

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**LABORATUVAR ŞARTLARINDA ÜRETİLEN AÇIK HÜCRELİ  
ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN GAZ DİFÜZYON TABAKASI  
OLARAK SODYUMBORHİDRÜR YAKIT HÜCRELERİNDE  
KULLANILMASI**

**UĞUR ERGİN**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**LABORATUVAR ŞARTLARINDA ÜRETİLEN AÇIK HÜCRELİ  
ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN GAZ DİFÜZYON TABAKASI  
OLARAK DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT HÜCRELERİNDE  
KULLANILMASI**

**UĞUR ERGİN**

**Doç. Dr. Alpay Tamer Ertürk**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Prof. Dr. Cenk Çelik**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZER**  
**Jüri Üyesi, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniv.**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 30.06.2021**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez yazım sürecinde her türlü desteği veren, çalışma disiplinini aktaran, akademik olarak gelişebilmem için tüm özverisi ile bana yardımcı olan, üzerimde büyük emekleri bulunan danışmanım Doç. Dr. Alpay Tamer ERTÜRK'e teşekkür ederim.

Laboratuvar desteği sağlayan Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi ekibine, çalışmada desteklerini esirgemeyen Yük. Müh. Mustafa Enes BULDUK'a sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Yapılan alışma TÜBİTAK (215M255 Nolu Proje) desteği ile sundukları imkanlardan dolayı teşekkür ederim. Projemizin yürütücüsü Prof. Dr. Cenk ÇELİK'e ve diğer proje ekip arkadaşlarıma desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca benim geleceğim ve mutluluğum için maddi ve manevi hiçbir fedakrlıktan kaçınmadan, beni en iyi şekilde yetiştiren, sevgi, saygı, hoşgörüyü ve vefayı öğreten aileme canı yürekten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2021

Uğur ERGİN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ .....	ivi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ .....	1
1.METALİK KÖPÜKLER .....	3
1.1. Metal Köpüklerin Üretimi Yöntemleri.....	5
1.1.1. Kapalı hücre metal köpük üretim yöntemleri .....	5
1.1.2. Açık hücreli metal köpük üretim yöntemleri .....	9
1.2. Metalik Köpüklerin Boşluk Tutucu Yöntemi ile Üretimi .....	11
1.3. Metalik Köpüklerin Yapısal ve İşlevsel Özellikleri.....	15
1.4. Metalik Köpüklerin Mekanik Özellikleri.....	17
1.5. Metalik Köpüklerin Uygulama Alanları .....	19
2.YAKIT HÜCRELERİ.....	22
2.1. Yakıt Pilleri Bileşenleri.....	23
2.1.1. Gaz difüzyon tabakası .....	23
2.1.2. Akış dağıtıcı plaka .....	24
2.1.3. Elektrolit.....	25
2.2. Yakıt Pili Çeşitleri.....	25
2.2.1. Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP).....	26
2.2.2. Alkali yakıt pili (AYP).....	26
2.2.3. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP).....	27
2.2.4. Katı oksit yakıt pili (KOYP) .....	28
2.2.5. Formik asit yakıt pili (FAYP) .....	28
2.2.6. Doğrudan bor hidrür yakıt pilleri (DBHYP).....	29
3.METALİK KÖPÜKLERİN YAKIT PİLLERİNDE KULLANIMI.....	31
4.MALZEMELER VE YÖNTEM .....	39
4.2. Test Cihazları ve Ekipmanları.....	42
4.2.1. Yoğunluk ölçümü ve porozite hesabı.....	42
4.2.2. Makro ve mikro yapı incelenmesi.....	43
4.2.3. Mikro sertlik test deneyi .....	44
4.2.4. Yakıt hücresi test sistemi .....	44
4.3. Üretim Yöntemi .....	45
5.DENEYSEL BULGULAR .....	47
5.1. Ön Deneme Çalışmaları .....	47
5.2. Numune Kesitleri .....	48
5.3. Kütle ve Yoğunluk Hesaplamaları .....	50
5.4. Makro Yapı Analizi.....	50
5.5. Mikro Yapı Analizi .....	51
5.6. Sertlik Testi Sonuçları.....	52

5.7. Yakıt Pili Test Sonuçları .....	53
6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	55
KAYNAKLAR .....	57
EKLER.....	67
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	73
ÖZGEÇMİŞ .....	74



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Metalik köpüklerin üretim yöntemleri .....	6
Şekil 1.2. Gaz üfleme yöntemi .....	7
Şekil 1.3. Sıvı metal içerisine köpürtücü madde ilavesi yöntemi .....	7
Şekil 1.4. FORMGRIP üretim yöntemi .....	8
Şekil 1.5. Toz metalürjisi ile metalik köpük üretimi.....	9
Şekil 1.6. Yer tutucu yöntemi ile metalik köpük üretimi .....	10
Şekil 1.7. Polimer köpük ile hassas döküm tekniği .....	11
Şekil 1.8. Boşluk tutucu yöntemi ile metalik köpük üretimi .....	13
Şekil 1.10. Açık hücreli nikel köpük.....	17
Şekil 1.11. Kapalı hücreli alüminyum köpük .....	18
Şekil 1.12. Metalik köpükler de gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	18
Şekil 1.13. Metalik köpüklerin kullanım alanları .....	20
Şekil 1.14. Metalik köpük ısı değiştiricileri.....	21
Şekil 3.1. Yakıt pilinin çalışma mekanizması .....	32
Şekil 3.2. Yakıt pilinin içerisinde bulunan difüzyon tabakası ve katalizör tabakasının yapısı .....	34
Şekil 4.1. Yer tutucu yöntemi ile açık hücreli alüminyum köpük üretimin balık kılıçığı modeli .....	39
Şekil 4.2. Retsch AS 200 marka eleme makinası .....	40
Şekil 4.3. Atmosfer kontrollü fırın.....	41
Şekil 4.4. Köpük üretim kalıbı .....	41
Şekil 4.5. CT-WaterJet Makinesi.....	42
Şekil 4.6. Ticari açık hücreli nikel köpüğün makro yapı incelemesi .....	43
Şekil 4.7. Jeol 6060 SEM cihazı .....	43
Şekil 4.8. Zwick marka Vickers mikrosertlik cihazı.....	44
Şekil 4.9. Tek hücre test sistemi.....	45
Şekil 4.10. Mekanik yöntem ile parçalanmış tuz parçacıkları a) Parçalanmamış b) 2-4 mm c) 1-2 mm d)1-0,5 mm .....	46
Şekil 4.11. Deneylerde uygulanan sıcaklıklar ve süreler .....	46
Şekil 5.1. Yeterli sızma kabiliyetine sahip olmayan alüminyum yapılar.....	47
Şekil 5.2. Proses sonrası alüminyum köpük.....	48
Şekil 5.3. Farklı üretim sonuçları a) NaCl parçacıkları birikmiştir b) NaCl homojen dağılmıştır .....	49
Şekil 5.4. a-c) Su jeti yöntemi d) Tel erozyonu ile kesilen köpükler.....	49
Şekil 5.5. Stereo mikroskop ile köpüklerin hücre genişliği ve duvarları ölçülmüştür. a) Ticari Alüminyum köpük b) NaCl boyutu 2-4 mm olan köpükler c) NaCl boyutu mm olan köpükler.....	51
Şekil 5.6. SEM mikroyapı görüntüsü.....	52
Şekil 5.7. EDS analiz sonuçları.....	52
Şekil 5.8. Anot kısmında 5x5x0,5 cm Al köpük üzerine 2 mg cm <sup>2</sup> Pt/C katalizör kaplı difüzyon tabakası, katot kısmında 1 mg cm <sup>2</sup> Pt/C, yakıt pili yakıt çözeltisi (% ağırlık) %4 NaBH <sub>4</sub> + %12 NaOH, membran Nafyon 117 ve 0,3L/dk kuru oksijen oksidant.....	53

- Şekil 5.9. Anot kısmında ticari Cu köpük üzerine 2 mg cm<sup>2</sup> Pt/C katalizör kaplı difüzyon tabakası, katot kısmında 1 mg cm<sup>2</sup> Pt/C, yakıt pili yakıt çözeltisi (% ağı.) %4 NaBH<sub>4</sub> + %12 NaOH, membran Nafyon 117 ve 0,3L/dk kuru oksijen oksidant ..... 54
- Şekil 5.10. Anot kısmında ticari Ni köpük üzerine 2 mg cm<sup>2</sup> Pt/C katalizör kaplı difüzyon tabakası, katot kısmında 1 mg cm<sup>2</sup> Pt/C, yakıt pili yakıt çözeltisi (% ağı.) %4 NaBH<sub>4</sub> + %12 NaOH, membran Nafyon 117 ve 0,3L/dk kuru oksijen oksidant ..... 54



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Yakıt pili türüne göre elektroliti ve işletme sıcaklığı.....	26
Tablo 2.2. Yakıt pili türüne göre anot ve katotta meydana gelen tepkimeler.....	26
Tablo 4.1. Deneyde kullanılan alüminyum alaşımlarının elementel bileşimleri.....	40
Tablo 4.2. Deneyde kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri.....	40
Tablo 4.3. Tek hücre testlerinde kullanılan bileşenler.....	44
Tablo 5.1. Stereo mikroskop ile B-1, B-5, A-1, A-2 ve Ticari Alüminyum köpüğün hücre genişliği ve duvarları boyutları.....	50
Tablo 5.2. Vickers sertlik değerleri .....	53





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Al-B <sub>4</sub> C	: Alüminyum bor karbür
Au	: Altın
Au-Sn	: Altın-Kalay
BH <sub>4</sub>	: Borhidrür
B <sub>4</sub> C	: Bor karbür
Ca	: Kalsiyum
CaCl <sub>2</sub>	: Kalsiyum Klorür
CO <sub>2</sub>	: Karbon mono oksit
CoP	: Kobalt fosfor
Co-P/Ni	: Kobalt-fosfor kaplı nikel
Co-Mo-B/Ni	: Kobalt-molibden bor kaplı nikel
Co-W-B-P/Ni	: Kobalt-molibden bor-fosfor kaplı nikel
E	: Young Modülü
Fe(Al)	: Demir alüminyum alaşımı
G	: Kayma Modülü
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	: Hidrojen Peroksit
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	: Formik asit
KBH <sub>4</sub>	: Potasyum bor hidrür
KCl	: Potasyum klor
KOH	: Potasyum hidroksit
NaBH <sub>4</sub>	: Sodyum borhidrür
NaCl	: Sodyum klor
NaOH	: Sodyum hidroksit
NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub>	: Amonyum bikarbonat
Ni	: Nikel
NiP	: Nikel Fosfor
Ti	: Titanyum
Ti <sub>2</sub> AlC	: Titanyum alüminyum karbür
TiH <sub>2</sub>	: Titanyum hidrid
U	: Enerji sönümlenme değeri
$\rho$	: Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
$\nu$	: Poisson oranı
ZrH <sub>2</sub>	: Zirkonyum hidrid
ağ%	: Ağırlıkça yüzde

### Kısaltmalar

ADM	: Anyon değişim membran
AYP	: Alkali yakıt pili
DBYP	: Doğrudan bor yakıt pili
DBHYP	: Doğrudan Bor Hidrür Yakıt Pilleri

DMYP	: Doğrudan metanol yakıt pili
EKYP	: Erimiş karbonat yakıt pili
FAYP	: Fosforik asit yakıt pili
FORMGRIP	: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors (Öncülerin Gaz Salınımı ile Güçlendirilmiş Metal Köpük Üretimi)
KDM	: Katyon değişim membran
KOYP	: Katı oksitli yakıt pili
PEM	: Polimer elektrolit membranlı
PEMYH	: Polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi
PEMYP	: Polimer elektrolit membranlı yakıt pili



# LABORATUVAR ŞARTLARINDA ÜRETİLEN AÇIK HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN GAZ DİFÜZYON TABAKASI OLARAK DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT HÜCRELERİNDE KULLANILMASI

## ÖZET

Yakıt pili sistemleri hali hazırda gelişmekte olan bir teknoloji olmasına rağmen yüksek enerji verimi, uzun çalışma süresi, sessiz çalışması ve çevreye zararlı atık oluşturmaması nedeniyle enerji ihtiyacının karşılanması çözümünde dikkat çeken bir teknolojidir. Yakıt pili sistemlerinin ticarileştirilebilmesi için maliyet düşürücü, verimlilik arttırıcı ve daha küçük hacimlerde daha yüksek güç sağlayan yakıt hücreleri elde edilmelidir.

Yakıt pillerinin ticarileştirilmesi ve maliyet düşürülmesi kapsamında metal esaslı köpüklerin kullanılması günümüzde dikkat çekmektedir. Metalik köpükler arasında üretim kolaylığının yanı sıra üstün performans özelliğinden dolayı çalışmada alüminyum köpükler kullanılmıştır. Alüminyum köpükler elektriksel ve termal iletkenlikleri, gözenekli yapının sağladığı yüksek geçirgenlik, dar akış kanalları, geniş özgül yüzey alanı, kılcal ve difüzyon kuvvetleri sayesinde yakıt pilleri başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamalarında mükemmel performans sağlayan bir malzemedir. DBHYP için anot difüzyon tabakasında alüminyum köpüklerin akış dağıtıcı ve elektrot olarak metal köpük kullanılması hücre performansında, hücre ağırlık ve hacminde önemli artılar sağlamaktadır. Tez kapsamında yakıt hücrelerinde kullanılması amacıyla laboratuvar şartlarında üretilen açık hücreli alüminyum köpüklerin DBHYP denenmesi ve mekanik davranışları incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum Köpükler, Doğrudan Borhidrür Yakıt Pili, Mekanik Davranışlar, Yakıt hücreleri, Yer Tutucu Yöntemi.

# **THE USE OF OPEN-CELL ALUMINUM FOAMS PRODUCED UNDER LABORATORY CONDITIONS IN DIRECT BORHYDRIDE FUEL CELLS AS GAS DIFFUSION LAYER**

## **ABSTRACT**

Although fuel cell systems are currently a developing technology, it is a remarkable technology in meeting energy needs due to its high energy efficiency, long operating time, silent operation and not creating harmful waste to the environment. For fuel cell systems to be commercialized, fuel cells that increase costs, increase efficiency and provide higher power in smaller volumes should be obtained.

The use of metal-based foams within the scope of commercialization of fuel cells and cost reduction is drawing attention today. Among metallic foams, aluminum foams were used in the study due to their ease of production as well as their superior performance. Aluminum foams are a material that provides excellent performance in many engineering applications, especially fuel cells, thanks to their electrical and thermal conductivity, high permeability provided by the porous structure, narrow flow channels, large specific surface area, capillary, and diffusive forces.

For DBHYP, using aluminum foams as flow distributors and metal foams as electrodes in the anode diffusion layer provides significant increases in cell performance, cell weight, and volume. Within the scope of the thesis, DBHYP testing and mechanical behavior of open-cell aluminum foams produced under laboratory conditions for use in fuel cells have been investigated.

**Key Words:** Aluminum Foams, Direct Borohydride Fuel Cell, Mechanical Behavior, Fuel cells, Space Holder Method.

## GİRİŞ

İnsanoğlu yaşamı boyunca doğada bulunan yapıları veya olayları taklit ederek yeni yapılar üretmeye çalışmaktadır. Bunlardan biride gözenekli yapılardır. Çevremizde bulunan kemik, ağaç kabuğu, odun vb. maddelerin üstün özelliklerinden dolayı gözenekli yapıların kullanımı artmıştır. Gözenekli malzemeler günümüzde farklı alanlarda sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Gözenekli yapılar seramik, polimer, metal ve kompozit malzemelerden üretilmektedir [1]. Teknikte kullanılan gözenekli malzemeler arasında önemli konumda bulunanlardan biri de metalik köpüklerdir. Son 50 yılda gelişen mühendislik uygulamaları ile hayatımızda rol almaya başlamıştır. Metalik köpükler akustik özelliği, darbe enerjisi sönümleme, sıvı ve gaz geçirgenliği, termal ve elektriksel özelliklerinde dolayı diğer malzemelerden sıra dışı özelliklere sahiptirler. Bu benzersiz özelliklerinden ötürü uygulama alanları genişlemektedir [2].

Metalik köpükler alüminyum, bakır, nikel, çelik, titanyum, çinko vb. metallerin alaşımlarından köpükler üretilmiştir. Bu üretilen köpüklerin hüresel farklılıklarından dolayı uygulama alanları değişmektedir. Metallik köpükler yapısal olarak hücre topolojilerine, kapalı veya açık hücre olmalarına, özgül yoğunluklarına, hücre boyutuna, hücre şekline ve anizotropi yapılarına göre karakterize edilirler. Kullanım alanlarından bazıları şok ve darbe absorpsiyonu, ısı yalıtım, katalizör destekleyici, akış dağıtıcı yapı, sıvı veya gaz filtreleme, sızdırmazlık elemanı gibi uygulamalarıdır [3, 4].

Açık hücreli metalik köpüklerle ilgili olarak çalışmalar 1950'lerde başlamıştır. Eriyik halde bulunan alüminyum kaya tuzuna dökülmüş ve işlem sonunda kaya tuzu alüminyumdan uzaklaştırılarak açık gözenekli köpük elde edilmiştir [5]. 1968 yılında Kaliforniya'da bulunan Energy Production and Research şirketi tarafından polimerik kalıp ile açık hücreli metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir [6].

Günümüzde hidrojen enerjisinin kullanıldığı, hidrojenin kimyasal enerjisini doğrudan elektriğe dönüştüren yakıt pili sistemleri üzerinde çalışmalar artmıştır. Yakıt pili sistemleri ile diğer yenilebilir enerji kaynaklarına göre yakıt takviyesi sağlandığı takdir

de sürekli bir enerji elde edilebilmektedir. Yakıt pili sistemlerinde yakıt olarak saf hidrojen veya hidrojen taşıyıcı sıvı yakıtlar kullanılmaktadır. Yakıt olarak saf hidrojenin kullanıldığı yakıt pili sistemlerinde, hidrojenin yanıcı ve patlayıcı özelliği sebebiyle yakıt depolama ve taşıma problemleri meydana gelmektedir. Saf hidrojenin bu dezavantajlarından dolayı hidrojen taşıyıcı sıvı yakıtların kullanıldığı yakıt pili sistemlerle çalışmak daha avantajlı olmaktadır. Yakıt olarak borhidrür bileşikleri kullanılan doğrudan bor hidrür yakıt pillerinin (DBHYP) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması ülkemizde bulunan zengin bor rezervi açısından stratejik bir öneme sahiptir. DBHYP'lerinin yaygınlaştırmak, ticarileştirilmesi, hücre performansının artırmak ancak hücre hacmini ve maliyeti azaltarak gerçekleştirilebilmektedir. Metal köpüklerin yakıt hücrelerinde kullanılmaya başlanması da yakıt pili sistemlerinde hücre performansında önemli gelişmeler elde edilmesini sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda sıvı yakıtlı pillerde genellikle nikel köpükler yaygın olarak kullanılmaktadır [7–9].

Bu çalışmada günümüz enerji teknolojisinde kullanılan DBHYP'lerde üretim maliyeti yüksek nikel esaslı köpüklerin yerine yer tutucu yöntemi ile üretilen maliyeti düşük açık hücreli alüminyum köpüklerin kullanımı araştırılmıştır. Laboratuvar şartlarında üretilen açık hücreli alüminyum köpükler gaz difüzyon tabakası olarak DBHYP'lerinde kullanılabilirliği ve performansı test edilmiştir.

## 1. METALİK KÖPÜKLER

Düşük yoğunluklu ve yüksek mekanik davranışlara sahip malzemelere olan ihtiyaç araştırmacıların sürekli ilgisini çekmektedir. Gözenekli malzemeler ise bu hususta mühendislik malzemeleri içerisinde önemli bir konuma sahiptir. Gözenekli malzemeler içerisinde metalik köpüklerin mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından oldukça önemli avantajları bulunmaktadır. Başlıca özellikleri arasında yüksek tokluk, basma mukavemeti, enerji ve akustik sönümlenme, elektriksel ve ısı iletkenliği gibi özellikleri bulunmaktadır. Bu tür malzemelerin avantajları yoğunluk ve gözenek türlerine göre değişmektedir. Metalik köpükler açık ve kapalı olmak üzere iki farklı gözenek yapısına sahiptir. Bu hücre yapılarının oluşumları ise üretim metodu ve parametreleri ile ilgilidir.

Metal köpükle ilgili ilk çalışma Meller tarafından 1926 yılında ortaya çıkmıştır. Alüminyum ve alaşımlarına gaz enjekte edilerek ve ilave köpürtücü maddeler kullanılarak metal köpük üretilmiştir. Sosnick 1948 yılında ve ilerleyen yıllarda eriyik alüminyum içinde köpürtücü madde olarak kullandığı cıvayı buharlaştırma yöntemini kullanarak kendi söylemiyle “Sünger Metal” oluşturmuştur [10]. 1970’li yıllara kadar metalik köpük üretebilmek için farklı üretim teknikleri geliştirilmiştir. Elliott ergiyik alüminyum içerisine  $TiH_2$  ve  $ZrH_2$  gibi köpürtücü maddeler eklenerek metal köpük oluşabileceğini ileri sürmüştür [11].

1990’lı yılların başında endüstriyel ve bilimsel çalışmaların arttığı gözlemlenmiştir. 1987’de Japonya’da Shinko Wire şirketinde Akiyama ve arkadaşları Ca ve  $TiH_2$  gibi köpürtücü maddeleri ergiyik alüminyuma ekleyip karıştırma yoluyla ekonomik ve hızlı bir üretim tekniği geliştirmiştir. Bu metod Alporas ismi ile ticarileştirilmiştir [12]. Gaz enjekte ederek metal köpük elde edilmesi 1990 yılında Kanada, Montreal’de Alcan International firması tarafından keşfedilmiştir. Jin ve arkadaşları metal ergiyiğe gaz enjekte ederek ergiyiğin yüzeyinde ve yüzeye yakın bölgelerinde köpükleştirme meydana getirilir. Bu işlem günümüzde Cymat ticari ismiyle bilinir [13], [14]. Metal ve köpürtücü tozların başlangıç malzemesi olarak kullanılmasına dayalı üretimi fikri Almanya Fraunhofer Enstitüsünde Baumeister tarafından ileri sürüldü. Bu işlem toz

metalürjisi yöntemiyle köpük üretimi olarak bilinmektedir. Bu yöntem Alulight firması tarafından patenti alınmıştır [15]. Ergiyik metal ve toz metalürjisi yöntemleriyle köpürtme işlemlerinin bazı avantajlarını birleştiren ve FORMGRIP olarak adlandırılan bir teknik geliştirildi. Bu yöntemde gaz ortaya çıkmasına sebep olacak öncü malzemelerin alüminyum temelli kompozit yapı içerisinde ayrışmasına olanak sağlar. Bu öncü malzemelere uygulanan ısı işlem ile köpük meydana gelmektedir [16].

Bir diğer teknik ise Berlin Hahn-Meitner Enstitüsü tarafından geliştirildi. Bu yöntem de toz metalürjisi tabanlıdır. Ancak farklı olarak üretimde köpürtücü madde eklenmesi gerekmemektedir. İlk aşamada sıkıştırılmış metal tozları yüksek basınç altında ısıtılır, sonrasında basıncın düşürülmesi ile metal köpüğün meydana gelmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem basınç ile uyarılmış köpük üretimi olarak adlandırılır [17]. Hücresel yapılar içerisinde gaz boşlukları bulunan yapılar olarak tanımlanır. Gözenekli yapı ise ince plakalardan oluşan yüksek oranlarda boşluk bulunan metal, polimer, seramik vb. malzemelerden oluşan yapılardır. Gözenekli yapılar hücresel yapıların bir türüdür. Köpükler gözenekli malzemelerin özel bir türüdür. Köpükler katı veya sıvı formundaki malzemenin içinde düzenli veya düzensiz bulunan gaz fazındaki malzemelerden oluşan yapılardır. Gaz fazındaki yapı diğer fazlardan ayrılmış bir şekilde yer alır. Bu şekilde olması ile hücreler sıvı veya katı ile çevrelenmiş şekilde yapı oluşur [18], [19].

Hücresel yapılar birim hücre boyutları milimetre veya mikrometre cinsinden ifade edilir. Hücrelerin boyutunun küçük olması hücresel yapıların yapısal olarak incelemenin yanında yapıyı oluşturan esas malzeme bakımından da ayrıca incelenmesi gerekmektedir. Köpükler önceleri kafes yapılarının bir alt birimi olarak kabul edilirdi [20], [21].

Köpük çalışmalarının başlarında bağıl yoğunluk ile köpükleri tanımlama yapılmaktadır. Ancak ilerleyen çalışmalar sonunda bu tanımlamanın da eksik kaldığına ulaşıldı. Gent ve Thomas 20 yy. da köpük yapılarının mekanik özelliklerini belirlemek ve tanımlamak üzere çalışmalarda bulunmuştur. Bu çalışmaları ile köpüklerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinin karakterizasyonunda ilk adımı atmışlardır [20].



Metalik köpük üretimi günümüzde genellikle alüminyum, çelik, titanyum, bakır, nikel, magnezyum, altın ve çinko gibi metaller ve alaşımları ile üretilmektedir. Özellikle alüminyum ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, diğer metallere nazaran üretim kolaylığı ve uygun maliyet gibi karakteristik özelliklerinden dolayı araştırmalar bu malzeme üzerine yoğunlaşmaktadır.

### **1.1. Metal Köpüklerin Üretimi Yöntemleri**

Metalik köpüklerin üretim yöntemlerini sınıflandırmada birçok metot kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan yöntem ise esas metalin fiziksel yapısına göre sınıflandırılmaktadır. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi metal yapılar 4 farklı fiziksel formda bulunarak metalik köpük üretimi gerçekleştirilmektedir.

