



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
CUMHURBAŞKANLIĞI
SAVUNMA SANAYİİ
BAŞKANLIĞI



YAKIT HÜCRESİ OTAĞ

SONUÇ RAPORU

EKİM 2025

TASNİF DIŞI



“

Milletimiz her güçlük ve zorluk karşısında, durmadan ilerlemekte ve yükselmektedir. Büyük Türk Milleti'nin bu yoldaki hızını, her vasıtayla artırmaya çalışmak, bizim hepimizin en kutlu vazifemizdir.

K. Atatürk



“

Türkiye, savunma sanayiindeki tüm stratejik ihtiyaçlarını kendisi tasarlayabilir, geliştirebilir, üretebilir ve bunların ihracatını yapabilir hale gelene kadar durmayacağız, dinlenmeyeceğiz, gece gündüz çalışacağız.

Recep Tayyip ERDOĞAN
Cumhurbaşkanı



Prof. Dr. Haluk Grgn
SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANI

SAYIN BAŞKAN N SÖZÜ

Savunma Sanayii Başkanlığı olarak ülkemizin rekabet gücünü artırma hedefiyle yürüttüğümüz projelere her geçen gün bir yenisini daha eklemekteyiz. Ulusal ve uluslararası arenada büyük başarılar imza atmak için gelişen ve değişen dünyada fark yaratacak teknolojileri platform ve sistemlerimize kazandırma hedefiyle Ar-Ge çalışmalarına odaklanmış durumdayız.

Silahlı Kuvvetlerimizin, Emniyet ve Güvenlik Glerimizin mevcut durumda ve geleceğin harekât ortamında ihtiyaç duyabileceği stratejik öneme sahip teknoloji konularını tespit ederek Odak Teknoloji Ağı (OTAğ) faaliyetlerini yürütmekte ve kazanım planlamalarının yapılabilmesi amacıyla yol haritaları oluşturamaktayız. Alanında uzman kurum, kuruluş ve üniversitelerden aktif katılımcıların destekleri ile oluşturulan yol haritalarımız, rekabet gücünün artırılmasını ve odak birliğini sağladığı gibi kurum/ kuruluşlar tarafından yapılacak çalışmalara da önemli katkılar sağlamaktadır.

Dünyada ve ülkemizde hem askeri hem de sivil sektörde yakıt hücresi teknolojileri üzerine gerçekleştirilen çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Savunma Sanayii Başkanlığı olarak "Yakıt Hücresi Teknolojileri" alanındaki gelişmelerin, dünya ile eř zamanlı takip edilmesi kadar, kazanılan teknolojilerle fark yaratılmasının özgün platform ve sistemlerimiz için elzem olduğunu değerlendirmekteyiz. Bu kapsamda, çalışmalarını yürüttüğümüz Yakıt Hücresi Teknolojileri Odak Teknoloji Ağı Sonuç Raporu'nu nihai hale getirdik.

"Yakıt Hücresi Odak Teknoloji Ağı" Sonuç Raporu'nun ülkemiz savunma sanayii için hayırlı olmasını diler, bu Yol Haritası'nın hazırlanmasında emeği geçen Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı başta olmak üzere, tüm Başkanlık personeline, değerli katkılarını esirgemeyen akademisyen, kurum, kuruluş ve sektör temsilcilerine göstermiş oldukları çaba için teşekkür eder, hazırlanan çalışmanın sektörün ihtiyaçlarının giderilmesinde kılavuz rolü üstlenmesini temenni ederim.

TABLolar	ii
ŞEKİLLER	iii
HAZIRLAYANLAR	v
1. AMAÇ	1
2. KAPSAM	1
3. TANIMLAR VE KISALTMALAR	2
4. YÖNETİCİ ÖZETİ	4
5. YÖNTEM	5
5.1 Önceliklendirme Metodolojisi	5
5.1.1 DEMATEL	6
5.1.2 AHP	6
5.1.3 TOPSIS	7
5.1.4 Önceliklendirme Analiz Yöntemi	8
6. GERÇEKLEŞTİRİLEN FAALİYETLER	9
6.1 Lansman Toplantısı	9
6.2 Yönlendirme Komitesi	9
6.3 Odak Çalışma Grubu Çalışmaları	10
6.3.1 I. OÇG Toplantısı	10
6.3.2 II. OÇG Toplantısı	14
7. TÜRKİYE VE DÜNYADA MEVCUT DURUM VE EĞİLİMLER	15
7.1 Yakıt Hücresi Modül / Yığın Geliştirme	15
7.1.1 Yakıt Hücresi Türleri ve Genel Özellikleri	15
7.1.2 PEMFC ve SOFC Modül Bileşenleri	16
7.1.3 Yakıt Hücresi Teknolojisinde Güncel Gelişmeler	19
7.1.4 Yakıt Hücresi Teknolojisinin Geleceği ve Araştırma Yönelimleri	20
7.2 Depolama ve Besleme Sistemleri	20
7.2.1 Hidrojen Depolama Yöntemleri	20
7.2.2 Hidrojen Depolama Tankları	24
7.3 Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri	27
7.3.1 Hava Besleme Sistemi	28
7.3.2 Hidrojen Besleme Sistemi	29
7.3.3 Soğutma Sistemi	30
7.3.4 Proses ve Kontrol Bileşenleri	31
7.4 Patent ve Yayın Analizi	31
7.4.1 Yayın Analizi	31
7.4.2 Patent Analizi	36
8. YAKIT HÜCREŞİ TEKNOLOJİLERİ ÖNCELİKLENDİRME ANALİZİ	62
8.1 Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme	62
8.1.1 Yakın Vade Alt Konu Başlıkları	62
8.1.2 Uzak Vade Alt Konu Başlıkları	63
8.2 Depolama ve Besleme Sistemleri	64
8.2.1 Yakın Vade Alt Konu Başlıkları	64
8.2.2 Uzak Vade Konu Başlıkları	64
8.3 Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri	65
8.3.1 Yakın Vade Alt Konu Başlıkları	65
8.3.2 Uzak Vade Konu Başlıkları	65
9. KAZANIM PLANI ÇALIŞMALARI	66
10. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER	67
11. REFERANSLAR	78

TABLOLAR

Tablo 1 AHP Yönteminde Kullanılan Önem Ölçeği	7
Tablo 2 Teknoloji Konularının Öncelik ve Vade Sıralamasında Öne Çıkan Kriterler	8
Tablo 3 Yönlendirme Komitesi Üye İsimleri	10
Tablo 4 İlişkilendirilmiş Taksonomi Başlıkları	11
Tablo 5 Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme OÇG Alt Konu Başlıkları	12
Tablo 6 Depolama ve Besleme Sistemleri OÇG Alt Konu Başlıkları	13
Tablo 7 Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri OÇG Alt Konu Başlıkları	13
Tablo 8 Tank Tipleri ve Özellikleri	27
Tablo 9 Yakın/Uzak Vade Kesme Noktası Parametreleri	62
Tablo 10 Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme Yakın Vade Alt Konu Başlıklarına Ait Teknoloji Konuları	63
Tablo 11 Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme Uzak Vade Alt Konu Başlıklarına Ait Teknoloji Konuları	63
Tablo 12 Depolama ve Besleme Sistemleri Yakın Vade Alt Konu Başlıklarına Ait Teknoloji Konuları	64
Tablo 13 Depolama ve Besleme Sistemleri Uzak Vade Alt Konu Başlıklarına Ait Teknoloji Konuları	64
Tablo 14 Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri Yakın Vade Teknoloji Konuları	65
Tablo 15 Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri Uzak Vade Teknoloji Konuları	65
Tablo 16 Yakın Vade Teknoloji Konuları	68
Tablo 17 Uzak Vade Teknoloji Konuları	69

ŞEKİLLER

Şekil 1 Önceliklendirme Metodolojisi Akış Şeması	5
Şekil 2 Ana Kriterler, Öznitelikler ve Alt Kriterler	5
Şekil 3 DEMATEL Yönteminde Kullanılan Etki Ölçeği ve DEMATEL Adımları	6
Şekil 4 AHP Yöntemi Adımları	7
Şekil 5 TOPSIS Yöntemi Adımları	7
Şekil 6 Katılımcı Dağılımı	9
Şekil 7 Önerilen Konu Sayısı ve Alt Konu Başlığı	12
Şekil 8 Önceliklendirme Çalışmaları için Gerekli Kriter Detayları	14
Şekil 9 II.OÇG Katılımcı Sayısı	14
Şekil 10 PEM yakıt hücresinin şematik gösterimi	15
Şekil 11 Yakıt Hücresi Türleri ve Yıllara Göre Pazar Durumu	17
Şekil 12 PEM Yakıt Hücresi Bileşenleri	17
Şekil 13 Çeşitli Hidrojen Depolama Yöntemlerinin Şematik Gösterimi	20
Şekil 14 Hidrojen Tankı ve Bileşenleri	21
Şekil 15 Basıncılı Gaz Depolama Tanklarının Sınıflandırılması	25
Şekil 16 Yıllara ve Ülkelere Göre Yakıt Hücresi Yayınları	32
Şekil 17 Yakıt Hücresi Türlerinin Yıllara Göre Dağılımı	33
Şekil 18 PEMFC ve SOFC yayınlarının ülkeler göre analizi	34
Şekil 19 Yakıt Hücresi (a) Bipolar Plaka (b) Modül Bileşenlerinin Yıllara Göre Analizi	35
Şekil 20 Yakıt Hücresi Konusunda Türkiye’de Yapılan Yayınların Dağılımı	36
Şekil 21 Yakıt Hücresi Yığın Sistemine Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	37
Şekil 22 Yakıt Hücresi Yığın Sistemine Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	37
Şekil 23 Yakıt Hücresi Yığını Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	38
Şekil 24 Yakıt Hücresi Yığını Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	38
Şekil 25 MEA Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	39
Şekil 26 MEA Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	39
Şekil 27 Bipolar Plaka Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	39
Şekil 28 Bipolar Plaka Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	40
Şekil 29 Katalizör ve Elektrokatalizör Konu Başlıklarına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	40
Şekil 30 Katalizör Başlığına Konu Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	41
Şekil 31 Hücre Tasarımı Başlığına Konu Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	41
Şekil 32 Hücre Tasarımı Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	42
Şekil 33 Soğutma Plakası Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	42
Şekil 34 Soğutma Plakası Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	43
Şekil 35 Membran Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	43
Şekil 36 Membran Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	44

ŞEKİLLER

Şekil 37 GDL Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	44
Şekil 38 GDL Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	45
Şekil 39 PEM Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	45
Şekil 40 PEM Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	46
Şekil 41 Depolama ve Besleme Sistemine Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	46
Şekil 42 Depolama ve Besleme Sisteminin Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	47
Şekil 43 Yakıt Dolum Sistemi ve Sıvı Yakıt Depolama Başlıklarına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	47
Şekil 44 Yakıt Dolum Sistemi ve Sıvı Yakıt Depolama Konu Başlıklarına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	48
Şekil 45 Hidrojen Üretim Sistemi ve Hidrojen Tedarik Sistemi Başlıklarına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	48
Şekil 46 Hidrojen Üretim Sistemi ve Hidrojen Tedarik Sistemi Başlıklarına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	49
Şekil 47 Metal Hidrür Tank Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	49
Şekil 48 Metal Hidrür Tank Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	50
Şekil 49 Reformer Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	50
Şekil 50 Reformer Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	51
Şekil 51 Basıncılı Gaz Tankları Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı	51
Şekil 52 Basıncılı Gaz Tankları Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı	52
Şekil 53 Yakıt Hücresi Yardımcı Elemanlar Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi	52
Şekil 54 Yakıt Hücresi Yardımcı Elemanlar Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi	53
Şekil 55 Yakıt Hücresi Hava Kompresörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi	53
Şekil 56 Yakıt Hücresi Hava Kompresörü Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi	54
Şekil 57 Yakıt Hücresi Kontrol Ünitesi Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi	54
Şekil 58 Yakıt Hücresi Kontrol Ünitesi Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi	55
Şekil 59 Yakıt Hücresi Soğutma Sistemi ve Su Yönetim Sistemi Konularına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi	55
Şekil 60 Yakıt Hücresi Soğutma Sistemi ve Su Yönetim Sistemi Konularına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi	56
Şekil 61 Yakıt Hücresi Isı Eşanjörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi	56
Şekil 62 Yakıt Hücresi Isı Eşanjörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi	57
Şekil 63 Yakıt Hücresi Nemlendirme Ünitesi Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi	57
Şekil 64 Yakıt Hücresi Nemlendirme Ünitesi Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi	58
Şekil 65 Yakıt Hücresi Hidrojen Sensörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi	58
Şekil 66 Yakıt Hücresi Hidrojen Sensörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi	59
Şekil 67 Yakıt Hücresi Pompa ve Devridaim Pompası Konularına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi	59
Şekil 68 Yakıt Hücresi Pompa ve Devridaim Pompası Konularına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi	60
Şekil 69 Yakıt Hücresi Regülatör/Valf Sistemleri Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi	60
Şekil 70 Yakıt Hücresi Regülatör/Valf Sistemleri Konularına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi	61
Şekil 71 Odak Çalışma Grupları ve Konu Öneri Sayıları	67

HAZIRLAYANLAR

AD SOYAD	KURUM/KURULUŞ
Dr. Ahmet ALTINAY	ASPILSAN
Dr. Almıla BAHAR DOĞAN	LENTATEK
Banu Şükran ŞENGEL KARAKUZU	SSB
Bekir YILMAZ	ASELSAN
Berfin Yaren KAYA	ROKETSAN
Beyza KARAGÖZ	ROKETSAN
Cemre ÖZEL	ROKETSAN
Ceren VANLI	ROKETSAN
Dr. Çiğdem KARADAĞ	TÜBİTAK MAM
Deniz DEMİRCİ	SSB
Dr. Erkut YILMAZ	TEMEN
Emre ATA	ASPILSAN
Doç. Dr. Fatma Gül BOYACI SAN	TÜBİTAK MAM
Hasan MERMER	SSB
Hüseyin Sertaç SÜMER	ROKETSAN
İbrahim PAMUK	LENTATEK
Lütfiye Sercan TURHAN ŞAMİLOĞLU	ROKETSAN
Melis ÖZEN	TUSAŞ
Merve KADAN	TUSAŞ
Murat Gökhan ESKİN	ASELSAN
Tufan CAN	SSB
Yağmur BUDAK	TEMEN
Yusuf Gökçe DEMİR	ROKETSAN
*Hazırlayanlar alfabetik olarak listelenmiştir.	

1. AMAÇ

Günümüzde giderek artan enerji ihtiyacı göz önüne alındığında gerek sivil gerek askeri alanda yakıt hücrelerinin kullanımı ve uygulama alanlarının hızla arttığı gözlemlenmektedir. Bu doğrultuda, Başkanlığımız tarafından yakıt hücresi konusunun, ihtiyaç, teknoloji ve yetenekler göz önünde bulundurularak yol haritası bütünlüğünde ele alınması önem arz etmektedir.

Savunma Sanayii Başkanlığı tarafından ülkemizde yakıt hücresi teknolojisinin geldiği noktanın belirlenmesi, mevcut durumda çalışılan ve gelecekte çalışılması planlanan konulara yönelik olarak yapılması gerekenler ile birbirini bütünleyen çalışmaların kurgulanması ile yakın ve uzak vadede öncelikli teknoloji konularının belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu amaç doğrultusunda, Yakıt Hücresi Odak Teknoloji Ağı faaliyetleri 14 Nisan 2023 tarihindeki Lansman Toplantısı ile başlatılmıştır. Bu kapsamda faaliyetler “Yakıt Hücresi Modül ve Yığın Geliştirme”, “Depolama ve Besleme Sistemleri” ile “Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri” odak çalışma grupları vasıtasıyla ele alınmış olup 19 Kasım 2024 tarihinde çalışmanın sonuçlarının paylaşıldığı Yakıt Hücresi OTAĞ Kapanış Toplantısı gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar işbu rapor ile sunulmaktadır.

Rapor kapsamında; ülkemiz hedefleri doğrultusunda kullanıcı yetenek ve ihtiyaçları temel alınarak yakıt hücresi teknolojilerinde mevcut durum analizi yapılmış, gelecekte çalışılması hedeflenen teknoloji konuları belirlenmiş ve değerlendirmeleri ile beraber sunulmuştur.

2. KAPSAM

Bu rapor, yakıt hücresi teknolojileri alanında deneyim sahibi olan firma, araştırma kurumu ve üniversiteden yaklaşık 128 temsilcinin katılımıyla gerçekleştirilen bir dizi toplantının ürünüdür. Yakıt Hücresi OTAĞ Sonuç Raporu kapsamında, ülkemizde yakıt hücresi teknolojilerindeki mevcut durum belirlenerek, halihazırda çalışılan ve gelecekte çalışılması planlanan konular değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda hazırlanan Yakıt Hücresi Teknolojileri Yol Haritası OTAĞ Sonuç Raporu’nun “Yöntem” bölümünde çalışma süresince izlenen metotlar ve aşamalar özetlenmektedir.

“Gerçekleştirilen Faaliyetler” bölümünde çalışma takvimi, katılımcıların görev dağılımları ve gerçekleştirilen toplantılara ilişkin bilgiler verilmektedir.

Yakıt Hücresi Teknolojileri konuları önceliklendirme analizinde; kritiklik, yapılabirlik, uygulanabilirlik ve risk konuları ele alınarak gerçekleştirilen analiz sonucunda öne çıkan teknolojiler “Yakıt Hücresi Teknolojileri Önceliklendirme Analizi” bölümünde değerlendirilmektedir.

Bu çalışmaların paralelinde, “Türkiye ve Dünyada Mevcut Durum ve Eğilimler” gözden geçirilmiş, yakıt hücresi teknolojilerindeki eğilimlere ve teknolojilerin sektörlere göre gelişimine ilişkin bilgiler sunulmuştur.

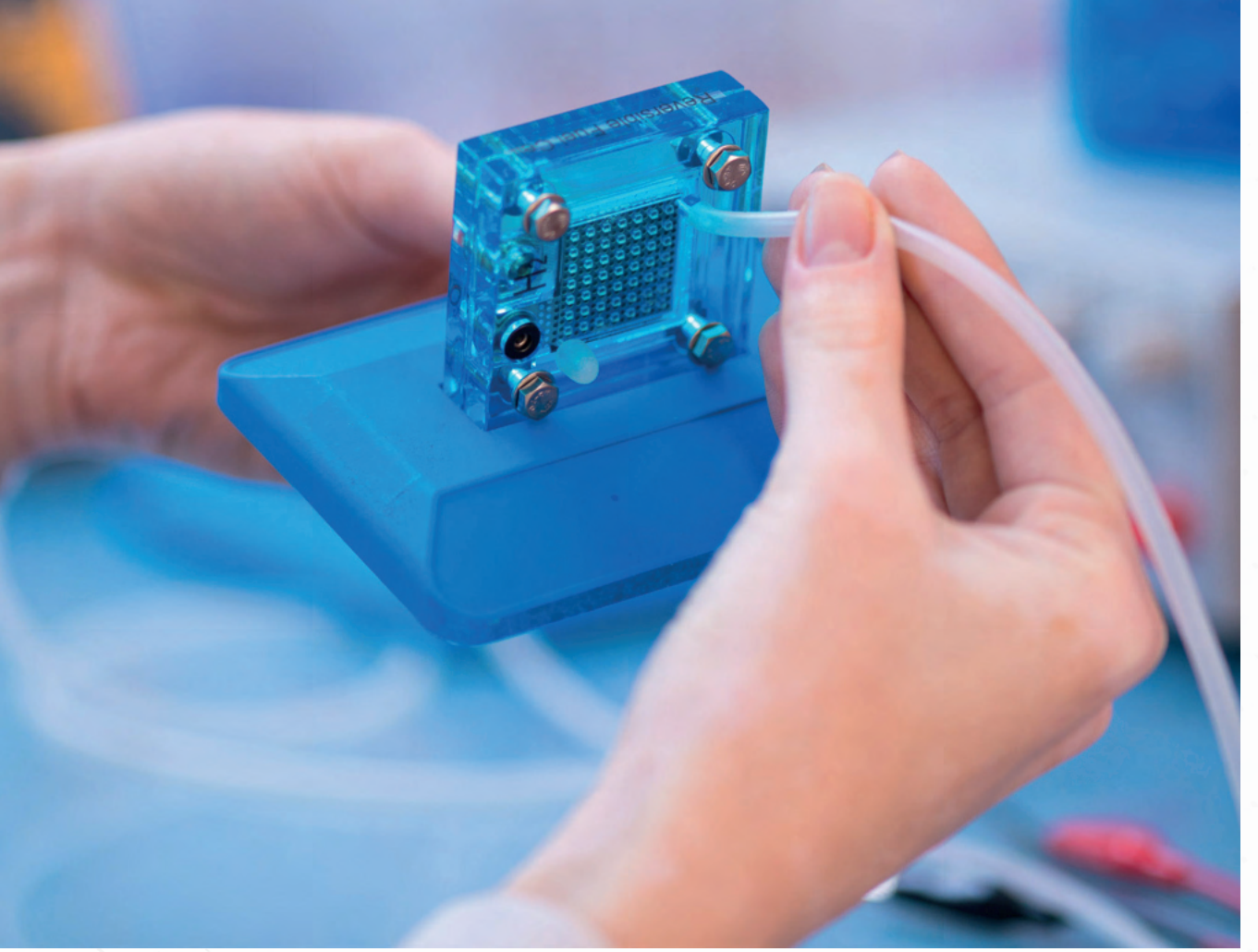
“Kazanım Planı Çalışmaları” bölümünde, öncelikli teknoloji konularının kazanımına yönelik yaklaşımlar ve fon sağlayıcıların projelendirme yöntemleri yer almaktadır.

Yakıt Hücresi OTAĞ çalışmasında elde edilen başlıca bulgular ile teknoloji konularının kazanımlarına yönelik değerlendirmelere raporun son bölümünde yer verilmiştir. Toplanan envanterler ile öncelikli olarak değerlendirilen konular arasında eşleştirme yapılarak öncelikli konuların ülkemizdeki durumu analiz edilmiştir.

3. TANIMLAR VE KISALTMALAR

°C	: Derece Santigrad
2B	: 2-boyutlu
3D	: 3-boyutlu
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Alternatif Akım
AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci (ing. Analytic Hierarchy Process)
Ar-Ge	: Araştırma ve Geliştirme
Atm	: Atmosfer Basıncı (ing. Atmospheric Pressure)
BOP	: Yardımcı ve Destek Elemanlar (ing. Balance of Plant)
C	: Karbon
$C_{10}H_8/C_{10}H_{18}$	: Naftalin/Dekalin
$C_{21}H_{20}/C_{21}H_{33}$	: Dibenziltoluen (DBT)/Perhidro-Dibenziltoluen
C_6H_6/C_6H_{12}	: Benzen/Sikloheksan
C_7H_8/C_7H_{14}	: Toluen/Metilsikloheksan
CGH ₂	: Sıkıştırılmış Hidrojen (ing. Compressed Gaseous Hydrogen)
CHP	: Birleşik Isı ve Güç (ing. Combined Heat and Power)
cm	: Santimetre
CO ₂	: Karbondioksit
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme (ing. Chemical Vapor Deposition)
DBT	: Dibenziltoluen
DC	: Doğru Akım (ing. Direct Current)
DEMATEL	: Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı (ing. Decision-Making Trail and Evaluation Laboratory)
DMYP	: Doğrudan Metanollü Yakıt Hücresi
EYDEP	: Endüstriyel Yetkinlik Değerlendirme ve Destekleme Programı
FTKR	: Füze Teknolojisi Kontrol Rejimi
GDL	: Gaz Difüzyon Tabakası (ing. Gas Diffusion Layer)
GHOST	: Geleceğin Harekât Ortamını Şekillendirecek Teknolojiler
H ₂	: Hidrojen
ITAR	: Uluslararası Silah Ticareti Düzenlemeleri (ing. International Traffic in Arms Regulations)
kW	: Kilowatt
LaNi ₅	: Lantan Penta-Nikel

LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (ing. liquefied petroleum gas)
LSM	: Lantan Stronsiyum Manganez
MCFC	: Ergimiş Karbonat Yakıt Hücresi (ing. Molten Carbonate Fuel Cell)
MEÜ	: Membran Elektrot Ünitesi
MgH ₂	: Magnezyum Hidrür
MPa	: Megapascal
MW	: Megawatt
NPT	: Nükleer Silahların Yayılmasının Önlemesi Antlaşması
OÇG	: Odak Çalışma Grubu
OTAĞ	: Odak Teknoloji Ağı
PAFC	: Fosforik Asit Yakıt Hücresi (ing. Phosphoric Acid Fuel Cell)
PEM	: Proton Değişim Membranı (ing. Proton Exchange Membrane)
PEMFC	: Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (ing. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)
PFSA	: Perflorosülfonik Asit
PID	: Oransal-İntegral-Türevsel Denetleyici Kontrol Döngüsü Yöntemi (ing. Proportional Integral Derivative)
SAGA	: Savunma Sanayii Ar-Ge Geniş Alan
SNG	: Sentetik Doğal Gaz (ing. Synthetic Natural Gas)
SOFC	: Katı Oksit Yakıt Hücresi (ing. Solid Oxide Fuel Cell)
SPAEK	: Sülfonatlanmış Poliarilen Eter Keton
SSB	: T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı
Teknoloji Konuları	: OTAĞ çalışması kapsamında, odak grup üyeleri tarafından savunma, havacılık ve uzay sanayi için stratejik öneme sahip teknoloji konuları ortak akıl ile saptanmış, mevcut durum değerlendirilmesi yapılmış, gelecekte kazanılması hedeflenen teknolojiler, kullanıcı makamlarının yetenek ihtiyaçlarını ifade etmektedir.
THS	: Teknoloji Hazırlık Seviyesi
Ti	: Titanyum
TOPSIS	: İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği (ing. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)
U/D	: Uygulanabilir Değil
W	: Watt
YETEN	: Savunma Sanayii Yetenek Envanteri
YHYH	: Yakıt Hücresi Yol Haritası
YSZ	: Yttriya Stabilizasyonlu Zirkonya



4. YÖNETİCİ ÖZETİ

Savunma Sanayii Başkanlığı öncülüğünde gerçekleştirilen Yakıt Hücresi Odak Teknoloji Ağı (OTAĞ) ile yakıt hücresi teknolojilerinde mevcut durumda çalışılan ve gelecekte çalışılmasına ihtiyaç duyulan konulara yönelik birbirini bütünleyen çalışmaların kurgulanması faaliyetleri yürütülmüştür.

