmet alımı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Proje iş-zaman çizelgesi Tablo 1’de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Proje takvimi.

İşin Tanımı	AYLAR								
	Mayıs 2019	Haziran 2019	Temmuz 2019	Ağustos 2019	Eylül 2019	Ekim 2019	Kasım 2019	Aralık 2019	Ocak 2020
Literatür Taraması	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Laboratuvar Çalışması			X	X	X	X	X	X	
Verilerin Toplanması ve Analizi			X	X	X	X	X	X	X
Proje Raporu Yazımı						X	X	X	X

## 8. Proje Fikrinin Hedef Kitle (Kullanıcılar):

Projemizde üretilen perovskit temelli elektrotların hedef kitlesi güneş enerji sistemleri üzerine yatırım yapan şirketler ile temel kimyasal malzeme üreten şirketlerdir. Ülkemizde hidrojen yakıtı üretiminde kullanılan iridyum ve platin metallerinin doğada az bulunmaları nedeniyle maliyetinin yüksek olması hidrojen yakıtı üretimine yapılan yatırımı azaltmaktadır.

## 9. Riskler

Projenin temel amacı güneş enerjisi yardımıyla BMFC ve BMCZ elektrotlarının su molekülünü oksijen (O<sub>2</sub>) ve hidrojen (H<sub>2</sub>) gazlarına ayrıştırmasıdır. Sonuç olarak, üretilen elektrotlar suyun hidrolizini gerçekleştirdikten sonra açığa çıkacak olan O<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> gazlarının iyi depolanmaması güneş yakıt verimini düşürmesi ilk risk olarak karşımıza çıkmaktadır. H<sub>2</sub> gazının yanıcı ve O<sub>2</sub> gazının ise yakıcı olması ikinci riski oluşturmaktadır. Bu iki risk için çözüm ise hidroliz tankının her iki gazın bir araya gelmemesi şeklinde tasarlanması ve zıt elektrotlar üzerinden açığa çıkan gazların iyi bir depolanmasını ve denetlenmesi sağlayacak büyük tanklarla gerçekleştirilebilir. Açığa çıkan gazların denetlenmesinde Arduino temelli gaz sensörleri ile anlık ölçümler alınabilir ve bir kaçak olması durumunda sistem hızlıca durdurulabilir.

## 10. Proje Ekibi

**Takım Lideri:** Dr. Onur Akpınar

Adı Soyadı	Projedeki Görevi	Okul	Projeyle veya problemle ilgili tecrübesi
Dr. Onur Akpınar	Danışman	İzmir Özel Ege Lisesi	7 yıl
Abdullah Kazaz	Araştırmacı	İzmir Özel Ege Lisesi	1 yıl
İlgin Karakaş	Araştırmacı	İzmir Özel Ege Lisesi	1 yıl

## 11. Kaynaklar

- Ahmed, M., ve Dincer, I. (2018). A review on photoelectrochemical hydrogen production systems: challenges and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy*. Çevrimiçi ön yayın. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.037
- Bin, A. R., Yusoff, M., ve Jang, J. (2016). Highly efficient photoelectrochemical water splitting by a hybrid tandem perovskite solar cell. *Chemical Communications*, 52(34), 5824-5827. Çevrimiçi ön yayın. doi: 10.1039/c6cc01249c
- Cheng, X., Fabbri, E., Yamashita, Y., Castelli, I. E., Kim, B., Uchida, M., ... ve Schmidt, T. J. (2018). Oxygen evolution reaction on perovskites: A multieffect descriptor study combining experimental and theoretical methods. *ACS Catalysis*, 8(10), 9567-9578. Çevrimiçi ön yayın. doi 10.1021/acscatal.8b02022
- Karagöl, E. T., ve Kavaz, İ. (2017). Dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji. *Analiz. Seta*, 197, 18-28. Erişim Tarihi: 23.10.2019. Erişim Adresi: <https://setav.org/assets/uploads/2017/04/YenilenebilirEnerji.pdf>
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y. ve Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. Erişim Tarihi: 03.10.2019. Erişim adresi: [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/6\\_dunyadaveturkiyede.pdf](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/6_dunyadaveturkiyede.pdf)
- May, K. J., Carlton, C. E., Stoerzinger, K. A., Risch, M., Suntivich, J., Lee, Y. L., ... ve Shao-Horn, Y. (2012). Influence of oxygen evolution during water oxidation on the surface of perovskite oxide catalysts. *The journal of physical chemistry letters*, 3(22), 3264-3270. Çevrimiçi ön yayın. doi: 10.1021/jz301414z