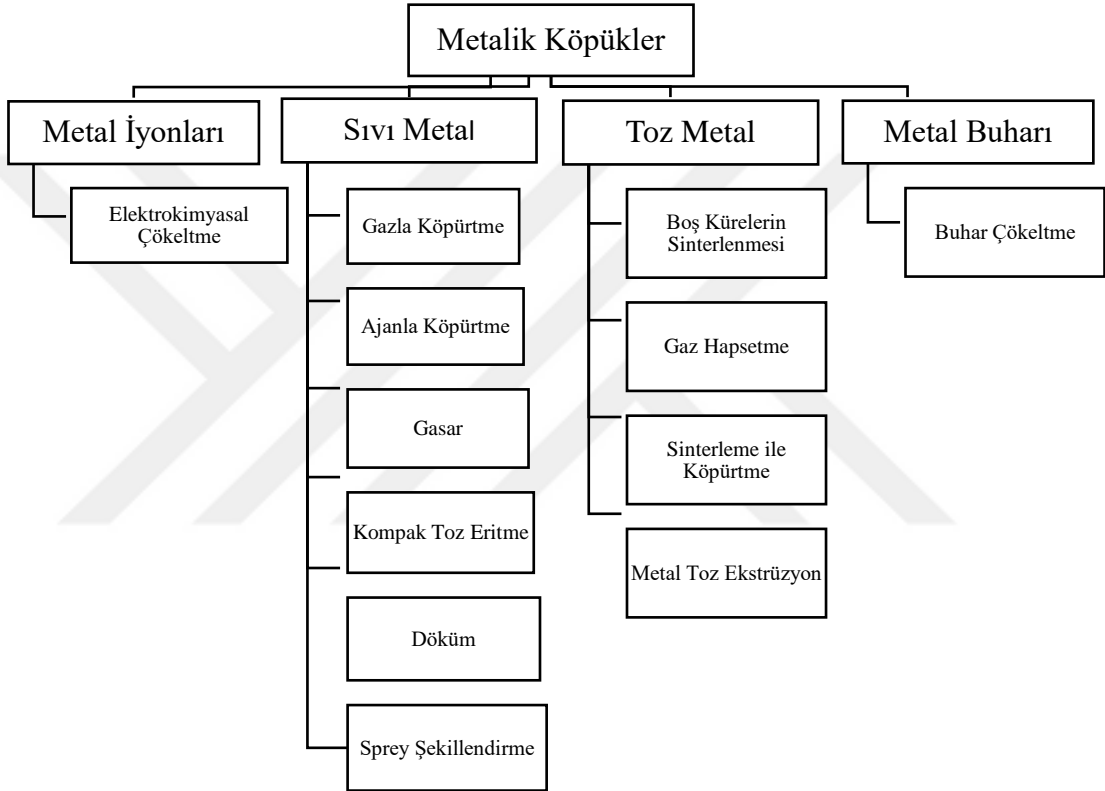
Metalik köpük üretiminde uygulama alanlarına göre farklı ve özgül üretim teknikleri kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemleri;[2]

- Erimiş metal içerisine gaz gönderilmesi ile köpük üretimi
- Erimiş metal içerisine köpürtme ajanı eklenmesi ile köpük üretimi
- Metal parçacıkların içerisine köpürtme ajanları eklenerek karışım oluşturularak ve ısıl işlem ile köpük üretimi
- Polimer malzemedan kalıbın oluşturularak, erimiş metal veya metal tozu bulamacının kalıba sızdırılması ile köpük üretimi
- Metalin polimer iskelet üzerine buhar fazında veya elektro-çökeltmesi ile köpük üretimi
- Metal tozunun içerisinde yüksek basınçlı inert gaz ile presleme ve ardından yüksek sıcaklıkta gazın genişlemesinin sağlanması ile köpük üretimi
- Sıvı metal içerisinden basınçlı gazı kontrollü şekilde geçirilmesi ile katılaşmanın sağlanması ile köpük üretimi

#### **1.1.1. Kapalı hücre metal köpük üretim yöntemleri**

Kapalı hücreli metalik köpüklerin üretiminde genellikle gaz üfleme, köpürtücü madde kullanımı, toz metalürjisi vb. üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler aşağıda incelenmiştir.

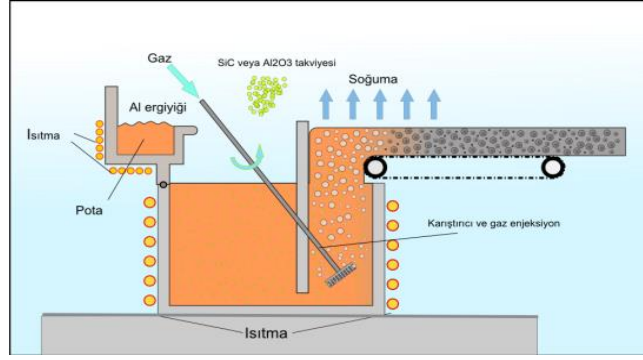
Gaz üfleme yöntemi, metal eriyik içerisinde gaz kabarcıkları oluşturularak köpük üretimi yapmaktadır. Şekil 1.2’de gaz üfleme sistemi verilmiştir. Sistemin çalışma prensibinde metal eriyiğin yüksek yoğunluğundan dolayı içerisine aktarılan gaz kabarcıkları yüzeye çıkma eğiliminde olmaktadır. Yükselen gaz kabarcıklarına tutunan sıvı metal yüzeyde sıcaklığın düşük olmasından dolayı köpük oluşmasını sağlamaktadır. Viskoziteye bağlı olarak metalik köpüğün hücre duvarlarının kalınlığını kontrol etmek zordur [2, 19, 20, 22, 23].



Şekil 1.1.Metalik köpüklerin üretim yöntemleri

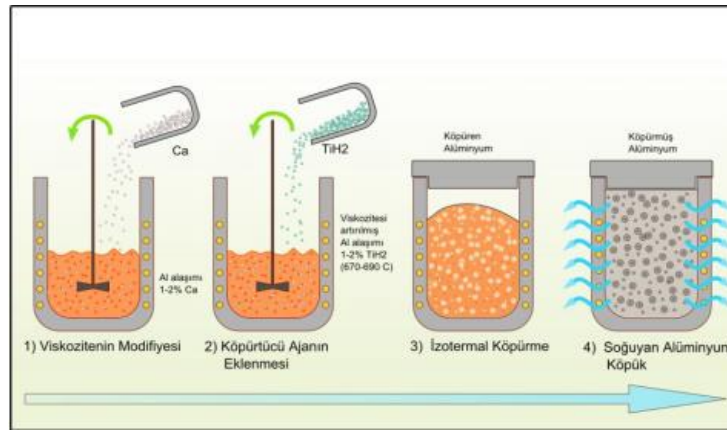
Gaz üfleme metodu seri üretime elverişli yöntemdir. Maliyeti düşük ve diğer metotlara göre karmaşık değildir. Diğer kapalı hücreli üretimlere göre daha düşük yoğunluklu köpükler üretilmektedir. Kapalı gözenekli alüminyum köpükler bu yöntemle üretilmektedir. Üflenen gazlar ise hava, argon, nitrojen ve inert gazlar kullanılmaktadır.

Ajan ile köpük üretme metodu sıvı metal içerisine yüksek sıcakta tepkimeye girerek gaz çıkışını sağlayan parçacıkların eklenmesi ile köpük üretim yöntemidir. Yaygın olarak kullanılan köpürtücü madde  $TiH_2$  parçacıklarıdır. Köpürtücü parçacıklar literatürde köpürtücü ajan olarak isimlendirilmektedir [2], [19].



Şekil 1.2. Gaz üfleme yöntemi [19, 21]

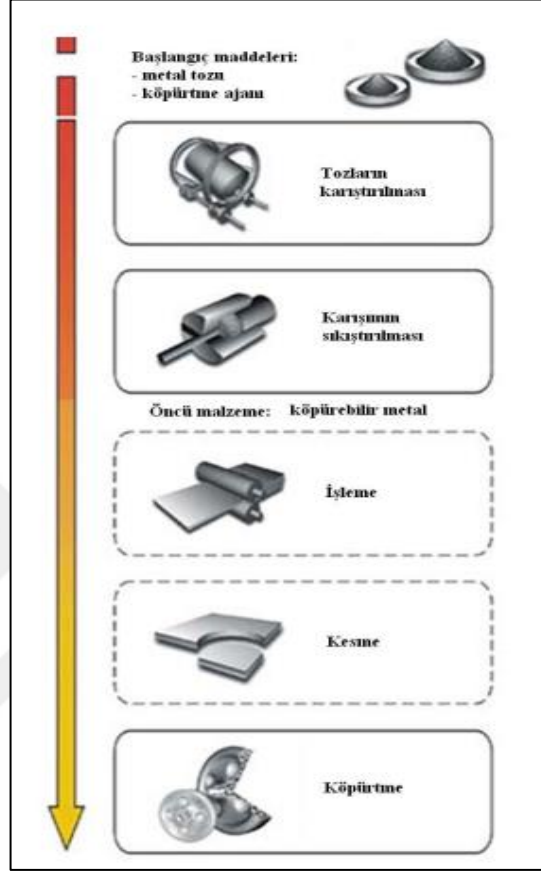
Şekil 1.3’ de görüldüğü üzere köpürtücü madde eklendikten sonra oluşan gaz kabarcıkları yüzeye hareket etmeye çalışmaktadır. Eriyiğin viskozitesine bağlı olarak sıvının içerisinde homojen şekilde dağılmış gözenekler oluşmaktadır. Böylece homojen köpük yapısı elde edilmektedir. Bu yöntemle üretilen köpüklerde kullanılan köpürtücü ajanın boyutuna bağlı olarak 0,5-5 mm arasında gözenek boyutunu elde edilmektedir. Köpürtücü ajan ilavesi yöntemi gaz üfleme yöntemine göre daha pahalı bir üretim yöntemidir. Soğutma hızı, köpürtme zamanı vb. etkenlerden dolayı köpüğün mekanik davranışları farklılıklar göstermektedir. Köpürtücü ajanların homojen şekilde sistemde dağılmasını sağlamak zordur [2].



Şekil 1.3. Sıvı metal içerisine köpürtücü madde ilavesi yöntemi [2, 19, 21]

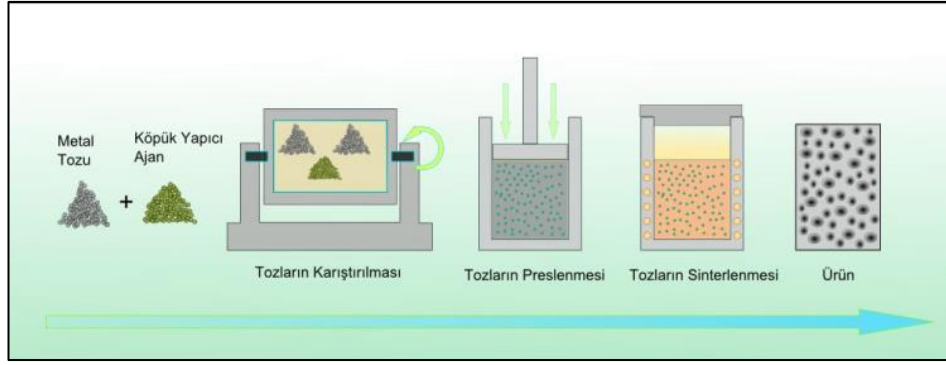
FORMGRIP yöntemi “Foaming of Reinforced Metal by Gas Release in Precursor” kısaltmasıdır. Bu yöntemde gözenek oluşmasını sağlamak için  $TiH_2$  parçacıkları kullanılmaktadır. Üretim yönteminde metal tozları, alaşım malzemeleri ve köpürtücü parçacıklar karıştırılır, yapı sıkıştırılır ve ısıl işlem öncesi kompakt yapı oluşmaktadır. Şekil 1.4’de kompakt olarak hazırlanmış metal tozlarının köpürtme işlemi

gösterilmektedir. Bu üretim tekniğinde kompakt yapı uygun parçalara ayrılarak farklı şekilde köpük üretilmesini sağlamaktadır. Gözeneklerin homojenliği ve boyutları kontrol edilebilmektedir [2, 5, 19, 21, 24].



Şekil 1.4. FORMGRIP üretim yöntemi [19, 23]

Toz metalürjisi metodu ile köpük üretimi seri imalatta Alulight ve Foaminal adlarıyla bilinen üretim tekniğidir. Bu yöntemde, toz metal ve köpürtücü maddelerin karıştırılması ile süreç başlamaktadır. Karıştırılan tozlara pres uygulanır ve yapıya ısıl işlem uygulanmaktadır. Bu ısıl işlem de ise kullanılan metal tozlarının ergime sıcaklıklarının üstüne çıkılır ve köpürtücü maddelerin yapısında sıcaklıktan dolayı gaz çıkışına izin verilmektedir. Oluşan gaz ile eriyik metalin içerisinde gözenekler oluşmaktadır. Şekil 1.5’da toz metalürjisi tekniği ile köpük üretimi gösterilmiştir [2, 25].



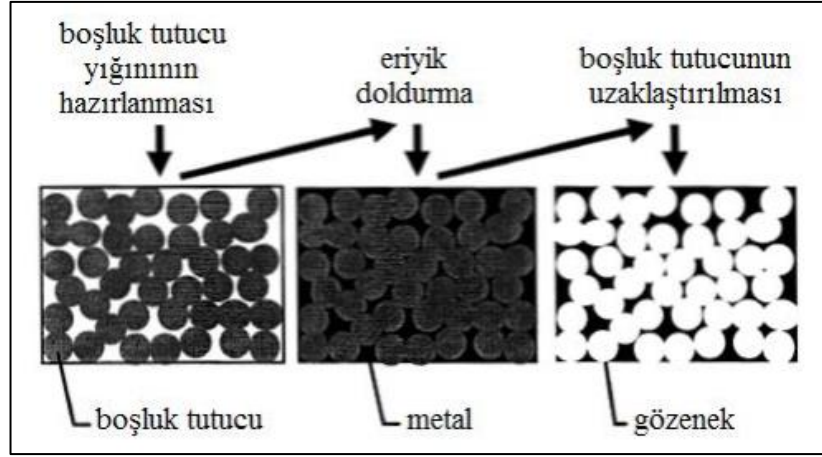
Şekil 1.5. Toz metalürjisi ile metalik köpük üretimi [19, 21, 23]

İşlem sırasında oluşan gazın sistemden çıkmasını engellemek için uygun basınç ve sıcaklık değerleri seçilmelidir. Ayrıca toz metal parçacıkları birbirine bağlayacak şekilde hazırlanmalıdır. Preslenen toz karışımı köpürtme işlemi için gereken zaman, uygulanacak sıcaklık ve yapının büyüklüğü önemlidir [26]. Kompozit metal köpükler üretilmektedir. Ancak kullanılan tozların maliyeti yüksek ve ön işlemler uygulanmalıdır.

### 1.1.2. Açık hücreli metal köpük üretim yöntemleri

Bu bölümde araştırma konumuz olan açık hücreli metalik köpüklerin üretim teknikleri incelenmektedir. Açık hücreli metalik köpüklerin üretiminde yaygın olarak yer tutucu, hassas döküm, içi boş tozların sinterlenmesi, elektrolitik kaplama, buhar biriktirme, püskürtmeli biçimlendirme ve çamur köpüklendirme vb. yöntemler kullanılmaktadır [19].

Yer tutucu yöntemi ile metalik köpük üretiminde sıvı metalin boşluk tutucu maddenin üzerine dökülmesi veya sıvı metal içerisine boşluk oluşturu maddelerin aktarılması ile yapılan üretim yöntemidir. Yer tutucu madde olarak pişirilmiş kil parçacıkları, çözünebilir tuzlar, kum tanecikleri, cam küreleri veya düşük sıcaklıklar için organik maddeler kullanılmaktadır. Şekil 1.6'da yer tutucu ile metalik köpük üretim yönteminin işlem adımları verilmiştir. Boşluk tutucu olarak kullanılan maddelerin ergime veya bozulma sıcaklıklarının sıvı metalden yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca köpürme işleminden sonra yapıdan kolayca uzaklaştırılmalıdır. Bu uzaklaştırma işlemi mekanik, ısıl işlem ve sıvı içerisinde çözündürme ile yapılabilmektedir. Tane boyutu ve yapısının ayarlanabilir olması gözeneklerin boşluk dağılımını ve kontrolünü kolaylaştırmaktadır [19, 27].

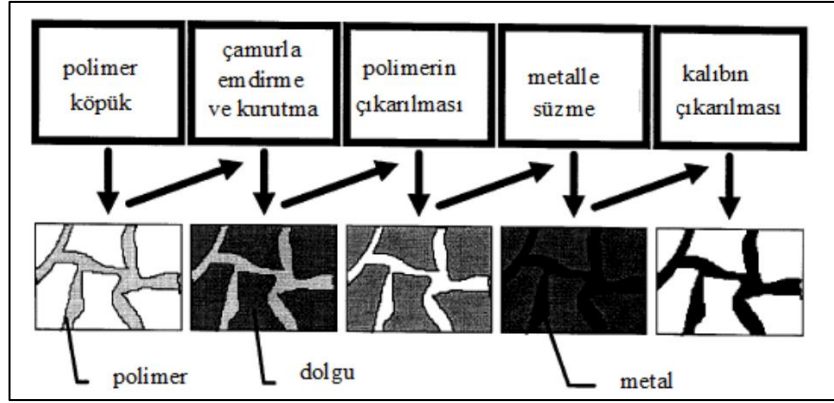


Şekil 1.6. Yer tutucu yöntemi ile metalik köpük üretimi [19, 23]

Yer tutucu ile metalik köpük üretim yöntemi ile erime sıcaklığı düşük metallere üretim yapılmaktadır. Alüminyum, magnezyum, çinko, kurşun, kalay gibi metal malzemelerden açık hücreli metalik köpükler üretilmektedir. Bu yöntem diğer üretim yöntemlerine göre maliyeti daha düşüktür. Gözenek boyutu yer tutucunun boyutuna bağlı olmaktadır. Bundan dolayı gözeneklerin boyutlarını kontrol etmek zordur. Gözeneklilik oranı %65 den daha yüksektir [2, 28, 29].

Polimer köpük ile hassas döküm tekniği, üretime başlamadan önce hazırlanan polimer kalıp üzerine sıvı metalin dökülmesi ile elde edilen metalik köpük üretim yöntemidir. Şekil 1.7’de görüldüğü üzere polimer malzemedan üretilen köpük iskeletine sıvı metal dökülür ve boşluklar doldurulur. Polimer köpük malzemenin yüzeyi ısıya dayanıklı mullit, fenolik reçine, kalsiyum karbonat, alçı vb. malzeme ile kaplanmaktadır. Doldurma işleminden sonra yapıya ısı işlem uygulanarak polimer köpük yapıdan uzaklaştırılır. Polimer köpüğün bıraktığı boşluklara sıvı metalin aktarılması ile metalik köpük üretilmektedir. İçerisinde bulunan ısıya dayanıklı inorganik maddeleri uzaklaştırmak için basınçlı su kullanılmaktadır [19], [30].

Bu teknik ile düşük erime sıcaklarına sahip alüminyum, alüminyum alaşımları, bakır vb. malzemelerden metalik köpük üretimi yapılabilmektedir. Bu yöntem ile yüksek kalitede, homojen gözenek yapısına sahip metalik köpükler üretilmektedir. Diğer açık hücreli köpük üretimlerine göre daha fazla gözenek sayısına sahip metalik köpükler üretilmektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise polimer köpüklerin yapıdan uzaklaştırılması işleminden sonra oluşturduğu boşluk boyutunun küçük olmasından dolayı sıvı metalin yapı içerisine sızdırılması zor olmaktadır [19].



Şekil 1.7. Polimer köpük ile hassas döküm tekniği [19, 24, 30]

Diğer açık hücreli metalik köpük üretiminde ise toz metal, boşluk tutucular ve bağlayıcı malzemeler birbirine karıştırılır ve metal enjeksiyon kalıplama tekniği ile üretim yapılmaktadır. Preslenen yarı mamul ürün içerisinde bulunan boşluk tutucular yapıdan uzaklaştırılmaktadır. Boşluk tutucu olarak polimetil metaakrilat, karbomit, amonyum bikarbonat vb. malzemeler kullanılabilir. Boşluk tutucu malzemeler uzaklaştırdıktan sonra metal tozları sinterleme işlemi uygulanır ve ısıl işlem sonucunda metalik köpük oluşmaktadır. Bu yöntem ile karmaşık şekilli yapılar üretilebilir ve işlevsel olarak daha yüksek özellikte metalik köpük üretilebilmektedir. Gözeneklerin dağılımı ve boyutunun kontrol etmek diğer yöntemlere göre zor olmakla birlikte gözenek değeri düşüktür [31–33].

## 1.2. Metalik Köpüklerin Boşluk Tutucu Yöntemi ile Üretimi

Boşluk tutucu yöntem (Space Holder Method) ile gözenekli yapı üretmek için esas malzeme toz veya sıvı formda olmalıdır. Boşluk tutucu madde olarak seramik, içi boş küreler, polimer parçacıklar, tuzlar, metal parçacıklar vb. malzemeler kullanılarak açık gözenekli yapılar üretilmektedir. Açık hücreli köpük üretiminde istenilen hücre boyutu, gözenek şekli, porozite değeri vb. özellikleri kontrol edilebilmektedir. Diğer üretim yöntemlerinden daha basit ve maliyeti düşük bir üretim tekniği olmaktadır. Boşluk tutucular işlem sırasında veya işlem sonunda yapılan işlemler ile köpük yapısından uzaklaştırılmaktadır. Mekanik titreşim, ısıl işlem, kimyasal içinde çözdürme veya su içerisinde çözdürme ile uzaklaştırma işlemi yapılabilmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde yer tutucu ile metalik köpük üretim yöntemi diğer üretim metotlarına göre daha çok ilgi çekmektedir. Bu yöntemin işlem adımları Şekil

1.8'de gösterilmektedir. Yöntemde toz formdaki esas malzeme ile yer tutucunun homojen şekilde karıştırılması ile başlamaktadır. Karıştırma işleminden sonra oda sıcaklığında karışıma pres uygulanmaktadır. Üretimi yapılacak köpüğün özelliklerine bağlı olarak pres işleminde ısı işlem uygulanabilir. Böylece metalik köpük yapı elde edilir. Bu işlemler sonucunda yer tutucu malzeme uzaklaştırılmalıdır. Uzaklaştırma işlemi yer tutucunun özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Son ısı işlemine geçilir. Isıl işlem farklı köpük yapılar için farklı sıcaklıklarda yapılmaktadır [32].

Boşluk tutucu yöntemi ile üretilmiş metalik köpüklerin üretim yöntemleri ve karakterizasyon çalışmaları aşağıda incelenmiştir.

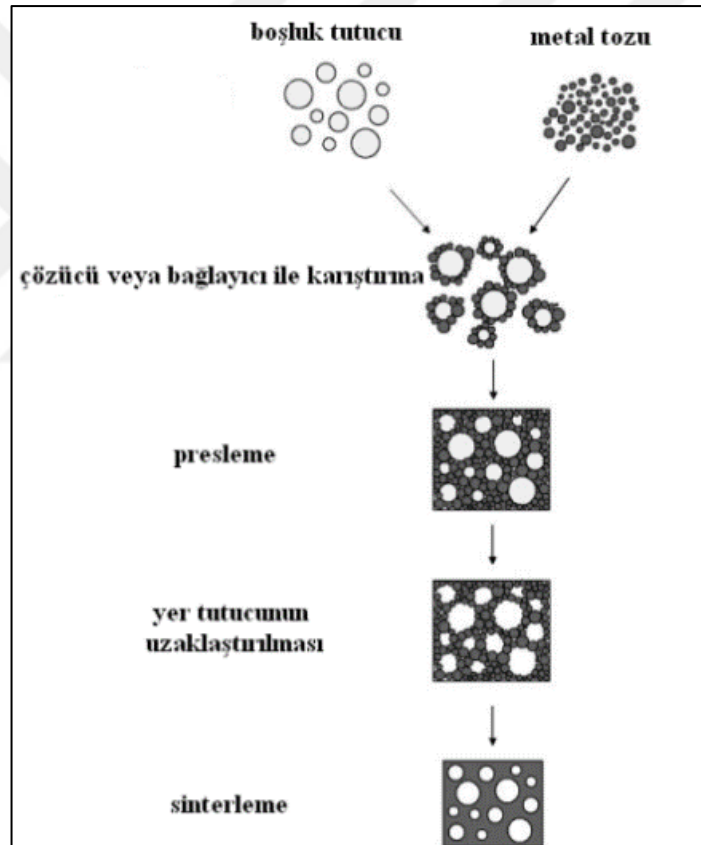
Smorygo ve arkadaşları titanyum tozu ve küresel karbamid granülleri kullanılarak kapalı gözenekli titanyum köpükler üretmişlerdir. Titanyum köpükler %65-85 arasında porozite değerlerine sahiptir. Toz metalürjisi ile üretilen köpüklere göre daha yüksek akma mukavemeti ve iyileştirilmiş modelden sapma veya hata oranı düşük kapalı hücreli titanyum köpükler üretilmiştir[34].

Mansourighasri ve arkadaşları açık hücreli titanyum köpükler üzerine yaptıkları çalışmada yer tutucu yöntemde kullanılan yer tutucuların sistemden uzaklaştırılması maliyetinin yüksek olduğunu bildirmiştir. Yer tutucu olarak nişasta kullanılmıştır. Kullanılan yer tutucu ile daha düzenli açık hücreli titanyum köpükler üretmeyi başarmışlardır. Yer tutucu yönteminde nişasta tozu kullanılması ile toz metal homojen karıştırılması ve gözenek boyutunun homojen olması sağlanmıştır. %64-79 gözenek oranına ve akma gerilimi 17-34 MPa arasında değişen metalik köpükler üretilmiştir [32].