Başkanlığımız 2024-2028 Stratejik Planı'nda yer alan geleceğe yön verecek teknoloji ve yetenekleri milli imkanlarla geliştirmek amacı ile günümüzün ve geleceğin teknolojilerine yönelik kapsayıcı ve istikrarlı gelişim sürdürülmesi sağlamak hedefi doğrultusunda gerçekleştirilen Yakıt Hücresi OTAĞ faaliyetleri; alanında deneyim sahibi temsilcilerin katılımıyla "Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme", "Depolama ve Besleme Sistemleri" ve "Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri" Odak Çalışma Grupları (OÇG) altında yürütülmüştür.

Odak grup üyeleri tarafından savunma, havacılık ve uzay sanayi için stratejik öneme sahip teknoloji konuları ortak akıl ile saptanmış, mevcut durum değerlendirilmesi yapılmış, gelecekte kazanılması hedeflenen teknolojiler, kullanıcı makamlarının yetenek ihtiyaçları ile ilişkilendirilmiştir.

Belirlenen teknoloji konularının önceliklendirilmesi, Yakıt Hücresi OTAĞ beklentilerine uygun AHP, DEMATEL, TOPSIS gibi Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metotları kullanılarak mümkün olduğunca nesnel olarak puanlanmış, teknoloji konularının yakın ve uzak kazanım vadeleri belirlenmiştir.

Yakıt Hücresi Odak Teknoloji Ağı Sonuç Raporu, gelecekte daha da önemli bir rol oynayacak Yakıt Hücresi Teknolojilerinin günümüz ihtiyaçları doğrultusunda ve geleceğe yönelik öngörüler ile hazırlanmıştır.

5. YÖNTEM

5.1 Önceliklendirme Metodolojisi

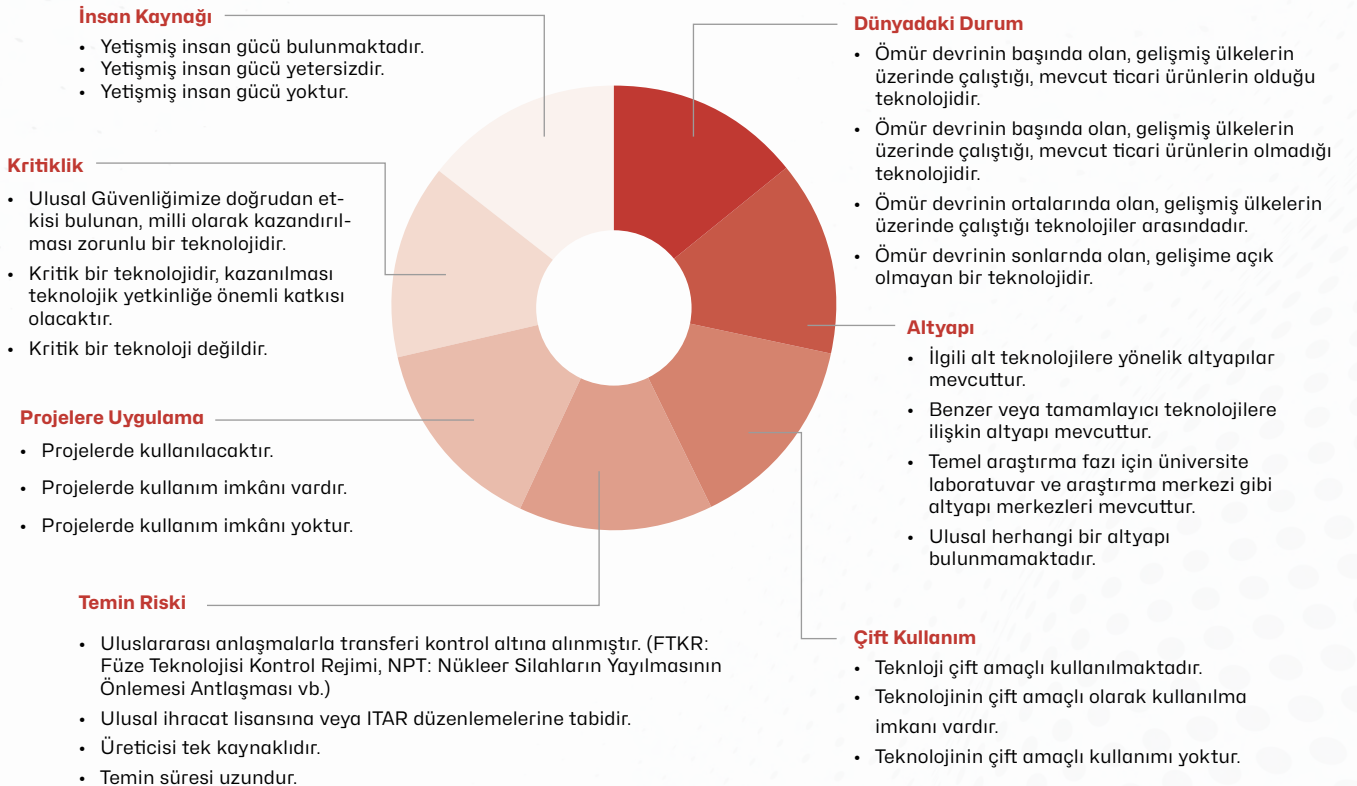
Yakıt Hücresi OTAĞ çalışmaları kapsamında belirlenen Teknoloji Konularının önceliklendirilmesi için SSB'nin OTAĞ çalışmalarında geliştirilen özgün önceliklendirme metodolojisi kullanılmıştır. Geliştirilen önceliklendirme metodolojisinin adımları ve her adımda kullanılan yöntem Şekil 1'de verilmiştir [1].



Şekil 1: Önceliklendirme Metodolojisi Akış Şeması

AHP ve DEMATEL yöntemleri ile kriter, alt kriter ve öznitelik ağırlıkları belirlenmiş, belirlenen pozitif ve negatif ideal Teknoloji Konuları referans alınarak TOPSIS metodu ile öncelik ve vade düzeylerine göre teknoloji konuları sıralanmıştır.

Geliştirilen metodolojiye göre Teknoloji Konularına ait öncelik ve vade değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Vade, bir teknolojinin ne zaman kullanıma hazır hale geleceğini veya etkisini göstereceğini ifade eder. Öncelik, bir teknolojinin ne kadar önemli olduğunu ve ne kadar hızlı bir şekilde geliştirilmesi veya uygulanması gerektiğini ifade eder. Bahse konu parametrelerin ayrı ayrı hesaplanmaları ile önceliklendirme çalışmasının kapsayıcılığı ve doğruluğu artırılmıştır. Belirlenen her bir Teknoloji Konusu için 7 ana kriter altında yer alan 20 alt öznitelik, 4 alt kriter üzerinden önceliklendirme değerlendirilmesi yapılmıştır. Değerlendirmede kullanılan ana nitelikler, öznitelikler ve alt kriterler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Ana Kriterler, Öznitelikler ve Alt Kriterler

Daha önceki OTAĞ çalışmalarında “Kritiklik” ana kriteri altında değerlendirilen ancak “Temin Riski” altında değerlendirilebilecek 4 alt kriter ayrıştırılarak ayrı ayrı ele alınmıştır. Mevcutta ana kriterler altındaki değerler tek bir öznitelik değeri seçimiyle belirlenmiş olup, “Temin Riski” altında ele alınan alt kriterlerin çoktan seçmeli yapısı bulunduğu için alt kriter değerleri “Evet/Hayır” seçenekleriyle belirlenmiştir.

5.1.1 DEMATEL

DEMATEL yöntemi, 1970’lerde Cenevre Battelle Enstitüsü tarafından geliştirilen, karmaşık sistemlerdeki nedensellik ilişkilerini ve kriterler arasındaki önem ağırlığını analiz etmek için kullanılarak sebep ve sonuç arasındaki bağlantıları görselleştirerek sistemin dinamiklerini anlamaya yardımcı olan bir yöntemdir [2].

Uzman görüşlerine dayanan DEMATEL yöntemi, bir matris ve çeşitli analiz teknikleri kullanarak sistem bileşenleri veya kriterler arasındaki etkileşimleri incelemektedir. Bu sayede, nedensellik zincirlerini ve sistemdeki veya problemdeki en önemli bileşenleri veya kriterleri belirlemek mümkün hale gelmektedir.

Bu çalışma kapsamında DEMATEL yöntemi, ilişkisi olduğu değerlendirilen kriterler arasında uygulanarak kriterlerin birbirleri arasındaki önem ağırlık hesabının belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu kapsamda, Ana Kriterlerin ve “Temin Riski” altındaki alt kriterlerinin önem ağırlıkları DEMATEL yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Belirlenen Ana Kriter ve Alt Kriter önem ağırlıkları ise TOPSIS yöntemine girdi olarak kullanılmıştır. DEMATEL yöntemi kapsamında takip edilen adımlar ve DEMATEL etki ölçeği Şekil 3’te sunulmaktadır.

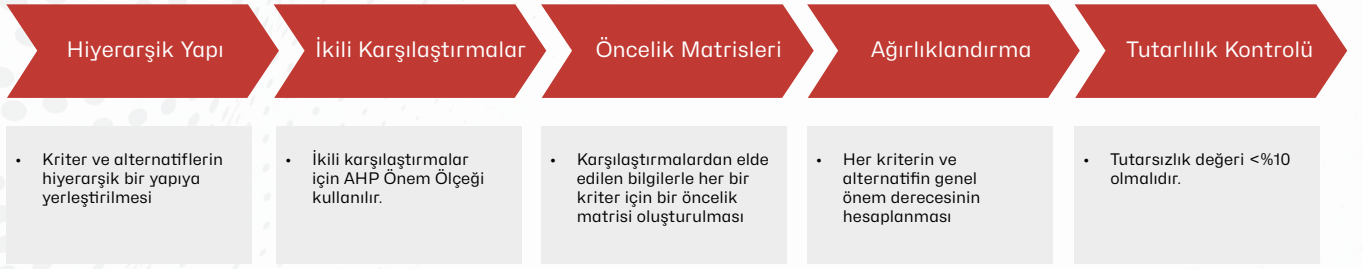


Şekil 3: DEMATEL Yönteminde Kullanılan Etki Ölçeği ve DEMATEL Adımları

5.1.2 AHP

AHP, karmaşık karar verme problemlerini çözmek için 1970’lerde Thomas L. Saaty tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir [3]. AHP, birden fazla kriteri ve alternatifi sistematik bir şekilde analiz ederek en uygun seçeneği belirlemeye yardımcı olur. AHP’nin temel prensibi, karmaşık bir problemi hiyerarşik bir yapıya indirgeyerek ve her bir seviyedeki unsurları ikili karşılaştırmalar yoluyla karşılaştırarak çözmektir.

2024 Yakıt Hücresi OTAĞ çalışmaları kapsamında, ilişkili olmayan kriterler altındaki özniteliklerin önem ağırlıklarının belirlenmesinde ise AHP yöntemi kullanılmıştır. AHP yönteminin adımları Şekil 4’te, AHP yönteminde kullanılan önem ölçeği ise Tablo 1’de sunulmuştur.



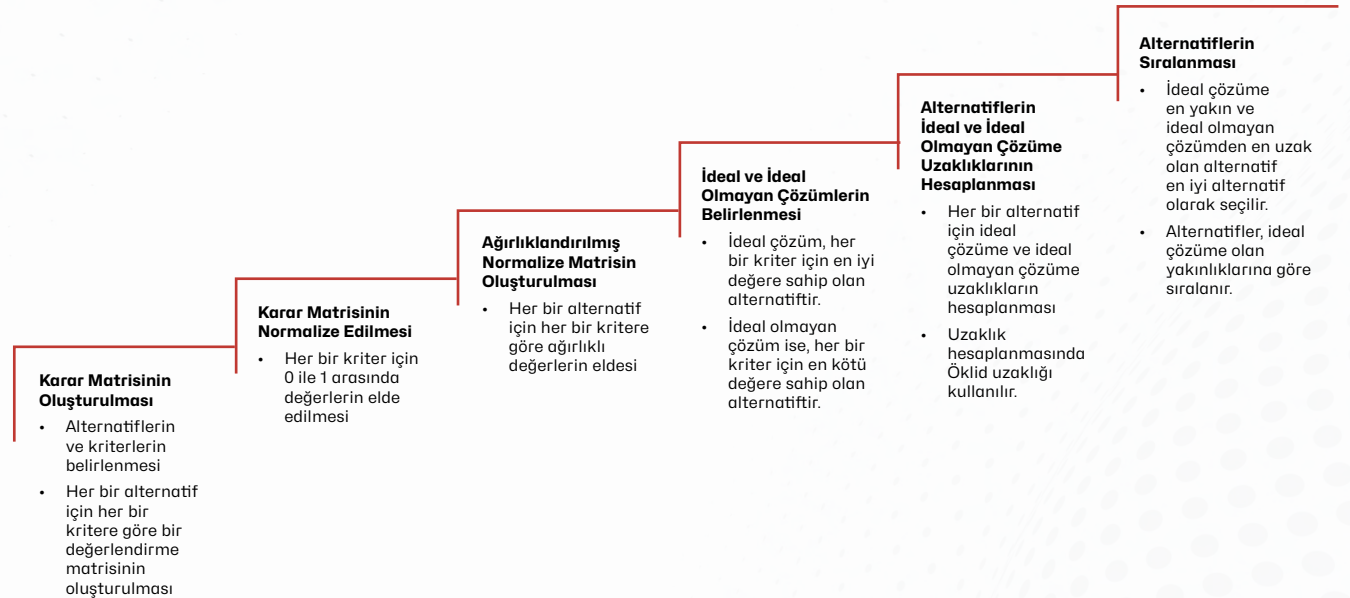
Şekil 4: AHP Yöntemi Adımları

Tablo 1: AHP Yönteminde Kullanılan Önem Ölçeği

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Eşit Önem	İki faaliyet amaca eşit düzeyde katkıda bulunmaktadır.
3	Orta Derecede Önem	Tecrübe ve yargı faaliyeti diğerine orta derecede tercih edilmektedir.
5	Kuvvetli Düzeyde Önem	Tecrübe ve yargı faaliyeti diğerine kuvvetli bir şekilde tercih edilmektedir.
7	Çok Kuvvetli Düzeyde Önem	Bir faaliyet güçlü bir şekilde tercih ediliyor ve uygulamada baskınlığı rahatlıkla görülür.
9	Aşırı Düzeyde Önem	Bir faaliyetin diğerine tercih edilmesine ilişkin kanıtlar büyük bir güvenliğe sahiptir.
2,4,6	Ortalama Değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanmak üzere iki ardışık yargı düşen değerdir.

5.1.3 TOPSIS

TOPSIS, çok kriterli karar verme yöntemleri arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Hwang ve Yoon tarafından 1981 yılında geliştirilen TOPSIS yöntemi, ideal çözüme ve ideal olmayan çözüme olan uzaklıkları hesaplayarak alternatifleri sıralamaktadır [4]. TOPSIS yöntemine ait adımlar Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5: TOPSIS Yöntemi Adımları

Bu çalışma kapsamında TOPSIS yöntemi kullanılarak ana kriter, alt kriter ve öznitelik ağırlıkları belirlenmiş olan konular birbirleri arasında negatif ideal ve pozitif ideal konu vektörleri referans alarak sıralanmıştır. Sıralanan “Teknoloji Konuları” vade puanlarına göre sınıflandırılmıştır. Vade puanı hesaplanmış olan konular, kesme vektörü belirlenmiş olan sınır değere göre sınıflandırılmıştır. Kesme vektörü, konuları vade puanlarına göre yakın ve uzak vade olmak üzere iki gruba sınıflandırır. Uzman görüşü ile belirlenen kesme vektörünün öznitelik değerleri, bir konunun yakın vadede kazanılması için gereken minimum öznitelik değerlerinin ne olması gerektiğine göre belirlenir. Yakın ve uzak vade içerisindeki konular öncelik puanlarına göre birbirleri arasında büyükten küçüğe doğru sıralanır [1].

Uzman görüşüne olan bağımlılığı azaltıp daha kapsamlı, objektif, tutarlı bir karar verme süreci oluşturmak için AHP, DEMATEL, TOPSIS metotları bir arada kullanılarak hibrit bir karar modeli oluşturulmasıyla önceliklendirme yöntemi üzerinde yapılan başlıca iyileştirmeler aşağıda açıklanmalarıyla beraber sunulmuştur.

- **Vade ve Öncelik Düzeylerinin Belirlenmesi:** Teknoloji Konuları çalışılma vadeleri ve öncelik düzeylerine göre farklı ağırlık kümeleriyle değerlendirilmiş olup daha şeffaf ve izlenebilir bir süreç yaratılmıştır.
- **Kapsamlılık:** AHP, kriterler arasındaki ikili karşılaştırmalara dayalı bir yöntemdir. DEMATEL ise kriterler arasındaki karşılıklı etkileşimleri de hesaba katar. Bu iki yöntemin birlikte kullanılması, kriterler arasındaki karmaşık ilişkileri daha iyi anlamayı sağlar.
- **Tutarlılık:** TOPSIS ile alternatifleri ideal çözüme göre sıralayarak karar vermede daha doğru ve tutarlı sonuçlar oluşur.
- **Objektiflik:** Her Teknoloji Konusu özelinde vade düzeyini belirlerken ve öncelik puanında iyileştirme yaparken uzman görüş desteğine ihtiyaç duyulurken, geliştirilen metodoloji ile birlikte bu ihtiyaç ortadan kalkmış olup referans vade vektörüne göre konuların vadeleri analitik olarak tasnif edilir [1].

5.1.4 Önceliklendirme Analiz Yöntemi

Yakıt Hücresi OTAĞ Çalışmalarında yer alan Teknoloji Konuları geliştirilen yeni ve özgün önceliklendirme metodolojisi kullanılarak öncelik ve yakın, uzak vadelere kazanımını planlanmak üzere kategorize edilmiştir. Teknoloji konularının öncelik ve vade sıralamasında Tablo 2’de öznitelik değerleri etkili olmuştur.

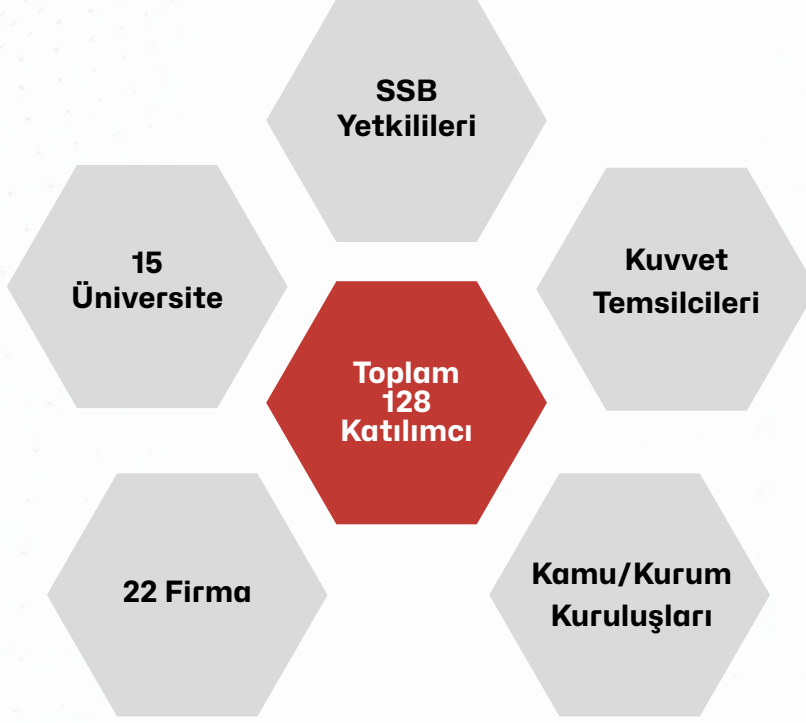
Tablo 2: Teknoloji Konularının Öncelik ve Vade Sıralamasında Öne Çıkan Kriterler

Kriter Listesi	Öncelik	Vade
Altyapı	Benzer veya tamamlayıcı teknolojilere ilişkin altyapı mevcuttur.	İlgili alt teknolojilere yönelik altyapılar mevcuttur.
Çift Kullanım	Teknoloji çift amaçlı olarak kullanılmaktadır.	Teknoloji çift amaçlı olarak kullanılmaktadır.
Dünyadaki Durum	Ömür devrinin başında olan, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı, mevcut ticari ürünlerin olmadığı teknolojidir.	Ömür devrinin başında olan, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı, mevcut ticari ürünlerin olmadığı teknolojidir.
Projelerde Uygulama	Projelerde kullanılacaktır.	Projelerde kullanılacaktır.
Temin Riski	Ulusal ihracat lisansına veya ITAR düzenlemelerine tabidir.	Ulusal ihracat lisansına veya ITAR düzenlemelerine tabidir.
İnsan Kaynağı	Yetişmiş insan gücü yetersizdir.	Yetişmiş insan gücü bulunmaktadır.
Kritiklik	Ulusal güvenliğimize doğrudan etkisi bulunan, milli olarak kazanılması zorunlu bir teknolojidir.	Ulusal güvenliğimize doğrudan etkisi bulunan, milli olarak kazanılması zorunlu bir teknolojidir.

6. GERÇEKLEŞTİRİLEN FAALİYETLER

6.1 Lansman Toplantısı

Lansman toplantısı 14 Nisan 2023 tarihinde firma, kurum ve üniversiteler ile Genelkurmay Başkanlığı ve Kuvvet Komutanlıklarından toplam 128 temsilcinin katılımı ile SSB Nuri Demirağ Salonu'nda icra edilmiştir. Katılımcı dağılımı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: Katılımcı Dağılımı

Toplantıda Yakıt Hücresi ve Hidrojen Teknolojileri alanında ülkemizde Ar-Ge yeteneğinin kazanılmasına, çalışılması gereken öncelikli konuların tespitine ve bu konuların çalışılması için üniversite-sanayi iş birliğinin artırılmasına yönelik gerçekleştirilecek çalışma yöntemi aktarılmış ve Odak Çalışma Grupları tanıtılmıştır.

Odak Çalışma Grupları ile yapılan toplantılarda konu önerileri üzerinden gidilmiş ve Yakıt Hücresi Teknolojileri envanter çalışması gerçekleştirilmiştir. Yakıt Hücresi Teknolojileri Yol Haritası taslağının oluşturulması için muhtelif çalışma toplantıları icra edilmiştir.