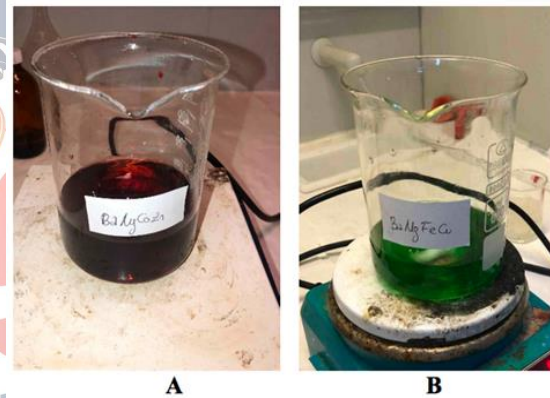


- McCrorry, C. C., Jung, S., Peters, J. C., ve Jaramillo, T. F. (2013). Benchmarking heterogeneous electrocatalysts for the oxygen evolution reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 135(45), 16977-16987. Çevrimiçi ön yayın. doi: 10.1021/ja407115p
- T.C. Enerji Bakanlığı (2019). Kömür. Erişim tarihi 07.10.2019, Erişim adresi: <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Komur>
- Xie, X., Ni, C., Wang, B., Zhang, Y., Zhao, X., Liu, L., ... ve Du, W. (2019). Recent advances in hydrogen generation process via hydrolysis of Mg-based materials: A short review. *Journal of Alloys and Compounds*, 152634. Çevrimiçi ön yayın. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.152634
- Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54. Çevrimiçi ön yayın. doi: 10.1501/Csaum\_0000000064
- Zhang, X., Zhang, B., Cao, K., Brillet, J., Chen, J., Wang, M., ve Shen, Y. (2015). A perovskite solar cell-TiO<sub>2</sub>@ BiVO<sub>4</sub> photoelectrochemical system for direct solar water splitting. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(43), 21630-21636. Çevrimiçi ön yayın. doi: 10.1039/c5ta05838d
- Zhou, W., Shao, Z., ve Jin, W. (2006). Synthesis of nanocrystalline conducting composite oxides based on a non-ion selective combined complexing process for functional applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 426(1-2), 368-374. Çevrimiçi ön yayın. doi: 10.1016/j.jallcom.2006.02.029