Hassani ve arkadaşları açık hücreli alüminyum köpükleri boşluk tutucu yöntemine farklı bir bakış açısı getirmek maksadıyla hücre boyutu derecelendirilmiş köpükler üretilmişlerdir. Araştırmada yer tutucu olarak NaCl kullanılmıştır. Yaptıkları çalışmada derecelendirilmiş köpüklerin yoğunluk değerine göre üretilen köpüklere daha fazla enerji sönümlenme gerçekleştirmektedir. NaCl parçacıkları kullanılması yapıda düzenli hücre boyutu sağlanacağını ve hücre boyutu kontrol edilebilir açık hücreli alüminyum köpükler imal edilebileceğini bildirmişlerdir [35].



Shimizi ve arkadaşları yer tutucu yöntem ile yüksek gözenekli paslanmaz çelik köpükler üretmeyi başarmışlardır. Üretimde genişletilmiş polisiren parçacıkları kullanmışlardır. Toz halde kullanılan 316L metali polivinil alkol ile karıştırılarak karışım hazırlayıp içerisine polisiren eklenerek karışımı kalıplayıp kurumaya bırakmışlardır. Yapıdan polisitiren uzaklaştırıldıktan sonra sinterleme işlemi yapılmıştır. Sonuç olarak %90-97 oranında gözenekli, plato gerilimi 0.4-4 MPa arasında değişen ve 0.1-0.5 W/mK ısı iletkenliğine sahip paslanmaz çelik köpükler üretmişlerdir. Bu metal köpükler filtreler, termal izolatörler, amortisörler ve akustik izolatörler gibi birçok uygulama alanına sahiptir. Ancak bu yöntemde maliyeti azaltmak için üretim tekniğinin geliştirilmesi gerekmektedir [36].



Şekil 1.8. Boşluk tutucu yöntemi ile metalik köpük üretimi [19, 23]

Golabgir ve arkadaşları boşluk tutucu olarak NaCl kullanılarak Fe(Al) alaşımli köpük üretilmiştir. Çalışmalarında %65 oranına sahip açık hücreli alaşımli köpükler üretmiş olup üretimde oksidasyonun metalik köpük üzerinde etkisi incelemiştir. Al elementinin yapıdaki ağırlıkça oranına göre oksidasyon hızının en yavaş %2 olduğu belirtilmiştir [37].

Ruperez ve arkadaşları tantal elementinden metal köpüğün boşluk tutucu yöntemiyle üretilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmada yer tutucu madde olarak NaCl parçacıkları kullanmışlardır. Açık hücreli tantal köpükleri üretilmişlerdir. Çalışma sonucunda tantal köpüklerinin düşük maliyetli üretildiği bildirilmiştir. Ortopedik uygulamalarda kullanılabilir olacağı biyomedikal uygulama alanında gelişme sağlandığı bildirilmiştir. Ayrıca çalışmada NaCl parçacık boyutu ve yoğunluk değişimi ile köpüklerde gözenek boyutunun kontrol edilebileceği bildirilmiştir [38].

Adamek ve Jakubowicz tıbbi uygulamalarda kullanılmak amacıyla tantal köpükleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada yertutucu olarak maliyeti azaltmak için sükröz kristalleri kullanılmıştır. Gözenek oranı %50-60-70 oranında olan köpükler üretilmişlerdir. %50 gözenekliliğe sahip köpüklerin basınç dayanımının diğer gözenek oranlarına göre yüksek olduğunu ve tıbbi uygulamalar için düşük maliyetli köpüklerin üretilbileceği bildirmişlerdir [39].

Moradi ve arkadaşları nanokompozit yapıları Al-B<sub>4</sub>C köpükler üretiminde %0,5-1-1,5-2 ve 2,5 hacimsel oranla nano B<sub>4</sub>C boyutta karışımlar hazırlamışlardır. Yer tutucu olarak karbamid parçacıkları kullanmışlardır. Çalışma sonucunda en yüksek mekanik dayanım değeri hacimsel olarak %2 B<sub>4</sub>C numunede akma dayanımı 23.9 MPa, enerji sönümlenme kapasitesi 11.47 MJ/m<sup>3</sup> elde etmişler ve kompozit köpüklerinde yertutucu yöntemi ile yüksek gözenekli köpüklerin üretilbileceğini bildirmişlerdir [40].

Velasco ve arkadaşları ticari Ti<sub>2</sub>AlC tozu ile yertutucu madde olarak ham şeker kullanılarak metalik köpükler üretilmişlerdir. Üretim çalışmalarında hacimsel olarak %20-40-60-80 oranında yer tutucu madde kullanmışlardır. Çalışma sonucunda %40 ve daha düşük olan yer tutucu ile tahmin edilebilir gözenek yoğunluğu elde edilmişlerdir. Ayrıca açık ve kapalı gözenek oranı %40 oranında yer tutucuda istenen gözenek değerleri elde etmişlerdir [41].

Mondal ve arkadaşları açık hücreli paslanmaz çelik (316) köpükler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Yer tutucu olarak NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada sinterleme sıcaklığı 1100-1200 °C arasında olup ve sertleşme hızı faktörlerini incelemişlerdir. İncelemeleri sonucunda 1200 °C sinterlenen yapıların 1100 °C sıcaklığında sinterlenen köpüklere göre enerji sönümlenme değeri daha yüksektir.

Sinterleme sıcaklığının plato bölgesine etkisi incelendiğinde etkisinin olmadığını yer tutucunun şekline göre şekillenen hücre yapısına bağlı olduğunu bildirmişlerdir [42].

Noorsyakirah ve arkadaşları ısı iletkenliği alüminyum köpüklerden daha yüksek olan bakır köpükler ile çalışma yapmışlardır. Yer tutucu olarak potasyum karbonat tozları sisteme ağırlık oranında dahil edilmiştir. Sinterleme aşamasında yapıya farklı elementlerin karışmaması için işlem azot ortamında yapılmıştır. Sonuç olarak %52,985 gözeneklilik ve 520,46 W/mK ısı iletkenliğine sahip bakır köpükler elde etmişlerdir [43].

Aida ve arkadaşları yerçekimini kullanarak döküm tekniği ile açık hücreli alüminyum köpükler üretmişlerdir. Yer tutucu olarak NaCl parçacıkları kullanmışlardır. Çalışmalarında ağırlıkça %30 olan yertutucunun eklenmesi ile elde ettikleri yapının gözeneklerin düzenli olduğu bildirmişlerdir [44].

Shbeh ve Goodall çalışmalarında, biyomedikal uygulamalar için açık gözenekli Ti köpükler üretmek için, titanyum tozu ile iki farklı partikül şekline (küresel ve kübik) sahip potasyum klorür kullanmışlardır. Küresel KCl partikülleri ile hazırlanan hammaddelerin, kübik partiküller kullanılan köpüklere kıyasla daha düşük bir viskoziteye ve daha iyi akışkanlığa sahip olduğu bildirilmiştir. %61,25 gözenekliliğe sahip açık hücreli Ti köpükler üretmişlerdir. Tıp alanında açık hücreli Ti köpüklerin kullanılması amacıyla yertutucu tekniğiyle metalik köpüklerin üretilebileceği bildirilmiştir [45].

Xie ve arkadaşları titanyum köpükler üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında  $\text{CaCl}_2$  partikülleri boşluk tutucu olarak kullanmışlardır. Çalışma sonucunda %71-89 oranında gözeneklilik ile hücre boyutu 1-3 mm arasında değişen yapıda Ti köpükler elde etmişlerdir. Plato gerilimi 11,2-55,6 MJ/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Bu sonuçlara göre enerji sönmleme çalışmalarında kullanılabileceği bildirmişlerdir [46].

### **1.3. Metalik Köpüklerin Yapısal ve İşlevsel Özellikleri**

Köpükler ve diğer gözenekli yapılar çok farklı mekanik ve fiziksel özellikler sergilemektedir. Örneğin düşük ağırlıklı yapıların yüksek dayanım, yüksek ısı iletim veya yüksek enerji emilimi bunlardan bazılarıdır. Doğada gözenekli yapılar sıkça

rastlanmaktadır. Bunlara örnek olarak ağaç, mercan, kemik veya süngerler verilebilmektedir [19].

Metalik köpük terimini doğru tanımlamak için hücreli metal, gözenekli metal ve metal sünger terimlerini de tanımlamamız gerekmektedir. Hücreli metal, içerisinde birçok gaz boşluğu bulunan metal yapıları genel ifade etme şeklidir. Gözenekli metaller, iki metal levha arasında yüksek oranda boşluktan oluşan metal, seramik veya polimer malzemelerden oluşur. Metalik faz, gaz fazı içeren kapalı hücrelerle bölünmüş yapılardır. Metal sünger, boşlukları birbiri ile bağlantılı olan hücreli yapılardır.

Metalik köpük, gözenekli metal gruplarının alt üyesidir. Hücre şekilleri, üretim veya kullanım alanlarına göre değişen hücrelerden meydana gelirler. Böylece gözenekli olarak üretilen her yapı metalik köpük olarak tanımlanmamaktadır [19, 23].

Metalik köpüklerin özelliklerini üç temel özellik belirlemektedir. Bunlar metalik köpüğün esas malzemesinin özellikleri, hücre topolojisi ve şeklidir. Metalik köpüklerin mekanik davranışlarını gözenek özellikleri belirlemektedir. Bundan dolayı gözenek dağılımı, miktarı, boyutu ve esas malzeme özelliklerini belirlemek yapının karakterizasyonunda ilk adım olarak nitelendirilebilir [3, 19].

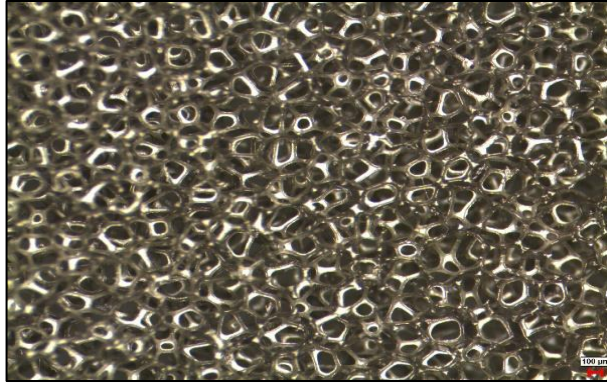
Açık hücreli metalik yapılarda hücreleri birbirinden ayıran yüzeyler bulunmamaktadır. Yapıda hücre duvarları bulunmaktadır. Hücreler arası geçiş yapılabilmektedir. Açık hücreli köpüklerin önemli özelliği yüksek gaz veya sıvı geçirgenliği ve ısı geçişi özellikleri bulunmasıdır. Mekanik özellikleri kapalı hücreli köpüklere göre düşük değerlere sahip olduklarından fonksiyonel uygulamalarda kullanılmaktadır. Genellikle düşük yoğunluğa sahip olan bu köpükler genellikle akustik, darbe sönümleme, filtre ve ısı değiştiricileri olarak kullanım alanlarına sahiptirler [47–50]. Şekil 1.10'da açık hücreli nikel köpüğün mikroskop altında görüntüsü verilmiştir.

Kapalı hücreli metalik köpüklerde, hücreleri birbirinden ayıran hücre duvarları ve hücre yüzeyleri bulunmaktadır. Böylece hücreler arası bağlantı bulunmamaktadır. Hücrelerin içerisinde hapsedilmiş gaz bulunmaktadır [48]. Kapalı hücreli metalik köpükler içerisinde hücre duvarları bulunmaktadır. Böylece malzeme içerisinde sınırlı ve birbirinden bağımsız gaz fazı bulunmaktadır. Katı fazı ise hücre duvarları ile birleşen kırımlardan meydana gelmektedir. Kırımlar ve hücre duvarları birleşerek

metalik köpüğün katı gövdesini oluşturmaktadır. Kapalı hücreli metalik köpükler açık hücreli metalik köpüklere göre daha yüksek darbe ve ses sönümlenme değerlerine sahip olduğu literatürlerde bildirilmiştir. Genel olarak yapısal amaçlar için kullanılmaktadır. Bunlar yüksek mukavemet gerektiren, darbe sönümlenme uygulamalarında kullanılabilir. Genellikle yüksek yoğunluğa sahip olan kapalı hücreli köpükler yüksek dayanım özellikleri gösterirler [49, 50]. Şekil 1.11’de kapalı hücreli metalik köpük gösterilmiştir.

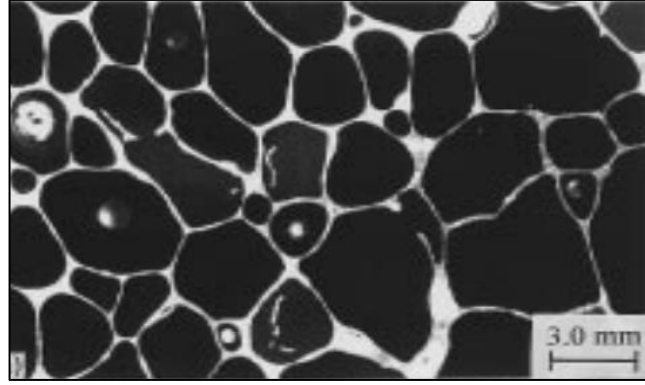
#### 1.4. Metalik Köpüklerin Mekanik Özellikleri

Metalik köpüklerin mekanik özellikleri, sahip oldukları hücre morfolojisi, hücreyi oluşturan esas malzemeye ve göreceli yoğunluk değerlerine bağlı olmaktadır. Göreceli yoğunluk, köpük yoğunluğunun hücre duvarını oluşturan malzeme yoğunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır. Köpüklerin özellikleri köpük yapısı (hücre boyutu veya şekli), izotropisi ve kusurları (kıvrımlı, buruşuk veya kırık hücre duvarları) ile farklılıklar göstermektedir. Bu özelliklerinden dolayı metalik köpüklerin mekanik yaklaşımları quasi-static kuvvet altında sıra dışı deformasyon davranışları sergilemektedir [23, 51].



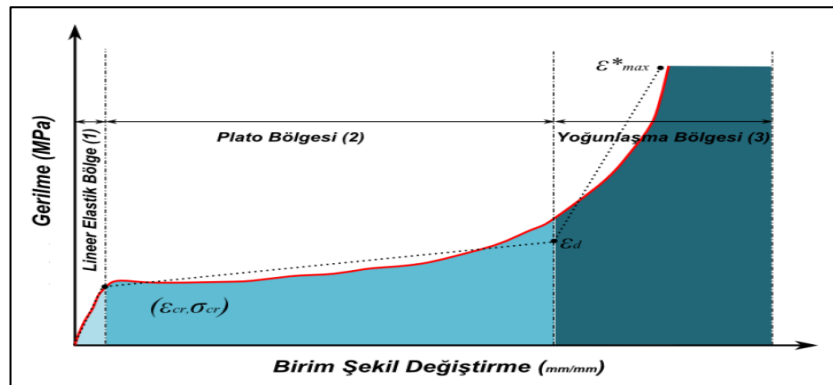
Şekil 1.10. Açık hücreli nikel köpük

Metalik köpükleri özel yapan basma etkisi altında göstermiş oldukları non-lineer deformasyon davranışları farklılık oluşturmaktadır. Quasi-static yük altında metalik köpükler üç farklı bölgede deformasyon etkisi gösterir. Bu üç bölge sırasıyla; lineer elastik bölge, çökme (plato) bölgesi ve yoğunlaşma bölgesidir.



Şekil 1.11. Kapalı hücreli alüminyum köpük [51]

Birinci bölge “lineer elastik bölge” olarak adlandırılmaktadır ve bu bölgede metalik köpükler elastik olarak deforme olmaktadır. Bu bölge hücre duvarlarının bükülmesi ile sona erer. İkinci bölgede, elastik bölgeden deforme olmadan çıkan köpükler diğer kısımlara katlanarak sıçramasıyla ilerler. Bu bölgede gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi yatay bir davranış sergilemektedir. Bu sergilenen eğriden dolayı “plato bölgesi” olarak adlandırılmaktadır. Kritik bir seviyede hücre duvarlarının birbirine temas etmesi ile deformasyon davranışı ile yoğunlaşma bölgesi başlamaktadır. Hücre boşluklarının kaybolması ile gerilme davranışı hücre duvarını oluşturan esas malzeme seviyesine yaklaştırmaya başlar. Bu bölgede gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde sert bir çıkış görülmektedir [52–55]. Şekil 1.12’de örnek bir gerilme-şekil değiştirme grafiği verilmiştir [55].



Şekil 1.12. Metalik köpükler de gerilme-şekil değiştirme diyagramı [55]

Metalik köpüklerin basma gerilmesi yoğunluğa ve kullanılan esas malzemenin akma gerilmesine bağlı olarak değişmektedir. Köpük yapıların Young modülü (E), kayma modülü (G) ve Poisson oranı ( $\nu$ ) Denklem (1.1), (1.2) ve (1.3)’deki gibi;

$$E = \alpha_2 E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^n \quad (1.1)$$

$$G = \frac{3}{8} \alpha_2 G_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^n \quad (1.2)$$

$$v = 0.3 \quad (1.3)$$

ifade edilmektedir [2, 51].  $E_s$  ve  $G_s$  köpüğü oluşturan esas malzemenin Young ve kayma modülüdür.  $\alpha_2$  0,1-4 arasında,  $n$  1,8-2,2 arasında köpük yapısına bağlı olarak bir değer almaktadır.

Açık hücreli köpükler Şekil 1.12’de gösterilen plato bölgesi kapalı hücreli köpüklere göre daha uzun süre devam etmektedir. Plato gerilmesi  $\sigma_{pl}$  ve yoğunlaşma bölgesindeki birim şekil değiştirme Denklem (1.4) ve (1.5)’de verilmiştir.

$$\sigma_{pl} = (0.25 \dots 0.35) \sigma_{ys} \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^m \quad (1.4)$$

$$\varepsilon_D = \left(1 - \alpha_1 \frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (1.5)$$

Bu denklemlerde  $m$  değeri 1,5-2 arasında,  $\alpha_1$  değeri 1,4-2 arasında alınmalıdır. Bu özellikler köpüklerin enerji absorpsiyonu uygulamalarında önemlidir [23, 51].

Metalik köpüklere enerji sönümlenme uygulamalarında sıkça karşılaşılmaktadır. Metalik köpüklerde sönümlenme enerjisi plato bölgesinin altında kalan alanın yoğunlaşma bölgesine kadar olan kısmı olarak değerlendirilmektedir. Enerji sönümlenme değeri Denklem (1.6)’da;

$$U = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma d\varepsilon \quad (1.6)$$

şeklinde verilmiştir.

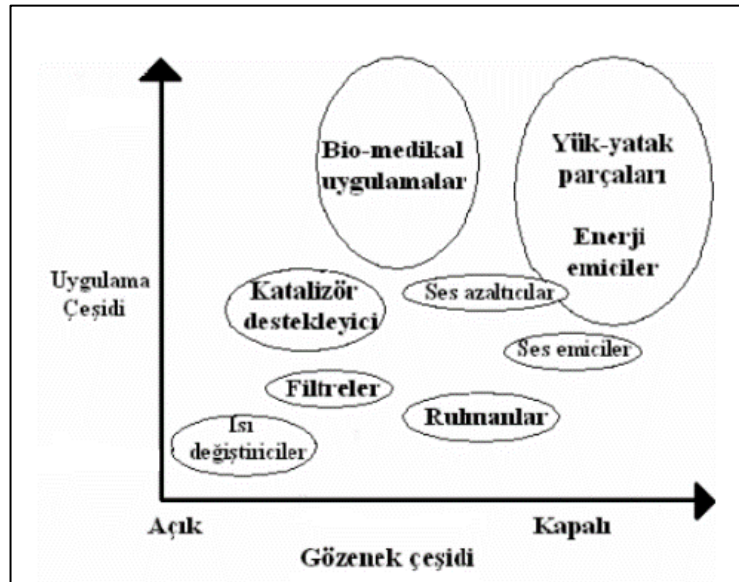
### 1.5. Metalik Köpüklerin Uygulama Alanları

Metalik köpükler hafiflik, geçirgenlik, yüksek enerji emme kabiliyeti, ısı veya elektriksel iletkenlik gibi birçok iyi özelliğinden dolayı farklı uygulama alanlarında karşılaşılmaktadır. Metalik köpüklerin kullanım alanları hücre yapısının açık veya

kapalı olması durumuna göre değişmektedir. Metalik köpüklerin kullanım alanlarını, hücre biçimi ve uygulama alanlarına göre yapısal ve fonksiyonel olarak sınıflandırabilmektedir [19, 23].

Isı değiştiricisi olarak fonksiyonel kullanımlarda istenen önemli özellik yüksek termal iletkenliğe sahip olmaktır. Açık hücreli alüminyum köpüklerin yüzey alanlarının büyük olması termal iletkenlik değerinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı ısı değiştiricisi olarak kullanılabilir. Şekil 1.13’de gözenek türüne göre uygulama değişkenliği gösterilmiştir. Bu malzemeler; endüstriyel fırınlarda, hava soğutmalı kondansatörlerde, kimyasal elektronik reaktörlerde ve entegre devrelerinde kullanılmaktadır [22]. Şekil 1.14’te metalik köpük matrisi içine gömülmüş tüplerden oluşturulan yüksek sıcaklık ısı değiştiricileri gösterilmiştir.

Sıvı içerisinde dağılmış katı parçacıkları ayırmak veya gaz içerisinde dağılmış katı ya da sıvı parçacıkları ayırmak için filtreler kullanılmaktadır. Açık hücreli metalik köpükler; yüksek sıvı/gaz geçirgenliği, korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı filtre ve ayırıcı olarak kullanılmaktadır. Açık hücreli metalik köpükler sıvı akışını sağlayabildikleri için suda çözünmüş istenmeyen iyonların konsantrasyonunu azaltmak amacıyla su arıtıcılarında kullanılmaktadırlar [5, 23].



Şekil 1.13 Metalik köpüklerin kullanım alanları [5, 19]

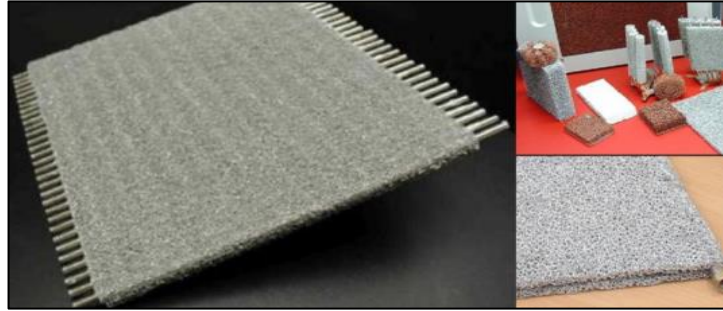
Hafif ve sağlam alüminyum sandviç köpük yapılar araçların ağırlıklarını azaltmak için yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. 3 boyutlu sandviç paneller arabalardaki



orijinal elik panellerden yaklaşık olarak 8 kat daha sağlam olup, %25 daha hafif olmaktadır [18].

Otomotiv endüstrisi için ses emilimi ve yalıtımı önemli bir araştırma konusu olarak yer almaktadır. Alüminyum köpükler iyi ses emilimi özelliğinden dolayı otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Ayrıca inşaat alanında bir viyadüğün altına levha halinde montajı yapılan Alporas metal köpük ile viyadük altından geçen araçların seslerini emerek gürültü kirliliğini azaltmaktadır [56].

Hafif-ağırlıklı yapıların kullanımı otomotiv sektöründe olduğu gibi hava-uzay endüstrisinde sıkça metalik köpük uygulamalarına yer verilmiştir. Uzay ve havacılık endüstrisi de metal köpük sandviç panellerini yüksek performansı ve düşük maliyetinden dolayı kullanmaktadır. Boeing firması alüminyum köpük çekirdekli alüminyum sandviç panelleri ile helikopter kuyruk çubuklarında kullanım yolları geliştirmiştir. Hava taşıtları üreticileri alüminyum köpükleri taşıt parçalarında kullanım alanını genişletmek için çalışmalarına önem vermişlerdir. Uzay endüstrisi de alüminyum köpüklerin uzay araçları iniş takımlarında, enerji sönümlenme malzemesi olarak kullanılmaktadır [18].



Şekil 1.14 Metalik köpük ısı değiştiricileri [5]

## 2.YAKIT HÜCRELERİ

Yakıt hücreleri, yakıt olarak hidrojen kullanılarak enerji üretilen ve son yıllarda üzerinde çalışmaların artarak devam ettiği alternatif enerji kaynağıdır. Yakıt hücrelerinin bulunduğu yüzyılda ve gelecek yüzyıl ekonomisinde önemli bir rol oynaması beklenmektedir [57, 58]. Yakıt hücreleri ile ilgili çalışmalar 19. yüzyılın başlarına dayanmaktadır. 1839 yılında Sir William Grove tarafından seyreltik sülfürik asit çözeltisine daldırılmış iki platin elektrot ile oluşturduğu bir sistem ile hidrojen ve oksijenden elektrik üretmesiyle başlayan süreç, 1930'lu yıllarda kimya mühendisi Francis Bacon'un çalışmaları ile tekrar ivme kazanmıştır. Bacon 1959 yılında, 5 kW'lık pratik bir sistem kurmayı başarmıştır. 1950'lerin sonlarında NASA, insanlı uzay araştırmaları için yakıt hücrelerini kullanmaya karar vermiştir. NASA, geliştirdiği yakıt hücresi ile 1968 yılındaki Ay'a ilk insanlı uçuşta başarı sağlanmıştır. 1990'lı yıllar yakıt hücresi teknolojisinde bir dönüm noktası olarak atfedilmektedir. 1960'lı yıllarda bilinmesine rağmen iyi sonuçlar alınamayan yakıt hücreleri komponentlerinden dolayı 1990'lu yıllardan sonra çalışılan yakıt hücreleri diğer hücrelerin önüne geçmiştir. Günümüzde ise yakıt hücreleri; kara araçları, güç santralleri, elektronik cihazlar, uzay çalışmaları ve askeri uygulamalar başta olmak üzere pek çok sistemde kullanılmaktadır [59].