6.2 Yönlendirme Komitesi

Yönlendirme Komitesi, YHYH hazırlama sürecinde SSB temsilcileri, OÇG Liderleri ve öncü firma temsilcilerinin katılımı ile tüm OÇG faaliyetlerini planlayan, yöneten, izleyen ve raporlayan bir komite olarak faaliyet göstermiştir.

Yönlendirme komitesi üyelerinin adları ile temsilcisi oldukları kurum ve kuruluş bilgisi Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3: Yönlendirme Komitesi Üye İsimleri

 TÜRKİYE CUMHURİYETİ CUMHURBAŞKANLIĞI SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANLIĞI	Deniz DEMİRCİ Banu Ş.Ş. KARAKUZU Tufan CAN Hasan MERMER
 ROKETSAN	Hüseyin Sertaç SÜMER Beyza KARAGÖZ Berfin Yaren KAYA Ceren VANLI Cemre ÖZEL
 aselsan	Bekir YILMAZ Murat Gökhan ESKİN
 TÜRK HAVACILIK UZAY SANAYİİ	Melis ÖZEN Merve KADAN
 TUBİTAK MAM	Doç. Dr. Fatma Gül BOYACI SAN Doç. Dr. Fehmi AKGÜN Dr. Çiğdem KARADAĞ Betül KAHRAMAN DÖNMEZ
 aspilsan	Dr. Ahmet ALTINAY Emre ATA
 TENMAK	Dr. Erkut YILMAZ Yağmur BUDAK
 LENTATEK	Dr. Almıla BAHAR DOĞAN İbrahim PAMUK

6.3 Odak Çalışma Grubu Çalışmaları

6.3.1 I. OÇG Toplantısı

Odak Çalışma Gruplarının ilk toplantısı 21 Haziran 2023 tarihinde SSB Nuri Demirağ Salonu'nda gerçekleştirilmiştir. İlgili toplantıda, lansman sonrası katılımcılar tarafından iletilen konu önerileri ilgili odak grup lideri öncülüğünde tüm katılımcılar ile birlikte değerlendirilmiştir. Her bir konu önerisi sahibi kendisine ait olan konu önerisini detaylı olarak açıklamıştır. Bu sayede, konu önerileri doğru OÇG altında ele alınmış ve alt konu başlıklarının son hali belirlenmiştir.

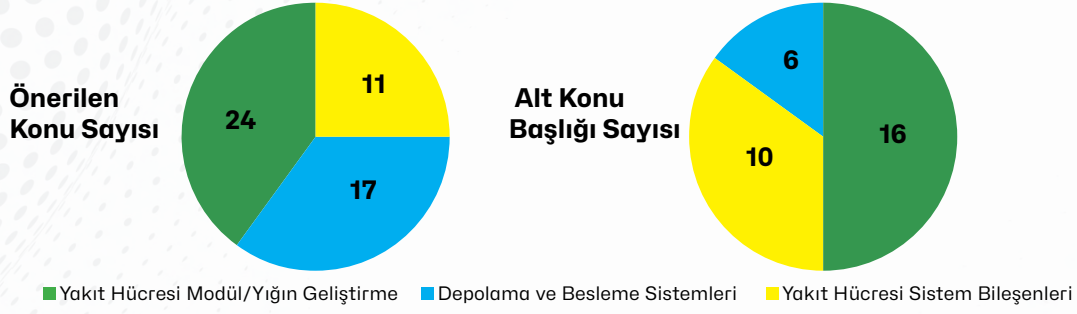
I. OÇG Toplantısı'na 48 kişilik bir katılım gerçekleşmiştir. Önerilen konular doğrultusunda belirlenen alt konu başlıklarının Savunma Sanayii Teknoloji Taksonomisi 2.0 dokümanında yer alan açıklamalara göre Yakıt Hücresi Teknolojisi ile ilgili olabileceği değerlendirilen başlıklar için liste hazırlanmıştır. Bu başlıklar Tablo 4'te liste olarak sunulmuştur.

Tablo 4: İlişkilendirilmiş Taksonomi Başlıkları

#	Savunma Sanayii Taksonomisi 2.0
1	A01.01 Metal ve Metal Matris Kompozit Teknolojisi
2	A01.03 Polimerler ve Polimer Matris Kompozit Teknolojileri
3	A01.04 Yapısal Malzemelerin İşlenmesi - Birleştirme Teknolojileri
4	A01.05 Yapısal Malzemelerin İşlenmesi - Yüzey Koruma Teknolojileri
5	A01.07 Korozyon ve Aşınma Kontrol Teknolojisi
6	A01.09 Yapısal Malzemeler - Şekillendirme
7	A01.12 Nanomalzeme Teknolojileri
8	A01.13 Yapısal Malzemeler - Eklemeli İmalat
9	A03.05 Karbon Bazlı Malzemeler
10	A05.01 Cihaz Kavramları ve İmalatı
11	A05.03 Cihaz Entegrasyonu ve Güvenilirliği
12	A05.05 Elektriksel Yakıt Pilleri
13	A05.17 Bağlantı, Kablo ve Kablaj Teknolojiler
14	A08.01 Yazılım Mühendisliği
15	A08.08 Matematiksel Model Geliştirme
16	A08.12 Yüksek Başarımli Hesaplama
17	A09.01 Veri & Bilgi Yönetimi Teknolojisi
18	A09.02 Dijital Sinyal İşleme Teknolojisi
19	A12.01 Mekanik/Hidrolik/Pnömatik Teknolojileri ve Cihazları
20	B09.11 Entegre Sistem Test ve Değerlendirme
21	B12.09 Proses Kontrol Teknolojisi
22	B12.10 Çevre Dostu Fabrika Süreçleri
23	B12.12 İleri İmalat Teknolojileri
24	B13.03 Modelleme ve Simülasyon Çözümleri
25	B13.06 Yenilikçi Sensörler

“Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme Alt Konu Başlıkları”, “Depolama ve Besleme Sistemleri Alt Konu Başlıkları” ve “Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri Alt Konu Başlıkları” OÇG’lerine önerilen konu sayıları ve alt konu başlığı sayıları Şekil 7’de gösterilmiştir.

Şekil 7: Önerilen Konu Sayısı ve Alt Konu Başlığı



6.3.1.1 Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme Odak Çalışma Grubu

Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme OÇG için katılımcılar ile birlikte yapılan değerlendirme sonucunda tüm gruplardan iletilen konular ile birlikte toplam konu sayısı 24 olarak belirlenmiştir. Önerilen konular Tablo 5'te listelenen 16 alt konu başlığı altında gruplandırılmış ve Savunma Sanayii Teknoloji Taksonomisi 2.0 dokümanı ile ilişkilendirilmiştir.

Tablo 5: Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme OÇG Alt Konu Başlıkları

Grup Sayısı	Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme Alt Konu Başlıkları	Konu Sayısı	SSB Taksonomisi
1	Akım Toplayıcıları	1	A01.01 Metal ve Metal Matris Kompozit Teknolojisi A05.05 Elektriksel Yakıt Pilleri B12.12 İleri İmalat Teknolojileri
2	Bağlantı Elemanları	1	A01.01 Metal ve Metal Matris Kompozit Teknolojisi B12.12 İleri İmalat Teknolojileri
3	Bipolar Plaka	3	A01.01 Metal ve Metal Matris Kompozit Teknolojisi A01.04 Yapısal Malzemelerin İşlenmesi- Birleştirme Teknolojileri A01.09 Yapısal Malzemeler- Şekillendirme A03.05 Karbon Bazlı Malzemeler A05.05 Elektriksel Yakıt Pilleri B12.12 İleri İmalat Teknolojileri
4	Farklı Uygulama Alanları için Yakıt Hücresi Teknolojileri	4	A05.05 Elektriksel Yakıt Pilleri B12.12 İleri İmalat Teknolojileri
5	Gaz Difüzyon Tabakası	1	A01.12 Nanomalzeme Teknolojileri A03.05 Karbon Bazlı Malzemeler
6	Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik	1	B12.10 Çevre Dostu Fabrika Süreçleri
7	Giyilebilir Teknolojiler	1	A01.12 Nanomalzeme Teknolojileri A05.05 Elektriksel Yakıt Pilleri B12.12 İleri İmalat Teknolojileri
8	Kapatma Plakaları	1	A05.05 Elektriksel Yakıt Pilleri
9	Katalizör	1	A01.12 Nanomalzeme Teknolojileri A03.05 Karbon Bazlı Malzemeler
10	Membran	2	A01.03 Polimerler ve Polimer Matris Kompozit Teknolojileri A01.12 Nanomalzeme Teknolojileri
11	Membran Elektrot Atacı (MEA)	2	A01.03 Polimerler ve Polimer Matris Kompozit Teknolojileri A01.12 Nanomalzeme Teknolojileri A05.05 Elektriksel Yakıt Pilleri
12	Modelleme ve Simülasyon	1	A08.01 Yazılım Mühendisliği A08.08 Matematiksel Model Geliştirme A08.12 Yüksek Başarımlı Hesaplama B13.03 Modelleme ve Simülasyon Çözümleri
13	Modül, Hücre ve Sistem Testleri	1	A05.05 Elektriksel Yakıt Pilleri B09.11 Entegre Sistem Test ve Değerlendirme
14	Sıvı Beslemeli Yakıt Hücreleri	1	A05.05 Elektriksel Yakıt Pilleri
15	Sızdırmazlık Elemanı	2	A01.03 Polimerler ve Polimer Matris Kompozit Teknolojileri A01.12 Nanomalzeme Teknolojileri
16	Yakıt Hücresi Yapısal Tasarımı	1	A05.05 Elektriksel Yakıt Pilleri
TOPLAM		24	

6.3.1.2 Depolama ve Besleme Sistemleri Odak Çalışma Grubu

Depolama ve Besleme Sistemleri OÇG için katılımcılar ile birlikte yapılan değerlendirme sonucunda tüm gruplardan iletilen konular ile birlikte toplam konu sayısı 17 olarak belirlenmiştir. Önerilen konular Tablo 6'da listelenen 6 alt konu başlığı altında gruplandırılmış ve Savunma Sanayii Teknoloji Taksonomisi 2.0 dokümanı ile ilişkilendirilmiştir.

Tablo 6: Depolama ve Besleme Sistemleri OÇG Alt Konu Başlıkları

Grup Sayısı	Depolama ve Besleme Sistemleri Alt Konu Başlıkları	Konu Sayısı	SSB Taksonomisi
1	Depolama Sistemi Bileşenleri	1	A01.01 Metal ve Metal Matris Kompozit Teknolojisi B12.12 İleri İmalat Teknolojileri
2	Depolama Tankları için Malzeme Geliştirilmesi	4	A01.05 Yapısal Malzemelerin İşlenmesi - Yüzey Koruma Teknolojileri A01.07 Korozyon ve Aşınma Kontrol Teknolojisi A01.12 Nanomalzeme Teknolojileri
3	Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik	1	B12.10 Çevre Dostu Fabrika Süreçleri
4	Hidrojen Depolama Teknolojileri	8	A01.01 Metal ve Metal Matris Kompozit Teknolojisi A01.03 Polimerler ve Polimer Matris Kompozit Teknolojileri A01.04 Yapısal Malzemelerin İşlenmesi- Birleştirme Teknolojileri A01.13 Yapısal Malzemeler- Eklemeli İmalat
5	Hidrojen Üretim Teknolojileri	2	B12.12 İleri İmalat Teknolojileri
6	Modelleme ve Simülasyon	1	A08.01 Yazılım Mühendisliği A08.08 Matematiksel Model Geliştirme A08.12 Yüksek Başarımli Hesaplama B13.03 Modelleme ve Simülasyon Çözümleri
TOPLAM		17	

6.3.1.3 Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri Odak Çalışma Grubu

Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri OÇG için katılımcılar ile birlikte yapılan değerlendirme sonucunda tüm gruplardan iletilen konular ile birlikte toplam konu sayısı 11 olarak belirlenmiştir. Önerilen konular Tablo 7'de listelenen 10 alt konu başlığı altında gruplandırılmış ve Savunma Sanayii Teknoloji Taksonomisi 2.0 dokümanı ile ilişkilendirilmiştir.

Tablo 7: Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri OÇG Alt Konu Başlıkları

Grup Sayısı	Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri Alt Konu Başlıkları	Konu Sayısı	SSB Taksonomisi
1	AC/DC ve DC/DC Dönüştürücüler	1	A05.01 Cihaz Kavramları ve İmalatı A05.03 Cihaz Entegrasyonu ve Güvenilirliği A05.17 Bağlantı, Kablo ve Kablaj Teknolojiler
2	Adsorbsiyon Teknolojileri	1	A01.12 Nanomalzeme Teknolojileri
3	Filtreler	1	A12.01 Mekanik/Hidrolik/ Pnömatik Teknolojileri ve Cihazları
4	Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik	1	B12.10 Çevre Dostu Fabrika Süreçleri
5	Kompresörler	1	A12.01 Mekanik/Hidrolik/ Pnömatik Teknolojileri ve Cihazları
6	Modelleme ve Simülasyon	2	A08.01 Yazılım Mühendisliği A08.08 Matematiksel Model Geliştirme A08.12 Yüksek Başarımli Hesaplama B13.03 Modelleme ve Simülasyon Çözümleri
7	Nemlendiriciler	1	A12.01 Mekanik/Hidrolik/ Pnömatik Teknolojileri ve Cihazları
8	Proses Kontrol Yöntemleri	1	A09.01 Veri & Bilgi Yönetimi Teknolojisi A09.02 Dijital Sinyal İşleme Teknolojisi B12.09 Proses Kontrol Teknolojisi
9	Regülatör ve Valfler	1	A12.01 Mekanik/Hidrolik/ Pnömatik Teknolojileri ve Cihazları
10	Sensörler	1	A09.01 Veri & Bilgi Yönetimi Teknolojisi A09.02 Dijital Sinyal İşleme Teknolojisi B13.06 Yenilikçi Sensörler
TOPLAM		11	

6.3.2 II. OÇG Toplantısı

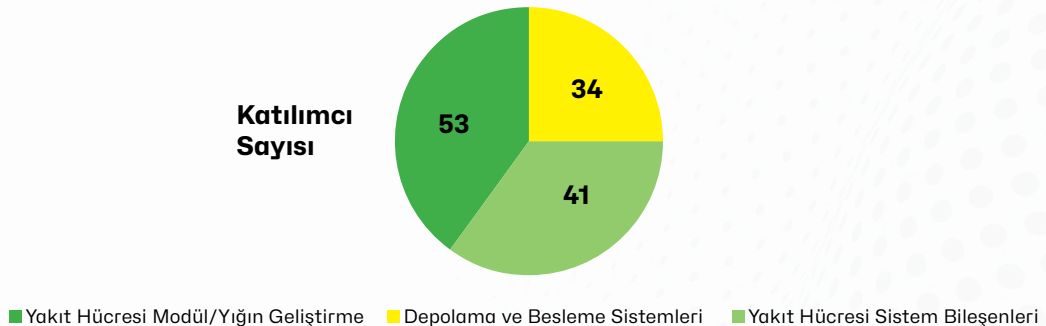
5-6 Ekim 2023 tarihlerinde çevrimiçi olarak gerçekleştirilen toplantılar sırasında, I. OÇG'de oluşturulan teknoloji konuları kazanım yılı, kritiklik, dünyadaki durum, insan kaynağı, altyapı ve riskler gibi belirli kriterler doğrultusunda değerlendirilmiş olup kriter detayları Şekil 8'de dikkatinize sunulmuştur.

KRİTİKLİK	TEMİN RİSKİ	İNSAN KAYNAĞI	ALTYAPI	ÇİFT KULLANIM	DÜNYADAKİ DURUM	PROJELERE UYGULAMA
Ulusal güvenliğimize doğrudan etkisi bulunan, milli olarak kazanılması zorunlu bir teknolojidir.	Uluslararası anlaşmalarla transferi kontrol altına alınmıştır. (FTKR, NPT vb.)	Yetişmiş insan gücü bulunmaktadır.	İlgili alt teknolojilere yönelik altyapılar mevcuttur.	Teknoloji çift amaçlı olarak kullanılmaktadır.	Ömür devrinin başında olan, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı, mevcut ticari ürünlerin olduğu teknolojidir.	Projelerde kullanılacaktır.
Kritik bir teknolojidir, kazanılmasının teknolojik yetkinliğe önemli katkısı olacaktır.	Ulusal ihracat lisansına veya ITAR düzenlemelerine tabidir.	Yetişmiş insan gücü yetersizdir.	Benzer veya tamamlayıcı teknolojilere ilişkin altyapı mevcuttur.	Teknolojinin çift amaçlı olarak kullanım imkânı vardır.	Ömür devrinin başında olan, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı, mevcut ticari ürünlerin olmadığı teknolojidir.	Projelerde kullanım imkânı vardır.
Kritik bir teknoloji değildir.	Üreticisi tek kaynaktır.	Yetişmiş insan gücü yoktur.	Temel araştırma fazı için üniversite laboratuvarı ve araştırma merkezi gibi altyapılar mevcuttur.	Teknolojinin çift amaçlı olarak kullanımı yoktur.	Ömür devrinin ortalarında olan, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı teknolojiler arasındadır.	Projelerde kullanım imkânı yoktur.
	Temin süresi uzundur.		Ulusal herhangi bir altyapı bulunmamaktadır.		Ömür devrinin sonlarında, gelişime açık olmayan bir teknolojidir.	

Şekil 8: Önceliklendirme Çalışmaları için Gerekli Kriter Detayları

II. OÇG sonrası yapılan toplantılarda mevcut durum analizine yönelik Teknoloji Envanteri Formu'nun hazırlanması için çalışmalar başlatılmıştır. 21 Aralık 2023 tarihinde Teknoloji Envanteri Formu katılımcılar ile paylaşılmış ve formların doldurulması talep edilmiştir. II. OÇG Toplantısı'na katılan katılımcı sayısının odak çalışma gruplarına göre dağılımı Şekil 9'da gösterilmiştir. Teknoloji Envanter Formlarının tamamlanmasının ardından, 23 Şubat 2024, 8 Mart 2024, 28 Mart 2024 ve 24 Mayıs 2024 tarihlerinde gerçekleştirilen toplantılarda alt konu başlıklarını önceliklendirmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. 5. YÖNTEM konu başlığı altında açıklanmış olan TOPSIS, DEMATEL ve AHP metotları kullanılarak önceliklendirme çalışması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 9: II.OÇG Katılımcı Sayısı



7. TÜRKİYE VE DÜNYADA MEVCUT DURUM VE EĞİLİMLER

Enerji üretiminde sürdürülebilir ve çevre dostu çözümler arayışında olan dünyanın, yakıt hücresi teknolojisi gibi yenilikçi enerji üretim yöntemlerine olan ilgisi giderek artmaktadır. Yakıt hücresi sistemleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme özellikleri ile ve geniş bir güç aralığında yüksek verimle kullanılabilme özellikleri ile dikkat çekmektedir. Yakıt hücresi sistemlerinin en büyük avantajlarından biri, fosil yakıtlarla çalışan geleneksel enerji sistemlerine kıyasla son derece düşük sera gazı emisyonu üretmeleridir. Bu nedenle, yakıt hücresi sistemleri, gelecekteki enerji geçişinin önemli bir parçası olarak görülmektedir.

Yakıt hücreleri farklı türlerde ve yapılar da bulunmaktadır. Bu türler arasında Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri (PEMFC), Katı Oksit Yakıt Hücreleri (SOFC), Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (PAFC) ve Ergimiş Karbonat Yakıt Hücreleri (MCFC) yer almaktadır. Her bir yakıt hücresi türü, çalışma sıcaklıkları, kullanılan malzemeler ve uygulama alanları bakımından birbirlerinden ayrılır. Örneğin, PEMFC'ler düşük sıcaklıklarda çalışırken, SOFC'ler yüksek sıcaklıklarda çalışarak yüksek verimlilik sağlarlar.

Bu raporda, başlıca yakıt hücresi türleri ve modül bileşenleri ile ilgili dünyada ve ülkemizde mevcut durum ve eğilimler incelenmiştir. Ayrıca, yakıt hücresi teknolojisinde karşılaşılan maliyet düşürme ve performans iyileştirme sorunlarına dair çözümler ve gelecekteki yönelimler de değerlendirilmiştir.

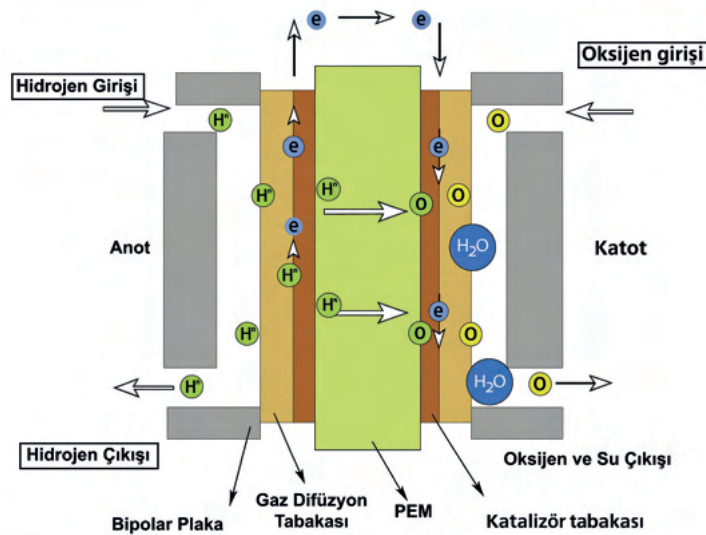
7.1 Yakıt Hücresi Modül / Yığın Geliştirme

7.1.1 Yakıt Hücresi Türleri ve Genel Özellikleri

Yakıt hücreleri, kullanılan elektrolit ve çalışma sıcaklıklarına göre çeşitli kategorilere ayrılır. Her yakıt hücresi türü farklı avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Bu bölümde, en yaygın yakıt hücresi türlerinin genel özellikleri, avantajları ve uygulama alanları kısaca sunulmuştur.

7.1.1.1 Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri (PEMFC)

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri (PEMFC), hidrojen yakıtını kullanarak elektrik enerjisi üretir. Hidrojen yakıtı, anotta protonlara ve elektronlara ayrışır. Protonlar proton değişim membranı üzerinden katoda geçerken, elektronlar dış devre üzerinden akarak elektrik akımı oluşturur. Katoda ulaşan protonlar, oksijen ile birleşerek su oluşturur. Bu süreç, sıfır emisyonlu elektrik ve ısı üretimini sağlar. PEM yakıt hücresinin şematik gösterimi Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10: PEM yakıt hücresinin şematik gösterimi

PEMFC'ler düşük çalışma sıcaklıkları (60-80°C) nedeniyle taşınabilir cihazlar, otomobiller ve evsel enerji sistemleri gibi küçük ölçekli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, yüksek verimliliği ve hızlı başlangıç süreleri nedeniyle elektrikli araç platformları için ideal bir enerji kaynağıdır. Düşük çalışma sıcaklıkları, hızlı başlatma ve durdurma özellikleri, hidrojen kullanımıyla sıfır emisyon ve taşınabilirlikten araç uygulamalarına geniş bir kullanım aralığı gibi avantajlarının yanında platin bazlı katalizörlerin yüksek maliyeti, düşük nem seviyelerinde performans kaybı ve yüksek maliyetli membran malzemelerinin kullanımı gibi dezavantajları vardır.

7.1.1.2 Katı Oksit Yakıt Hücreleri (SOFC)

Katı Oksit Yakıt Hücreleri (SOFC), yüksek sıcaklıklarda (500-1.000°C) çalışarak hidrojen veya hidrokarbon yakıtlarını oksidant ile tepkimeye sokar. Oksijen iyonları katot tarafından elektrolit üzerinden anoda taşınır ve burada yakıt ile reaksiyona girer. Yüksek sıcaklık, reaksiyonları hızlandırarak yüksek verimlilik sağlar ve bu da SOFC'leri büyük enerji üretim tesisleri ve santral uygulamaları için ideal hale getirir. SOFC'ler sabit enerji üretim sistemlerinde, özellikle büyük ölçekli enerji santrallerinde ve endüstriyel güç sistemlerinde kullanılır. Ayrıca, yüksek sıcaklıkların avantajları sayesinde doğal gaz gibi fosil yakıtlarla çalışabilme esnekliği sunar. Yüksek verimlilik, farklı yakıt türleri ile çalışma esnekliği (doğalgaz, hidrojen vb.) ve büyük enerji üretim tesisleri için uygun olmasının yanında yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle uzun başlangıç süreleri, yüksek sıcaklıkların neden olduğu malzeme yorgunluğu ve korozyon riskleri ve yüksek maliyetli malzeme ve üretim süreçleri teknolojinin yaygınlaşmasındaki önemli kısıtlardır.