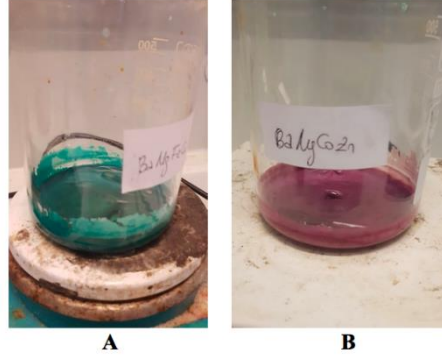
## EKLER



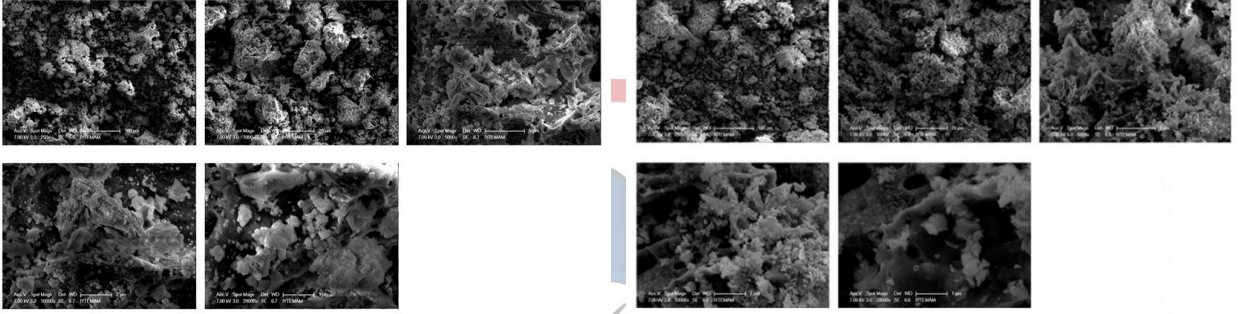
Şekil 1. Öğütülmüş BMCZ ve BMFC.



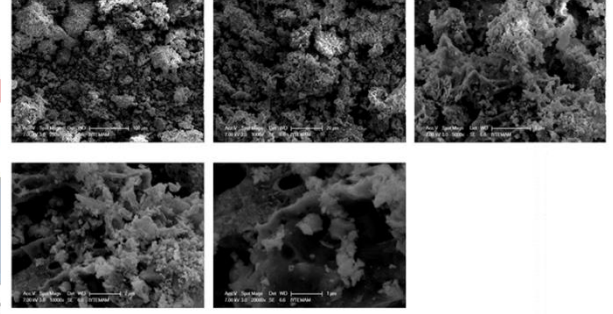
Şekil 2. 100 ml suda çözülmüş A; Mg, Co, Zn; B: Mg, Fe, Cu.



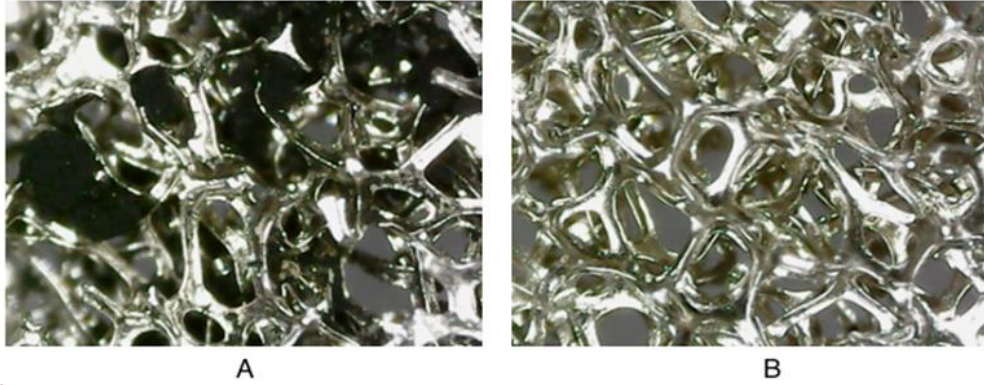
Şekil 3. A: BMFC'nin; B: BMCZ'nin jelimsi formu.



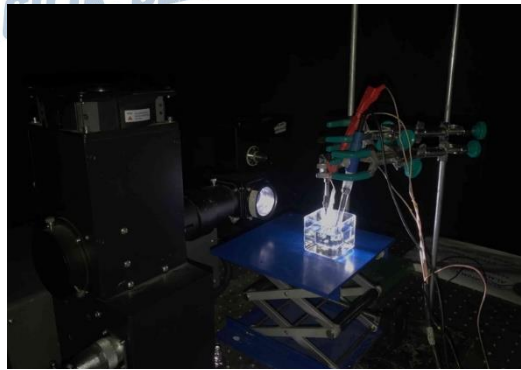
Şekil 4. BMFC'nin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.



Şekil 5. BMCZ'nin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.



Şekil 6. A'da üzeri perovskit kaplanmış nikel köpük B'de üzeri kaplı olmayan nikel köpük (400x yakınlaştırmada).



Şekil 7. Xenon lamba ışığında AM1.5G güneş spektrumunda ölçüm düzeneği gösterilmektedir.