Yakıt hücreleri, kimyasal enerjiyi elektrokimyasal tepkimeler ile elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Ancak yakıt hücreleri sıradan pillerde olduğu gibi depolanan kimyasal enerjiyi değil, çalışma esnasında beslenen yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine çevirmektedir [60]. Yakıt hücrelerinin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi verilebilir [57, 59, 60];

Avantajları;

- Yakıt hücreleri sessiz çalışır, gürültü kirliliğine neden olmamaktadır.
- Konvansiyonel güç üretim proseslerine göre çevresel kirletici emisyon oranları düşüktür, çevre kirliliğine neden olmamaktadır.

- Modüler bir yapıya sahip olup montaj süresi kısadır. Uzun süre aktif çalışabilmektedir.
- Çalışma verimi fosil yakıt ile enerji üretimine göre daha yüksek verime sahiptir.
- Yakıt hücreleri döngüye sahip olduklarından dolayı süreç devam eder ve şarj edilmeye ihtiyaç duyulmamaktadır.
- Farklı yakıt kaynakları kullanılarak çalıştırılabilir.
- Güvenli bir sistemdir. Gelişme potansiyeli oldukça yüksek enerji üretim sistemidir.

Dezavantajları;

- Yakıt pilleri iyi iletkenlik, korozyon dayanımı vb. özelliklere sahip malzemelere gereksinim duymaktadır. Bu özelliğinden dolayı yakıt pillerinin kurulum maliyeti yüksektir.
- Yakıt pillerinin güç çıkışı doğru akımdır. Alternatif akıma çevirmek için invertörlere ihtiyaç duyulmaktadır.
- Yakıt pillerin sistemlere entegrasyon maliyeti yüksektir.
- Yakıt pillerinden elde edilen enerjiyi depolama sistemleri geliştirilmesi gereken proseslerden biridir.
- Aktivasyon ve ohmik kayıplar, yakıt geçişi ve içsel akımlardan kaynaklanan ani voltaj düşüşleri süreci etkileyen problemler arasında yer almaktadır [61].

## **2.1. Yakıt Pilleri Bileşenleri**

Yakıt pilleri temel olarak 5 ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler ise elektrolitik membran, anot ve katot gaz difüzyon tabakası, anot ve katot akış dağıtıcılarından meydana gelmektedir.

### **2.1.1. Gaz difüzyon tabakası**

Anot ve katot gaz difüzyon tabakası olmak üzere yakıt hücresi içerisinde iki farklı difüzyon tabakası bulunmaktadır. Gaz difüzyon tabakası doğrudan elektrokimyasal reaksiyona katılmamakta, reaktifin elektrolit bölgesine taşınmasına izin verirken, reaksiyona katılacak ürünlerinin akış dağıtıcı plakaya taşınmasını sağlayan hücre içerisinden uzaklaştırılmasını gerçekleştiren yakıt hücresi bileşenidir [62–64]. Gaz difüzyon tabakasının görevleri;

1.Reaktif geçirgenliği: Gaz difüzyon tabakasının katalizör tabakasına kesintisiz bir şekilde reaktifin geçmesini sağlayacak gözenek büyüklüğüne sahip olmalıdır. Katalizör bölgesine kesintisiz bir şekilde reaktifin taşınması hücre performansının elektrolit membrana bağlı meydana gelmesini sağlaması gerekmektedir.

2.Tepkime ürününün geçirgenliği: Tepkime sonucu oluşan ürünlerin hücre içerisinden uzaklaştırılması ve katalizör bölgesinde tıkanıklık oluşturmaması gerekmektedir. Tıkanıklık oluşması halinde tepkimenin verimini düşürmekle birlikte hücre performansında kademeli bir azalma meydana getirmektedir.

3.Elektriksel iletkenlik: Gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası ile akış dağıtıcı plaka arasında yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olmalıdır. Hücre içerisindeki ohmik kayıplarından dolayı hücre performansını düşürecek etkilere sahip olmamalıdır.

4.Isıl iletkenlik: Yakıt hücresi içerisinde gerçekleşen ekzotermik bir tepkime meydana gelmektedir. Yakıt hücresinin sabit çalışma sıcaklıklarında gaz difüzyon tabakasının ısı iletkenlik değerinin yüksek olması gerekmektedir.

5.Mekanik dayanım: Elektrolitin zarar görmemesi için akış dağıtıcı ile elektrolit membran arasında mekanik destek görevi sağlamalıdır [63, 65–71].

### **2.1.2. Akış dağıtıcı plaka**

Yakıt hücresi içerisinde yakıtın ve reaktif gazın akışını yönlendiren, hücre yığımında hücreleri fiziksel olarak birbirlerinden ayırırken elektriksel olarak birbirine bağlayan, hücre yığımına mekanik destek sağlayan, yakıt hücresi katalizör bölgesinde tepkime sonucu oluşan ıyıyı uzaklaştıran, süreç sonunda üretilen akımı toplayan kompakt bir yapılarıdır. Akış dağıtıcı plakaların rolü reaktifler için akış alanı sağlamak, akış esnasında basıncı düşürmek, reaktiflerin katalizör bölgesine homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak, reaksiyon ürünlerini hücre içerisinden uzaklaştırmaktır. İyi elektriksel iletkenliğe sahip ve düşük maliyetli olması gerekmektedir [58, 72, 73].

Akış dağıtıcı plaka olarak genellikle karbon esaslı grafit malzemeler uzun yıllardır kullanılmaktadır. Grafit plaka, akışın gerçekleşmesi için paralel, serpantin, paralel serpantin ve benzeri akış kanalları oluşturularak akış dağıtıcı plaka olarak

kullanılmaktadır. Grafit mükemmel korozyon dirence ve elektriksel iletkenliğe sahip bir malzeme olmasının yanı sıra oldukça kırılğan ve maliyetli bir malzemedir.

Son yıllarda kanallar açılmış veya gözenekli yapıdaki kompozit veya metal esaslı malzemeler akış dağıtıcı olarak kullanılmaktadır. Akış dağıtıcı plaka için metal esaslı malzemeler iyi mekanik özellikler, elektriksel ve termal özellikleri, imalat kolaylığı, süneklik ve düşük maliyetlerinden dolayı dikkat çekmektedir [64, 74, 75].

### **2.1.3. Elektrolit**

Yakıt hücrelerini anot ve katot bölgelerini birbirinden ayıran, iyonik iletkenliğe sahip yapısal elemanlara elektrolit denir. Elektrolitin yerine getirmesi gereken özellikler;

- Kimyasal tepkime sonucu oluşan iyonları minimum kayıpla anottan katoda iletebilmesi için iyon iletkenliği yüksek olmalıdır.
- Anot ve katot yapısal elemanlarını elektriksel olarak birbirinden ayırırken iyonik olarak birbirine bağlamalıdır.
- Anot ve katot reaktiflerinin birbirine karışmasını önlemelidir [76, 77].

### **2.2. Yakıt Pili Çeşitleri**

Gelişmekte olan yakıt pili teknolojisinde farklı yakıt pili türleri vardır. Bunlar kullandığı yakıt ve oksitleyici türüne, yakıtın sistemin dışında veya içinde işlenişi, elektrolit tipi, çalışma sıcaklığı, yakıtın besleme biçimine göre çok farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Yakıt pillerinin en yaygın sınıflandırma şekli ise hücrenin içinde kullanılan elektrolitin çeşidine göre sınıflandırmaktır. Bu sınıflandırmaya göre 6 çeşit yakıt pili bulunmaktadır. Bunlar polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP), doğrudan metanol yakıt pili (DMYP), alkali yakıt pili (AYP), fosforik asit yakıt pili (FAYP), erimiş karbonat yakıt pili (EKYP) ve katı oksitli yakıt pili (KOYP) olmaktadır.

Tablo 2.1’de yakıt pilli türüne göre elektroliti ve işletme sıcaklığı, Tablo 2.2’de ise yakıt pili türüne göre anotta ve katotta gerçekleşen tepkimeler verilmektedir. Yakıt pillerinde oksitleyici olarak saf O<sub>2</sub> veya hava kullanılmaktadır. Yakıt ile oksijen arasında indirgenme yükseltgenme tepkimesi meydana gelirken elektrik akımı ve ısı oluşmaktadır.

Tablo 2.1. Yakıt pili türüne göre elektroliti ve işletme sıcaklığı

Yakıt Pili Türü	Elektrolit	İşletme Sıcaklığı (°C)
PEMYP	Katı Polimer Membran	80
DMYP	Doğrudan Polimer Membran	80
AYP	Potasyum Hidroksit	60-250
FAYP	Fosforik Asit	200
EKYP	Alkali Metal Karbonat	600-800
KOYP	Seramik	800-1000

Tablo 2.2. Yakıt pili türüne göre anot ve katotta meydana gelen tepkimeler

Yakıt pili	Anot reaksiyonu	Katot reaksiyonu
AYP	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e$	$1/2O_2 + H_2O + 2e \rightarrow 2(OH)^-$
PEYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O$
FAYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O$
EKYP	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e \rightarrow CO_3^{2-}$
KOYP	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e$	$1/2O_2 + 2e \rightarrow O^{2-}$
DMYP	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e$	$6H^+ + 6e + O_2 \rightarrow 3H_2O$

### 2.2.1. Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP)

Polimer elektrolit membranlı yakıt pili, proton değişim membranlı yakıt pili olarak da bilinmektedir. Son yıllarda en hızlı gelişim gösteren, piyasada en yaygın olarak kullanılan yakıt pili çeşididir. PEMYP'nin diğer yakıt pillerine göre daha fazla tercih edilmesinin başlıca nedenleri yüksek dayanım, %50-70 verimlilik, yüksek maliyet etkinliği, diğer yakıt pili türlerine göre düşük hacim ve ağırlık avantajlarına sahip olmasıdır. 50-100 °C arası çalışma sıcaklıklarına sahip PEMYP hücre güç çıkışını hızla değiştirilebilmesine olanak sağlaması ve yüksek güç yoğunluğundan dolayı otomotiv ve havacılık endüstrisinde yoğun ilgi görmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı, otomotiv sektörü için PEMYP'nin içten yanmalı motorların yerini almaya yönelik potansiyel aday olabileceğini duyurmuştur. Anot tarafında kimyasal reaksiyon sonucu  $H^+$  iyonları oluşmaktadır. Hidrojen iyonu iletkenliği oldukça yüksek, elektriksel olarak yalıtkan bir malzeme olan polimer elektrolit vasıtası ile katoda transfer edilir. Katotta kimyasal reaksiyon sonucu oluşan  $O^{2-}$  ile birleşerek su ve elektrik enerjisi oluşturmaktadır [8, 9, 57].

### 2.2.2. Alkali yakıt pili (AYP)

Sıvı alkali KOH çözeltisini elektrolit olarak kullanan yakıt pili türüdür. Alkali ortamlar da asidik ortamlara göre indirgeme ve oksidasyon tepkimeleri daha hızlı meydana

gelmektedir. Alkali KOH sağladığı yüksek tepkime kinetiği ve yüksek iyonik iletkenliği ile yüksek hücre performansı sağlamaktadır. AYP maliyeti düşük katalizörlerin kullanıldığı bir yakıt pili türüdür. Hücre ve elektrot maliyeti diğer yakıt hücrelerine göre daha düşüktür. AYP'nin yakıt ve oksidant içerisinde CO<sub>2</sub> var olması sistemi olumsuz etkilemektedir. Bu nedenden dolayı sistem yüksek saflıktaki gazlarla beslenmek zorundadır. Ayrıca bu yakıt pili türünde sıvı elektrolit sebebiyle sızdırmazlık problemleri görülmektedir. Bu dezavantajlar doğrultusunda günümüzde AYP başarılı bir yakıt pili türü olarak değerlendirilmemektedir [8, 9, 78, 79].

AYP'nin çalışma prensibi katoda beslenen oksijen, harici devreden iletilen elektronlarla ve elektrolit içerisindeki su ile tepkimeye girerek oluşturduğu hidroksil iyonları (OH<sup>-</sup>), alkali sıvı elektrolit vasıtası ile anoda iletilir. Anoda iletilen OH<sup>-</sup> iyonları su ve elektron üretmek için hidrojenle reaksiyona girmektedir. Anot reaksiyonu sonucu oluşan elektronlar, oksijen ve suyla reaksiyona girerek hidroksil üretmek için harici bir devreden geçirilerek katoda gönderilmektedir [80].

### **2.2.3. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)**

Ortalama 600 °C ve daha yüksek işletme sıcaklıklarında çalışan yüksek çalışma sıcaklıklarına sahip bir yakıt pili çeşididir. Sabit taşınmaz uygulamalara yönelik yüksek verimliliklere sahip yakıt pili çeşididir. Bu yakıt pillerinde alkali metallerin erimiş tuzları sıvı elektrolit olarak kullanılmaktadır. Bu elektrolitler oldukça yüksek iyonik iletkenliğe sahip elektrolit türüdür. Bu yakıt hücresinin yüksek çalışma sıcaklıkları tepkime kinetiğini ve hızını artırmasından dolayı pahalı katalizörlerin kullanılması gerekmektedir. EKYP de anot reaksiyonu için yakıt olarak hidrojen, karbon monoksit gazı (CO), doğal gaz, kömür ve çöp gazları kullanılırken, katot tepkimesi için oksijen kullanılmaktadır.

Bu yakıt pillerinde kimyasal tepkimeler sonucu yüksek miktarda atık ısı elde edilmektedir. Elde edilen atık ısı geri kazandırılarak EKYP'nin %60'luk yakıt pili verimi %80'lere kadar çıkarılabilmektedir. EKYP atık ısının kazandırılması ve ucuz katalizörlerin kullanılabilirliği gibi avantajlarının yanında uzun koşullandırma süresi ve yüksek çalışma sıcaklığının hücre ömrünü kısaltıcı etkileri gibi dezavantajlarına sahip yakıt pili çeşididir [8, 79, 80].

#### **2.2.4. Katı oksit yakıt pili (KOYP)**

Yakıt olarak hidrojen, hidrokarbonlar, doğal gaz ve bio-yakıtlar kullanılmaktadır. Yüksek işletme sıcaklıklarında çalışan (600-1000 °C) bir yakıt pili türüdür. Yüksek işletme sıcaklıklarına sahip yakıt pilleri arasında sahip olduğu %60-75 arasındaki hücre verimleri ilgileri üzerinde toplamaktadır. EKYP'lerinde olduğu gibi KOYP'lerinde tepkime sonucunda atık ısının geri kazandıran sistemler ile geri kazanıldığı taktirde %80'lik hücre verimlerine ulaşılabilir. Yüksek işletme sıcaklıklarına uygun hücre performansı ve ömrünü kısıtlamayacak hücre bileşenlerinin malzemeleri seçilmesi bu yakıt pili türü için son derece önemli bir araştırma konusu olmaktadır. Hücre maliyeti, üretim sürecinde çalışma koşullarını sağlayacak malzemelerin seçilmesine bağlı olarak yüksek değerlere sahiptir. KOYP'nin dezavantajları yüksek maliyet, yüksek işletme sıcaklığı, kükürt zehirlenmesi ve korozyondan dolayı malzeme seçiminde zorluklar yaşanmaktadır [8, 79, 81, 82].

#### **2.2.5. Formik asit yakıt pili (FAYP)**

FAYP'lerinde sıvı fazdaki formik asit ( $H_3PO_4$ ) elektrolit kullanılmaktadır. Formik asit termal özellikleri, elektrokimyasal kararlılığı ve düşük uçuculuğu nedeni ile yaygın olarak kullanılan inorganik bir asit çeşididir. Bu yakıt pili üründe yakıt olarak LPG, doğal gaz ve kömür gazları kullanılmaktadır. Yeni nesil yakıt pillerinin ilk uygulaması olması ve ticari olarak kullanılan ilk yakıt pili türü olması nedeni ile FAYP yakıt pili tarihinde ayrı bir değere sahiptir.

FAYP, 175-200 °C sıcaklıkları arasında çalışma sıcaklıklarına sahiptir. Geri kazanım (kojenerasyon) uygulanarak %37-42 arasındaki hücre verimi, %85'in üzerine çıkarılabilmektedir. FAYP diğer yakıt pili türlerine göre daha yüksek katalizör yükleme miktarlarına ihtiyaç duymaları nedeni ile hücre maliyeti yüksektir. FAYP hacim ve ağırlık performansına göre diğer yakıt pillerine göre daha düşük güç yoğunluğuna sahiptir [9, 83].

Modern yakıt pillerinin ilk örneği olan FAYP ticarileşen ilk yakıt pili türüdür. Hastanelerde, otellerde, evlerde, hava alanlarında, okullarda ve elektrik santrallerinde güç ve ısı sağlamak için kullanılmaktadır. Kullanılan en büyük yakıt hücresi Japonya'da bir elektrik şirketine aittir ve 11 MW güç çıkışı vermektedir [8, 83].



### 2.2.6. Doğrudan bor hidrür yakıt pilleri (DBHYP)

Chicago Üniversitesinde 1940'lı yıllarda araştırmacılar yeni borhidrür bileşiklerini üretmişlerdir. Bu yeni uçucu bileşiklerini elde ederek savaşın etkisini desteklemek istemişlerdir. Sonucunda uranyum borhidrür, uranyum heksaflorayte alternatif olarak başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Amerikan ordusu işaret balonları için üretilen hidrojenin potansiyel kaynağı olarak sodyum borhidrür ( $\text{NaBH}_4$ ) ile ilgilenmiş ve çeşitli araştırmacılar onu roket motorları için yakıt olarak değerlendirmektedirler.

Günümüzde  $\text{NaBH}_4$  öncelikle organik kimyasal bileşiklerin sentezinde indirgeyici ve kâğıt üretiminde beyazlatıcı olarak kullanılmakla beraber roket yakıtlarına katkı maddesi olarak, yüksek enerjili jet motorlarında ve roketlerde yakıt ve saf hidrojen kaynağı olarak da kullanılmaktadır [84].

Rusya uzaya ilk uydularını gönderdiklerinde kullandıkları roket yakıt olarak, günümüzde çok ciddi stratejik değerlere sahip olan sodyum borhidrür teknolojisini kullanmıştır. Rusya bu teknoloji için gerekli olan bor elementini Türkiye'den satın almışlardır. Dünyanın bor rezervlerinin 2/3'sine sahip olan Türkiye'nin yataklarının çoğu yüzeye sıfır mesafededir. Bundan kısa bir süre sonra A.B.D de bu teknolojiyi deneyimlemiş ve roketlerinde şu anda konvansiyonel bir teknoloji olan bor sistemini kullanmaktadır [85].

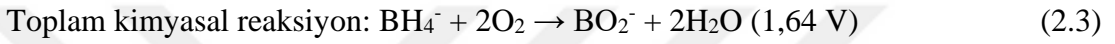
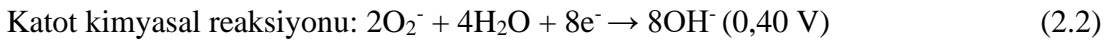
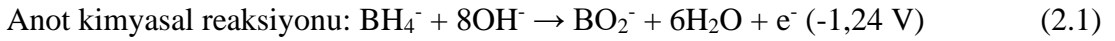
Sodyum borhidrür çözeltisi yakıt pillerinde yakıt olarak kullanılabilir. Yakıt olarak kullanılan borhidrür çözeltisi, yakıt pili bloğunda soğutma bölümlerine gerek kalmaksızın yakıt pilini soğutmak için ısı değiştirici ortam olarak da görev yapabilmektedir [8, 85].

Bor hidrür ( $\text{BH}_4$ ) yakıt pillerinde yakıt olarak doğrudan veya dolaylı yollar ile elde edilerek yakıt hücresinde kullanılmaktadır. Potasyum (K) veya sodyum (Na) elementine bağlı olarak bulunan borhidrür ( $\text{KBH}_4$ ,  $\text{NaBH}_4$ ) oldukça yüksek hidrojen kapasitesine sahip yakıt türleridir. Alkali borhidrür çözeltisi ile beslenen DBHYP'den 9,3 Wh/g gibi yüksek enerji yoğunluğu elde edilebilmektedir [76, 77, 86]. DBHYP'nin diğer yakıt pillerine göre avantajlı yönleri vardır. Bunlar şunlardır [87], [88];

- Hidrojen depolanmasında yaşanan problemler ortadan kaldırmaktadır.

- DBHYP bor hidrür bileşiklerinin yüksek hidrojen kapasitesi sebebiyle yüksek güç yoğunluğu ve yüksek hücre voltajına sahiptir.
- DBHYP’de yakıtın katot tarafına geçişi diğer yakıt pili türlerine göre daha az problem oluşturmaktadır.
- Diğer yakıt pillerine göre daha ucuz katalizör malzemeler kullanılabilir.

DBHYP’de anotta ve katotta meydana gelen kimyasal tepkimeler Denklem (2.1), (2.2) ve (2.3)’deki gibi;



gerçekleşmektedir.

Yakıt hücresinin anot tarafındaki hidroliz tepkimesinin uzun süreli dayanabilmesi için sodyum hidroksit (NaOH) ile seyreltilmiş borhidrür (BH<sub>4</sub>) bileşiğinden oluşan alkali bir sulu çözelti ile beslenmektedir [88]. DBHYP katot kimyasal reaksiyonu saf oksijen, hava veya hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ile beslenmektedir [7, 76]. DBHYP’de elektrolit olarak hem anyon değişim membranı (ADM) hem de katyon değişim membranı (KDM) kullanılabilir. Bu iki membran türünün kullanıldığı yakıt hücreleri arasındaki fark iyon iletimindeki farklılıklar nedeniyle oluşmaktadır.

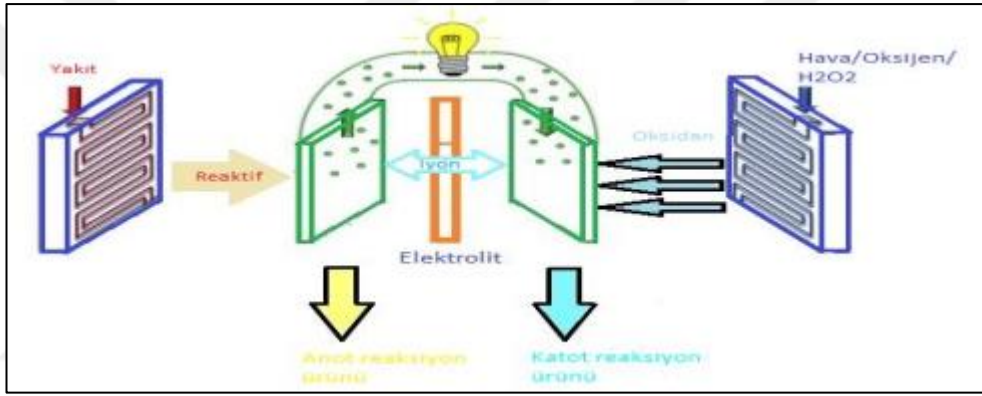
### 3.METALİK KÖPÜKLERİN YAKIT PİLLERİNDE KULLANIMI

Yakıt pilleri diğer enerji üretim sistemlerine göre daha verimli enerji üretim sistemleridir. Örneğin içten yanmalı motorlar da yakıtın kimyasal enerjisi termal enerjiye, termal enerji ise mekanik enerjiye dönüştürülen sistemlerdir. Bu her bir enerji dönüşüm aşaması, sistemin verimini azaltan kayıpların oluşmasına sebep olmaktadır. Yakıt pili sistemleri yakıtın kimyasal enerjisini herhangi bir dönüşüm olmaksızın yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirmesinden dolayı sistemin verimliliği diğer enerji üretim sistemlerine göre daha yüksek olmaktadır [77].

Yakıt pilleri verimli sistemler olarak değerlendirilmektedir. Ancak hücre içerisinde meydana gelen ohmik kayıplar, aktivasyon, yakıt-reaktif taşıma ve yakıt kullanım verimliliği sebebiyle verim düşüşleri meydana gelmektedir. Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP) ve doğrudan metanol yakıt pili (DMYP) günümüzde en çok ilgi gören yakıt pili türleridir. PEMYP’de yakıt olarak kullanılan yanıcı ve patlayıcı özelliği sebebiyle kullanım esnasında yaşanabilecek taşıma ve depolama zorlukları özellikle taşınabilir küçük ve orta büyüklükteki güç üretim sistemlerinde problem oluşturmaktadır. Yakıt olarak hidrojen taşıyıcı kimyasal sıvıların kullanılması kolay dağıtım ve depolanabilmeleri ile hidrojen kullanımındaki zorluklara çözüm oluşturmaktadır. Sıvı yakıt pillerinde kullanılan temel yakıtlar; metanol, etanol, etilen, dimetil, glikol, sodyum bor hidrür olarak sıralanabilmektedir [8, 86, 89–92].

Yakıt pili hücreleri anot ve katot akış dağıtıcı plaka, membran, anot ve katot difüzyon tabakası, anot ve katot katalizör tabakasından meydana geldiği önceki bölümde bahsedilmiştir. Yakıt hücresinin temel çalışma mekanizması Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Yakıt, oksidasyon reaksiyonunu gerçekleştirmek üzere anottan hücre içerisine gönderilmektedir. Oksidan ise aynı anda indirgeme reaksiyonunu gerçekleştirmek için katottan gönderilmektedir. Katalizör tabakasına ulaşan reaktifler kimyasal reaksiyona uğrar. Bu reaksiyonların sonucu oluşan iyonlar elektrolitten geçerken; elektronlar, harici bir devreden geçmektedir. Yakıt türüne bağlı olarak reaksiyon ürünleri değişse de katotta genellikle çevreye herhangi bir zararlı etkisi olmayan su oluşmaktadır [93–96].