7.1.1.3 Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (PAFC)

PAFC'ler, fosforik asit bazlı elektrolit kullanarak 150-200 °C sıcaklıkları arasında çalışır. Bu hücrelerde hidrojen, anotta protonlara ve elektronlara ayrılır. Protonlar elektrolit aracılığıyla katoda taşınırken, elektronlar dış devreyi dolaşarak elektrik üretir. Fosforik asit elektroliti, geniş bir sıcaklık aralığında kararlı bir yapı sergiler ve bu da PAFC'leri sabit enerji üretimi için uygun hale getirir.

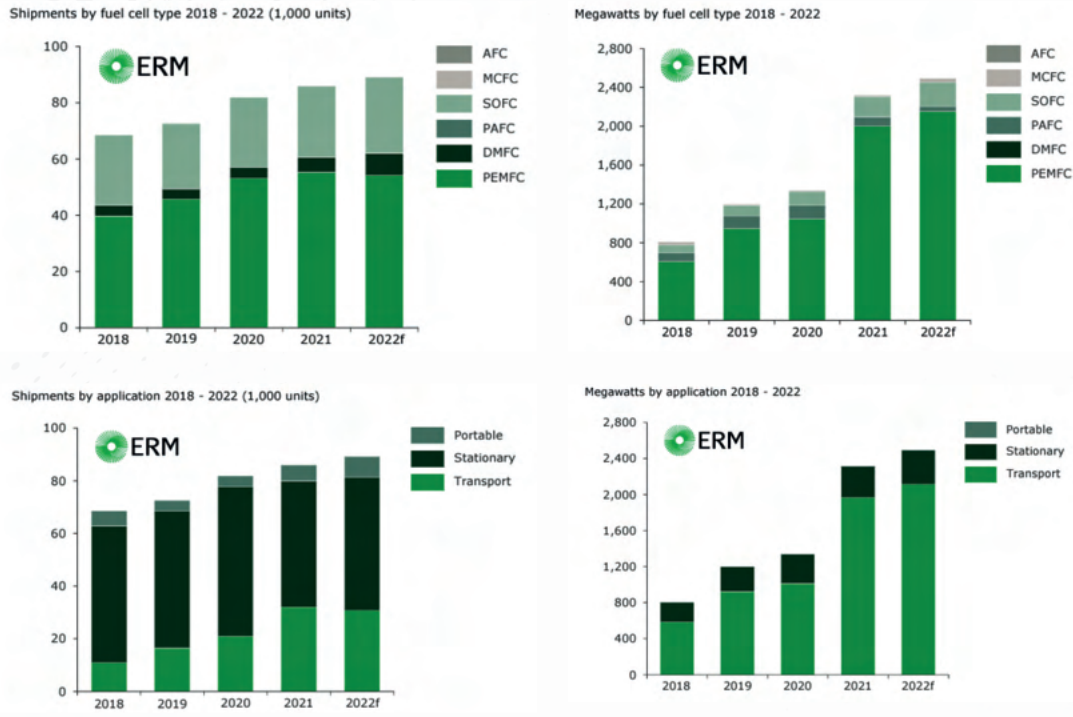
PAFC'ler genellikle büyük sabit enerji üretim sistemlerinde, birleşik ısı ve güç (CHP) sistemlerinde ve endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Yüksek sıcaklık stabilitesi, sabit enerji üretiminde yüksek verim ve CHP sistemleri için uygunluk başlıca avantajlarıdır. Ancak fosforik asidin korozyon durumu, elektrot malzemelerinin maliyeti ve düşük güç yoğunluğu önemli dezavantajlardır.

7.1.1.4 Ergimiş Karbonat Yakıt Hücreleri (MCFC)

MCFC'ler, ergimiş karbonat tuzlarını elektrolit olarak kullanır ve genellikle yüksek sıcaklıklarda (600-700°C) çalışır. Oksijen ve karbon dioksit, katotta reaksiyona girer ve karbonat iyonları oluşur. Bu iyonlar, elektrolit üzerinden anoda taşınarak yakıt ile reaksiyona girer ve elektrik üretir. MCFC'ler, büyük ölçekli enerji santrallerinde ve endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Ayrıca, karbondioksit geri kazanımı ve depolama teknolojileri ile birleştirildiğinde, bu sistemler karbon nötr enerji üretimi için uygundur. Başlıca avantajları yüksek sıcaklıklarda verimli çalışma, fosil yakıtlarla çalışabilme esnekliği, karbondioksit geri kazanımı ile çevresel faydalar olmasına karşın yüksek çalışma sıcaklıklarının neden olduğu malzeme sorunları, elektrot ve elektrolitlerin karmaşık üretimi ve korozyon riski önemli sorunlardır.

7.1.2 PEMFC ve SOFC Modül Bileşenleri

Yakıt hücreleri, modüler yapıları sayesinde farklı büyüklükte enerji sistemlerine entegre edilebilir. Yakıt hücreleri arasında PEMFC ve SOFC yaygın kullanım potansiyeli olan ve en fazla araştırma yapılan türlerdir (Şekil 11). Yakıt hücresi türlerinde kullanılan modül bileşenleri, sistemin verimliliği ve dayanıklılığı açısından büyük öneme sahiptir. Bu bölümde, bu iki yakıt hücresi türünün modül bileşenleri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.



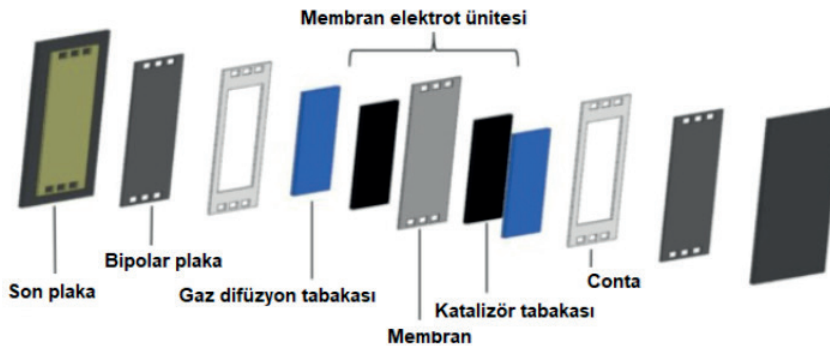
Şekil 11: Yakıt Hücresi Türleri ve Yıllara Göre Pazar Durumu

Şekil 11 incelendiğinde, PEM yakıt hücrelerinin hem adet hem de toplam güç ölçeği açısından (MW) diğer yakıt hücresi türlerine göre üstünlüğünü sürdürdüğü gözlemlenmektedir. 2022 yılında pazara sevk edilen yaklaşık 90.500 yakıt hücresinin 55.000'den fazlası PEM tipi yakıt hücresidir (toplam sevkiyatların %61'i). Buna ek olarak, güç ölçeği (MW) bazında ise PEM yakıt hücreleri 2.151 MW kapasiteyle, toplam sevkiyatların %86'sını oluşturmaktadır.

PEM yakıt hücrelerinin büyük bölümünün (pazar durumu ve güç ölçeği açısından) araç pazarına (otomobiller, otobüsler ve kamyonlar) yönelik olduğu, ardından sabit uygulamalar için mikrokojenerasyon sistemlerinin yer aldığı gözlenmektedir.

7.1.2.1 PEMFC Modül Bileşenleri

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC); modülü başlıca anot (elektrokatalizör varlığında reaksiyonla hidrojeni protona dönüştürmektedir), katot (elektrokatalizör varlığında proton ve oksijen birleşerek suya dönüşmektedir), elektrolit (membran, sadece proton geçişine izin vermekte, oksijen ve hidrojenin karışmasını engellemektedir, yüksek kimyasal ve mekanik kararlılığa sahip olmalıdır) ve bipolar plakalardan (başlıca hidrojen ve oksitleyicinin katalizörlere homojen dağılımı, ısı yönetimi ve hücrelerin serilenmesini sağlamaktadır) oluşmaktadır (Şekil 12). Tek bir yakıt hücresinde nominalde yaklaşık 0,6-0,7V gerilim elde edilebilmektedir. Yüksek gerilim için hücreler bipolar plakalar ile serilenirken daha yüksek akım değerlerine ulaşmak için reaksiyonun gerçekleştiği aktif alanların büyütülmesi gerekmektedir.



Şekil 12: PEM Yakıt Hücresi Bileşenleri

a. Proton Değişim Membranı (PEM)

- Fonksiyonu: PEM, protonların anottan katoda geçişini sağlar ve yakıt ile oksidantın karışmasını engeller. Bu membran, hücrenin performansını ve verimliliğini doğrudan etkiler.
- Malzeme: Genellikle Nafion gibi PFSA bazlı membranlar kullanılır. Ancak, yüksek maliyet ve düşük nem seviyelerinde performans kaybı yaşanması gibi dezavantajları vardır. Yeni nesil membran malzemeleri, bu sorunları çözmeyi amaçlamaktadır.

b. Elektrotlar (Anot ve Katot)

- Fonksiyonu: Anotta hidrojen, protonlara ve elektronlara ayrışır. Elektronlar dış devre üzerinden katoda giderken protonlar PEM aracılığıyla katoda taşınır. Katotta, protonlar oksijen ile birleşerek su oluşturur.
- Malzeme: Genellikle platinyum tabanlı katalizörler kullanılır. Ancak, platinyumun yüksek maliyeti nedeniyle alternatif katalizör malzemeleri (örneğin, nikel veya geçiş metalleri) üzerinde araştırmalar devam etmektedir.

c. Gaz Difüzyon Tabakası (GDL)

- Fonksiyonu: GDL, yakıt ve oksidantın hücre yüzeyine eşit şekilde dağıtılmasını sağlar ve elektrotlarda reaksiyona girmelerini mümkün kılar. Ayrıca, hücrede üretilen suyun buharlaşmasını ve gazların dışarı atılmasını sağlar.
- Malzeme: Gözenekli karbon fiber malzemeler yaygın olarak kullanılır. GDL'nin gözenek yapısı, gaz dağılımı ve su yönetimi açısından önemlidir.

ç. Bipolar Plakalar

- Fonksiyonu: Bipolar plakalar, hücreler arasındaki gaz akışını düzenler ve elektriksel bağlantı sağlar. Ayrıca, modüler yapının bir parçası olarak hücreler arasındaki basıncı dengeleyerek hücre performansını artırır.
- Malzeme: Grafit, metal ve kompozit malzemeler kullanılır. Metal bipolar plakalar, yüksek iletkenlik ve dayanıklılık sağlar, ancak korozyon sorunu ile karşılaşılabilir. Bu nedenle, yüzey kaplama teknikleri geliştirilmiştir.

d. Sızdırmazlık Elemanları

- Fonksiyonu: Yakıt hücresinin içindeki gazların dışarı sızmasını ve gazların birbirine karışmasını engeller. Aynı zamanda, hücre içindeki basınçlı ortamı muhafaza eder.
- Malzeme: Polimer esaslı sızdırmazlık elemanları kullanılır. Bu malzemeler, uzun ömürlü kullanım ve kimyasal direnç sunar.

7.1.2.2 SOFC Modül Bileşenleri

Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC), yüksek sıcaklıkta çalışan sabit enerji üretim sistemleri için uygundur ve aşağıdaki modül bileşenlerine sahiptir:

a. Elektrolit

- Fonksiyonu: Elektrolit, oksijen iyonlarının katottan anoda geçişini sağlar. Bu iyonik iletkenlik, hücrede elektrik üretimi için kritik öneme sahiptir.
- Malzeme: Yttriya stabilizasyonlu zirkonya (YSZ) gibi seramik bazlı malzemeler yaygın olarak kullanılır. Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklarda yüksek iyonik iletkenlik sağlar.

b. Anot

- Fonksiyonu: Anotta, yakıt oksitlenir ve elektronlar serbest kalır. Bu elektronlar dış devrede akarak elektrik üretir.
- Malzeme: Genellikle nikel bazlı anot malzemeleri kullanılır. Nikel-YSZ kombinasyonu, SOFC anotları için yaygın bir tercihtir.

c. Katot

- Fonksiyonu: Katotta oksijen indirgenir ve elektrolit üzerinden anoda taşınır. Katot, bu reaksiyonun hızlı bir şekilde gerçekleşmesi için yüksek sıcaklıklarda çalışır.
- Malzeme: Genellikle Perovskit yapısında lantan stronsiyum mangan (LSM) gibi malzemeler kullanılır. Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklarda iyonik ve elektriksel iletkenlik sağlar.

ç. Sızdırmazlık Elemanları

- Fonksiyonu: SOFC'de hem modülde anot katot arasında gazların karışmasını hem de modülden dışarı gazların geçişini engellemek için kritik bir rol oynar.
- Malzeme: Yüksek sıcaklığa dayanıklı alüminyum oksit, silikatlar ve zirkonya bazlı bileşikler yaygın olarak kullanılır. Paslanmaz çelik gibi bazı metal malzemeler genellikle dış yapıda ve bazı sızdırmazlık elemanlarında kullanılır.

7.1.3 Yakıt Hücresi Teknolojisinde Güncel Gelişmeler

Yakıt hücresi teknolojisindeki en önemli zorluklardan biri maliyetlerin düşürülmesi ve performansın artırılmasıdır. Bu bölümde, yakıt hücresi teknolojisindeki son gelişmeler ve yenilikler ele alınacaktır.

7.1.3.1 Platin Alternatifleri Üzerine Araştırmalar

Platin, yakıt hücresi katalizörleri için mükemmel bir malzeme olmasına rağmen, yüksek maliyeti ticari uygulanabilirliği zorlaştırmaktadır. Son yıllarda, platin kullanımını azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak için alternatif katalizörler üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Geçiş metalleri (örneğin demir, kobalt) ve karbon bazlı nanomalzemeler, bu araştırmaların odak noktası olmuştur. Nanoteknoloji sayesinde, katalizör yüzey alanı artırılarak daha az platinle daha yüksek performans elde edilebilmektedir.

7.1.3.2 Nanoteknoloji Uygulamaları

Yakıt hücresi performansını artırmak ve maliyetleri düşürmek için nanoteknoloji büyük bir potansiyel sunmaktadır. Özellikle elektrokatalizörlerde ve membran yapılarında nanoteknolojinin kullanımı, performansı önemli ölçüde artırabilir. Nanopartikül boyutunda katalizörler, daha fazla aktif yüzey alanı sağlayarak daha az malzeme ile aynı verimin elde edilmesine olanak tanır.

7.1.3.3 Yüksek Sıcaklık Dayanımlı Membranlar

PEM yakıt hücrelerinde kullanılan PFSA bazlı membranlar, düşük nem seviyelerinde ve yüksek sıcaklıklarda performans kaybı yaşar. Bu sorunun üstesinden gelmek için sülfonatlanmış poliarilen eter keton (SPAEEK) gibi alternatif malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca, iyonik sıvılarla modifiye edilen membranlar da dayanıklılığı artırmak amacıyla test edilmektedir.

7.1.3.4 Bipolar Plaka Geliştirmeleri

PEMFC'ler ve SOFC'lerde kullanılan bipolar plakalar, yakıt pilinin performansını ve dayanıklılığını doğrudan etkileyen kritik bileşenlerdir. Grafit, polimer kompozit ve metal plakalar uygulama alanına göre kullanılabilir. Metal bipolar plakalar, yüksek iletkenlik sağlar; ancak korozyona karşı dirençli olmaları gerekir. Bu nedenle, son yıllarda metal plaka yüzey kaplama (Titanyum, karbon vb.) teknolojileri ve korozyona dayanıklı alaşımlar üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Aynı zamanda bipolar plaka akış alanı tasarım geliştirme konularında da yoğun çalışmalar yürütülmektedir.

7.1.3.5 Diğer Modül Bileşenleri Geliştirme Çalışmaları

Yakıt hücresi sistemlerinde sızdırmazlık elemanları, gaz sızıntılarını önlemek ve sistem verimliliğini artırmak için gelişmiş polimerler ve seramik malzemeler ve farklı uygulama teknikleri konularında çalışılmaktadır. Akım toplayıcılar, daha iyi iletim özellikleri ve düşük direnç sağlamaları amacıyla yeni metal alaşımları ve kaplamalarla optimize edilmektedir. Modül kaplama plakaları, sistemin mekanik bütünlüğünü ve sızdırmazlığını sağlamak için hafif, dayanıklı ve ısıya dirençli malzemelerle tasarlanmaktadır; bu, aynı zamanda sistemin genel performansını

artırmaktadır. Donanım tasarımı, modüler yapılarla kolay montaj ve bakım süreçleri sunarak kullanıcı dostu hale getirilmektedir. Ayrıca, sistemin hafifliği ve taşınabilirliği, sürdürülebilir enerji çözümlerine yönelimi konusunda çalışmalar yürütülmektedir.

7.1.4 Yakıt Hücresi Teknolojisinin Geleceği ve Araştırma Yönelimleri

Yakıt hücresi teknolojisi, enerji üretimi ve depolama alanında gelecekteki en umut verici teknolojilerden biri olarak görülmektedir. Gelecekteki araştırmalar, maliyetlerin daha da düşürülmesi, performansın ve ömrün artırılması ve yakıt çeşitliliğinin genişletilmesi üzerine odaklanacaktır.

7.1.4.1 Maliyet Düşürme Stratejileri

Yakıt hücresi teknolojisinin ticari olarak başarılı olabilmesi için maliyetlerin düşürülmesi kritik öneme sahiptir. Platin gibi pahalı malzemelerin yerine daha ucuz alternatiflerin kullanılması, üretim süreçlerinin optimize edilmesi ve seri üretime geçiş, bu teknolojinin daha erişilebilir hale gelmesini sağlayacaktır.

7.1.4.2 Performans ve Ömür İyileştirmeleri

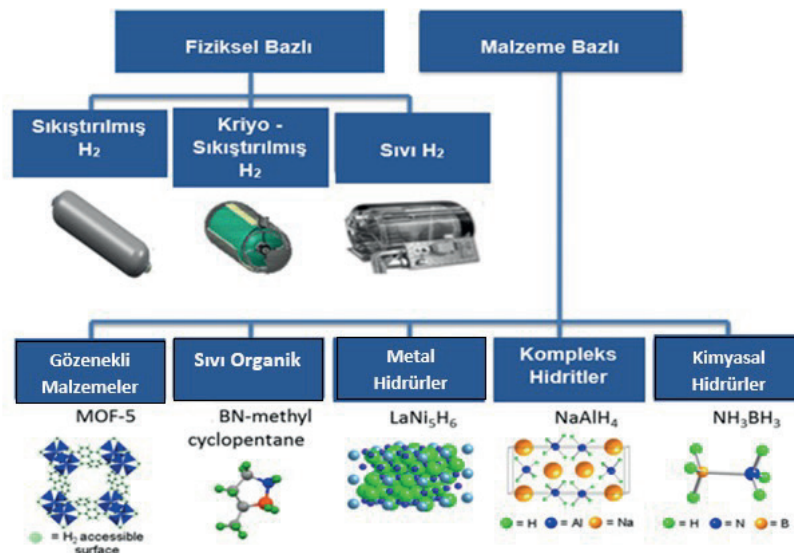
Yakıt hücrelerinin uzun süreli performansı, ticari başarı için kritik bir faktördür. Yüksek sıcaklıklarda ve zorlu çalışma koşullarında membran ve elektrotların dayanıklılığını artırmak için malzeme biliminde yapılan yenilikler, yakıt hücresi sistemlerinin ömrünü uzatabilecektir.

7.2 Depolama ve Besleme Sistemleri

Gelişen teknolojiyle birlikte dünyanın enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan petrol ve doğalgaz rezervleri her geçen gün tükenmekte olup önümüzdeki 35 yıl içerisinde petrolün dünya enerji ihtiyacını karşılayamaz seviyeye gelmesi tahmin edilmektedir. Gelecekte dünyanın enerji ihtiyacını karşılayabilme konusunda potansiyeli en yüksek olan yakıt hidrojenidir. Temiz enerji kaynaklarından elde edilen hidrojen, su buharına dönüşerek atmosfere zararlı emisyonlar salmamaktadır. Böylelikle hidrojen depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanması, taşınması ve ihtiyaç anında kullanılmasında çözüm sunan önemli bir teknoloji olmaktadır. Depolama ve Besleme Sistemine yönelik alt yapı çalışmaları, Dünya’da ve Türkiye’de agresif artış ve azalış göstermemiştir. Dünya genelinde, Japonya ve Çin alt yapı geliştirme çalışmalarında ilerlemiş ülkeler olup bu konuda genel büyüme oranı ise %47,17 olmuştur. Türkiye’de ise bu alanda araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütülmektedir.

7.2.1 Hidrojen Depolama Yöntemleri

Hidrojen depolama teknolojileri temel kapsamda fiziksel ve malzeme bazlı depolama olmak üzere ikiye ayrılır. Bu iki farklı yöntem, kendi içinde de farklı gruplara ayrılır. Şekil 13’te gösterilmiştir.



Şekil 13: Çeşitli Hidrojen Depolama Yöntemlerinin Şematik Gösterimi [5]

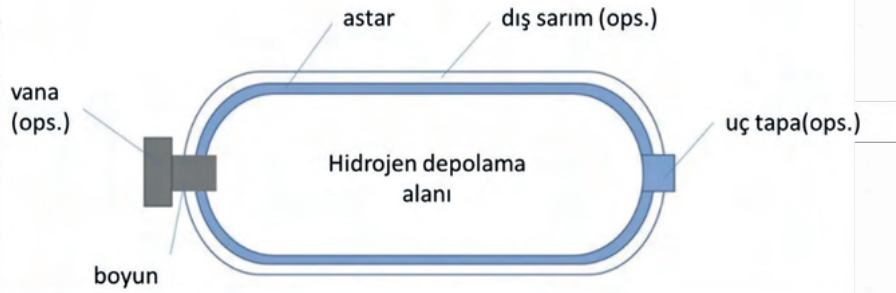
Her depolama tekniğinin kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmakla birlikte uygulama alanı da önemli bir kriterdir. Fiziksel olarak hidrojen sıkıştırılmış, kriyo-sıkıştırılmış ve sıvı şeklinde depolanabilmektedir. Hidrojen depolama yöntemlerinin ve malzemelerinin seçiminde; (a) gravimetrik ve hacimsel hidrojen yoğunlukları, (b) enerji verimliliği, (c) yakıt doldurma süresi, (d) dayanıklılık, (e) maliyet, (f) standartlar (g) teknoloji olgunluğu ve (h) yaşam döngüsü ve verimlilik analizi dahil olmak üzere birkaç anahtar parametre vardır [6].

7.2.1.1 Fiziksel (Saf Hidrojen) Depolama

Günümüzde en fazla ilgi çeken hidrojen depolama yöntemlerinden biri de saf hidrojen depolamadır. Fiziksel depolama şu anda mevcut olan en gelişmiş hidrojen depolama teknolojisini temsil etmektedir. Ayrıca, bu yöntem hidrojenin depolanmasından hemen sonra herhangi bir saflaştırma işlemi olmadan kullanılmasına izin veren bir teknolojidir. Saf hidrojen sıkıştırılarak veya sıvılaştırılarak depolanabilmektedir. Hidrojeni saf halde depolamak her zaman ekonomik açıdan en avantajlı seçenek olmasa da bu tür bir depolamanın getirebileceği çeşitli faydalar bulunmaktadır [7].

7.2.1.1.1 Sıkıştırılmış Halde Hidrojen Depolama (ing. Compressed Gaseous Hydrogen (CGH2))

Gaz depolama tankları ortam basıncından farklı bir basınçta gazları depolamak için tasarlanan ve içerisi ile dış çevre (ortam) arasında bir basınç farkına sahip olan kapalı yapılardır. Sıkıştırılmış Hidrojen, en köklü ve bilinen hidrojen depolama teknolojisidir. Bu depolama yönteminde kullanılan yüksek basınçlı hidrojen depolama tanklarının malzemesi çelik ve alüminyumdur. Ancak bu malzemelerin sistemin ağırlığını artırması nedeniyle daha hafif olan karbon fiber ve epoksi içeren kompozit malzemelerden yapılmış tanklar önem kazanmış olup bu tankların geliştirilmesi için araştırmalar devam etmektedir [7]. Şekil 14'te ile kompozit sıkıştırılmış hidrojen tankının genel bir gösterimi ve bileşenleri verilmiştir.



Şekil 14: Hidrojen Tankı ve Bileşenleri [8]

Astar, hidrojeni tankın depolama alanı içinde tutmaktadır. Astar ayrıca, hidrojen yüksek basınçlarda depolandığında üzerine uygulanan fiziksel gerilime karşı astarı stabilize etmeye yarayan ve ayrıca bir ısı yalıtım tabakası oluşturan bir dış sargı içerisine kapatılabilmektedir. Boyun, hidrojenin tanka yerleştirildiği veya tanktan çıkarıldığı kısım olup, hidrojenin kontrollü giriş ve çıkışını sağlayan bir hidrojen tankı valfine veya boruya bağlanmaktadır. Ayrıca, bir emniyet vanası içerebilir veya sensörler/ek basınç düzenlemesine izin veren daha karmaşık bir hidrojen tank vana yapısını içerebilmektedir. İsteğe bağlı olan uç tapa tankın ikinci bir açıklığıdır [8].

7.2.1.1.2 Kriyojenik Sıkıştırma ile Hidrojen Depolama

Kriyojenik sıkıştırılmış hidrojen depolaması, hidrojeni yüksek basınçlarda ve kriyojenik sıcaklıklarda (yani -140°C ve altı sıcaklıklar) depolamaya dayanır. Bu yöntem, sıkıştırılmış gaz ve sıvılaştırılmış hidrojen depolama teknolojilerinin en kritik dezavantajlarının üstesinden gelir. Sıkıştırılmış hidrojen depolamasının eksikliklerinden biri, yüksek basınçlarda (yani 70 MPa) bile hidrojenin düşük gravimetrik ve hacimsel yoğunluğudur [9].

Sıvılaştırılmış hidrojen depolaması düşünüldüğünde, hidrojenin kaynama kaybı da önemli bir konudur. Sıvı hidrojen tankları düşük basınçlı tanklardır ve maksimum çalışma basıncı 1 MPa civarındadır. Kriyojenik basınçlı tank tasarımında iç kap, tipik olarak sıkıştırılmış gazların

depolanması için kullanılan, alüminyum astarlı, karbon elyafı sarılmış bir basınçlı kaptır. Bu kap, kaba ısı transferini en aza indiren ve paslanmaz çelikten bir dış kılıfla dolu bir vakum boşluğu ile çevrilidir. Kriyojenik sıkıştırmalı hidrojen depolaması, mevcut yöntemler arasında en yüksek gravimetrik ve hacimsel yoğunluğa sahiptir. Buna ek olarak, sıvılaştırılmış hidrojen depolamasının önemli bir eksikliği olan kaynama kayıplarını önemli ölçüde azaltır. Bu nedenle kriyojenik sıkıştırmalı hidrojen depolama, gelecek vaat eden bir hidrojen depolama teknolojisi olarak kabul edilir.

7.2.1.1.3 Sıvılaştırılmış Halde Depolama

Diğer fiziksel depolama yöntemi, sıvılaştırılmış hidrojen depolamadır. Sıkıştırılmış gaz halinde depolamaya kıyasla bu yöntem kullanılarak yüksek gravimetrik ve hacimsel yoğunluk elde edilebilir [10]. Sıvılaştırılmış hidrojen depolama tankı basıncı, sıkıştırılmış hidrojen depolamaya kıyasla çok daha düşüktür (<1 MPa). Bu da sıkıştırılmış hidrojen depolamada kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit tank maliyetini ortadan kaldırır. Öte yandan, sıvılaştırma için gerekli enerji ve kaynama kayıpları bu depolama yönteminin dezavantajlarıdır. Sıvı hidrojen 71 kg/m^3 yoğunluğa sahiptir. Hidrojeni sıvı hale getirip depolayabilmek için -253°C 'ye soğutmak gerekir. Mevcut teknolojiyle hidrojeni -253°C 'ye soğutup depolamak oldukça maliyetli ve uzun zaman almaktadır. Ayrıca sıvı depolarının çok iyi ısı yalıtımına sahip olması gerekmektedir. Ayrıca depolama tankı ile sıvı hidrojenin ağırlık oranı %26 civarındadır. Sıvı hidrojen günümüzde uzay teknolojisi ve yüksek enerjili nükleer fizik uygulamalarında kullanılmaktadır.

7.2.1.2 Malzeme Bazlı (Kimyasal) Depolama

7.2.1.2.1 Gözenekli Malzemeler

Hidrojen depolama teknolojilerinde, gözenekli malzemeler de hidrojen depolama seçenekleri arasında yer almaktadır. Katı hal gözenekli malzemelerin, şu anda çoğu uygulama için kullanılan teknolojilere göre potansiyel olarak karşılaştırılabilir miktarlarda hidrojeni daha güvenli ve daha verimli bir şekilde depolayabilmesi bu malzemeleri ilgi çekici hale getirmektedir. Burada, karbon bazlı hidrojen depolama seçenekleri ve metal-organik çerçeveler, önemli hidrojen depolama potansiyelleri nedeniyle en önemli gözenekli malzeme ailelerinden ikisini temsil etmektedir. Bu depolama yönteminde, hiçbir tam teşekküllü ticarileştirme için gerekli olan teknoloji hazırlık düzeyine henüz yaklaşmamıştır.

7.2.1.2.2 Sıvı Organikler

Sıvı organik hidrojen taşıyıcıları, kimyasal reaksiyonlar yoluyla hidrojeni emebilen ve serbest bırakabilen organik bileşikler temsil eder. İşlemde, temel maddenin hidrojenin taşıyıcı ile reaksiyonu (yani hidrojenasyon) ve taşıyıcıdan ayrıştırılması (yani dehidrojenasyon) ile, temel madde aynı kalmakta ve bu da döngü şeklinde kullanılmaktadır. Araştırmacılar tarafından en çok ilgi çeken sıvı taşıyıcılar toluen/metilsikloheksan ($\text{C}_7\text{H}_8/\text{C}_7\text{H}_{14}$), naftalin/dekalin ($\text{C}_{10}\text{H}_8/\text{C}_{10}\text{H}_{18}$), benzen/sikloheksan ($\text{C}_6\text{H}_6/\text{C}_6\text{H}_{12}$) ve dibenziltoluen (DBT)/perhidro-dibenziltoluen ($\text{C}_{21}\text{H}_{20}/\text{C}_{21}\text{H}_{32}$) bileşikleridir. Bunlardan hepsinin hidrojenasyon ve dehidrojenasyon için farklı gereksinimleri olsa da hiçbir hidrojen depolaması için özel ayarlamalar gerektirmemekte ve bu nedenle hiçbir ek enerji ve ek maliyet ortaya çıkmamaktadır. Bu maddelerin her biri karbon içerirken, hiçbir de karbon-nötr bir şekilde üretilmemektedir. Hepsinin içerdiği karbon potansiyel olarak yeniden kullanılabilir ve bu nedenle atmosfere salınmasa da ağırlıkça %6,19 ile %7,29 arasında değişen gravimetrik hidrojen içerikleri hidrojen depolama için yeterli olmamaktadır [11].

7.2.1.2.3 Metal Hidrürler

Metal hidrürler hidrojeni katı depolamak için kullanılabilecek geniş bir grup malzemeyi temsil etmektedir. Metal hidrür oluşumu, bu bileşiklerin yüzeyi ile temas halinde H_2 molekülündeki hidrojen atomları arasındaki bağın kırılması ve hidrojen atomlarının kararlı bir bileşik oluşturan (metal hidrür) yığına difüze olması gerçeğine dayanmaktadır. Metal hidrürler, hidrojeni çok kompakt bir biçimde tutabilmelerine rağmen, çoğu durumda gravimetrik hidrojen içerikleri daha az olması nedeniyle, depolanan birim H_2 başına diğer yöntemlerden daha ağır depolama alternatifleri sunmaktadır. Bu faktör depolama maddesinin taşınabilirliğini sınırlasa da, metal hidrürler genellikle serbest bırakıldığında yüksek saflıkta düşük riskli ve istikrarlı bir H_2 depolama yöntemi sunmaktadır. Metal hidrürler, ortam koşullarında veya ortama yakın koşullar

altında katı formda hidrojen depolaması sunabilmektedir. Metal hidrürlerde metal; (1) element, (2) alaşım (intermetalik bileşik) veya (3) metal kompleksi formunda olabilir [12].

7.2.1.2.3.1 Temel Metal Hidrürler

Temel metal hidrürler vanadyum, magnezyum hidrür (MgH_2) ve alüminyum hidrür (AlH_3) bileşikler senelerdir hidrojen depolama için araştırılmaktadır. Özellikle hidrojen depolama kapasitelerinin yüksek olması nedeniyle dikkat çeken bu bileşikler, ucuz olması, hafif ve kararlı olmaları nedeniyle de avantaj sağlamaktadır. Ancak, bir element tarafından oluşturulan metal hidrürler sınırlı özelliklere sahiptir. Örneğin, MgH_2 için desorpsiyon sıcaklıkları çok yüksek, absorpsiyon kinetikleri ise çok yavaştır. AlH_3 için desorpsiyon sıcaklığı görece daha düşük olsa da alüminyum hidrür oluşumu çok yüksek basınçlar gerektirdiği için prosesi yüksek enerji gerektirir ve uzun bir süreçtir. Bu özellikleri, temel metal hidrürleri tam ölçekli ticari kullanımını ve endüstriyel ölçekte büyümesini engelleyen faktörler arasında yer almaktadır [12].

7.2.1.2.3.2 İntermetalik Bileşikler

Temel metal hidrürlerin kısıtlamaları incelendiğinde daha geniş bir uygulama yelpazesine sahip intermetalik bileşikler, hidrojenasyon özelliklerini uygulamak için geniş kapsam ve daha fazla esneklik sunmaktadır. İntermetalik bileşikler ikili, üçlü, dörtlü ve daha karmaşık sistemler olabilmektedir. Alaşım olarak kullanılan başlıca ikili intermetalik bileşik sistemleri AB_5 , AB_2 ve AB' 'dir. A bileşeni olarak nadir toprak metali ve/veya kalsiyum kullanılmakta ve tüm yapılarda en yaygın B bileşenleri geçiş metalleri olmaktadır.

AB_5 tipi intermetalik bileşikler (örneğin $LaNi_5$), hidrojen depolamak için kullanılabilir zengin kimyaya ve uygun özelliklere sahiptir. Bu yapıların depolama stabilitesi avantajı ve nispeten düşük sıcaklıklar, basınçlar ve dolayısıyla hidrojenasyon/dehidrojenasyon için gereken enerji miktarının görece az olması gibi avantajları bulunsada hidrojen depolama kapasiteleri düşük kalmaktadır. Bu problemin üstesinden gelebilmek adına magnezyum bazlı bileşikler, AB_2 tipi bileşikler araştırılmıştır. Bu bileşikler hidrojen depolama kapasitesini arttırsa da bu bileşiklerin oluşumu ve hidrojenin çıkarılması yüksek basınçlar gerektirmektedir. Son olarak, yine hidrojen depolama kapasiteleri görece AB_5 bileşiklerinden daha yüksek olan AB tipi bileşikler araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar sonucu en çok umut veren bileşik $TiFe$ olmuştur. Öte yandan $TiFe$, ortam koşullarında hidrojeni kolayca absorblayamadığı için, ilk hidrojen emilimini desteklemek için sentezinden sonra zahmetli bir işlem gerektirmektedir. Ayrıca, $TiFe$ alaşımlarının hava nemine duyarlı olması ve onunla reaksiyona girebilmesi nedeniyle, oksitler ve hidroksitler oluşmakta ve bu durum da hidrojenle reaksiyonun engellenmesine neden olmaktadır [12].

7.2.1.2.3.3 Kompleks Metal Hidrürler

Kompleks metal hidrürler hafif depolama malzemeleri sınıfı olmalarıyla araştırmalarda dikkat çekmektedir. Yüksek hidrojen depolama kapasiteleri onları ayrıca ilgi çekici hale getirmektedir. Alanatlar $[AlH_4]^-$, amidler $[NH_2]^-$, imitler ve borohidritler $[BH_4]^-$ gibi bileşiklere hidrojen depolama kapsamında yoğun ilgi gösterilmektedir. Ancak karmaşık hidrürlerin, yüksek desorpsiyon sıcaklığı istekleri ve yavaş kinetiklere sahip olmaları gibi dezavantajları bulunmaktadır.

7.2.1.2.4 Kompleks Hidritler

Kompleks hidritler(alanatlar), yüksek hidrojen içeriklerine rağmen geri dönüşümlü olmadıkları düşünüldüğünden hidrojen depolaması için kullanılmamıştır. 1997'de Bogdanovic ve Schwickardi, $NaAlH_4$ 'ün geçiş metali bazlı katalizörlerin eklenmesiyle dehidre edilebilir olduğunu keşfetmişlerdir. Borohidritler, Li-N tabanlı ve magnezyum bazlı nanokompozitler, hidrojen depolama araştırmalarının en aktif alanıdır. Özellikle son 10 yıldır depolama kapasitelerinin yüksek olması sebebi ile alüminyum ve bor içeren kompleks hidrürler yoğun olarak çalışılmaktadır. Çalışmalar ağırlıklı olarak sodyum alüminyum hidrit üzerinde yoğunlaşmakla beraber Na_2LiAlH_6 gibi daha kompleks alanatları konu alan çalışmalarda da mevcuttur.

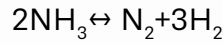
7.2.1.2.5 Kimyasal Hidrürler

Kimyasal hidrürler, potansiyel olarak hidrojenin depolanması için kullanılabilecek başka bir madde grubunu temsil etmektedir. Bu kategori, sentetik yakıtlar gibi daha çeşitli

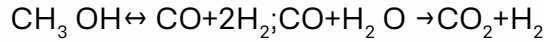
kimyasallardan oluşmasına rağmen, minimum enerji maliyetleri, altyapı geliştirmeye gerek olmaması vb. avantajlarından dolayı bunların depolaması genellikle sentetik hidrokarbonlarınkine benzemektedir. Bunun dışında hacimsel hidrojen yoğunluğu ve gravimetrik hidrojen içeriği özellikleri sentetik yakıtlarinkine benzerken, üretimleri ve dehidrojenasyonları çoğunlukla daha az enerji kullanmaktadır ve dolayısıyla bu yöntemle depolama daha az maliyetli olmaktadır [11].

7.2.1.2.5.1 Amonyak ve Metanol

Amonyak ve metanol, hidrojen depolama sistemleri için potansiyel bir ortam olarak kabul edilmektedir. Yüksek hacimsel hidrojen yoğunluğu, düşük depolama basıncı ve uzun süreli depolama kararlılığı, amonyağın hidrojen depolaması için faydalı özellikleri arasındadır. Bunun başlıca nedeni, nispeten yüksek hacimsel hidrojen yoğunluğunun (sıvı amonyak için 107,7-120 kg/m³ ve metanol için 95,04-99 kg/m³) ve yüksek gravimetrik hidrojen içeriğinin (sıvı amonyak için ağırlıkça %17,65 ve metanol için ağırlıkça %12,1) oluşundan kaynaklanmaktadır. Burada, amonyak ortam koşullarında gaz halinde olmasına ve bu nedenle depolanmasını kolaylaştırmak için sıvılaştırmaya ihtiyaç duymasına rağmen, hidrojen ve SNG'nin aksine bunun için çok daha az enerjiye ihtiyaç duymakta, amonyağın sadece -33 °C'a kadar soğutulması gerekirken, SNG ve H₂ sırasıyla -161 ve -252,8 °C'ye soğutulması gerekmektedir [6]. Metanol ise normal atmosferik basınç ve sıcaklıkta zaten sıvıdır ve bu nedenle herhangi bir ek dönüşüme ihtiyaç duymamaktadır. Amonyaktan hidrojenin salınması gerektiğinde, amonyağın hidrojene ayrışması termokimyasal ve elektrokimyasal yollarla gerçekleştirilebilir. Bu depolama yönteminde hidrojenin amonyaktan ayrıştırılması (ing. ammonia cracking) adımı bulunmaktadır. Bu proses yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve nikel katalizörü varlığında gerçekleşmektedir. Bu işlem yüksek miktarda enerji gerektirdiği için ve parçalama işleminden sonra uygun azot yönetimi gibi prosesler içerdiği için daha fazla maliyete neden olmaktadır [13].



Aynı durum, H₂ kullanılmadan önce dehidrojenlenmesi gereken metanol için de geçerli olmaktadır.



Hidrojen metanolden termoliz, buhar reformingi ve kısmi oksidasyon yoluyla salınabilmektedir. Bununla birlikte, metanol doğrudan kullanıldığında veya ayrıştırıldığında CO₂ salınımı nedeniyle kullanım alanında çevresel sorunlara yol açmaktadır.

7.2.1.2.5.2 Formik Asit ve İzopropanol

Formik asit ve izopropanol, gelecekte hidrojen depolama için potansiyel kabul edilmektedir. Burada aynı mantık geçerlidir: hacimsel hidrojen yoğunluğu (formik asit için yaklaşık 53 kg/m³ ve izopropanol için 25,9 kg/m³) ve ayrıca gravimetrik hidrojen içeriği (sırasıyla formik asit ve izopropanol için ağırlıkça %4,3 ve %3,3) onları hidrojen depolamak için kullanıma uygun yapmaktadır [14]. Buna ek olarak, her ikisi de normal atmosferik sıcaklık ve basınç altında sıvıdır. Ancak, ikisinin üretimi de fosil yakıtlardan elde edildiği için diğer hidrojen saklama metodlarına göre daha az ilgi çekmektedir.

7.2.2 Hidrojen Depolama Tankları

Hidrojen depolama tanklarının gelişim süreci, hidrojen enerjisi alanındaki gelişmelerle paralel olarak önemli bir ivme kazanmıştır. Ülke genelinde çeşitli firmalar, hidrojen depolama çözümleri sunmakta ve bu alanda Ar-Ge faaliyetleri yürütmektedir. Dünya genelinde ise ABD, Çin ve Güney Kore'de geliştirilen Tip-3 ve Tip-4 tankları başarılı olup tanklarda kullanılan astar malzemelerinin Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir.

Hidrojen depolama tankları, hidrojen gazını yüksek basınçlarda güvenli bir şekilde tutmak için tasarlanmış hidrojen depolamasının omurgasıdır. Hidrojen yakıt tankları, yakıt hücresi ve elektrolizör sistemleri, roketler ve uzay uygulamaları gibi hidrojenin kullanımını veya üretimini içeren her türlü alanda kullanılır. Bir hidrojen tankı, hidrojeni gaz veya sıvı formda depolamak için kullanılan bir kaptır. Depolama basıncına ve sıcaklığına bağlı olarak, bu tank çeşitli fiziksel

gereksinimleri karşılamalıdır.

7.2.2.1 Hidrojen Gaz Tanklarının Gereksinimleri

Hidrojen; toksik olmayan, renksiz, kokusuz, tatsız ve son derece yanıcı bir enerji taşıyıcısıdır ve aynı zamanda son derece hafiftir ve belirli malzemelerden sızabilir. Bu özellikler, depolamada belirli bir risk seviyesiyle ilişkilendirilir. Hidrojen tankları için temel gereksinimler şunlardır:

- Sızdırmazlık – Herhangi bir hidrojen tankının, içinde depolanan tüm hidrojeni güvenli bir şekilde tutması ve yalnızca kontrollü koşullar altında serbest bırakması temel bir gerekliliktir.
- Kompakt yapısı bulunmaktadır.
- Yüksek yorulma direnci – tankın birçok kez doldurulması, boşaltılması ve yeniden doldurulması beklenebilir. Bu diziye çalıştırmaya döngü denir. Genellikle bir tank ne kadar çok döngüye dayanabilirse o kadar uzun ömre sahip olabilir. Ayrıca hidrojen, belirli metalik malzemeleri kırılğanlaştırarak fiziksel olarak zayıflamalarına neden olabilir ve bunun hidrojen tanklarının tasarımında da aynı şekilde dikkate alınması gerekir.
- Yeterli ağırlık – düşük ağırlık, tüm uygulamalar için bir gereklilik olmasa da ağırlık önemlidir. Tanklar, hidrojen kullanan herhangi bir uygulamanın önemli bir bölümünü oluşturur ve bu nedenle tüm sistem üzerinde önemli bir ağırlık etkisine sahip olabilir.

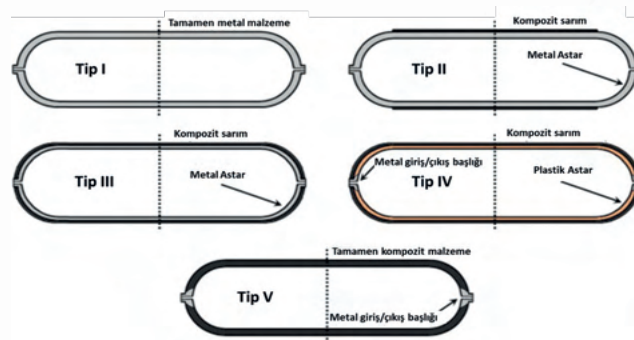
Hidrojen depolama tankları seçilirken kullanılan tipik ölçütler ise;

- Tank iç hacmi [litre]
- Çalışma basıncı [bar veya pascal]
- Çalışma basıncında depolanan hidrojen kütlesi [kg]
- Çalışma sıcaklığı aralığı [°C]
- İzin verilen maksimum basınç [bar veya pascal]
- Tank kütlesi [kg]
- Dış boyutlar
- Çevrim sayısı
- Tank tipi

olarak sıralanmaktadır.

7.2.2.2 Hidrojen Gaz Depolama Tank Tipleri

Gaz depolama tankları üretim yöntemine ve kullanılan malzemelere göre beş farklı tip altında incelenmektedir. Bunlar Tip I, II, III, IV ve V olarak sınıflandırılmaktadır ve Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15: Basıncı Gaz Depolama Tanklarının Sınıflandırılması

a. Tip I Hidrojen Tankı

Tip I hidrojen tankları tamamen metalden yapılmakta olup, sadece boyun kısmı, isteğe bağlı bir uç tapa ve metalik bir astar içerir. Dış sargı içermeyen bu tankların yapımı ve üretimi oldukça basittir. Bu nedenle maliyeti de nispeten düşüktür [15].

b. Tip II Hidrojen Tankı

Tip II hidrojen tankları, fiziksel özelliklerini güçlendirmek için etrafına dış bir sargı eklenmiş metalik bir iç astar (genellikle alüminyum) içerir. Bunlar, nispeten ince bir astarla daha yüksek hidrojen depolama basınçlarına izin verir. Dış sargı sentetik malzemeden yapılır.

c. Tip III Hidrojen Tankı

Tip III tanklarda, karbon fiberle sarılmış bir alüminyum astar kullanılır. Bu tasarım, Tip III tankların yüksek iç basınçlarla başa çıkmasını sağlayarak onları dış darbelere ve streslere karşı olağanüstü derecede dayanıklı hale getirir. Alüminyum astar yapısal bütünlük sağlarken, karbon fiber dış sargı ise mukavemeti ve basınç direncini artırarak zorlu uygulamalarda güvenli hidrojen depolamasını garanti eder. Bu nedenle kompozit katman, hidrojen sızıntısını engelleme ve fiziksel destek sağlama görevlerini üstlenir.

Tip III tanklar dayanıklılıkları ve maliyet etkin olmaları nedeniyle tercih edilir. Dayanıklılık ve uygun fiyatlılığın optimum dengesini oluşturur. Sağlamlıkları hizmet ömürlerini uzatır, bakım maliyetlerini azaltırken basınç toleransları onları çeşitli depolama ve taşıma ihtiyaçları için çok yönlü hale getirir.

d. Tip IV Hidrojen Tankı

Tip IV hidrojen tankları, genellikle yüksek yoğunluklu polimerlerden yapılan metalik olmayan bir astar (plastik) ve karbon fiber kompozit sargıdan oluşan gelişmiş bir tasarıma sahiptir. Bu yapı, metalik bir yapıya olan ihtiyacı ortadan kaldırarak önemli ölçüde daha hafif ve daha kompakt bir tankla sonuçlanır. Tasarımın yeniliği, depolama kapasitesini en üst düzeye çıkarırken ve ağırlığı en aza indirirken hidrojeni yüksek basınçlarda güvenli bir şekilde depolama yeteneğinde yatmaktadır. Tip I tanklara kıyasla %70'e kadar daha hafiftir ve bu nedenle bu tip tanklar, hidrojenin yüksek basınçlarda (örneğin 700 bar) depolanması ve sistem ağırlığının düşük olması gereken uygulamalarda kullanılabilir [15].