Doğrudan sıvı yakıt pillerinde anot ve katot akış dağıtıcı ve difüzyon tabakası, sıvı ve gaz fazdaki reaktiflerin ve reaksiyon ürünlerinin iki fazlı kütle taşınmasına olanak sağlaması gerekmektedir. Sıvı yakıt pillerinde çift fazlı akış nedeni ile kütle taşıma ve yakıt verim kayıplarını en aza indirmek gerekmektedir [86, 97–99]. Doğrudan sıvı yakıt pillerinde sıvı yakıtın ve reaksiyon ürünlerinin etkili bir şekilde taşınması hücre verimini etkileyen en önemli etkenlerden biri olmaktadır. Sıvı yakıt pillerinde reaktif ve reaksiyon ürünlerinin etkin bir şekilde taşınmaması katalizör bölgesinde tıkanıklıklar meydana getirerek verimi düşürmektedir. Bu sebeple sıvı yakıt pillerinde akış dağıtıcı plaka ve gaz difüzyon tabakası tasarımı büyük önem arz etmektedir ve çok fazlı akışa izin verecek kabiliyette olmalıdır [70, 71, 89, 90, 92].



Şekil 3.1. Yakıt pilinin çalışma mekanizması [79]

Yakıt hücresinin temel elemanlarından difüzyon tabakasını ve akış dağıtıcı plakası yaygın bir şekilde karbon bazlı malzemelerden tercih edilmektedir. Karbon malzemeler yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, yüksek korozyon dayanımı gibi benzersiz elektriksel ve yapısal özelliklere sahip malzemelerdir. Karbon malzemelerin avantajlarına ek pahalı ve dayanıksız oluşu alternatif malzeme arayışını gerektirmektedir [93–95, 100].

Karbon malzemelere alternatif olarak difüzyon tabakası ve akış dağıtıcı plaka olarak kullanılmak üzere metalik köpüklere araştırmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Metalik köpüklerin yakıt pillerinde kullanılmasının arka planında bu malzemelerin açık gözenek yapısına sahip olan türlerinin elektrokimyasal tepkime prosesinin gerçekleştiği yüzey alanını artırarak katalizörün daha etkin görev yapmasını sağlamaktır. Sonuç itibarıyla elektrik veriminde artış sağlanması yatmaktadır. Yakıt hücrelerinde katalizör desteği, bipolar plaka ve akım toplama bileşeni olarak metalik

köpüklerin kullanılması önemli bir gelişmedir. Bu gelişmelerin gelecekte yakıt hücresi imalatında tek bir yapı elemanı kullanılması hedeflendiğinde büyük ölçekte maliyet düşüşü ve işlem kolaylığı avantajı elde edilebilmektedir. Böylece yakıt hücrelerinin ticari olarak piyasaya girmesi daha kolay olacaktır. Enerji üretiminde farklı bir gelecek oluşturabilmektedir [73, 101]. Metalik köpükler yakıt hücrelerinde genellikle akım toplayıcı, akış dağıtıcı ve katalizör destekleyici yapı olarak kullanılmaktadırlar.

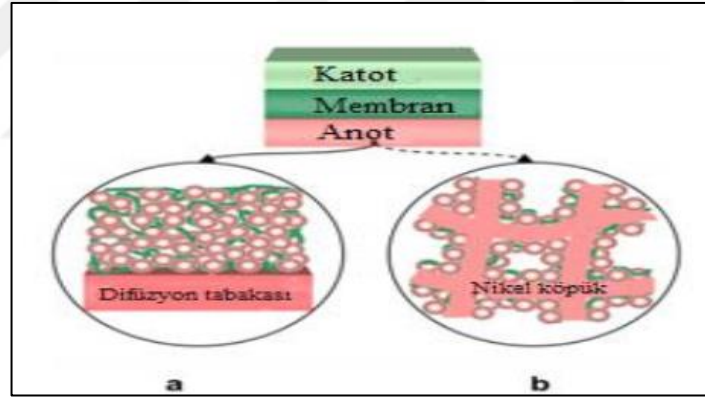
Metalik köpükler yakıt pillerinde akış dağıtıcı plaka, elektrot mimarisi ve yakıt pilinin ısı yönetimini sağlamak için kullanılmaktadır. Özellikle akış dağıtıcı ve elektrot olarak metalik köpük kullanılması hücre performansında, hücre ağırlığında ve hacminde önemli avantajlar sağlamaktadır [95, 102–106].

Son yirmi yılda yakıt pili sistemlerinde metalik köpükler akış dağıtıcı ve elektrot mimarisi olarak kullanılmasında artan bir ilgi görülmektedir. Metalik köpüklerin yüksek özgül yüzey alanları ve üç boyutlu yapıları elektrokimyasal ve katalitik uygulamalarda dikkat çeken bir performans artışına sebep olmaktadır. Difüzyon tabakası ve akış alanı görevi gören metalik köpüklerin katalizör malzemesi ile kaplanması ile üretilen metalik köpük yapıları elektrotlar yakıt hücresi performansını olumlu yönde etkilemektedir. Metalik köpüğün yüksek özgül yüzey alanı katalizörle kaplanan aktif yüzey alanı arttırarak reaksiyona giren alanın artmasından ötürü yüksek geçirgenlik ve difüzyon kuvvetleri nedeni ile kütle taşınmasını kolaylaştırmaktadır. Bu pozitif etkiler neticesinde hücrenin verimini arttırmaktadır [87, 104, 107–109].

Metalik köpükler sıvı yakıt hücresi içerisinde difüzyon tabakası ve akış dağıtıcı levha görevinde kullanılabilir. Metalik köpükler akış dağıtıcı plakada ve difüzyon tabakasında aranan yüksek geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip bir malzeme türü olmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde metalik köpüklerin, karbon esaslı grafit malzemelerden yaklaşık 10 kat daha yüksek akım taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir [62, 104, 110].

Metalik köpüklerin difüzyon tabakası olarak kullanılması halinde, yaygın bir şekilde metalik köpük difüzyon tabakası aynı zamanda katalizör destek malzemesi olarak da görev yapabilecek şekilde sisteme entegre edildiği görülmektedir. Katalizör tabakasının destek malzemesi üzerine kaplanarak sisteme dahil edilmesi katalizör dayanımını arttırmaktadır. Katalizör tabakası normal şartlar altında difüzyon tabakası

veya membran üzerine kaplama işlemi yapılarak yakıt hücresi sistemine montajı yapılabilmektedir. Katalizör tabakasının membran üzerine kaplanması durumunda katalizör tabakası ile difüzyon tabakası arasında istenen temas sağlanamamaktadır. Bundan dolayı hücre içerisinde kayıplar artmaktadır ve katalizör iyi bir şekilde desteklenmediği için dayanımı düşmektedir. Katalizör tabakasının difüzyon tabakası üzerine kaplanmasında katalizör ile difüzyon tabakası arasında temas alanının yüksek olması kayıpların daha düşük olmasına ve katalizör dayanımının yüksek olmasını sağlamaktadır. Karbon esaslı yapının difüzyon tabakası olarak kullanılması halinde Şekil 3.2(a)'da görüldüğü gibi katalizör düz bir tabaka halinde bulunmaktadır. Şekil 3.2(b)'de görüldüğü gibi metalik köpük difüzyon tabakasının katalizör desteği olarak kullanılmaktadır. Katalizör metalik köpüğün üç boyutlu geometrisi üzerinde yayılmaktadır. Metalik köpük difüzyon tabakası kullanımı ile karbon esaslı malzemelere göre daha yüksek katalizör yüzey alanı sağlanmasından dolayı daha yüksek elektrokimyasal hücre performansı elde edilmektedir [71, 104, 111].



Şekil 3.2. Yakıt pilinin içerisinde bulunan difüzyon tabakası ve katalizör tabakasının yapısı [79]

Şekil 3.2'de yakıt hücresi içerisinde difüzyon tabakası ve katalizör tabakasının yapısı plakalara akış kanalı açılarak üretilen geleneksel akış dağıtıcılarda kanal tasarımının zor olması ve kanal açılmasının güç olması zorluklarının dışında hücre içerisinde yapısal iki probleme sebep olmaktadır. Bu sorunlar metalik köpüklerin akış dağıtıcı olarak kullanılması ile ortadan kaldırılabilir. Sorunlardan birincisi akış kanal bölgesi reaktiflerin ve hücre içerisinde üretilen ısının katalizör tabakasına homojen bir şekilde dağılmasına engel oluşturmaktadır. Bu durum katalizörün tam olarak etkili şekilde faaliyet göstermesini engellemektedir. Metalik köpük kullanımı ile reaktifin çoklu girişi ve birden fazla bölgeye bölünmesi, reaktifin katalizör bölgesine eşit

dağılmasını sağlamakla birlikte katalizör etkinliğini arttırmaktadır. Metalik köpük kullanımını homojen ısı ve reaktif dağılımı sağladığından dolayı, reaksiyonun katalizör bölgesinde homojen bir şekilde gerçekleşmesini ve katalizör dayanımının artmasına sebep olmaktadır. Diğer bir sorun ise reaksiyon ürünü olan suyun yerçekiminin etkisi ile akış kanallarının alt bölgesinde birikme eğiliminde olmasıdır. Biriken suyun hücre içerisinden uzaklaştırılması güçleşir ve bu durum hücre içerisinde su baskınına ve katalizör bölgesinde tıkanıklıklarına sebebiyet vermektedir. Metalik köpüğün akış dağıtıcı olarak kullanılması metalik köpüğün muazzam kıvrımlı yapısının sağladığı kılcal kuvvet, yerçekimi bağımsızlığı ve yüksek geçirgenliği reaksiyon ürünü suyun hücre içerisinden uzaklaştırılmasını kolaylaştırıcı etkiler sağlamaktadır. Ayrıca metalik köpükler sıvı ve gaz fazındaki akışkanların aynı anda taşınmasına izin vermektedir. Dolayısıyla reaktif ve reaksiyon ürünlerinin muazzam bir şekilde taşınmasına olanak sağlamaktadır. Akış bölgesinde tıkanıklıklar oluşturmamaktadır. Özetlemek gerekirse metalik köpüklerin akış dağıtıcı olarak kullanılması hücre içerisinde reaksiyon kinetiğinin artmasına neden olduğundan hücre performansını olumlu şekilde etkilemektedir [74, 103, 104, 112, 113].

Arisetty ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, doğrudan metanol yakıt pillerinde metalik köpüklerin gaz difüzyon katmanında karbon tabakaya göre daha kalın olmasına rağmen artan iletkenliği sonucu yüksek performanslı olduğu belirtilmiştir [72]. Tseng ve arkadaşları PEM yakıt hücrelerinde akış dağıtıcısı olarak metalik köpükler kullanmıştır. Metalik köpüklerin geleneksel grafit plakalara göre daha hafif ve bipolar plakalara göre daha fazla taşıma sağladığını bildirmişlerdir. Metalik köpüklerin gözenekli yapısından dolayı akış direnci ve gazların konvektif akışını sağlamaktadır. Birçok avantajının yanında dezavantajlarından biride korozyonun önlenmesi probleminin mevcut olduğu bildirilmiştir [103].

Tsai ve arkadaşları çalışmalarında, akış distribütörü olarak metalik köpük yapıları PEM yakıt hücresi için akış alanı tasarımını geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, geliştirilmiş metalik köpük yapıları akış alanı tasarımlarını kullandıktan sonra yakıt pilinin performansının arttığını, tek bölge metalik köpüklü PEM ünitesinde, yan köşelerde konveksiyonun zayıf olduğunu göstermişlerdir. Metal köpüğün çoklu bölgelere bölünmesi ve çoklu girişlerin kullanılması, gaz dağıtımını ve kullanım oranının etkili bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir [113]. Kumar ve arkadaşı, polimer elektrolit

membranlı yakıt hücresi (PEMYH) için birleştirilmiş, üç boyutlu, tek hücre modeli geliştirmişlerdir. Modellenmiş yakıt hücresi, geleneksel olarak kullanılan dikdörtgen kanallar yerine bipolar / uç plakalarının akış alanında metalik köpük kullanmışlardır. Akış alanındaki metalik köpüğün farklı geçirgenlik seviyeleri için simülasyonlar yaparak sonuç olarak metalik köpüğün geçirgenliğinin yakıt hücresinin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir [114].

Yang ve arkadaşları üç boyutlu karbon ve nikel esaslı metalik köpük elektrot ile  $H_2O_2$  ve KOH kuvvetli oksitleyici ve korozif çözelti içinde yüksek katalitik aktivite ve iyi stabilize sergilediğini belirtmişlerdir. Anot olarak nikel esaslı metalik köpük kullanarak doğrudan peroksit yakıt hücresi ile  $19,4 \text{ mW/cm}^2$  güç yoğunluğu elde edildiği bildirilmişlerdir [115].

Oh ve arkadaşları çalışmalarında ise Co-P/Ni köpüğün önemli etkiye sahip olduğu katalitik aktivitenin, yüksek reaksiyon sıcaklıklarında arttığı optimum koşullar altında çökelmiş katalizör miktarının küçük olduğu ve bu sayede  $NaBH_4$ 'den hidrojen üretimi için uygun olduğunu bildirmişlerdir [109].

Dai ve arkadaşları nikel esaslı metalik köpüğün yüksek performanslı kobalt-tungsten bor katalizörle destekleyerek düşük maliyetle yüksek performans elde etmişlerdir. Diğer çalışmalarında ise gerçekleştirilen Co-Mo-B/Ni köpük katalizörün yüksek performanslı hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesinde geçiş metal katalizörlerinin potansiyele sahip olduğunu bildirmişlerdir [116].

Nakagawa ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda karbon köpüklerin mikro yapılarının PEMYP performansları üzerinde etkili olduğunu bulunmuşlardır [117]. Yang ve arkadaşları ise, gözenekli elektrotların  $H_2O_2$ 'de elektro-indirgenmesinde katalitik performans ve elektro stabilize özelliklerinin üstünlüğünü belirtmişlerdir. Gözenekli elektrotların yüksek performans sebebiyle yakıt hücreleri için büyük bir potansiyele sahip olduğunu bildirmişlerdir [118].

Ke ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada, nikel esaslı metalik köpük ile nano gözenekli altın ihtiva eden bir hibrit yapısı ile Au-Sn alaşımı film elektrot sentezlemişlerdir. Sonuçlarında nikel esaslı metalik köpük hibrit elektrotlarının yakıt hücresi teknolojisi uygulamaları için potansiyeli olduğunu göstermişlerdir [119].



Yang ve arkadaşları tarafından nikel esaslı metalik köpüğü ile yapılan bir çalışmada, borhidrür hidrolizinden hidrojen üretimi için Co-W-B-P/Ni'nin gelecek vaat eden düşük maliyetli katalizör olduğunu bildirmişlerdir [118]. Li ve arkadaşları nikel esaslı metalik köpüğün yüzeyi üzerinde bir alaşım katalizörü kullanarak BH<sub>4</sub>- hidroliz reaksiyonu üzerine çalışmışlardır [120].

Çelik, sıcaklık ve sodyum borhidrür konsantrasyonu DBYP performansı için önemli özellikler olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, bir alt tabaka olarak nikel esaslı metalik köpük etkisini farklı sıcaklık ve sodyum borhidrür konsantrasyonda incelemiştir. Çalışmalarının sonucunda güç yoğunluklarının artan sıcaklık ile arttığını göstermiştir. Örnek olarak sıcaklık 25 °C'den 60 °C'ye arttırıldığında pik güç yoğunlukları sırasıyla 0,5, 1, 1,5 mol/dm<sup>3</sup>, NaBH<sub>4</sub> olan yakıtlarda sırasıyla %41, 70, 91 arttığını göstermiştir [8].

Eugenio ve arkadaşları kobalt-bakır metalik köpükleri ile NaBH<sub>4</sub> yakıt hücresi geliştirmişler. Gözenekli bakır köpüklerin sodyum borhidrürün hidroliziyle hidrojen üretimi için düşük maliyetli, aktif ve kararlı heterojen katalizörler olarak kobalta bir alternatif olduğunu bulmuşlardır [121]. Eom ve arkadaşları bir Co-P/Ni köpük kullanılarak boron hidroliz yoluyla yakıt hücreleri için hidrojen üretiminin karakterizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri için hidrojen üretiminin gelecek vaat eden bir araç olduğunu ortaya koymuşlardır [122].

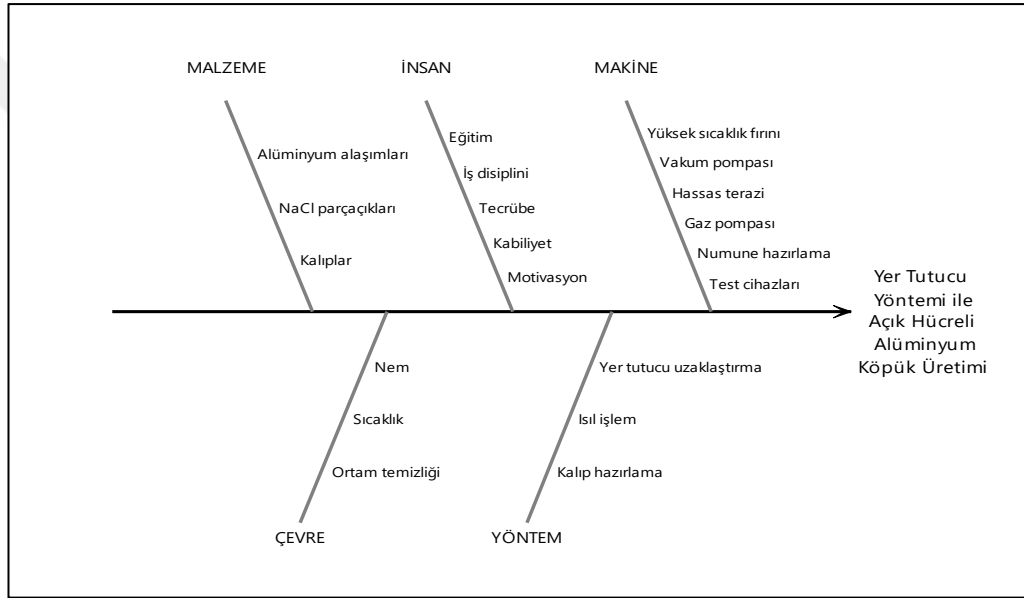
Literatürde bulunan bu çalışmaların bütününde anot malzemesi olarak nikel, gümüş, bakır gibi elementlerden üretilmiş ticari metalik köpüklerin kullanıldığı görülmektedir. Araştırmacılar ticari olarak temin ettikleri metalik köpükleri altlık olarak kullanıp Au, CoP, NiP, Ni gibi farklı içeriklerde katalizörle bütünleştirerek yakıt pili bileşenleri elde etmişlerdir. Metalik köpüklerin yakıt pillerinde kullanılmasının arka planında bu malzemelerin açık gözenek yapısına sahip olan türlerinin elektrokimyasal tepkimeni gerçekleştirdiği yüzey alanını artırarak katalizörün daha etkin görev yapması ve sonuç itibariyle elektrik veriminde artış sağlanması bulunmaktadır. Yapılan araştırmaların bugün geldiği durumda farklı metalik köpük yapıların proses verimi üzerindeki etkisinin irdelenmesi ön görülmektedir.

Metalik köpük yapının akış dağıtıcı plaka ve difüzyon tabaka görevi gören tek bir entegre yapı halinde kullanılmasına olanak tanıdığı belirtilmiştir. Bu durum yakıt pili sisteminin büyük ölçüde basitleşmesine ve maliyetinin azalmasına neden olacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak metalik köpük malzemelerin yakıt hücrelerinde kullanılması yakıt pilinin ticarileşmesine önemli katkılarda bulunacaktır [72, 104, 112].



#### 4.MALZEMELER VE YÖNTEM

Çalışmada açık hücreli köpüklerin ekonomik ve hızlı bir yöntem olan yer tutucu yöntemi ile mekanik özelliklerinde pozitif sonuçlar elde etmek amacıyla açık hücreli alüminyum esaslı metalik köpük malzeme üretim tekniği, morfolojisi, yapısı, kimyasal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Şekil 4.1’de deney çalışmasında izlenen işlem adımları gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Yer tutucu yöntemi ile açık hücreli alüminyum köpük üretimin balık kılıçlığı modeli

Çalışmamızda alüminyum silindir içi dolu çubuklar kullanılmıştır. Kullanılan alüminyum hammaddeler Seykoç firmasından tedarik edilmiştir. Alüminyum köpük üretimi için üç farklı alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de deneylerde kullanılan alüminyum alaşımlarının özellikleri verilmiştir.

Çalışmada yer tutucu malzeme olarak NaCl kullanılmıştır. Boşlukların boyutunu ve şeklini belirlemek amacıyla NaCl taneciklerin boyutları mekanik olarak parçalara ayrılarak eleme makinesinde boyutlara ayrılmıştır. Şekil 4.2’de Retsch AS 200 marka eleme makinası ile farklı boyutlara ayrıştırılmıştır.

Tablo 4.1. Deneyde kullanılan alüminyum alaşımlarının elementel bileşimleri

	2011	6063	7075
Fe	0,5	0,35	0,5
Si	0,3	0,2-0,6	0,5
Cu	5,0-6,0	0,1	1,2-2,0
Mn	-	0,1	0,3
Mg	-	0,45-0,9	2,1-2,9
Pb	0,2-0,6	-	-
Bi	0,2-0,6	-	-
Zn	-	0,1	5,1-6,1
Cr	-	0,1	0,18-0,28
Zi	-	0,15	-
Zi+Ti	-	-	0,25
Diğer	0,15	0,15	0,15

Tablo 4.2. Deneyde kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri

	2011	6063	7075
Akma Mukavemeti (MPa)	230-300	170-210	460-505
Çekme Mukavemeti (MPa)	310-395	205-245	530-570
Uzama (%50)	10	12	10
Sertlik (Brinell)	110	75	140-160



Şekil 4.2. Retsch AS 200 marka eleme makinası

Şekil 4.3’de Kocaeli Üniversitesi’nin imkân kabiliyetleri arasında bulunan atmosfer kontrollü fırın kullanılmıştır. Atmosfer kontrolü özelliği ile ortama inert gaz aktarımı veya ortamdaki havayı uzaklaştırmaya imkân sağlamaktadır.



Şekil 4.3. Atmosfer kontrollü fırın

Açık hücreli alüminyum köpük çalışmasında kullanılan 304 kalite paslanmaz kalıp Şekil 4.4’de gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Köpük üretim kalıbı

Çalışmada alüminyum köpüklerin karakterizasyon işlemlerinde ve uygulama çalışmalarında kullanmak amacıyla iki farklı kesim yöntemi kullanılmıştır. Tel erezyon yöntemi ve su jeti yöntemi ile kesim işlemi yapılmıştır. Su jeti ile yapılan çalışmada abrazif aşındırılmalı kesim yapılmıştır. Kesim basıncı olarak 3800 bar,

ilerleme hızı 50 mm/dk, aşındırıcı partikül 300 gr/dk 80 mesh konsol tipi su jeti makine kullanılmıştır.



Şekil 4.5. CT-WaterJet Makinesi

## 4.2. Test Cihazları ve Ekipmanları

### 4.2.1. Yoğunluk ölçümü ve porozite hesabı

Açık hücreli alüminyum köpüklerin yoğunlukları Archimedes prensibine göre ölçülmektedir. Kuru ağırlıkları ölçülen açık hücreli metalik köpükler, havadaki ve saf su içerisindeki ağırlıkları da ölçülerek yoğunlukları ve porozite değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar Denklem (4.1) ve (4.2);

$$\rho^* = \frac{w_1 \rho_w}{w_2 - w_1} \quad (4.1)$$

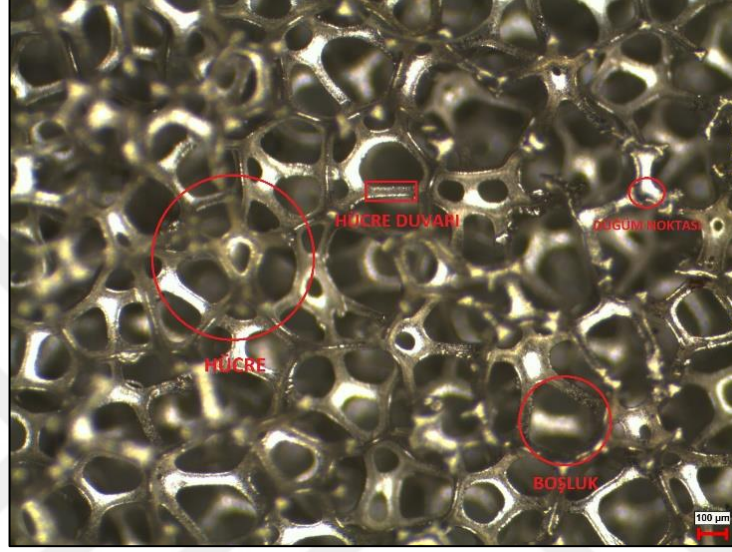
$$\rho_w = 1,0017 - 0,0002315T \quad (4.2)$$

ile yapılmıştır. Açık hücreli metalik köpüklerin porozitesi Denklem (4.3) ile hesaplanmaktadır. Porozite değerleri yüzdelik oran ile ifade edilmektedir. Bunun nedeni katı malzeme içerisindeki boşluk miktarını esas boşluksuz yapıya göre kıyaslanması ile ortaya çıkmaktadır.

$$P_{köpük} = \left[ 1 - \frac{\rho_{köpük}}{\rho_{Al}} \right] \times 100 \quad (4.3)$$

#### 4.2.2. Makro ve mikro yapı incelenmesi

Açık hücreli metalik köpüklerin makro-yapı incelemeleri stereo mikroskop ile (Trinokular) yapılmıştır. Şekil 4.6’da ticari açık hücreli nikel köpüğün gözenek, hücre duvarı ve boşlukları görülmektedir.