Tip III ve Tip IV tanklar arasındaki seçim genellikle ağırlık, kapasite ve maliyet arasındaki dengeye dayanır ve her malzeme kendine özgü avantajlar sunar. Hem Tip III hem de Tip IV tanklar çevreyi düşünerek tasarlanmış olup, ekolojik ayak izlerini en aza indirmek için uzun ömürlü ve geri dönüştürülebilir olacak şekilde tasarlanmıştır.

e. Tip V Hidrojen Tankı

Tip V hidrojen tankları astar içermeyen tam kompozit yapıdır. Tasarım çok düşük ağırlık ve azaltılmış karmaşıklık hedeflemektedir. Bu tanklar ağırlık açısından en avantajlı grup olmasına rağmen, yapısal mukavemet ve sızdırmazlık isterlerini sağlama noktasında problemler yaşanmaktadır. Bu tankların geliştirme aşaması devam etmektedir.

Aşağıda verilen Tablo 8'de beş farklı hidrojen depolama tankının malzemeleri ve optimum çalışma basınçları gösterilmektedir.

Tablo 8: Tank Tipleri ve Özellikleri

Tank Tipi	İç Astar Malzemesi	Dış Sargı Malzemesi	Optimum Çalışma Basıncı Aralıkları
TİP I	Çelik ve Alüminyum	U/D	200 bara kadar
TİP II	Alüminyum	Cam veya Karbon fiber	300 bara kadar
TİP III	Alüminyum	Karbon fiber	350-700 bara kadar
TİP IV	Plastik	Karbon fiber	700 bara kadar
TİP V	U/D	Kompozit	Değişken

Hidrojen depolama teknolojilerinin devam eden gelişimi, yakıt hücresi uygulamalarında daha iyi performans ve verimlilik için bu malzemeleri iyileştirmeye odaklanmaya devam etmektedir.

7.3 Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri

Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri olarak da bilinen yardımcı ve destek elemanları (ing. balance of plant (BOP)) terimi, yığının kendisi dışında bir yakıt hücresi sisteminin tüm bileşenlerini içermektedir. Yakıt hücresi yığınının düzgün ve sürekli bir şekilde çalışması için, bu BOP adı verilen ekipman ve bileşenler tarafından çalışma koşullarının oluşturulması gerekmektedir. BOP; pompalar, kompresörler, ısı eşanjörleri, ısı değiştiriciler, nemlendiriciler, contalar, sirkülasyon fanları, vanalar, çeviriciler, anahtarlar, kontrol ekipmanları, yazılım, kablaj, güç düzenleyiciler ve sensörler gibi bileşenleri içermektedir. Söz konusu sistem bileşenleri yakıt hücresi tasarımına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bunun nedeni yakıt hücresi sisteminin ihtiyaçlarının yakıt hücresi boyutuna, kullanılan yakıtı, kapasite ve uygulama alanına göre farklılık göstermesidir. Örneğin kullanılan yakıtın hidrojen veya hidrojen dışı yakıt (metanol, dizel vb) oluşuna göre sistemde yakıt dönüştürücü (reformer) kullanılmaktadır. Özellikle hidrojen tankı kullanılan sistemlerde basınç ve debi kontrolleri, dolayısıyla contalar ve sızdırmazlık elemanları önem taşımaktadır. Bir yakıt hücresinden çıkan egzoz gazlarının enerjisi sisteme eklenen bir türbin vasıtasıyla geri kazanılabilir. Bu örnekten de anlaşılabilir gibi sistemin özelliğine göre farklı BOP elemanları kullanılabilir. Yüksek güçlü yakıt hücresi sistemlerinde hava besleme tarafında kompresör, nemlendirici, ısı değiştirici, vanalar, sensörler, contalar ve sızdırmazlık elemanları; yakıt besleme tarafında ise gaz ölçüm sensörleri, geri dönüş pompası ve yine vanalar, contalar ve sızdırmazlık elemanları sistem bileşenleridir.

Yakıt hücresi sistem bileşenlerinden ısı değiştiriciler, sıkıştırılmış havayı soğutma, yığını soğutma ve yakıt dönüştürücüde kullanılmaktadır. Isı değiştiriciler için kompaktlık ve düşük basınç düşüşü önemlidir. Eğer yakıt hücresi katı oksit ise sıcak noktaların giderilmesi ayrıca önem taşımaktadır.

Yukarıda anlatılanlarla birlikte genel olarak BOP dört ana başlık içerisinde incelenebilmektedir. Bunlar:

1. Hava besleme sistemi
2. Hidrojen besleme sistemi
3. Soğutma sistemi
4. Proses ve kontrol bileşenleri

Hava besleme sistemi, PEMFC sistemlerinde temel alt sistemlerden birisidir. Hava besleme sistemi, hava filtresi, susturucu, kompresör, soğutucu, nemlendirici, geri basınç vanası, sıcaklık /basınç sensörü, hava kütle debisi sensörü ve bağlantı elemanları gibi bileşenlerden oluşmaktadır.

Hidrojen besleme hattı, basınç regülatörü, alev kapanı, buffer tank, hidrojen resirkülasyon pompası, sıcaklık/basınç/debi sensörleri, hidrojen solenoid valf, çek valf, gaz-su ayırıcı ve bağlantı elemanları gibi bileşenleri içermektedir.

Soğutma Sistemi Komitesi, temel olarak radyatör, sıcaklık sensörü, iyon filtresi, soğutma suyu filtresi, genişleme tankı, su pompası, iletkenlik sensörü, baypas vanası, ısıtıcı, bağlantı boruları ve manifoldlardan oluşmaktadır. Bu sistemler temelde, yığın içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal tepkimeler sonucunda açığa çıkan ısıyı dengelemek ve yığının optimum sıcaklıkta çalışmasını sürdürmek amacıyla kullanılmaktadır. Hava ile, buharlaşma ile, ısı yayıcılar ile soğutma gibi farklı soğutma metodları mevcuttur.

7.3.1 Hava Besleme Sistemi

7.3.1.1 Hava Filtresi

Hava filtresi, fiziksel filtrasyon ve kimyasal adsorpsiyon işlemlerini içermektedir. Fiziksel filtrasyon işlemi, toz gibi partikülleri ortadan kaldırmaya yarar; kimyasal adsorpsiyon işlemi, fiziksel olarak emilmeyen gazları uzaklaştırmayı sağlamaktadır [16]. Yakıt hücreleri, dışarıdan alınan hava yoluyla sistemin içerisine giren tozlara, kükürt veya amonyak içeren bileşiklere karşı hassas bir şekilde tepki vermektedir. Hava kirletici maddelerin yakıt hücresine girmesi, yakıt hücresinde performans düşüşüne yol açabilmekte ve yakıt hücresinin kullanım ömrünü azaltabilmektedir. Bu nedenle, yakıt hücresinde bileşenleri korumak için etkili filtreleme önemlidir. Filtre, kükürt oksitleri, amonyak ve diğer zararlı gazları etkili bir şekilde yakalayıp, yakıt hücresinde katalizör tabakasının ve membranın hasar görmesini önlemektedir. Yakıt hücresi sistemleri için ticari olarak üretilen hava filtreleri bulunmaktadır.

7.3.1.2 Kompresör

Kompresör hava besleme sisteminde önem arz etmektedir. Hava filtresi ile filtrasyon işlemi gerçekleştikten sonra temizlenen havanın istenen basınç değerine gelmesi için kompresöre gönderilmesi gerekmektedir. Kompresör, bu basınçta gerekli debiyi sağlayabilecek kapasitede olmalıdır. Hava kompresörü, yakıt hücresine farklı akış hızlarında ve farklı basınçlarda hava sağlayabilmektedir [17]. Ayrıca, yakıt hücresinde hava akış hızını ve yığının çıkış hava basıncını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Yakıt hücresinde istenilen hava debisi, kompresörün hızı düzenlenerek sağlanmaktadır. Bu nedenle, akış hızı kompresörün güç tüketimi ile doğru orantılıdır. Kompresör, elektrik gücü gerektiren bir elektrik motoru tarafından çalıştırılmaktadır ve bu nedenle sistemde güç kaybını veya parazitik yükü temsil etmektedir. Bu kapsamda, yüksek akış hızlarında çalışırken yakıt hücresi daha iyi performans gösterse de bu hızlarda kompresörün harcadığı güç önemli derecede sistemin verimliliğini etkilemektedir. Yakıt hücresi sistemlerinde düşük basınçlı sistemler için, fan ya da hava üfleyici (ing. blower) kullanılırken, basınçlandırılmış sistemler için kompresör tercih edilmektedir. Yakıt hücresi sisteminin gereksinimlerini karşılayacak uygun hava kompresörünü bulmak için farklı hava kompresörlerinin performansları ve fiziksel özellikleri değerlendirilmelidir. Yakıt hücresi sistemlerinde genel olarak kullanılan iki tip kompresör bulunmaktadır: pozitif yer değiştirmeli kompresörler ve dinamik kompresörler.

Literatürde yapılan çalışmalarda yakıt hücresi uygulamaları için farklı kompresörlerin (turbo, elektrikli turbo, santrifüj, spiral, vidalı, pistonlu, kanatlı) avantaj ve dezavantajları kıyaslanmıştır [18]. Yakıt hücresi uygulaması için özel gerekliliklere göre farklı kompresörler kullanılabilir. Çalışma sonucunda turbo kompresör, elektrikli turbo kompresör ve santrifüj kompresörün boyut, ağırlık, basınç oranı, gürültü ve basınç dalgalanmaları gibi özelliklerde daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, PEMFC sistemleri için santrifüj kompresörler hızlarının daha yüksek olması, daha az gürültülü olmaları, daha yüksek verimliliğe sahip olmaları ve daha yüksek güvenilirlikleri nedeniyle pozitif yer değiştirmeli kompresörlerden daha çok kullanılmaktadır [19].

7.3.1.3 Susturucu

Hava besleme sisteminde yer alan bir diğer bileşen susturucu bileşenidir. Hava kompresörü santrifüj pompa gövdesi benimsediği için kanatların yüksek hızlarda dönmesi tüm araçta rahatsızlık verecek şekilde gürültü oluşturmaktadır. Bu nedenle kompresörün arka tarafına bir susturucu bağlanmaktadır.

7.3.1.4 Soğutucu

Kompresörden çıkan basınçlı havanın yığının çalışma sıcaklığına düşürülmesi için bir soğutucudan geçmesi gerekmektedir. Hava besleme sisteminin bir diğer bileşeni olan soğutucu bu nedenle sistemde yer almaktadır. Soğutucu hava besleme sistemi için önemli bir bileşendir, çünkü yüksek sıcaklıklarda havanın yakıt hücresine gönderilmesi yakıt hücresi bileşenlerine zarar verebilmekte, membranda kurumaya yol açabilmekte ve bu da yakıt hücresi performansının düşmesine neden olabilmektedir [16].

7.3.1.5 Nemlendirici

Nemlendirici, yakıt hücresi sisteminde önemli olan bir diğer bileşendir. Kompresör havanın sıcaklığını arttırırken aynı zamanda içerisindeki bulunan suyun da buharlaşmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, yakıt hücresinin performansını arttırmak için kuru havanın nemlendirilmesi gerekmektedir. Nemlendiriciler, sürekli ve kararlı çalışmayı sağlamak için yakıt hücresi sisteminde sıklıkla kullanılmaktadır. Yakıt hücresinde membranın kurummasını önlemek için hava akışı nemlendirilmektedir. Burada havanın nemlendirmesi, nemlendirici tarafından sağlanmaktadır. PEMFC yığınlarında havanın nemlendirilmesi, optimum proton iletkenliği elde etmek için önem arz etmektedir.

7.3.1.6 Geri Basınç (ing. Back Pressure) Vanası

Reaksiyon sonucunda reaksiyona girmeyen hava, geri basınç vanası ile dışarı atılmaktadır. Proseste hem kompresör hem de geri basınç vanası yakıt hücresine giden reaktantın basıncını ve akış hızını etkilediği için son olarak geri basınç vanasından çıkan havanın bir denetleyiciden geçmesi gerekmektedir [20].

7.3.2 Hidrojen Besleme Sistemi

Hidrojen besleme hattı, hidrojen tankından çıkan gazı regüle edecek bir basınç regülatörü, gazı yeniden sirküle etmek için bir pompa, bir tahliye vanası, sıcaklık/basınç/debi sensörleri ve bağlantı elemanları gibi bileşenleri içerebilmektedir. Sistem isterlerine göre farklı konfigürasyonlarda tasarımlar literatürde mevcut olmak ile birlikte her besleme hattı için basınç regülatörü ve tahliye vanası bulunmaktadır [19].

a. Sürekli Akış Metodu: Bu metotta tahliye vanası (ing. purge valve) sürekli olarak açıktır. Bu besleme hattında reaksiyona girmeyen hidrojen doğrudan atmosfere salınmaktadır. Bu çalışma modunda, hidrojen akışı, yüksek yakıt kayıplarına ve güvenlik risklerine yol açmaktadır. Bu nedenle, bu yöntem PEMFC'lerde daha nadir kullanılmaktadır.

b. Kapalı Uç Metodu: Bu metotta tahliye vanası periyodik olarak açılmaktadır. Tahliye vanasının periyodik olarak kapanması, hidrojenin kullanım miktarında (ing. hydrogen utilization rate) bir artışa yol açmaktadır.

c. Ejektör Devirdaimi: Bu metotta, kullanılmayan hidrojen gazı bir ejektör kullanılarak yakıt hücresi yığınının girişine tekrar sirküle edilmektedir. Ejektör, basınç vanasından gelen yüksek basınçlı hidrojen gazıyla çalışmaktadır. Bu, devridaim enerjisinin hidrojen besleme sisteminin içinden alındığı ve harici bir enerji kaynağına gerek olmadığı anlamına gelmektedir.

d. Kompresör Devirdaimi: Bu tasarımda, kullanılmayan hidrojen gazını yakıt hücresi yığınının girişine sirküle etmek için bir kompresör kullanılmaktadır.

Ejektör kullanımı için gerekli olan enerji, basınç vanasından gelen yüksek basınçlı hidrojen gelmekte ve bu da dışarıdan bir sistemden ek enerji gerekmediği anlamına gelmektedir. Kompresör devridaim sistemi için, kompresörleri çalıştırmak için ek enerji gerekmemekte ve bu da yakıt hücresi verimliliğinde azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca, ejektörde dönen veya yüksek hızda hareket eden parça bulunmadığından yapısı basit, PEMFC'lere uygulandığında güvenilirliği daha yüksek olmaktadır. Kompresörlerde yüksek hızda dönen parçalar bulunduğu için, kompresörlerin yapısı karmaşıktır ve kompresörlerin güvenilirliği ejektörlere göre daha düşüktür [19].

7.3.2.1 Basınç Regülatörü

Hidrojen besleme hattında önemli olan bir BOP elemanı da basınç regülatörüdür. Yakıt hücresini beslemek için tipik olarak 350 veya 700 bar gibi yüksek basınçlı tanklardan gelen hidrojenin basıncını yakıt hücresinin çalışma koşullarındaki düşük basınçlara getirmek amacı ile basınç regülatörü kullanılmaktadır. Hidrojen yüksek basınçlı tanklarda depo edildiği için yakıt hücresine gönderilen hidrojenin çalışma koşullarındaki basıncına düşürülmesi gerekmektedir. Regülatör olmadan, yüksek basınçlı hidrojen tankı, yakıt hücresine geri dönüşü olmayacak şekilde zarar verecek basınçlarda hidrojeni serbest bırakacaktır [19].

7.3.2.2 Ejektör

Ejektör, reaksiyon sonucunda sistemde kullanılmayan hidrojenin devri daiminin yapılmasında kullanılan bir bileşendir. Ejektörler basınç vanalarından gelen hidrojen basınç enerjisini adiyabatik genleşme ile hız enerjisine dönüştürülmesiyle çalışmaktadır. Sabit ve değişken geometrili iki çeşit ejektör bulunmaktadır.

7.3.2.3 Tahliye (ing. Purge) Vanası

Hidrojen besleme hattı bir tahliye vanası içermektedir. Fazla hidrojen, tahliye vanası kullanılarak yakıt hücresi sisteminden dışarı atılmaktadır.

7.3.3 Soğutma Sistemi

Soğutma sistemi esas olarak soğutma sıvısını sirküle eden bir pompa, bir ısı eşanjörü, partikül filtreleri, iyon partikül filtreleri, genleşme tankı, iletkenlik sensörü, baypas vanası, sıcaklık sensörü ve bağlantı elemanları gibi ekipmanlardan oluşmaktadır. Soğutma sistemi, bir yakıt hücresinin kullanım ömrünü ve performansını artırmak için önem arz etmektedir. Yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyon tarafından açığa çıkan ısı, değişmeyen ve sabit bir sıcaklık profilini koruması için bir soğutma sistemi tarafından giderilmelidir. Bu termal yönetim olmadan membran aşırı ısınabilmekte ve kuruyabilmekte, bu da proton iletkenliğini ve dolayısıyla yakıt hücresinin verimliliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca, sıcaklığın homojen olmaması, elektrokimyasal reaksiyon hızının farklı yerlerde değişken olmasına neden olmaktadır. Literatürde farklı teknik özelliklere sahip yakıt hücreleri için farklı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır [21]. Soğutma stratejileri yakıt hücresi sistemi gücüne ve ölçeğine göre değişmektedir. Küçük ölçekli yakıt hücresi sistemlerinde (<5 kW) hava soğutması yeterlidir. Orta ölçekli (<10 kW) yakıt hücresi sistemlerinde daha çok hava soğutması veya pasif soğutma yapılmaktadır. Pasif soğutmada ısı yayıcılar veya ısı pompaları kullanılmaktadır. Büyük ölçekli (10 kW<) yakıt hücresi sistemlerinde ise soğutma, sıvı soğutma veya faz değişimi ile sağlanmaktadır.

7.3.3.1 Katot Hava Akışı ile Soğutma

Düşük güce sahip yakıt hücresi yığınları için (<100 W) soğutma katot hava akışıyla sağlanabilmektedir. Bu yöntemde dezavantaj, yığının katot tarafı için anot tarafına kıyasla nispeten daha büyük kanal boyutu gerektirmesidir, bu da sonuç olarak yığının hacmini arttırmaktadır [21].

7.3.3.2 Ayır Hava Akışı ile Soğutma

Daha büyük yığınlar için (200 W- 5 kW), yakıt hücresinde meydana gelen ekzotermik reaksiyon nedeniyle üretilen ısıyı uzaklaştırmak için havanın üflenebildiği ayrı soğutma kanalları gerekmektedir [21].

7.3.3.3 Sıvı Soğutma

Sıvının termal özellikleri (özellik ısı kapasitesi, termal iletkenlik), gaz veya havadan birkaç derece daha yüksektir, bu nedenle daha yüksek güce sahip yığınlar için (>10 kW), soğutucu olarak hava yerine sıvı bir madde seçilmektedir [21]. Sıvı soğutmada su-etilen glikol veya motor yağı kullanılmakta ve soğutma sıvısı ayrı kanallardan akmaktadır.

7.3.3.4 Buharlaştırma ile Soğutma

Buharlaştırma ile soğutma, reaksiyon sonucu üretilen ısıyı yakıt hücresinden uzaklaştırmak için buharlaştırma entalpisinden yararlanmaktadır. Suyun buharlaştırma entalpisi, PEMFC'nin

reaktant akımlarına ilave su enjekte edilerek soğutmada kullanılmaktadır. Bu soğutma yöntemi membranın kurumasını önlemeye yardımcı olmaktadır [21].

7.3.3.5 Isı Yayıcılar ile Soğutma

Isı yayıcılar, soğutma amacıyla akış kanalı plakasına bitişik olarak kullanılan yüksek iletkenliğe sahip malzemelerdir. Bu ısı yayıcılarda, ısının taşınması önce iletim yoluyla gerçekleşmekte, ardından ısı doğal veya zorlamalı konveksiyon yoluyla çevredeki havaya dağıtılmaktadır [20].

7.3.3.6 Isı Eşanjörü

Yakıt hücresi sisteminde farklı isterler ve farklı uygulamalar için çeşitli ısı eşanjörleri kullanılmaktadır. Eşanjör, aralarında sıcaklık farkı bulunan iki akışkan (sıvı veya gaz) arasında herhangi bir fiziksel temas olmaksızın ısı transferini sağlayan bir ekipmandır. Isı eşanjörleri üç tipe ayrılır. Bunlar boru tipi ısı eşanjörleri, plakalı ısı eşanjörleri ve bu ikisinin birleşimi olan kompakt ısı eşanjörleri olarak bilinmektedir [22].

7.3.3.7 Pompa

Soğutma sisteminde önemli olan bir diğer bileşen ise sıvıyı sirküle etmek için kullanılan pompadır. Pompa seçiminde sistem isterlerine göre farklı pompa çeşitleri bulunmaktadır. Pompaların satıcı tarafından paylaşılan karakteristik eğrileri incelenerek sistem isterlerine uygun pompa seçimi yapılması gerekmektedir.

7.3.3.8 By-pass Vanası

Baypas vanası, soğutma sisteminde sıcaklık kontrolü yapmakta ve soğutma sıvısı akışını bölerek bir kısmının radyatörden geçmesine ve bir kısmının da baypas etmesine neden olmaktadır.

7.3.4 Proses ve Kontrol Bileşenleri

Yakıt hücresi kontrol ünitesi, yakıt hücresi alt sistemlerinin önemli bir bileşenidir ve tüm yakıt hücresi sisteminin genel süreç kontrolünden sorumludur. Buna, hidrojen ve havanın beslenmesi, ısı ve su yönetimi, enerji dönüşüm denetimi ve ayrıca tüm emniyet ve güvenlik gereksinimlerinin karşılanması dahildir [23].

Yakıt hücresi sistemlerinde kontrol ve doğrulamalar, model tabanlı kontrol ve optimizasyon algoritmaları, bileşen kitaplığı ve hızlı prototipleme aracılığıyla yapılmaktadır. Isı, hidrojen, hava ve su bağlantı kontrolleri için farklı metodolojiler kullanılmaktadır (PID kontrol, adaptif kontrol, model tahmin kontrolü, yapay zekâ tabanlı kontrol vb).

Yakıt hücresindeki güç kontrol sistemleri, hücrenin ürettiği elektrik enerjisinin verimli bir şekilde yönetilmesini sağlamak amacıyla kullanılan sistemlerdir. Bu sistemler, yakıt hücresinin çıkış gücünü, enerji taleplerine göre dinamik bir şekilde ayarlarlar. Güç kontrolü, genellikle yakıtın besleme oranı, sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin izlenmesi ve optimize edilmesi yoluyla gerçekleştirilir. Bu sistemler, aşırı yüklenmeyi engellemek, enerji kayıplarını minimize etmek ve yakıt hücresinin ömrünü uzatmak için önemli rol oynar. Ayrıca, güç kontrol sistemleri, yakıt hücresinin çeşitli uygulamalarda, örneğin elektrikli araçlar veya sabit enerji santralleri gibi farklı koşullarda güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlar.