Şekil 4.6. Ticari açık hücreli nikel köpüğün makro yapı incelemesi

Açık hücreli alüminyum köpüklerin mikro-yapı analizi Şekil 4.7’de görülen Jeol-6060 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Jeol 6060 SEM cihazı

#### 4.2.3. Mikro sertlik test deneyi

Açık hücreli alüminyum köpük numuneler için 136° tepe açılı batıcı ucun 10 kgf yükte 10 saniye süreyle numuneye uygulanması yöntemi ile Şekil 4.8’de görülen Vickers sertlik cihazıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Zwick marka Vickers mikrosertlik cihazı

#### 4.2.4. Yakıt hücresi test sistemi

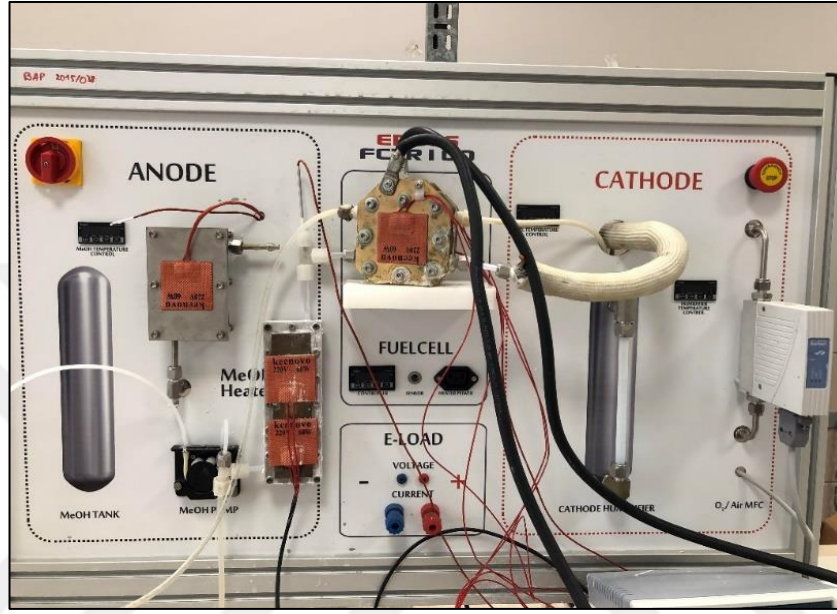
Yer tutucu yöntemi ile üretilen açık hücreli alüminyum köpüklerin yakıt hücrelerindeki performansı incelenmiştir. İncelemelerimizde Şekil 4.9’deki bileşenler kullanılmıştır. Tablo 4.3’de testlerde kullandığımız tek hücre test sistemi elemanları verilmiştir. Tek hücre test sistemi laboratuvar şartlarında üretilen membran ve membran elektrot üniteleri kullanılarak tasarlanan doğrudan borhidrüllü yakıt pilinde işletim parametrelerinin verim üzerine etkisinin incelenmesi TÜBİTAK 215M255 nolu proje kapsamında oluşturulmuştur.

Tablo 4.3. Tek hücre testlerinde kullanılan bileşenler

Bileşen	Özellik/Ticari ismi
Akış Kanalı	3 kanallı serpantin akış
Gaz difüzyon	Al/Cu/Ni Köpük
Membran	Nafion 117
Elektro katalizör	Pt/C
Akım toplama	Altın kaplı bakır



Ticari Pt/C elektro katalizörü 25 cm<sup>2</sup> alanında gaz difüzyon tabakalarına ultrasonik kaplama yöntemiyle kaplanmıştır. Katot tarafı katalizör yüklemesi 1 mg/cm<sup>2</sup>, anot tarafı katalizör yüklemesi ise 2 mg/cm<sup>2</sup> olarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde yakıt derişimi ağırlıkça %4 NaBH<sub>4</sub> + %12 NaOH, oksidant basıncı 2,5 bar ve oksidant debisi 0,3 l/dk olarak sabit tutulmuş, oksidant olarak saf oksijen kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Tek hücre test sistemi

### 4.3. Üretim Yöntemi

Açık hücreli alüminyum köpük, yer tutucu yöntemi ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yer tutucu olarak NaCl parçacıkları kullanılmıştır. Kullanılan tuzlar 3 farklı boyutta sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma işleminde hammadde mekanik yollarla parçalara ayrıldıktan sonra Retsch AS 200 makinesi ile boyutlarına ayrılmıştır. Şekil 4.10'da gösterilen 3 farklı boyuta sınıflandırılmıştır.

Ortamın ve kullanılan tuz paracıkların nem değerini düşürmek maksadıyla 1 saat 85 °C'de kurutma işlemi uygulanmıştır. Ayrıca çalışmaların gerçekleştiği fırın ortamı için de aynı işlem gerçekleştirilmiştir.

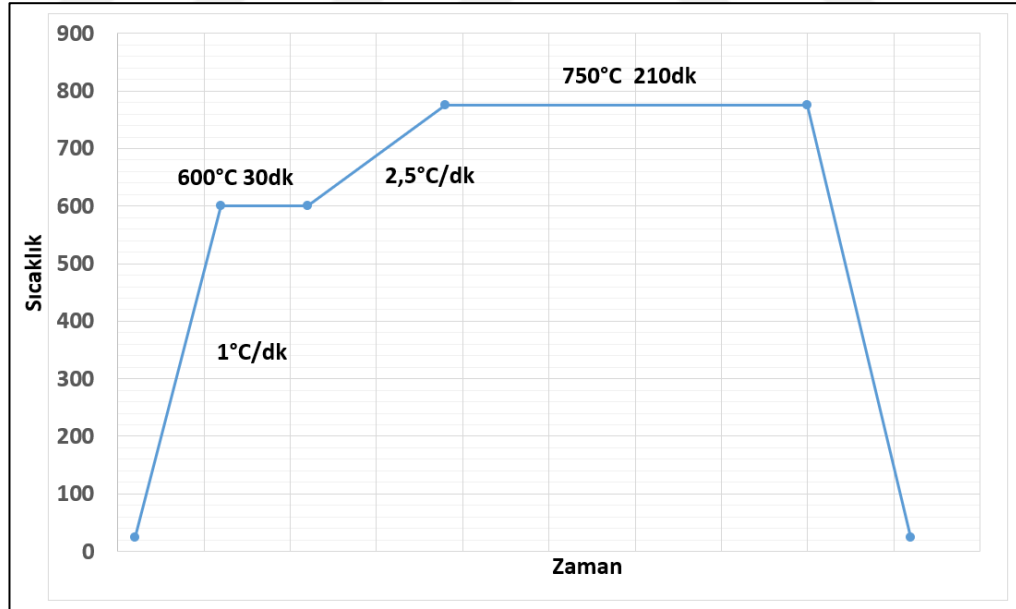
Çalışmamızda içi dolu alüminyum blokları kullanılmıştır. Çalışmada alüminyum alaşımları ve NaCl hacimsel olarak işleme katılmıştır. Hacimsel olarak %25-50-75-80 oranında alüminyum içeriği ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sırasında ortamda yapıya karışmasını önlemek ve izole ortam hazırlamak amacıyla fırının içinde bulunan gaz atmosferi vakum yardımıyla sistemden uzaklaştırılmıştır. Çalışmada uygulanan sıcaklık grafiği Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Isıl işlem sonunda eriyik alüminyumun yer tutucu arasına sızmasını kolaylaştırmak için kalıbın üst noktasından basınçlı gaz ortama aktarılmıştır.

Isıl işlem sonucunda kalıptan çıkartılan yapı içerisinde bulunan NaCl parçacıklarını 60°C su içerisinde alüminyum köpük yapısından uzaklaştırılmıştır.



Şekil 4.10. Mekanik yöntem ile parçalanmış tuz parçacıkları a) Parçalanmamış b) 2-4 mm c) 1-2 mm d) 1-0,5 mm



Şekil 4.11. Deneylerde uygulanan sıcaklıklar ve süreler

## 5.DENEYSEL BULGULAR

### 5.1. Ön Deneme Çalışmaları

Yer tutucu metodu ile metalik köpük üretim tekniğinde eriyik alüminyumun kalıp içerisinde bulunan yer tutucu olarak kullanılan NaCl partikülleri arasına sızma işlemi için işlem sıcaklığını, işlem sürelerini ve ortama verilecek basınçlı gaz değerinin ayarlanması gibi ön işlem çalışmaları değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde homojen dağılımlı alüminyum köpük elde edilmesi için sistemin verimli çalışması sağlanmıştır.

Çalışmanın ilk denemelerinde ısıtma işlem sıcaklığı olarak 680 °C kullanılmıştır. Alüminyumun ergiyik haline ulaşmadığından NaCl partikülleri arasına sızmadığı tespit edilmiştir. Sızma işleminin gerçekleşmemesinin nedeni işlem süresinin doğru saptanamamasından kaynaklanmaktadır. Kademeli olarak sıcaklık artışı sağlanmış ve 750 °C sıcaklıkta uygun numunelerin üretilebildiği gözlemlenmiştir. Kullanılan NaCl parçacıkların boyutlarının küçülmesi ile eriyik alüminyumun sızmasının zorlaşacağı düşünüldüğünden, proses işlem süresi artırılmıştır. Bu durumda ise NaCl parçacıkları ısıtma maruziyetten olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenden dolayı işlem süresini artırmak yerine dışarıdan bir etki sağlanmak maksadıyla basınçlı gaz sisteme aktarılmış olup eriyik alüminyumun sızma kabiliyeti artırılmıştır. Şekil 5.1’de yetersiz sızma sonucu oluşmuş numuneler gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Yeterli sızma kabiliyetine sahip olmayan alüminyum yapılar

## 5.2. Numune Kesitleri

Yer tutucu yöntemiyle elde edilen alüminyum köpük numune boyutları ve proses sonrası numunelerin üst kısımda kalan kalıntı alüminyum kalıntısı kesilerek deneylerde kullanılmak üzere yapı ideal forma getirilmiştir. Şekil 5.2’de yapılan çalışma sonucu oluşan açık hücreli alüminyum köpük görülmektedir.



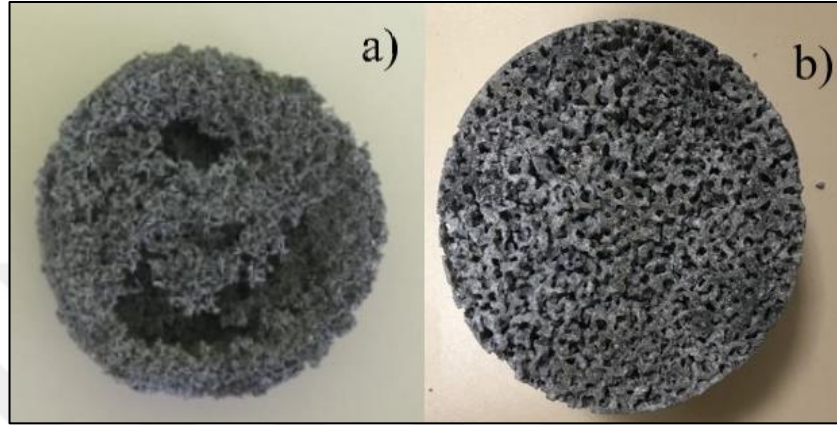
Şekil 5.2. Proses sonrası alüminyum köpük

Elde edilen açık hücreli alüminyum köpük numunelerde alüminyum ve NaCl dağılımı incelenmiştir. Şekil 5.3’te görüldüğü üzere yapının homojenliği incelenebilmektedir. Ayrıca gözeneklerin köpük boyunca homojen dağıldığı gözlemlenmiştir. Alüminyum metalik köpük üretim sırasında kullanılan yer tutucu NaCl partikül boyutuna göre köpük içerisindeki hücre boyutunun da paralel olarak değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir.

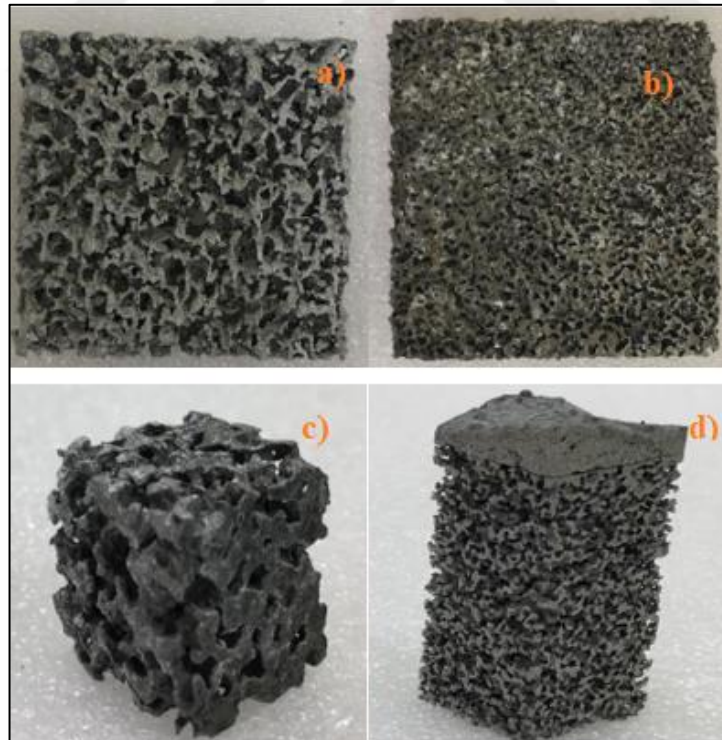
Numunenin alt kısımlarında daha sıkı ve kapalı bir gözenek morfolojisine sahip olduğu, bunun nedeninin alt kısımlarda NaCl parçacıkları üstlerine binen yük artışı ile eriyik alüminyum NaCl parçacıkları arasına sızma işleminin gerçekleşmemesidir. Şekil 5.3.a’da NaCl parçacıkların yoğun yükün meydana geldiği noktaları görülebilmektedir. Şekil 5.3.b’de homojen dağılım sonucu görülmektedir. Bu kısımda yük dağılımını eşit şekilde sağlamak maksadıyla ortama verilen basınçlı gazın basınç değeri ve dağılımı önem arz etmektedir.

Çalışma sonrasında testlerde ve uygulamalarda kullanılması maksadıyla iki farklı kesim tekniği denemeleri yapılmıştır. Denemelerde tel erozyon ve su jeti yöntemi ile

kesim gerçekleştirilmiştir. Tel erozyonu ile yapılan çalışmalarda işlem parametreleri sağlanamadığından dolayı işlem verimi su jeti prosesine göre düşüktür. Su jeti prosesinde ise kullanılan abrasif aşındırıcı parçacıkların etkisi ile hücre duvarlarına zarar verme olasılıkları artmaktadır. Şekil 5.4’de kesim sonucunda oluşan köpük numuneleri verilmiştir.



Şekil 5.3. Farklı üretim sonuçları a) NaCl parçacıkları birikmiştir  
b) NaCl homojen dağılmıştır



Şekil 5.4. a-c) Su jeti yöntemi d) Tel erozyonu ile kesilen köpükler



### 5.3. Kütle ve Yoğunluk Hesaplamaları

Çalışma sonucunda üretilen köpüklerin kütleleri 0,01 g hassas tartı ile ölçüldü. Köpük üretim prosesinden sonra yapı içerisindeki NaCl veya yabancı parçacıkları gidermek amacıyla ultrasonik yıkama makinası ile temizleme yapılmıştır. Köpüklerin boyut ölçümleri 0,01 mm hassasiyette kumpas ile yapılmıştır. Ek-A'da NaCl parçacıklarının boyutlarına göre yapılan alüminyum köpük çalışmalarında elde edilen yoğunluk ve porozite değerleri verilmiştir.

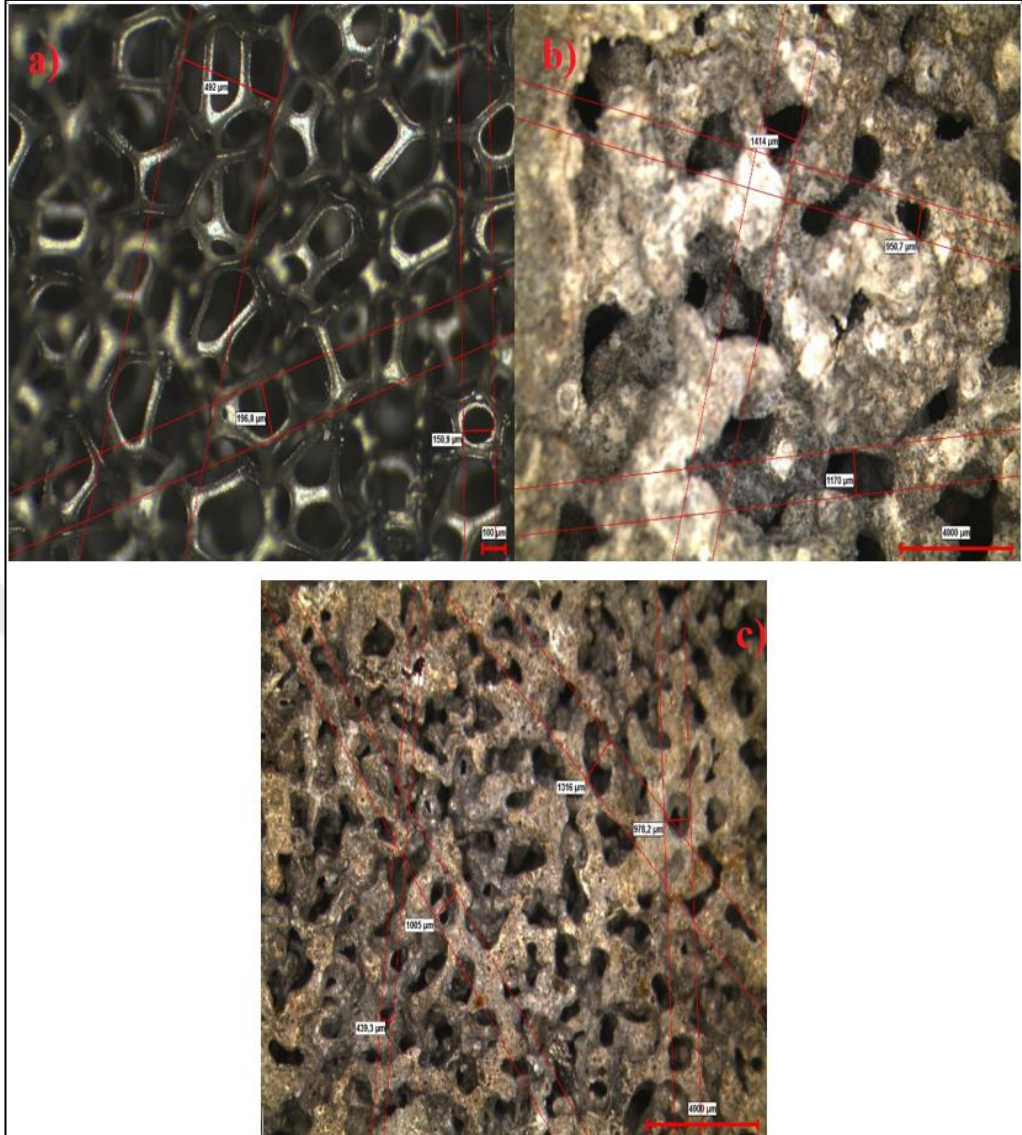
### 5.4. Makro-yapı Analizi

Yer tutucu yöntemi ile üretilen alüminyum köpüklerin makro-yapı incelemeleri stereo mikroskopta (Trinokular) yapılmıştır. Yapılan incelemelerde hücre duvarları, hücre boşlukları ve düğüm noktaları incelenmiştir.

Tablo 5.1'de dört farklı numunenin 3 farklı noktasından hücre duvar genişliği ve hücre genişliği değerleri ölçülmüştür. Ayrıca ticari olarak Xiamen Tob firmasından temin edilen %80 porozite ve 100 ppi değerine sahip alüminyumun köpük değerlerine de yer verilmiştir.

Tablo 5.1. Stereo mikroskop ile B-1, B-5, A-1, A-2 ve Ticari Alüminyum köpüğün hücre genişliği ve duvarları boyutları

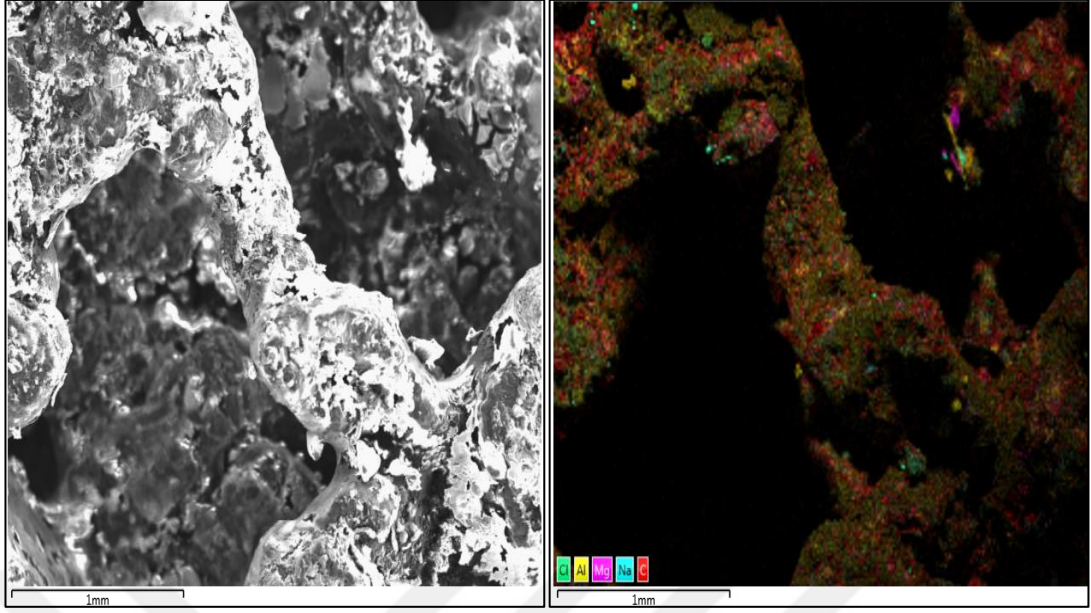
		Hücre Duvarı Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Hücre Genişliği ( $\mu\text{m}$ )
1-2 mm	A-1	a)	513,6
		b)	1117
		c)	812,5
	A-2	a)	443
		b)	579,5
		c)	1316
2-4 mm	B-1	a)	531,6
		b)	1005
		c)	978,2
	B-5	a)	1194
		b)	1414
		c)	1170
Ticari Alüminyum Köpük	a)	839,3	
	b)	950,7	
	c)	1969	
Ticari Alüminyum Köpük	a)	868,5	
	b)	655,7	
	c)	775,6	
Ticari Alüminyum Köpük	a)	431,6	
	b)	670,7	
	c)	492	
Ticari Alüminyum Köpük	a)	51,16	
	b)	196,8	
	c)	150,9	



Şekil 5.5. Stereo mikroskop ile köpüklerin hücre genişliği ve duvarları ölçülmüştür. a) Ticari alüminyum köpük b) NaCl boyutu 2-4 mm olan köpükler c) NaCl boyutu mm olan köpükler

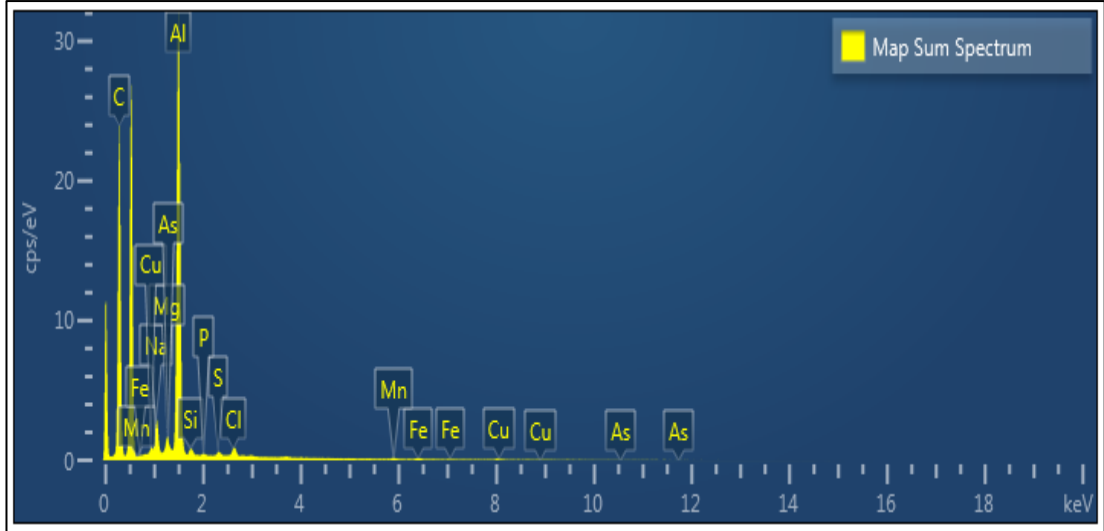
### 5.5. Mikro-yapı Analizi

Metalografik inceleme amacıyla üretimi gerçekleştirilen alüminyum köpüklerden alınan numuneler 2400 kuma kadar seri zımparalama işlemlerinin ardından 1 mikron koloidal parlatma uygulandıktan sonra alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 5.6'da görülmektedir. Ek-B'de diğer alüminyum köpüğe ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.6. SEM mikroyapı görüntüsü

Şekil 5.6’de hücre duvar yüzeyi ve gözeneğe ait yapısı incelenmektedir. Gerek hücre duvar yüzeyinde gerekse gözenek iç yüzeyinde düzenli şekilde çökelti yapısı görülmektedir. Şekil 5.7’de element bazında analiz yapıldığında yapı içerisinde Na elementinin yoğun olarak belli noktalarda çöktüğü, Cl elementinin ise yüzeyde dağıldığını ve diğer intermetaliklerin yapı da bulunduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.7. EDS analiz sonuçları

### 5.6. Sertlik Testi Sonuçları

Sertlik ölçümleri 1,961 N yük altında 10 saniye süre ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri her numune için 6 ayrı ize göre ortalama alınarak Tablo 5.2’de verilmiştir.

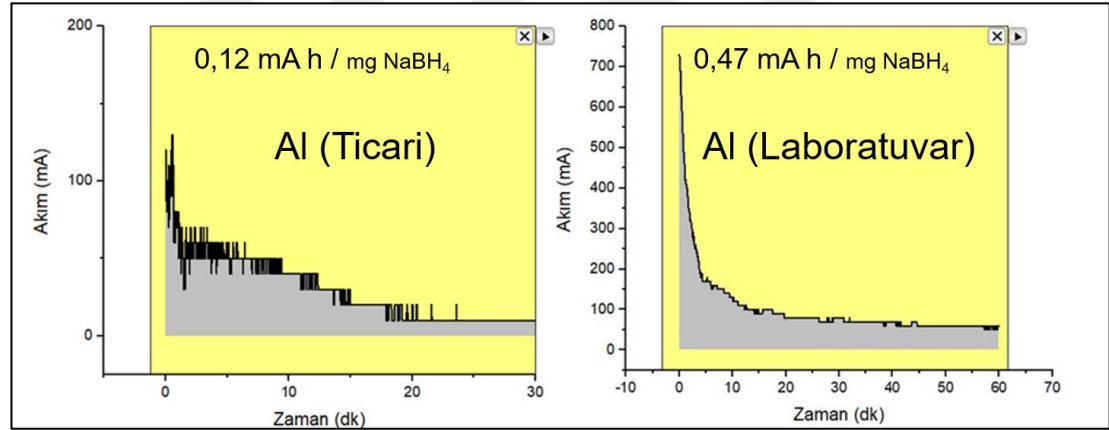


Tablo 5.2. Vickers sertlik değerleri

	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ortalama
A-1	92,2	87	81,6	80	75,5	82,3	83,10
A-2	84,2	81,8	83,2	77,4	81,3	82,1	81,67
B-1	98,6	102	94,4	88,9	89,2	92,6	94,28
B-5	83,6	88,2	83	87,1	84,9	86,6	85,57

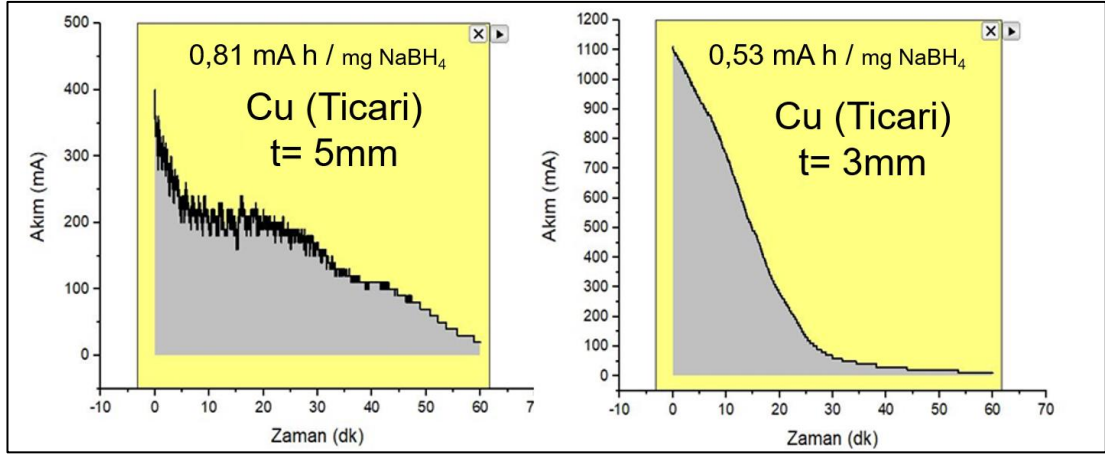
### 5.7. Yakıt Pili Test Sonuçları

Yakıt pili sisteminde yapılan deneme çalışmalarında yakıt pilinin bileşen kısımlarından anot kısmında 5x5x0,5 cm ölçülerinde metalik köpük yapı, yakıt pilinin katot kısmında 2 mg cm<sup>2</sup> Pt/C katalizör kaplı difüzyon tabakası, yakıt çözeltisi olarak (% ağ.) %4 NaBH<sub>4</sub> + %12 NaOH, membran olarak Nafyon 117 ve 0,3L/dk kuru oksijen oksidant olarak beslenmiştir. Belli bir koşullandırma prosesi altında çalışma gerçekleştirilmiştir.

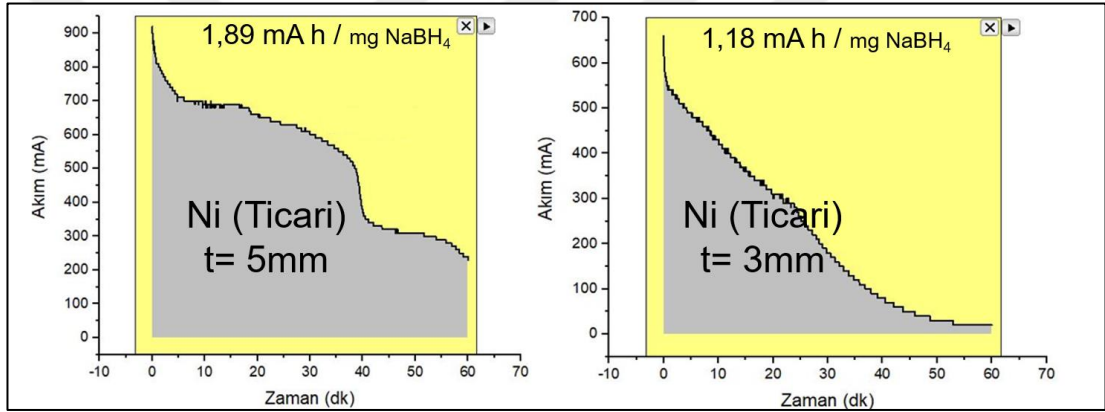


Şekil 5.8. Anot kısmında 5x5x0,5 cm Al köpük üzerine 2 mg cm<sup>2</sup> Pt/C katalizör kaplı difüzyon tabakası, katot kısmında 1 mg cm<sup>2</sup> Pt/C, yakıt pili yakıt çözeltisi (% ağ.) %4 NaBH<sub>4</sub> + %12 NaOH, membran Nafyon 117 ve 0,3L/dk kuru oksijen oksidant

Şekil 5.8’de laboratuvar şartlarında üretilen %89 porozite değerine sahip A-1 numunesi ve %80 porozite değerine sahip ticari alüminyum katalizör destek tabakası olarak kullanılmıştır. Söz konusu testlerde 0,47 mAh/mg NaBH<sub>4</sub> değeri A-1 numunesi ile 1 saatlik çalışma performansı sergilenmiştir. Ayrıca Şekil 5.9-10’da Tübitak 215M255 kodlu projesinde kullanılan ticari Cu ve Ni köpüklerin yakıt pili testi sonuçlarına yer verilmiştir.



Şekil 5.9. Anot kısmında ticari Cu köpük üzerine 2 mg cm<sup>2</sup> Pt/C katalizör kaplı difüzyon tabakası, katot kısmında 1 mg cm<sup>2</sup> Pt/C, yakıt pili yakıt çözeltisi (% ağı.) %4 NaBH<sub>4</sub> + %12 NaOH, membran Nafyon 117 ve 0,3L/dk kuru oksijen oksidant



Şekil 5.10. Anot kısmında ticari Ni köpük üzerine 2 mg cm<sup>2</sup> Pt/C katalizör kaplı difüzyon tabakası, katot kısmında 1 mg cm<sup>2</sup> Pt/C, yakıt pili yakıt çözeltisi (% ağı.) %4 NaBH<sub>4</sub> + %12 NaOH, membran Nafyon 117 ve 0,3L/dk kuru oksijen oksidant

Yapılan çalışmalar sonucunda ticari Cu ve Ni köpükler 60 dk test edilmiştir. Ticari Al köpük ise 30 dk boyunca sistemde aktif kalabilmiştir. Yakıt ile tepkimeye girmesinden dolayı ticari alüminyum köpük uzun süre test edilememiştir.

## 6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında laboratuvar şartlarında yer tutucu yöntemi ile açık hücreli alüminyum köpüklerin üretim tekniği üzerine çalışmalar yapılmış olup sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan üretim sonuçlarından elde edilen alüminyum köpüklerin uygulama alanlarında yeniliklerin ve iyileştirmenin araştırılması amacıyla  $\text{NaBH}_4$  yakıt pillerinde çalışma performansı incelenmiştir.

Açık hücreli alüminyum köpük üretimi için atmosfer kontrollü fırında farklı boyutlarda  $\text{NaCl}$  parçacıkları kullanılmıştır. 2-4, 1-2 ve 1 mm boyutlu  $\text{NaCl}$  parçacıkları kullanılmıştır. Kullanılan  $\text{NaCl}$  parçacık boyutları küçüldükçe eriyiğin sızma kabiliyeti zorlaşmaktadır. Bundan dolayı eriyiğin sızma kabiliyetinin artırılması amacıyla proses sonucunda kalıba dışarıdan basınçlı argon gazı uygulanarak sızma işlemi gerçekleştirilmiştir.

1mm'den daha küçük parçacıklarda ise sızma kabiliyetinin artırılması için mekanik karıştırma işlemi uygulanmasının uygun olacağı öngörülmektedir. En yüksek gözeneklilik değerinin hacimsel olarak %80 $\text{NaCl}$  %20  $\text{Al}$  kullanılmalıdır. Alüminyum oranının artırılması ile atık alüminyum tabaka kalınlığı artmaktadır.

Bu çalışmada 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Böylece farklı serilerin de aynı üretim parametreleri ile üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

Üretim sonucunda kalıptan çıkan köpüklerin uygulamalarda kullanılması maksadıyla ikinci imalat aşamalarından geçmesi gerekmektedir. Bu imalat aşamalarından tel erezyon ve su jeti ile istenilen boyutları elde etmek mümkündür. Ancak tel erezyon ile kesim işleminde ilerleme, akım ve tel kalınlığı parametrelerinin ayrıca araştırılması gerekmektedir. Su jeti ile kesimde ise aşındırıcı partiküllerin saçılmasından dolayı hücre duvarlarına ve düğüm noktalarına zarar vermektedirler. Ölçü hassasiyetinin olduğu çalışmalarda tel erezyon kullanılması önerilmektedir.

Gözenekli yapılarda porozite değerine göre tanımlanmaktadır. Üretilen alüminyum köpükler asgari %85 porozite değerlerine sahip olduğu hesaplanmıştır.

Ticari alüminyum köpükler ise %60-70 ve 80 porozite değerlerine sahiptir. Böylece ticari olarak yeni porozite değerlerine sahip alüminyum köpük seçeneğine sahip olma potansiyeli vardır.

Ticari alüminyum köpüklere göre üretilen alüminyum köpüklerin hücre duvarları kalınlığı daha yüksek değere sahipken hücre genişliği ise bununla beraber daha geniştir.

Elementel mikro-yapı analizinde köpüklerin hücre duvarlarında çökelti halinde Na, Cl ve diğer elementler bulunmaktadır. Alaşım bileşeni elementler ile alüminyum alaşımının yapısı değişmektedir. Böylece esas alaşıma göre farklı özellikler elde edilebilmektedir. Ayrıca NaCl parçacıklarını yapıdan uzaklaştırmanın daha hızlı yapılması gerekmektedir. Aksi halde yapıda korozyon belirtileri oluşmaktadır.

Çalışmanın esas amaçlarından olan yakıt pillerinde uygulama çalışması ticari köpükler ve laboratuvar şartlarında üretilen alüminyum köpükler ile karşılaştırılmıştır. Tübitak 215M255 projesi kapsamında yapılan çalışmalarla beraber incelenmiştir. Ticari alüminyum, laboratuvar şartlarında üretilen alüminyum, ticari bakır ve ticari nikel köpüklerin birim yakıttaki akım yoğunluğu sırası ile 0.12, 0.47, 0.81 ve 1.89 mAh/mg NaBH<sub>4</sub> değerleri elde edilmiştir. Literatür çalışmalarında NaBH<sub>4</sub> yakıt pillerinde alüminyum köpük çalışmalarına çok fazla değinilmemiştir. Yapılan çalışma neticesinde alüminyum köpüklerin kullanılması sistemde reaksiyona girerek kısıtlanmaktadır. Ayrıca ticari alüminyum köpük test hücresinde 30 dk çalışma sağlamasına karşın laboratuvarda üretilen köpükler ise test süresi boyunca çalışma sağlamıştır. Ayrıca kullanılan köpüklerin kalınlığı arttıkça elde edilen akım yoğunluğu değeri artmasının sebebi daha fazla yüzey alanına sahip olması ve reaksiyonda tepkiye girmesidir. Laboratuvar şartlarında üretilen alüminyum köpüklerin NaBH<sub>4</sub> yakıt pillerinde ilerleyen çalışmalarda kullanılabileceği öngörülmektedir.

İlerleyen yakıt pili teknolojisinde farklı yakıtlarda ve katalizör tipleri ile alüminyum köpüklerin denenmesi ile maliyet düşürülmesi hedeflenmektedir. Şu an ki sonuçlar ile alüminyum köpüklerin tüketilen kartuş niteliğinde çalışma gerçekleştirebileceği yorumu yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Ishizaki K., Komarneni S., Nanko M., *Porous Materials*, 1st ed., Kluwer Academic Publishers, Japonya, 1998.
- [2] Ashby M. F., Evans A. G., Fleck N. A., Gibson L. J., Hutchinson J. W., Wadley H. N. G., *Metal Foams: A Design Guide*, 1st ed., Butterworth Heinemann, Woburn, 2000.
- [3] Degischer H. P., Kriszt B., *Handbook of Cellular Metals, Production, Processing and Applications*, Wiley VCH, Weinheim, 2002.
- [4] Davies G. J., Zhen S., *Metallic Foams: Their Production, Properties and Applications*, J. Mater. Sci., 1983, **18**(1), 1899-1911.
- [5] Özer G., Alüminyum Esaslı Köpük Metal Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 198965.
- [6] Ozan S., Katı N., Metal Köpükler, *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Türkiye, 16-18 Mayıs 2011.
- [7] Arges C. G., Prabhakaran V., Wang L., Ramani V., Bipolar Polymer Electrolyte Interfaces for Hydrogen-Oxygen and Direct Borohydride Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(26), 14312–14321.
- [8] Çelik C., Doğrudan Sodyum Borhidrüllü Yakıt Pili Proses Parametrelerinin Verim Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 197911.
- [9] Okur O., Doğrudan Sodyum Borhidrüllü Yakıt Pili Anot ve Katot Elektrokatalizörünün Sentezi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 321350.
- [10] Banhart, J., Light-Metal Foams- History of Innovation and Technological Challenges, *Advanced Engineering Materials*, 2013, **15**(3), 82–111.
- [11] Elliott, J. C., Metal Foaming Process, 1961, U. S. Patent No. 3,005,700., *United States Patent and Trademark Office*.
- [12] Akiyama S., Hidetoshi U., Imagawa K., Kitahara A., Nagota S., Metal and Method of Producing Same, 1987, U. S. Patent No. 4,713,277, *United States Patent and Trademark Office*.
- [13] Jin I., Kenny L., Method of Producing Lightweight Foamed Metal, 1990, U. S. Patent No. 4,973,358, *United States Patent and Trademark Office*.

- [14] Mukherjee M., Evolution of Metal Foams During Solidification, Ph. D. Thesis, TU Berlin, Berlin, 2009.
- [15] Baumeister J.B., Schrader H., Methods for Manufacturing Foamable Metal Bodies, 1992 U. S. Patent No. 5,151,246, *United States Patent and Trademark Office*.
- [16] Gergely V., Clyne B., The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors, *Advanced Engineering Materials*, 2000, **2**, 175-178.
- [17] Leitlmeier D., Degischer H. P., Flankl H. J., (2002), Development of A Foaming Process for Particulate Reinforced Aluminium Melts, *Advanced Engineering Materials*, 2002, **10**, 735-740.
- [18] Banhart J., Aluminium Foams for Lighter Vehicles, *Int. J. Vehicle Design*, 2005, **37**(2/3), 114-125.
- [19] Banhart J., Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams, *Materials Science*, DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5.
- [20] Ashby M. F., *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, 1st ed., Wiley-vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
- [21] Körner C., Singer R.F., Processing of Metal Foams Challenges and Opportunities, *Advanced Engineering Materials*, 2000, **2**(4), 159–165.
- [22] Yavuz İ, Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2010, **1**, 49-58.
- [23] Ertürk A., Alüminyum Köpük Malzemelerin Uygulamaya Yönelik Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 348737.
- [24] Yamada Y., Shimojima K., Sakaguchi Y., Mabuchi M., Nakamura M., Asahina T., Mukai T., Kanahashi H., Higashi K., Processing of Cellular Magnesium Materials, *Advanced Engineering Materials*, 2000, **2**, 184-187.
- [25] Wen C. E., Yamada Y., Shimojima K., Chino Y., Asahina T., Mabuchi M., Processing and Mechanical Properties of Autogenous Titanium Implant Materials, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2002, **13**(4), 397–401.
- [26] Elbir S., Yilmaz S., Toksoy A. K., Guden M., SiC-particulate Aluminum Composite Foams Produced by Powder Compacts: Foaming and Compression Behavior, *Journal of Materials Science*, 2003, **38**, 4745–4755.
- [27] Zou L. C., Zhang Q., Pang B. J., Wu G. H., Jiang L. T., Su H., Dynamic Compressive Behavior of Aluminum Matrix Syntactic Foam and Its Multilayer Structure, *Materials and Design*, 2013, **45**, 555-560.

- [28] Jha N., Mondal D. P., Dutta J., Badkul A., Jha A. K., Khare A. K., Highly Porous Open Cell Ti-Foam Using NaCl as Temporary Space Holder Through Powder Metallurgy Route, *Materials and Design*, 2013, **47**, 810-819.
- [29] Ertürk A. T., Production of Aluminum Glass Fiber Reinforced Foam Synthesized by Space-Holder Technique, *Acta Physica Polonica*, DOI: 10.12693/APhysPolA.129.592.
- [30] Amjad S., Thermal Conductivity And Noise Attenuation In Aluminium Foams, Master's Thesis, University of Cambridge, Cambridge, 2001.
- [31] Manonukul A., Muenya N., Léaux F., Amaranan S., Effects of Replacing Metal Powder with Powder Space Holder on Metal Foam Produced by Metal Injection Moulding, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**, 529-535.
- [32] Mansourighasri A., Muhamad N., Sulong A. B., Processing Titanium Foams Using Tapioca Starch as A Space Holder, *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, **212**, 83-89.
- [33] Shimizu T., Matsuzaki K., Nagai H., Kanetake N., Production of High Porosity Metal Foams Using EPS Beads As Space Holders, *Materials Science and Engineering: A*, 2012, **558**, 343-348.
- [34] Smorygo O., Marukovich A., Mikutski V., Gokhale A. A., Reddy G. J., Kumar J. V., High-Porosity Titanium Foams by Powder Coated Space Holder Compaction Method, *Materials Letters*, 2012, **83**, 17-19.
- [35] Shimizu, T., Matsuzaki, K., Nagai, H., & Kanetake, N., Production of High Porosity Metal Foams Using EPS Beads As Space Holders, *Materials Science and Engineering: A*, DOI:10.1016/j.msea.2012.08.010.
- [36] Hassani A., Habibolahzadeh A., Bafti H., Production of Graded Aluminum Foams Via Powder Space Holder Technique, *Materials and Design*, 2012, **40**, 510-515.
- [37] Golabgir M. H., Ebrahimi-Kahrizsangi R., Torabi O., Tajizadegan H., Jamshidi A., Fabrication and Evaluation of Oxidation Resistance Performance of Open-Celled Fe(Al) Foam by Space-Holder Technique, *Advanced Powder Technology*, 2014, **25**(3), 960-967.
- [38] Rupérez E., Manero J. M., Riccardi K., Li Y., Aparicio C., Gil F. J., Development of tantalum Scaffold for Orthopedic Applications Produced by Space-Holder Method, *Materials and Design*, 2015, **83**, 112-119.
- [39] Adamek G., Jakubowicz J., Tantalum Foam Made with Sucrose as A Space Holder, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, **53**, 51-55.

- [40] Moradi M. R., Moloodi A. Habibolahzadeh A., Fabrication of Nanocomposite Al-B4C Foam Via Powder Metallurgy-Space Holder Technique, *Procedia Materials Science*, 2005, **11**(2000), 553–559.
- [41] Velasco B., Gordo E., Tsipas S. A., MAX phase Ti<sub>2</sub>AlC Foams Using a Leachable Space-Holder Material, *Journal of Alloys and Compounds*, 2005 **646**, 1036–1042.
- [42] Mondal D. P., Jain H., Das S., Jha A. K., Stainless Steel Foams Made Through Powder Metallurgy Route Using NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> As Space Holder, *Materials and Design*, 2015, **88**, 430–437.
- [43] Noorsyakirah A., Mazlan M., Afian O. M., Aswad M. A., Jabir S. M., Nurazilah M. Z., Bakri M. H. M., Application of Potassium Carbonate As Space Holder for Metal Injection Molding Process of Open Pore Copper Foam, *Procedia Chemistry*, 2006, **19**, 552–557.
- [44] Aida S. F., Hijrah M. N., Amirah A. H., Zuhailawati H. Anasyida A. S., Effect of NaCl as a Space Holder in Producing Open Cell A356 Aluminium Foam by Gravity Die Casting Process, *Procedia Chemistry*, 2016, **19**, 234–240.
- [45] Shbeh M. M., Goodall R., Open Pore Titanium Foams Via Metal Injection Molding of Metal Powder with A Space Holder, *Metal Powder Report*, 2016, **71**(6), 450–455.
- [46] Xie B., Fan Y. Z., Mu T. Z., Deng, B., Fabrication and Energy Absorption Properties of Titanium Foam with CaCl<sub>2</sub> as A Space Holder, *Materials Science and Engineering: A*, 2017, **708**, 419–423.
- [47] Jiang B., Zhao N., Shi C., Li J., Processing of Open Cell Aluminum Foams with Tailored Porous Morphology, *Scripta Materialia*, 2005, **53**(6), 781–785.
- [48] Sertkaya A.A., Alüminyum Köpüğün Isı Değişiricisi Olarak Tasarımı ve Isı Transferi Modeli, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008, 178526.
- [49] Uzun A., TM Yöntemi ile Alüminyum Esaslı Küresel Şekilli Metalik Köpük Üretimi ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009, 245576.
- [50] García-Moreno F., Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production, *Materials*, 2016, **9**(2), 20–24.
- [51] Harte A.M., Fleck N.A., Ashby M.F., Fatigue Failure of An Open Cell and A Closed Cell Aluminium Alloy Foam, *Acta Materialia*, 1999, **47**(8), 2511–2524.
- [52] Kadar C. S., Kenesei P., Lendvai J., Rajkovits Z. S., Energy Absorption Properties of Metal Foams, *Department of General Physics*, Budapest, Hungary, 1-6 January 2005.



- [53] Daxner T., Böhm H. J., Rammerstorfer H. G., Mesoscopic Simulation of Inhomogeneous Metallic Foams with Respect to Energy Absorption, *Computer Material Science*, 1999, **16**, 61-69.
- [54] Yan C., Hao L., Hussein A., Raymont D., Evaluations of cellular Lattice Structures Manufactured Using Selective Laser Melting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, **62**, 32-38.
- [55] Lopatnikov S. L., Dynamics of Metal Foam Deformation During Taylor Cylinder–Hopkinson Bar Impact Experiment, *Composite Structures*, DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00039-4.
- [56] Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., Kitahara A., Alporas Aluminum Foams: Production Process, Properties and Applications, *Advanced Engineering Materials*, 2000, **2**, 179-183.
- [57] Yılmaz A., Ünvar S., Ekmen M., Aydın S., Yakıt Pili Teknolojisi, *Technological Applied Sciences*, 2017, **4**, 185-192.
- [58] Hermann A., Chaudhuri T., Spagnol P., Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, **30**(12), 1297–1302.
- [59] Bıyıkoğlu A., Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Bugünkü Durumu, *Gazi University Journal of Science*, 2003, **16**, 523–542.
- [60] Hall J. L., Cell Components, *Phytochemistry*, 1987, **26**(4), 1235–1236.
- [61] Yeğen G., Doğrudan Metanol Yakıt Pili Membran Elektrot Bileşkesinin Tasarım ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 252694.
- [62] Morgan J. M., Datta R., Understanding The Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel Cells, 1st How Its Structural Characteristics Affect Diffusion and Performance, *Journal of Power Sources*, 2014, **251**, 269–278.
- [63] Omrani R., Shabani B., Review of Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane-Based Technologies with A Focus on Unitised Regenerative Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, **44**(7), 3834–3860.
- [64] Ozden A., Alaefour I. E., Shahgaldi S., Li X., Colpan C. O., Hamdullahpur F., Gas Diffusion Layers for PEM Fuel Cells: Ex- and In-Situ Characterization, Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions, *Academic Press*, London, UK., 2017, 253–277.
- [65] Atiyeh H. K., Karan K., Peppley B., Phoenix A., Halliop E., Pharoah J., Experimental Investigation of The Role of A Microporous Layer on The Water Transport and Performance of A PEM Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2007, **170**(1), 111–121.