7.4 Patent ve Yayın Analizi

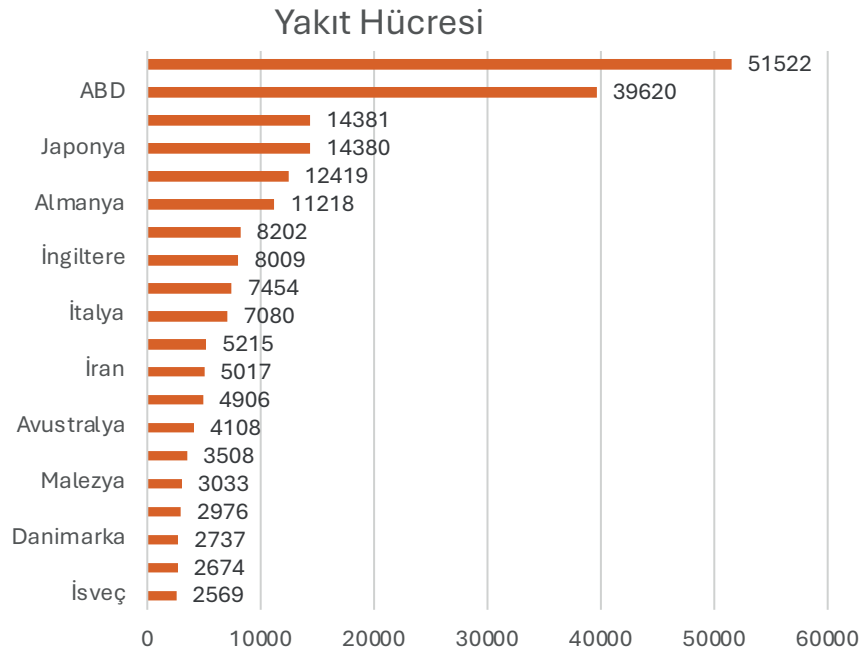
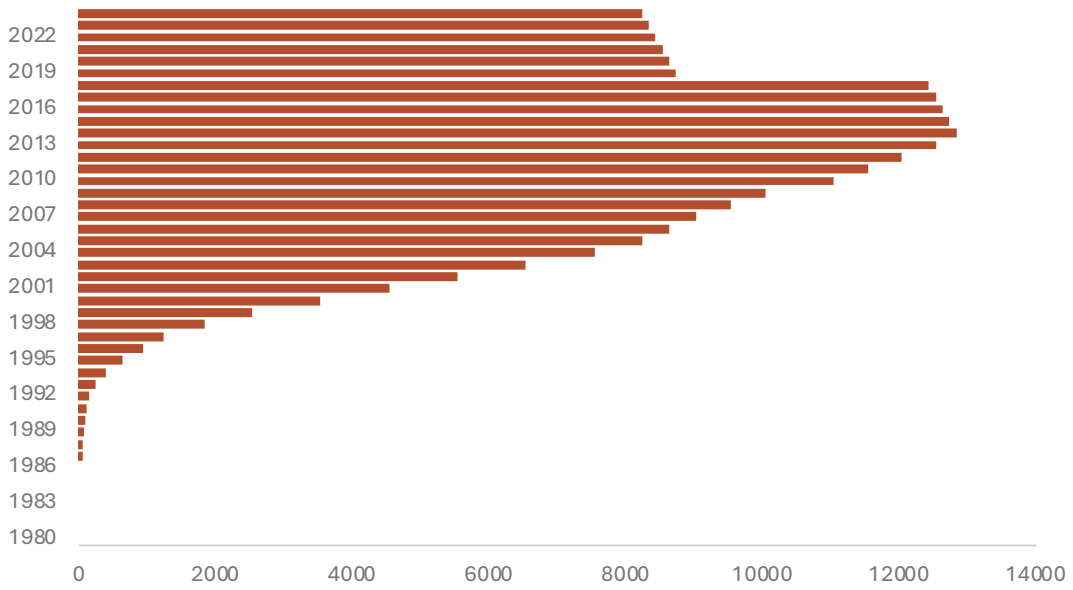
7.4.1 Yayın Analizi

Yakıt hücresi gibi kritik bir teknoloji alanında yapılan akademik çalışmaların analizi, mevcut durumu anlamak ve gelecekteki eğilimleri öngörmek açısından önemlidir. Yakıt hücresi konusunda Türkiye’de ve dünyadaki mevcut durum analizleri Web of Science ve Scopus değerlendirmelerine göre yapılmıştır.

Şekil 16’da yıllara ve ülkelere göre yakıt hücresi dağılımı görülmektedir. 1990’lı yıllarda oldukça sınırlı sayıda akademik yayın yapılmış olmasına karşın, 2000’li yıllarda bu sayı hızla artış göstermiştir. Bunun arkasında, sürdürülebilir enerjiye yönelik artan ilginin ve ülkelerin enerji politikalarında yenilenebilir teknolojilere öncelik vermeye başlamasının etkili olduğu söylenebilir. Özellikle 2005-2015 yılları arasında yakıt hücreleriyle ilgili yayınların sayısında belirgin bir artış gözlenmektedir. Bu dönemde devletlerin enerji yatırımlarına yönelik teşvikler sunması ve

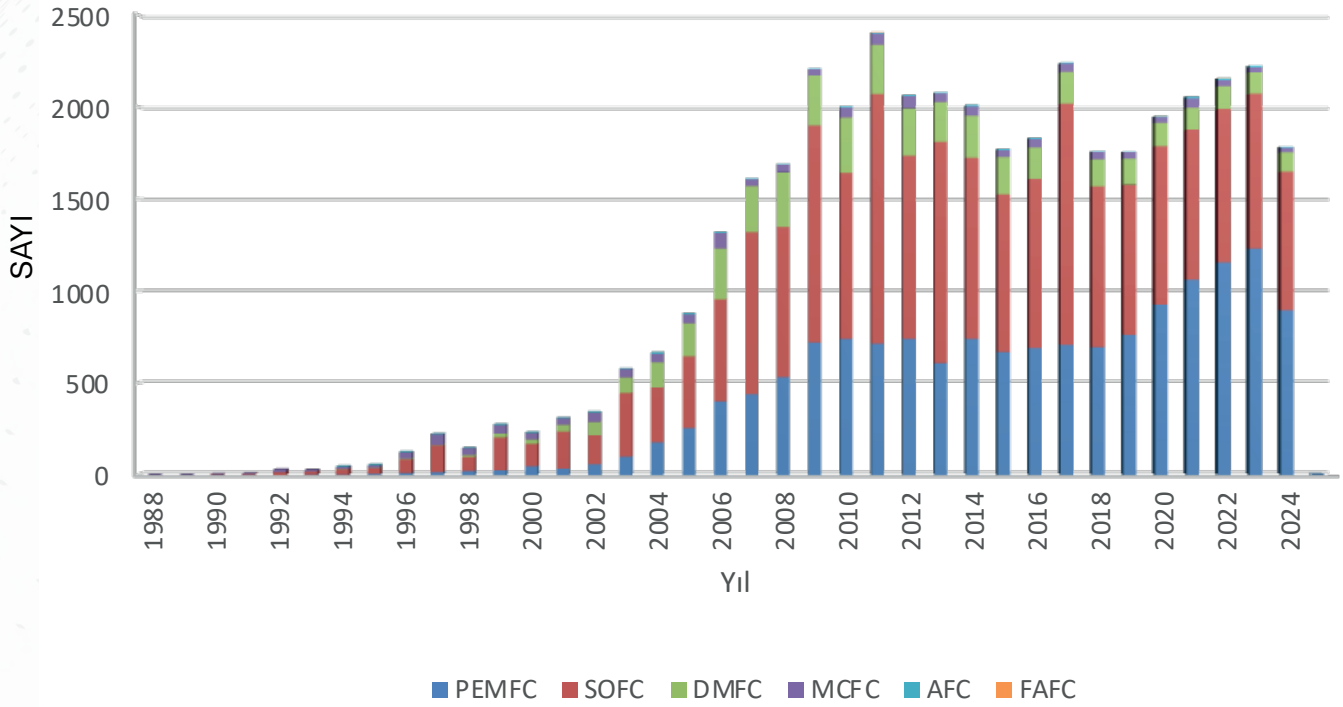
sanayi-üniversite iş birliklerinin artması, yayın sayısının yükselmesine katkıda bulunmuştur. 2020 yılına yaklaşıldığında, pandemi etkisiyle yayın sayılarında bazı dalgalanmalar meydana gelmiştir. Laboratuvar çalışmalarının kesintiye uğraması ve araştırma bütçelerinin azalması, bu dalgalanmaların başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. Ancak pandeminin etkilerinin azalmasıyla birlikte yayınlarda yine artışın olduğu görülmektedir. Bu durum, yakıt hücrelerinin enerji dönüşüm sürecinde stratejik önemini koruduğunu göstermektedir.

Ülkelere göre durum değerlendirildiğinde ise en çok yayına sahip olan ülkeler arasında Çin, ABD, Güney Kore ve Japonya öne çıkmaktadır. Çin, özellikle son yıllarda enerji dönüşümü ve yeşil teknolojiler alanında liderlik konumunu güçlendirmiştir. ABD’de ise özel sektör ile üniversiteler arasındaki güçlü iş birlikleri sayesinde, yakıt hücreleri üzerine yapılan çalışmalar oldukça yaygındır. Türkiye’nin yakıt hücresi araştırmalarındaki konumu ise gelişme aşamasındadır. Ülkemizde bu alandaki yayınların sayısı henüz sınırlı olmasına rağmen, gelecek vadeden bir artış eğilimi görülmektedir. Türkiye’nin enerji politikalarında yenilenebilir kaynaklara ağırlık vermesi, yakıt hücreleri üzerine yapılan araştırmaların ilerleyen yıllarda daha da artacağına işaret etmektedir.



Şekil 16: Yıllara ve Ülkelere Göre Yakıt Hücresi Yayınları

Farklı yakıt hücresi türleri için yapılan yayınların yıllar içindeki değişimi Şekil 17’de görülmektedir. Grafik, PEMFC ve SOFC gibi türlerin daha fazla ilgi gördüğünü ortaya koymaktadır. PEMFC, düşük sıcaklıkta çalışması ve hızlı başlatılabilir olması nedeniyle özellikle ulaşım sektörü başta olmak üzere pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. SOFC teknolojisi ise yüksek sıcaklık koşullarında verimli çalışabilmesi nedeniyle enerji santralleri gibi sabit uygulamalarda tercih edilmektedir. Yüksek sıcaklıkta çalışabilen bir sistem olması, yakıt çeşitliliği ve enerji dönüşüm verimliliği açısından avantaj sağlamaktadır. Diğer yakıt hücresi türleri olan DMFC, MCFC ve AFC’nin ise daha spesifik kullanım alanlarına sahip olmaları nedeniyle yayın sayılarının görece düşük kaldığı görülmektedir. Ancak bu alanlardaki araştırmalar da belirli sektörler için önemli yenilikler sunma potansiyeline sahiptir.

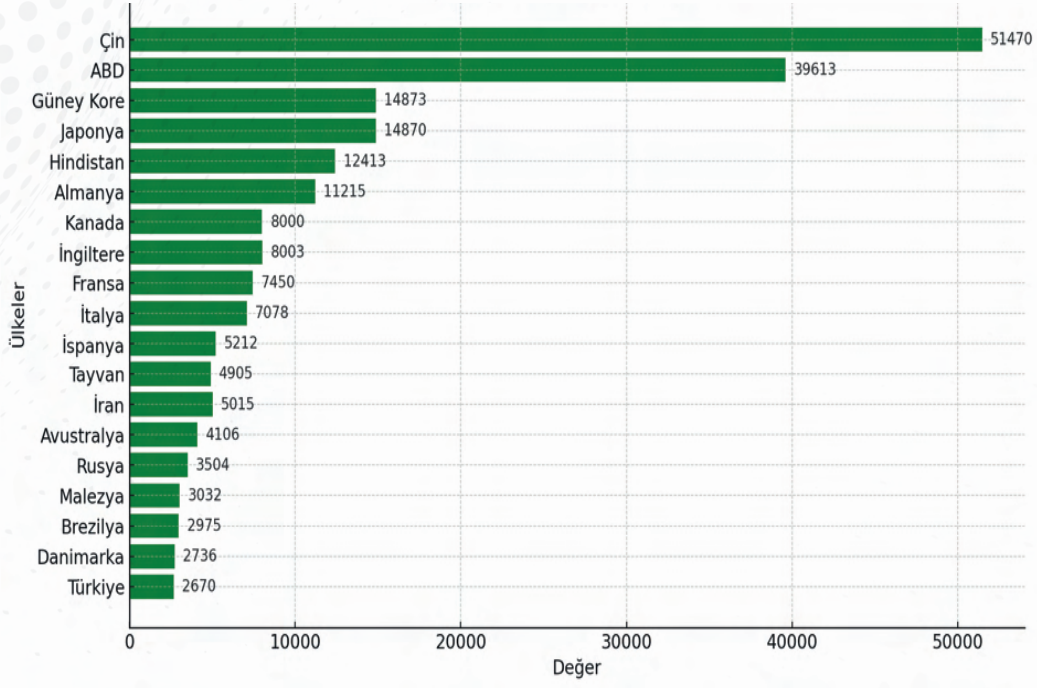


Şekil 17: Yakıt Hücresi Türlerinin Yıllara Göre Dağılımı

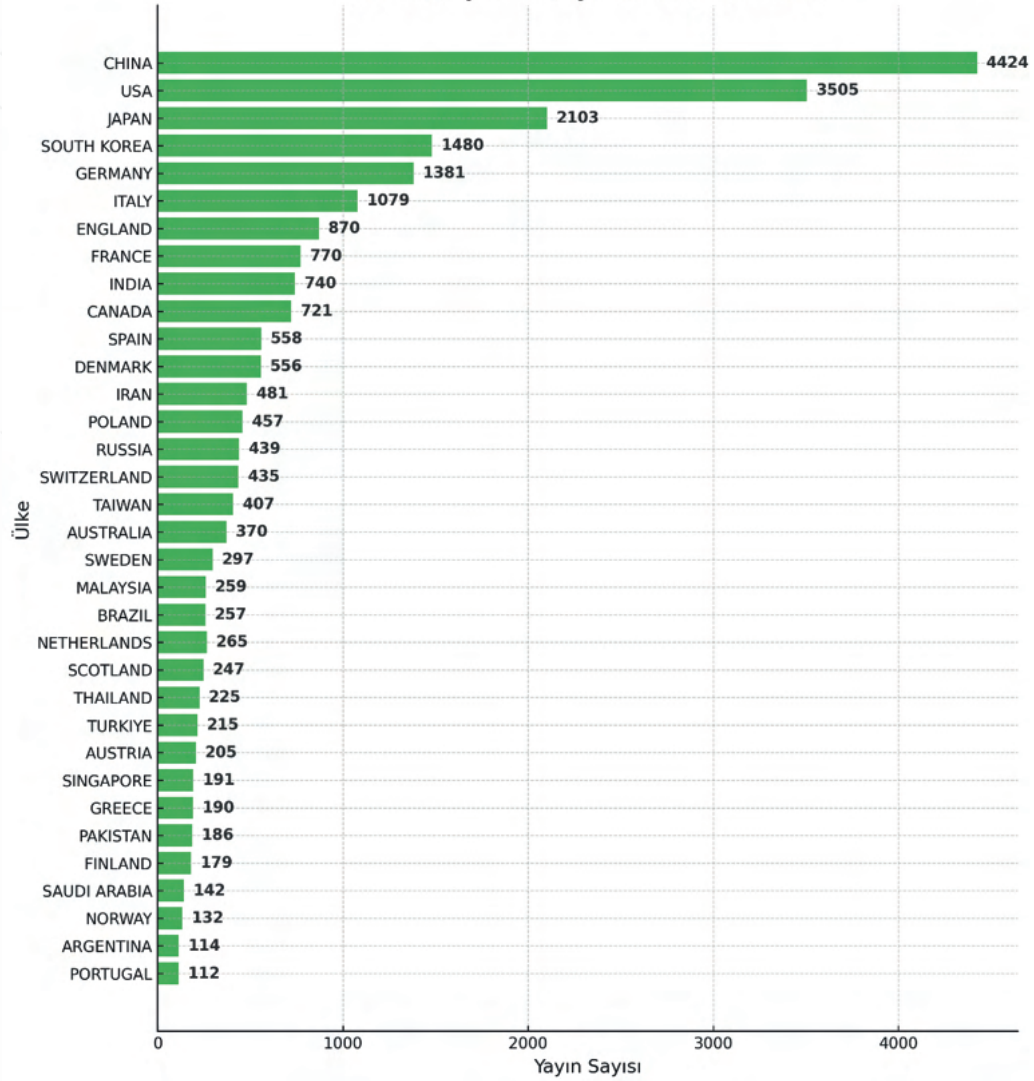
PEMFC ve SOFC yayınlarının ülkelere göre analizi ise Şekil 18’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde Çin, ABD, Japonya ve Güney Kore’nin bu alanlarda lider konumda olduğu görülmektedir. Bu ülkelerde PEMFC konusundaki yayınlar SOFC konusunda yapılan yayınlardan önemli ölçüde fazladır.

Türkiye’nin araştırmalarındaki konumu henüz sınırlıdır; ancak gelecek yıllarda bu alanda artışın olacağı beklenmektedir. Özellikle üniversitelerde yapılan araştırmaların sanayiye entegre edilmesi, Türkiye’nin yakıt hücresi teknolojisi alanında daha etkin bir rol oynamasına yardımcı olacaktır.

PEMFC Değerleri

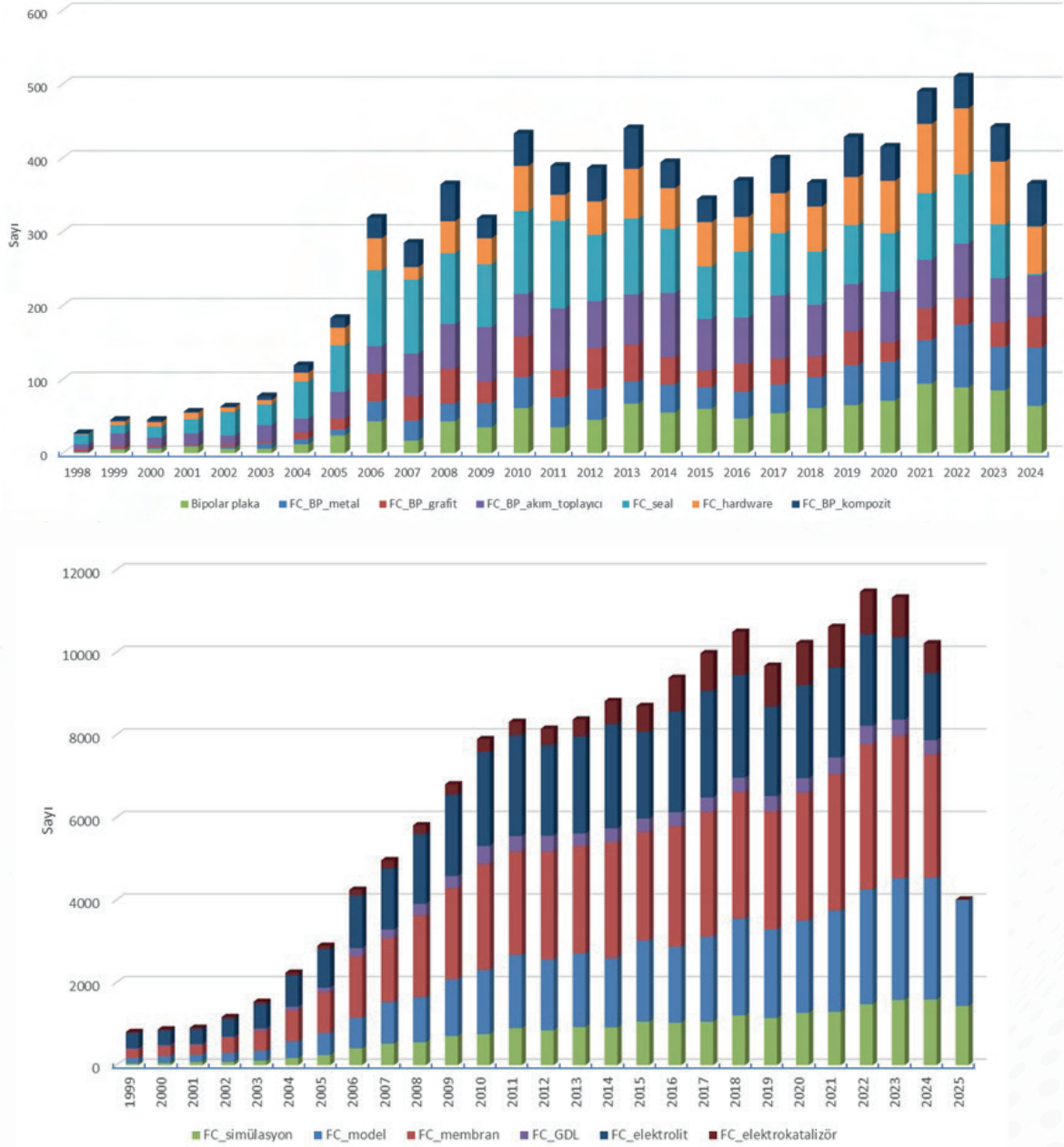


SOFC Araştırma Yayınları Ülkelere Göre

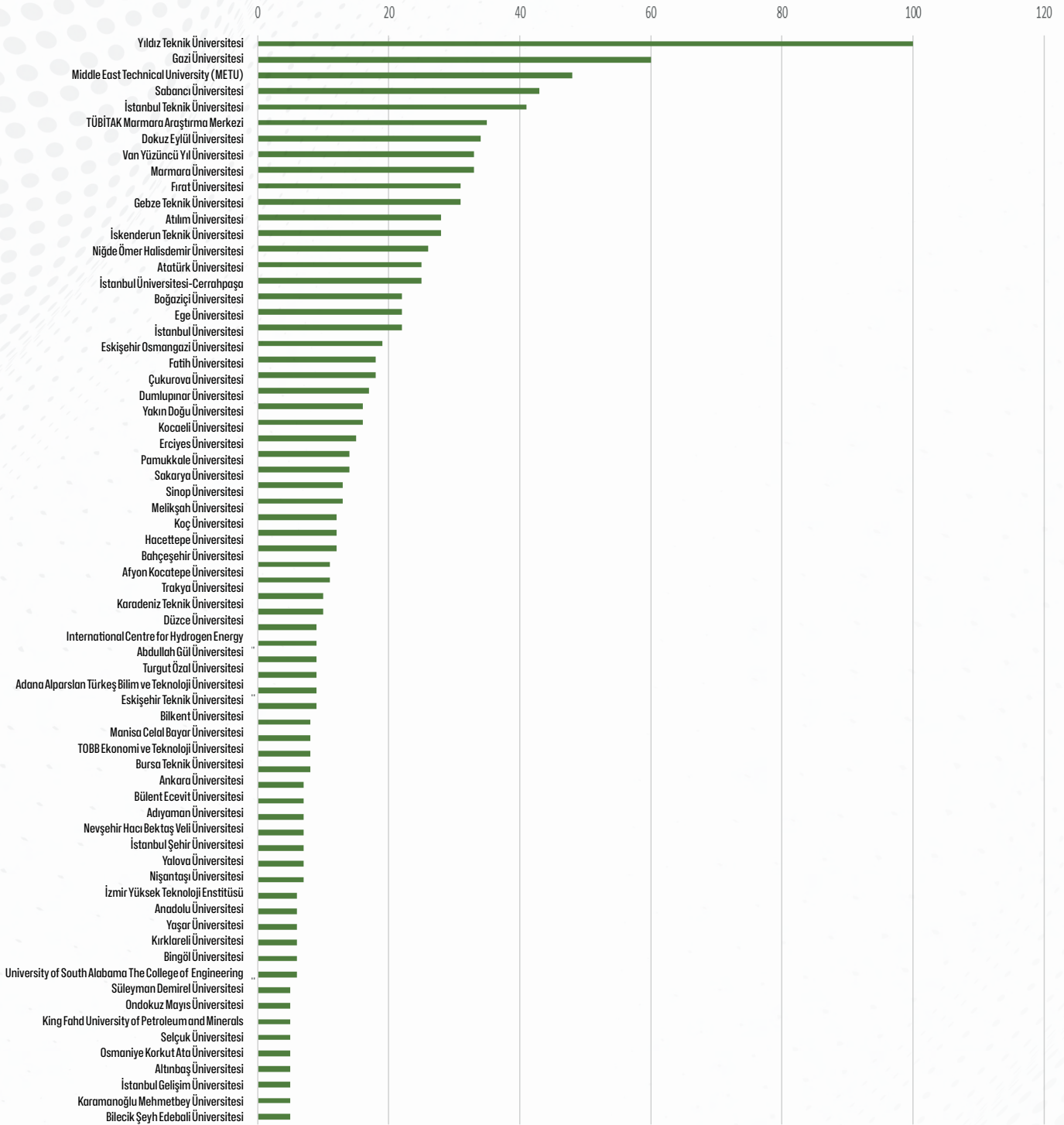


Şekil 18: PEMFC ve SOFC Yayınlarının Ülkelere Göre Analizi

Şekil 19 (a)'da yakıt hücresi bipolar plaka bileşenleri ve (b)'de modül bileşenleri yayınlarının yıllar içindeki değişimi gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde yakıt hücresi konusunda modelleme, simülasyon, elektrolit ve elektrokatalizör konularında yoğun yayınların yapıldığı; bunu diğer bileşenlerin takip ettiği görülmektedir (membran ve elektrolit kelimeleri yakıt hücresi adında da yer aldığından yayın konusu ya da teknoloji alanı ayırımı yapılamadığından yüksek çıkmıştır). Bipolar plakaların analizi metal, grafit ve kompozit olarak yapılmıştır. Buna göre üç türün de çalışıldığı ve yıllara göre artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Türkiye'de yakıt hücresi konusundaki yayınlar değerlendirildiğinde çok sayıda üniversitenin bu alanda çalışma yaptığı görülmektedir (Şekil 20).