- [66] Cindrella L., Kannan A. M., Lin J. F., Saminathan K., Ho Y., Lin C. W., Wertz J., Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells-A Review, *Journal of Power Sources*, 2009, **194**(1), 146–60.
- [67] Fadzillah D. M., Rosli M. I., Talib M. Z. M., Kamarudin S. K., Daud W. R. W., Review on Microstructure Modelling of A Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **77**, 1001–1009.
- [68] Kandlikar S. G., See E. J., Koz M., Gopalan P., Banerjee R., Two-Phase Flow in GDL and Reactant Channels of A Proton Exchange Membrane Fuel Cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(12), 6620–6636.
- [69] Majlan E. H., Rohendi D., Daud W. R. W., Husaini T., Haque M. A., Electrode for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **89**, 117–134.
- [70] Murphy O. J., Cisar A., Clarke E., Low-cost Light Weight High Power Density PEM Fuel Cell Stack, *Electrochimica Acta*, 1998 **43**(24), 3829–3840.
- [71] Shrivastava N. K., Harris T. A. L., Direct Methanol Fuel Cells, *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 2017, **3**(1), 343–357.
- [72] Arisetty Sr., Prasad A. K., Advani S. G., Metal Foams As Flow Field and Gas Diffusion Layer in Direct Methanol Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2007, **165**(1), 49–57.
- [73] Tawfik H., Y. Mahajan Hung. D., Metal Bipolar Plates for PEM Fuel Cell-A Review, *Journal of Power Sources*, 2007, **163**(2), 755–767.
- [74] Kim J., Cunningham N., Development of Porous Carbon Foam Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2010, **195**(8), 2291–2300.
- [75] Lee J. S., Park G. S., Kim S. T., Liu M., Cho J. A Highly Efficient Electrocatalyst for the Oxygen Reduction Reaction: N-Doped Ketjenblack Incorporated into Fe/Fe<sub>3</sub>C-Functionalized Melamine Foam, *Angewandte Chemie*, 2012, **125**(3), 1060–1064.
- [76] Oliveira V. B., Pereira J. P., Pinto A. M. F. R., Effect of Anode Diffusion Layer (GDL) on the Performance of A Passive Direct Methanol Fuel Cell (DMFC), *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**(42), 19455–19462.
- [77] Ma J., Choudhury N. A., Sahai Y., A Comprehensive Review of Direct Borohydride Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2010 **14**(1), 183–199.
- [78] Li Y. S., Zhao T. S., Liang Z. X., Performance of Alkaline Electrolyte-Membrane-Based Direct Ethanol Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2009 **187**(2), 387–392.

- [79] Çağlayan İ., Pd-Zn Kaplı Bakır Köpük Kullanımının Doğrudan Borhidrür Yakıt Pili Performansına Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2019, 598571.
- [80] Aydın S., Paladyum Kaplı Paslanmaz Çelik Elektrot Yapısının Doğrudan Borhidrür Yakıt Pili Performans Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2019, 612692.
- [81] Carrette L., Friedrich K. A., Stimming U., Fuel Cells-Fundamentals and Applications, *Fuel Cells*, 2001, **1**(1), 5–39.
- [82] Zhang Y., Zha S., Liu M., Dual-Scale Porous Electrodes for Solid Oxide Fuel Cells from Polymer Foams, *Advanced Materials*, 2005 **17**(4), 487–491.
- [83] Saraç B., Paladyum Kaplı Nikel Köpüğün Doğrudan Borhidrür Yakıt Pili Performansa Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2019, 598700.
- [84] Wee J.H., A Comparison of Sodium Borohydride As A Fuel For Proton Exchange Membrane Fuel Cells and For Direct Borohydride Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2006, **155**(2), 329–339.
- [85] Li Z. P., Liu B. H., Arai K., Suda S., Development of The Direct Borohydride Fuel Cell, *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, **404-406**, 648–652.
- [86] Li Z. P., Liu B. H., Arai K., Suda S., A Fuel Cell Development for Using Borohydrides As the Fuel, *Journal of The Electrochemical Society*, 2003, **150**(7), 868-872.
- [87] Oh T. H., Gang B. G., Kim H., Kwon S., Sodium Borohydride Hydrogen Generator Using Co-P/Ni Foam Catalysts for 200 W Proton Exchange Membrane Fuel Cell System, *Energy*, 2015, **90**, 1163–1170.
- [88] Cao D., Gao Y., Wang G., Miao R., Liu Y., A Direct NaBH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Fuel Cell Using Ni Foam Supported Au Nanoparticles as Electrodes, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, **35**(2), 807–813.
- [89] Gauthier E., Benziger J. B., Gas Management and Multiphase Flow in Direct Alcohol Fuel Cells, *Electrochimica Acta*, 2014, **128**, 238–247.
- [90] He Y. L., Miao Z., Zhao T. S., Yang W. W., Numerical Study of the Effect of the GDL Structure on Water Crossover in a Direct Methanol Fuel Cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(5), 4422–4438.
- [91] Wang W. L., He S. M., Lan C. H., Protective Graphite Coating on Metallic Bipolar Plates for PEMFC Applications, *Electrochimica Acta*, 2012, **62**, 30–35.
- [92] Wang Z. H., Wang C. Y., Mathematical Modeling of Liquid-Feed Direct Methanol Fuel Cells, *Journal of The Electrochemical Society*, 2003, **150**(4), 508-519.

- [93] Kamarudin S. K., Achmad F., Daud W. R. W., Overview on the Application of Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) for Portable Electronic Devices, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, **34**(16), 6902–6916.
- [94] Ling C. Y., Ee S. L., Birgersson E., Three-Dimensional Approximate Analytical Solutions Fordirect Liquid Fuel Cells, *Electrochimica Acta*, 2013, **109**, 305–315.
- [95] Ong B. C., Kamarudin S. K., Basri S., Direct Liquid Fuel Cells: A Review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(15), 10142–10157.
- [96] Schenk A., Cermenek B., Hacker V., Other Polymer Electrolyte Fuel Cells, Editors: Hacker V., Mitsushima S., *Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier B.V., 2018, 91-115
- [97] Li Z. P., Liu Z. X., Qin H. Y., Zhu K. N., Liu B. H., Performance Degradation of A Direct Borohydride Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2013, **236**, 17-24.
- [98] Zabel T., Thomsen A. C. V., Cole C., Martin R., Mahone E. M., Reliability Concerns in The Repeated Computerized Assessment of Attention in Children, *Clinical Neuropsychologist*, 2009, **23**(7), 12–31.
- [99] Zamel N., Xianguo L., Effective Transport Properties for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells-with a Focus on The Gas Diffusion Layer, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, **39**(1), 111–146.
- [100] Carton J. G., Olabi A. G., Three-Dimensional Proton Exchange Membrane Fuel Cell Model: Comparison of Double Channel and Open Pore Cellular Foam Flow Plates, *Energy*, 2017, **136**, 185–195.
- [101] Antunes R. A., Oliveira M. C. L., Ett G., Ett V. Corrosion Of Metal Bipolar Plates For PEM Fuel Cells: A Review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, **35**(8), 3632–3647.
- [102] Tan W. C., Saw L. H., Thiam H. S., Xuan J., Cai Z., Yew M. C., Overview of Porous Media/Metal Foam Application in Fuel Cells and Solar Power Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **96**, 181–197.
- [103] Tseng C. J., Tsai B. T., Liu Z. S., Cheng T. C., Chang W. C., Lo S. K., A PEM Fuel Cell with Metal Foam as Flow Distributor, *Energy Conversion and Management*, 2012, **62**, 14–21.
- [104] Yuan W., Tang Y., Yang X., Wan Z., Porous Metal Materials for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells - A Review, *Applied Energy*, 2012, **94**, 309–329.
- [105] Baroutaji A., Carton J. G., Stokes J., A. Olabi G., Application of Open Pore Cellular Foam for Air Breathing PEM Fuel Cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(40), 25630–25638.

- [106] Ferreira-Aparicio P., Conde J. J., Chaparro A. M., Fundamentals and Components of Portable Hydrogen Fuel-Cell Systems, Editors: Ferreira-Aparicio P., Chaparro A. M., *Portable Hydrogen Energy Systems: Fuel Cells and Storage Fundamentals and Applications*, 1st ed., Oxford, UK., Elsevier Inc., 15–39, 2018.
- [107] Alsabet M., Jerkiewicz G., Surface Science and Electrochemical Analysis of Nickel Foams, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2012, **4**, 3012–3021.
- [108] Gao J., Xuan H., Xu Y., Liang T., Han X., Yang J., Han P., Wang D., Du Y., Interconnected Network of Zinc-Cobalt Layered Double Hydroxide Stick on to RGO/Nickel Foam for High Performance Asymmetric Supercapacitors, *Electrochimica Acta*, 2018, **286**, 92–102.
- [109] Oh T. H., Kwon S., Effect of Manufacturing Conditions on Properties of Electroless Deposited Co-P/Ni Foam Catalyst for Hydrolysis of Sodium Borohydride Solution, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(21), 15925–15937.
- [110] Mallick R. K., Thombre S. B., Performance of Passive DMFC with Expanded Metal Mesh Current Collectors, *Electrochimica Acta*, 2017, **243**, 299–309.
- [111] An L., Zhao T. S., Xu J. B., A Bi-Functional Cathode Structure for Alkaline-Acid Direct Ethanol Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, **36**(20), 13089–13095.
- [112] Huo S., Cooper N. J., Smith T. L., Park J. W., Jiao K., Experimental Investigation on PEM Fuel Cell Cold Start Behavior Containing Porous Metal Foam as Cathode Flow Distributor, *Applied Energy*, 2017, **203**, 101–114.
- [113] Tsai B. T., Tseng C. J., Liu Z. S., Wang C. H., Lee C. I., Yang C. C., Lo S. K., Effects of Flow Field Design on the Performance of a PEM Fuel Cell with Metal Foam as the Flow Distributor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(17), 13060–13066.
- [114] Kumar A., Reddy R.G., Modeling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with Metal Foam in The Flow-Field of The Bipolar/End Plates, *International Journal of Power Sources*, 2003, **114**(2003), 54-62.
- [115] Yang F., Cheng K., Xue X., Yin J., Wang G., Cao D. Three-Dimensional Porous Ni Film Electrodeposited on Ni Foam: High Performance and Low-cost Catalytic Electrode for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Electrooxidation in KOH Solution, *Electrochimica Acta*, 2013, **107**, 194–199.
- [116] Dai H., Liliang Y., Wang P., Yao X., Rufford T., Lu M., Cheng H., High-Performance Cobalt–Tungsten–Boron Catalyst Supported on Ni Foam for Hydrogen Generation from Alkaline Sodium Borohydride Solution, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, **33**(16), 4405–4412.

- [117] Nakagawa K., Yasumura Y., Thongprachan N., Sano N., Freeze-Dried Solid Foams Prepared from Carbon Nanotube Aqueous Suspension: Application to Gas Diffusion Layers of A Proton Exchange Membrane Fuel Cell, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2011, **50**(1), 22–30.
- [118] Yang J., Cheng F., Liang J., Chen J., Hydrogen Generation by Hydrolysis of Ammonia Borane with A Nanoporous Cobalt–Tungsten–Boron–Phosphorus Catalyst Supported on Ni Foam, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, **36**(2), 1411–1417.
- [119] Ke X., Xu Y., Yu C., Zhao J., Cui G., Higgins D., Wu G., Nanoporous Gold on Three-Dimensional Nickel Foam: An Efficient Hybrid Electrode for Hydrogen Peroxide Electroreduction in Acid Media, *Journal of Power Sources*, 2014, **269**, 461–465.
- [120] Li S., Wang L., Chu J., Zhu H., Chen Y., Liu Y., Investigation of Au@Co-B Nanoparticles as Anode Catalyst for Direct Borohydride Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**(20), 8583–8588.
- [121] Eugénio S., Demirci U. B., Silva T. M., Carmezim M. J., Montemor M. F., Copper-Cobalt Foams As Active and Stable Catalysts for Hydrogen Release by Hydrolysis of Sodium Borohydride, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**(20), 8438–8448.
- [122] Eom K., Kim M., Kim R., Nam D., Kwon H., Characterization of Hydrogen Generation for Fuel Cells Via Borane Hydrolysis Using An Electroless-Deposited Co–P/Ni Foam Catalyst, *Journal Of Power Sources*, 2010, **195**(9), 2830–2834



## **EKLER**

## Ek-A Alüminyum köpüklerin kütle ve yoğunluk değerleri

Tablo A.1.1-2mm boyutunda NaCl kullanılan üretimlerde Al köpüklerin yoğunluk ve porozite değerleri

	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
Ağırlık (g)	2,360	2,344	2,336	2,376	2,384	2,368	5,488	5,440
Köpük Hacmi(cm <sup>3</sup> )	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	16,000	16,000
Köpük Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0,295	0,293	0,292	0,297	0,298	0,296	0,343	0,340
Porozite	89,074	89,148	89,185	89,000	88,963	89,037	87,296	87,407
	A-9	A-10	A-11	A-12	A-13	A-14	A-15	A-16
Ağırlık (g)	5,584	5,472	4,413	4,375	4,313	4,275	4,388	4,594
Köpük Hacmi(cm <sup>3</sup> )	16,000	16,000	12,500	12,500	12,500	12,500	12,500	13,200
Köpük Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0,349	0,342	0,353	0,350	0,345	0,342	0,351	0,348
Porozite	87,074	87,333	86,926	87,037	87,222	87,333	87,000	87,111
	A-17	A-18	A-19	A-20	A-21	A-22	A-23	A-24
Ağırlık (g)	3,775	3,750	3,700	3,738	4,200	2,560	2,520	2,600
Köpük Hacmi(cm <sup>3</sup> )	12,500	12,500	12,500	12,500	14,000	8,000	8,000	8,000
Köpük Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0,302	0,300	0,296	0,299	0,300	0,320	0,315	0,325
Porozite	88,815	88,889	89,037	88,926	88,889	88,148	88,333	87,96

Tablo A.2. 2-4mm boyutunda NaCl kullanılan üretimlerde Al köpüklerin yoğunluk ve porozite değerleri

	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8
Ağırlık (g)	3,013	3,038	3,572	2,663	2,613	2,738	2,337	27,930
Köpük Hacmi(cm <sup>3</sup> )	12,500	12,500	15,200	12,500	12,500	12,500	10,920	10,500
Köpük Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0,241	0,243	0,235	0,213	0,209	0,219	0,214	0,266
Porozite	91,074	91,000	91,296	92,111	92,259	91,889	92,074	90,148

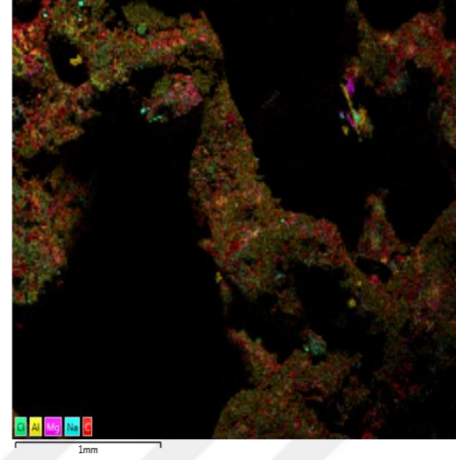
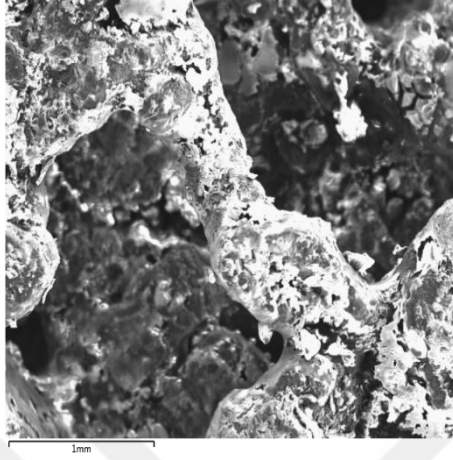


Tablo A.2.(Devam) 2-4mm boyutunda NaCl kullanılan üretimlerde Al köpüklerin yoğunluk ve porozite değerleri

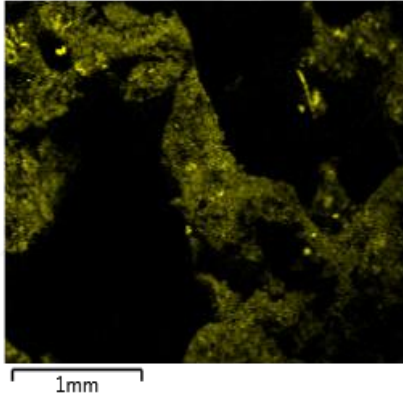
	B-9	B-10	B-11	B-12	B-13	B-14	B-15	B-16
Ağırlık (g)	4,402	4,519	4,536	4,435	2,664	2,672	2,720	2,640
Köpük Hacmi(cm <sup>3</sup> )	16,800	16,800	16,800	16,800	8,000	8,000	8,000	8,000
Köpük Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0,262	0,269	0,270	0,264	0,333	0,334	0,340	0,330
Porozite	90,296	90,037	90,000	90,222	87,667	87,630	87,407	87,778
	B-17	B-18	B-19	B-20	B-21	B-22	B-23	B-24
Ağırlık (g)	2,624	2,664	2,688	1,188	1,199	1,224	1,210	1,195
Köpük Hacmi(cm <sup>3</sup> )	8,000	8,000	8,000	3,600	3,600	3,600	3,600	3,600
Köpük Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0,328	0,333	0,336	0,330	0,333	0,340	0,336	0,332
Porozite	87,852	87,667	87,556	87,778	87,667	87,407	87,556	87,704
	B-25	B-26	B-27	B-28	B-29	B-30	B-31	B-32
Ağırlık (g)	1,188	1,199	3,263	3,288	4,096	3,325	3,313	3,275
Köpük Hacmi(cm <sup>3</sup> )	3,600	3,600	12,500	12,500	16,000	12,500	12,500	12,500
Köpük Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0,330	0,333	0,261	0,263	0,256	0,266	0,265	0,262
Porozite	87,778	87,667	90,333	90,259	90,519	90,148	90,185	90,296
	B-33	B-34	B-35	B-36	B-37	B-38	B-39	B-40
Ağırlık (g)	4,336	1,941	1,927	1,921	1,982	1,509	1,431	1,441
Köpük Hacmi(cm <sup>3</sup> )	16,000	6,859	6,859	6,859	6,859	5,202	5,202	5,202
Köpük Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0,271	0,283	0,281	0,280	0,289	0,290	0,275	0,277
Porozite	89,963	89,519	89,593	89,630	89,296	89,259	89,815	89,741
	B-41	B-42						
Ağırlık (g)	1,457	1,472						
Köpük Hacmi(cm <sup>3</sup> )	5,202	5,202						
Köpük Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0,280	0,283						
Porozite	89,630	89,519						

## Ek-B Alüminyum köpüklerin SEM görüntüleri

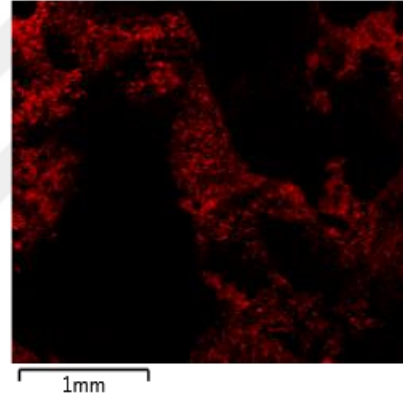
Tablo B.1. A-1 numunesine ait SEM ve EDS analizi



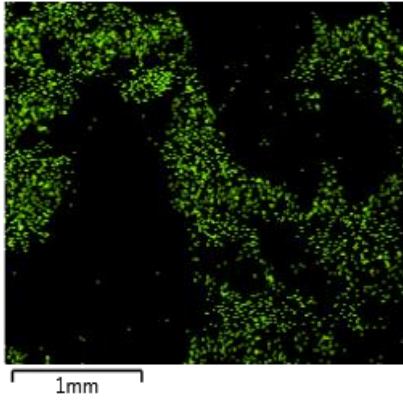
Al K $\alpha$ 1



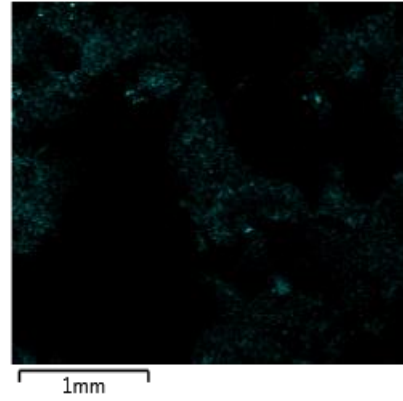
C K $\alpha$ 1\_2



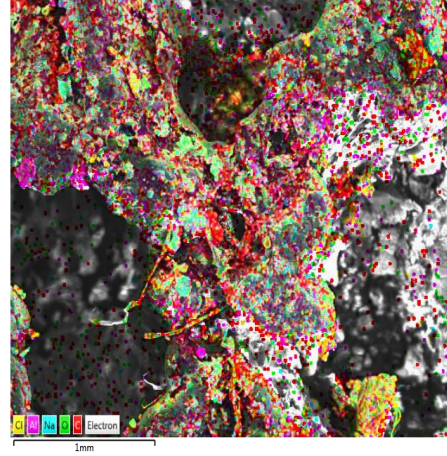
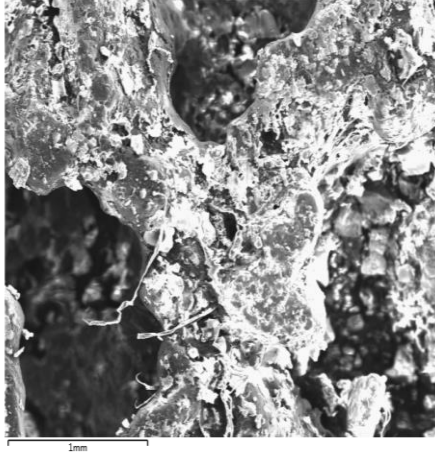
S K $\alpha$ 1



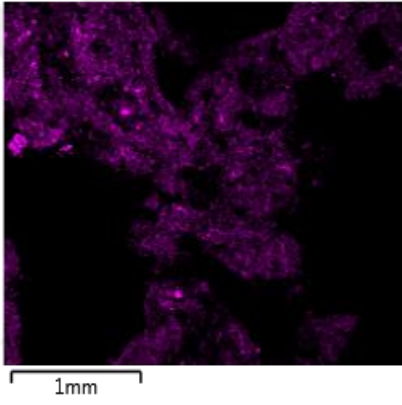
Na K $\alpha$ 1\_2



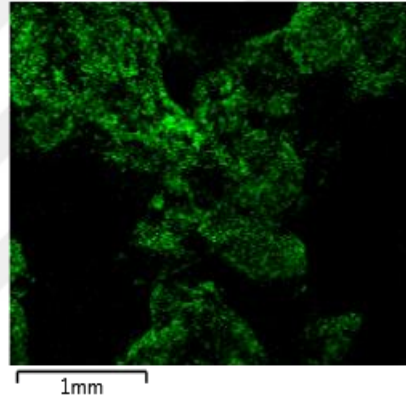
Tablo B.2. B-1 numunesine ait SEM ve EDS analizi



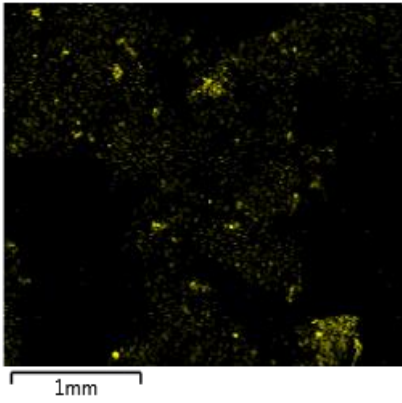
Al K $\alpha$ 1



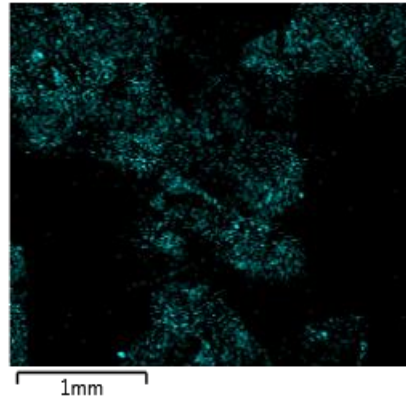
O K $\alpha$ 1



Cl K $\alpha$ 1



Na K $\alpha$ 1\_2



## Ek-C Alüminyum köpüklerin Vickers sertlik değerleri

Tablo C.1. Alüminyum köpüklerin Vickers sertlik değerleri

	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ortalama
A-1	92,2	87	81,6	80	75,5	82,3	83,10
A-2	84,2	81,8	83,2	77,4	81,3	82,1	81,67
A-3	76,5	83	81,5	76,1	82,5	82,5	80,35
A-4	68,1	79,1	71,5	87,9	83,9	85,2	79,28
A-5	79,5	82,5	88,4	87,6	65,8	72,8	79,43
A-6	36,9	34	36,1	39	38,1	38	37,02
B-1	98,6	102	94,4	88,9	89,2	92,6	94,28
B-2	87,6	88,9	90	84,2	84,2	84,8	86,62
B-3	77,8	76,1	77,6	82,7	84,5	79,8	79,75
B-4	89,4	93	75,3	77,1	78,4	85,2	83,07
B-5	83,6	88,2	83	87,1	84,9	86,6	85,57
B-6	77,6	74,3	81,1	90	70,4	81,3	79,12

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Bulduk M.E., Ertürk A.T., Coşkun M., Tarakçı G., **Ergin U.**, The Microstructure and Mechanical Properties Of Porous Structures Produced From AlSi10Mg by Direct Metal Laser Sintering, *AMC Turkey*, İstanbul, 17-18 Ekim 2019.



## ÖZGEÇMİŞ

Uğur ERGİN ilk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Konya ili Birol Polat İlköğretim Okulu, Muhittin Güzelkılınç Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2012 yılında girdiği Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 1 sene İngilizce hazırlık okuduktan sonra 2017 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine hak kazandı. 2017 yılında Tübitak'ın 215M255 nolu "Laboratuvar Şartlarında Üretilen Membran ve Membran Elektrot Üniteleri Kullanılarak Tasarlanan Doğrudan Borhidrüllü Yakıt Piline İşletim Parametrelerinin Verim Üzerine Etkisinin İncelenmesi" projesinde araştırma mühendisi olarak 1 yıl çalışmıştır. Mesleki hayatının bundan sonraki döneminde akademik çalışmalarına doktora programı ile devam etmek ve araştırma geliştirme faaliyetlerinde yer almak üzerine planlamaktadır. 2020 yılından beri RotaSeal Sealing Systems Şirketinde Üretim Departmanında özel salmastra ve başlık imalatında üretim sorumlusu olarak çalışmaktadır.