Şekil 19: Yakıt Hücresi (a) Bipolar Plaka (b) Modül Bileşenlerinin Yıllara Göre Analizi



Şekil 20: Yakıt Hücresi Konusunda Türkiye’de Yapılan Yayınların Dağılımı

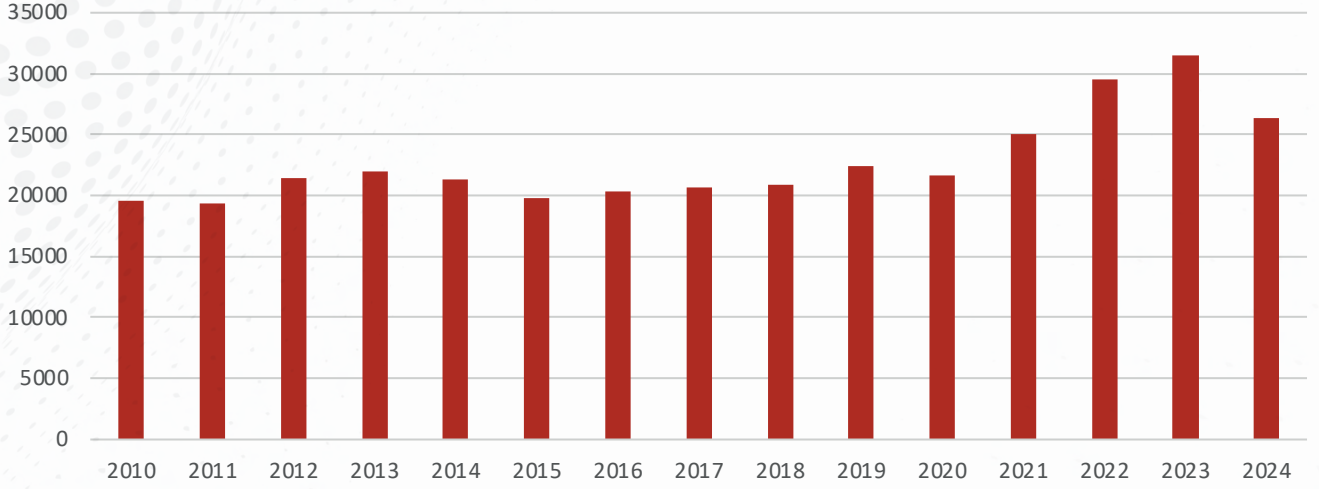
7.4.2 Patent Analizi

Yakıt Hücresi uygulamalarına yönelik trendlerin analiz yöntemlerinden bir tanesi de yapılan patent başvurularının incelenmesidir. Bu bağlamda, Yakıt Hücresi başlığı için “Espacenet” ve “WIPO” veritabanları kullanılarak analiz yapılmıştır. Patent veri tabanı analizi kapsamında; ilgili sınıflar tespit edilmiş ve sınıflandırmaları yapılmıştır. Arama sonuçları patentlerin ülkelere göre dağılımı, patentlerin yayımlanma tarihleri durumlarına göre yorumlanmıştır. Analiz kapsamında Yakıt Hücresi olarak geniş yelpazede tarama yapılmıştır.

7.4.2.1 Yakıt Hücresi Yığın Sistemi Patent Analizi

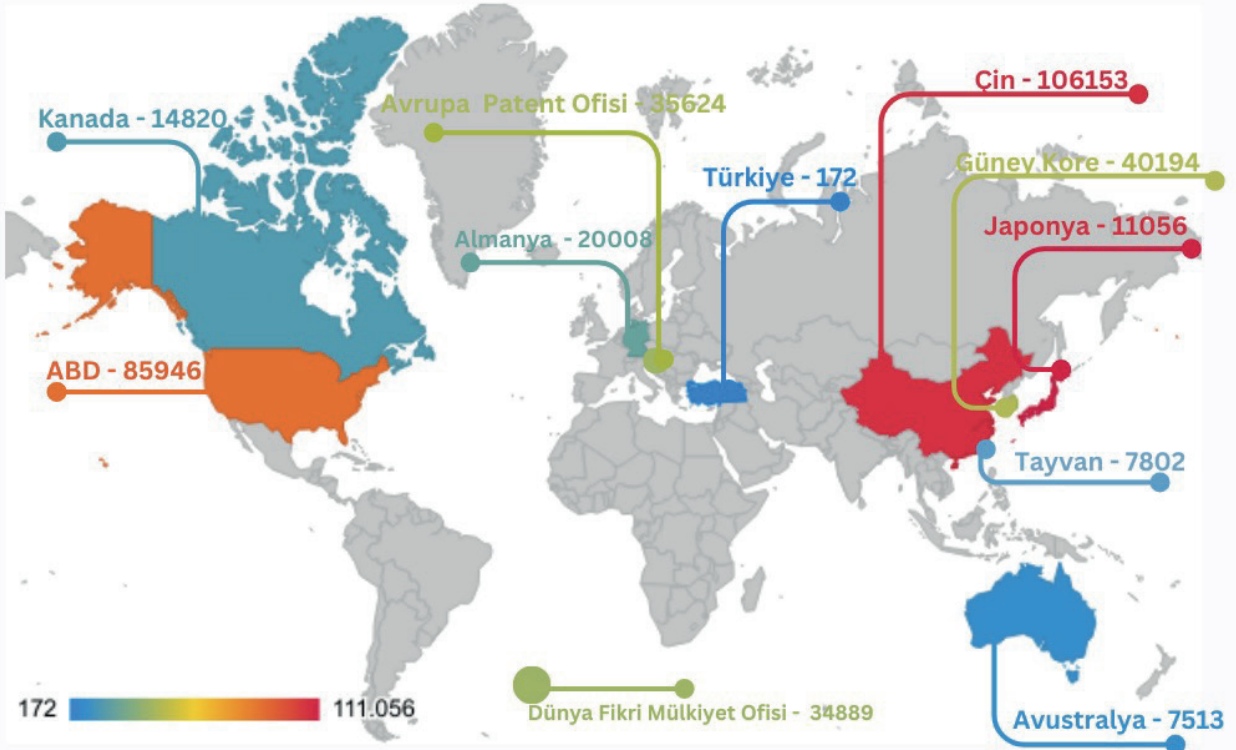
Çalışma kapsamında 2010-2024 yılları arasında “Yakıt Hücresi Yığın Sistemi” konulu patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2023 yılında Yakıt Hücresi Yığın Sistemi için yapılan patent başvurusu sayısının 31.453 başvuru ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Başvuru sayısının yıllar içerisinde artan şekilde değişken bir ivme ile devam ettiği Şekil 21’de gözlemlenmektedir.

YAKIT HÜCRESİ YIĞIN SİSTEMİ - YIL



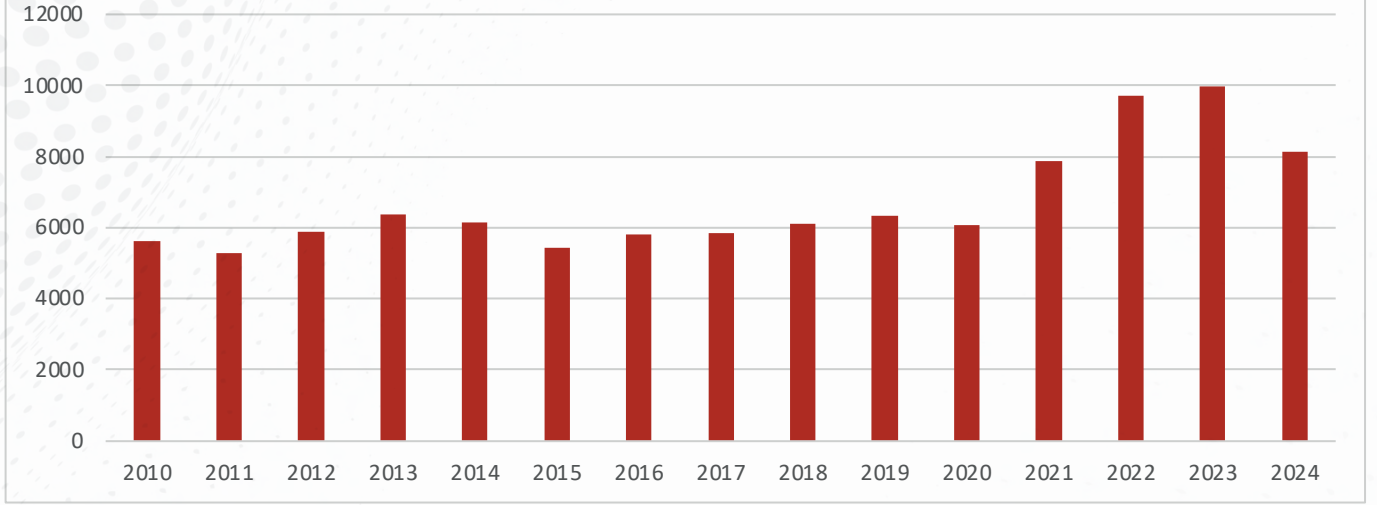
Şekil 21: Yakıt Hücresi Yığın Sistemine Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Yakıt Hücresi Yığın Sistemi konusundaki patent çalışmalarına bakıldığında Asya'daki ülkelerinin bu konudaki önderliği sürerken ikinci sırada ABD'deki patent sayısı dikkat çekmektedir. Avrupa'da Almanya özelinde en çok sayıda patent bulunmaktadır. Türkiye'nin ise 172 adet patenti bulunmaktadır. 35.624 adet patent Avrupa Patent Ofisine kayıtlıyken 34.889 adet patent Dünya Fikri Mülkiyet Ofisi'ne kayıtlıdır. Şekil 22'de ise Yakıt Hücresi Yığın Sistemi'nin Ülkelere Göre Dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 22: Yakıt Hücresi Yığın Sistemine Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı

YAKIT HÜCRESİ YIĞINI - YIL

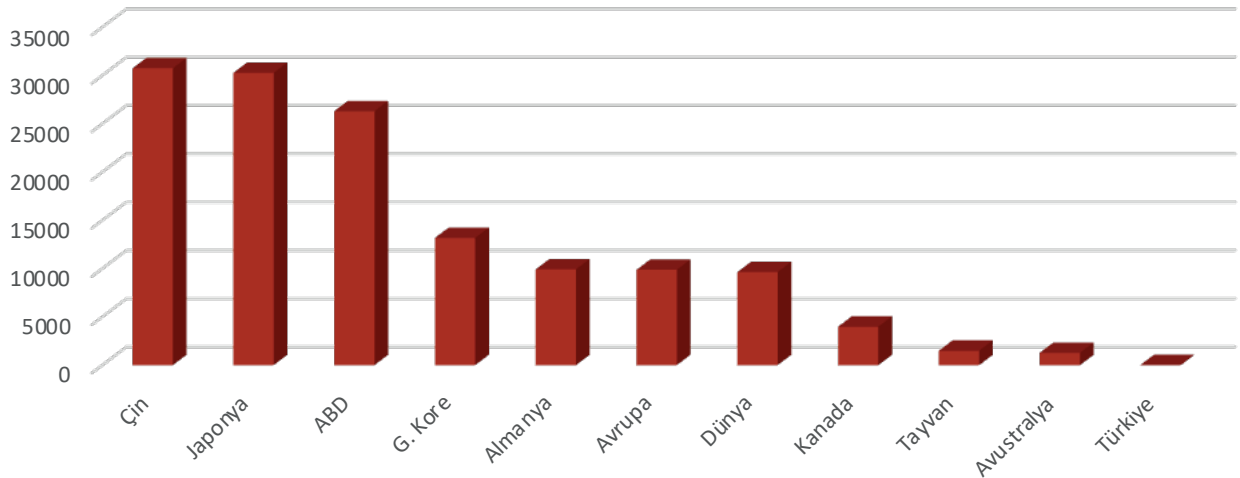


Şekil 23: Yakıt Hücresi Yığını Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Yakıt Hücresi Yığını konulu çalışmada 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2023 yılında Yakıt Hücresi Yığını için yapılan patent başvurusu sayısının 9.975 başvuru ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir.

Aşağıda Şekil 24'te ise Yakıt Hücresi Yığını Konu Başlığının Ükelere Göre Dağılımı gösterilmektedir.

YAKIT HÜCRESİ YIĞINI - ÜLKE

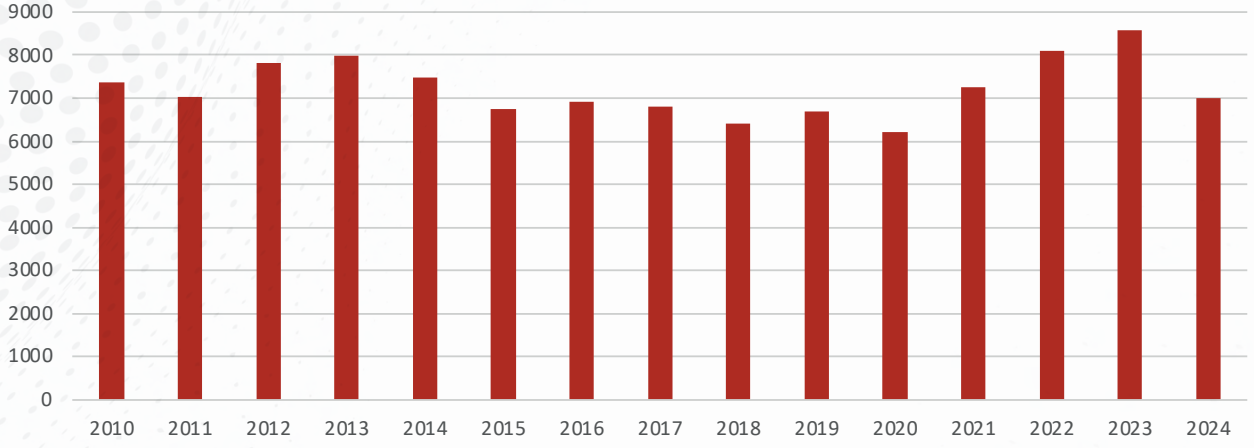


Şekil 24: Yakıt Hücresi Yığını Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Dağılımı

2010 - 2024 yılları arasına kadar olan patent başvuru sayısının 30.742 tanesi Çin menşelidir. İlgili alanda Çin'den sonra sırası ile Japonya ve ABD gelmektedir. Konu ile ilgili en çok başvuruya sahip 10 ülke/organizasyon sırasıyla Şekil 24'te gösterilmiştir. Türkiye'nin ilgili konuda 27 adet patent başvurusu bulunmaktadır.

Şekil 25'te "MEA" konu başlığının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. MEA konulu çalışmada 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2023 yılında MEA için yapılan patent başvurusu sayısının 8.568 başvuru ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Başvuru sayısının yıllar içerisinde artan/azalan şekilde değişken bir şekilde devam ettiği gözlemlenmektedir.

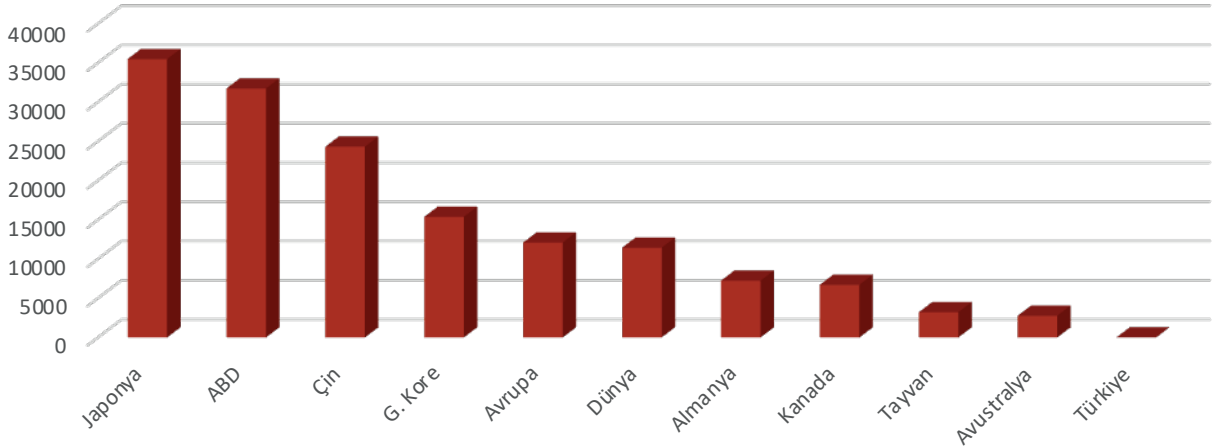
MEA - YIL



Şekil 25: MEA Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Şekil 26’da ise “MEA” konu başlığının ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010 – 2024 yılları arasında kadar olan patent başvuru sayısının 35.481 tanesi Japonya menşelidir. İlgili alanda Japonya’dan sonra sırası ile ABD ve Çin gelmektedir. Konu ile ilgili en çok başvuruya sahip 10 ülke/organizasyon sırasıyla gösterilmiştir. Türkiye’nin ise 25 adet patent başvurusu bulunmaktadır.

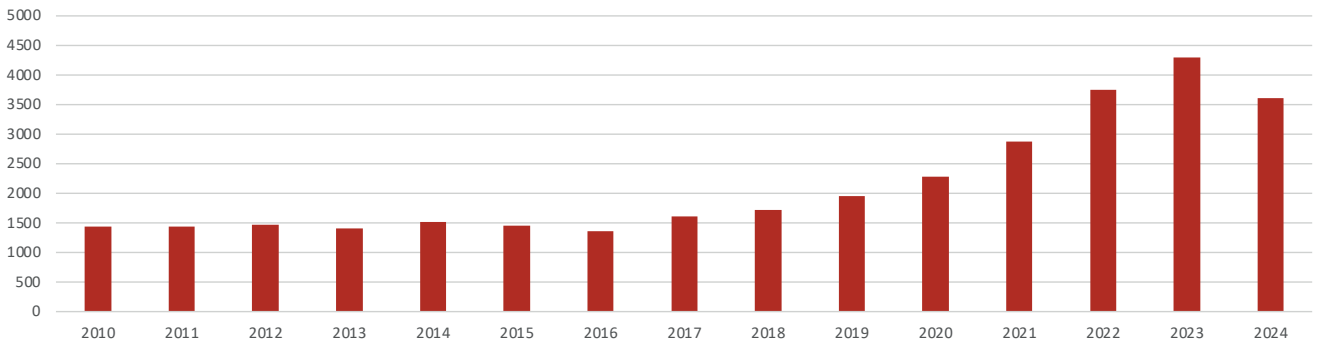
MEA - ÜLKE



Şekil 26: MEA Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ünelere Göre Dağılımı

Şekil 27’de “Bipolar Plaka” konu başlığının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde. 2023 yılında Bipolar Plaka için yapılan patent başvurusu sayısının 4.298 başvuru ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Başvuru sayısının yıllar içerisinde artış trendi gözlemlenmektedir.

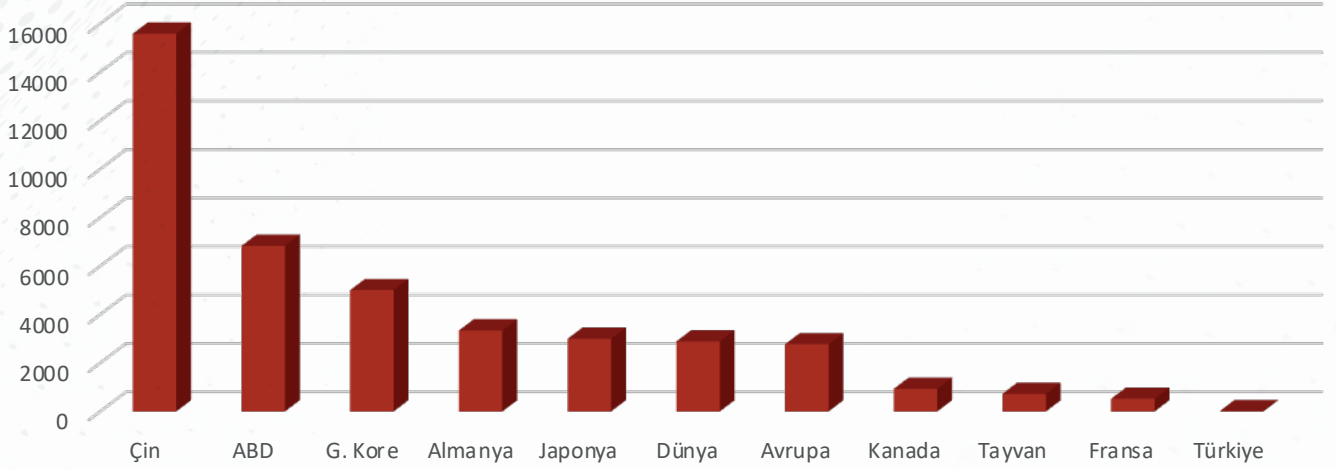
BİPOLAR PLAKA - YIL



Şekil 27: Bipolar Plaka Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Bipolar Plaka konu başlığının ülkelere göre dağılımı ise Şekil 28’de gösterilmektedir. 2010 – 2024 yılları arasında en fazla patent başvurusuna sahip ülke 15.586 adet başvuru ile Japonya’dır. İlgili alanda Japonya’dan sonra sırası ile ABD ve Kore Cumhuriyeti gelmektedir. Konu ile ilgili en çok başvuruya sahip 10 ülke/organizasyon sırasıyla Şekil 28’de gösterilmiştir. Türkiye’nin ise 17 adet patent başvurusu bulunmaktadır.

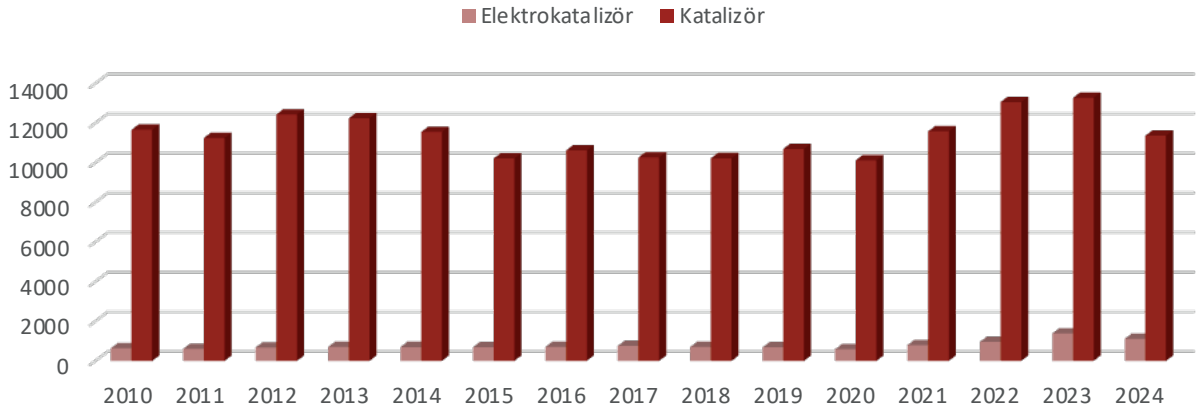
BİPOLAR PLAKA - ÜLKE



Şekil 28: Bipolar Plaka Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Dağılımı

Şekil 29’da “Katalizör ve Elektrokatalizör” konu başlıklarına yönelik patent çalışmalarının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde 2023 yılında Katalizör ve Elektrokatalizör konuları altında değerlendirilen patent başvurusu sayısının sırasıyla 13.278 ve 1.381 başvuru ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Başvuru sayısının yıllar içerisinde değişkenlik gösterdiği gözlemlenmektedir.

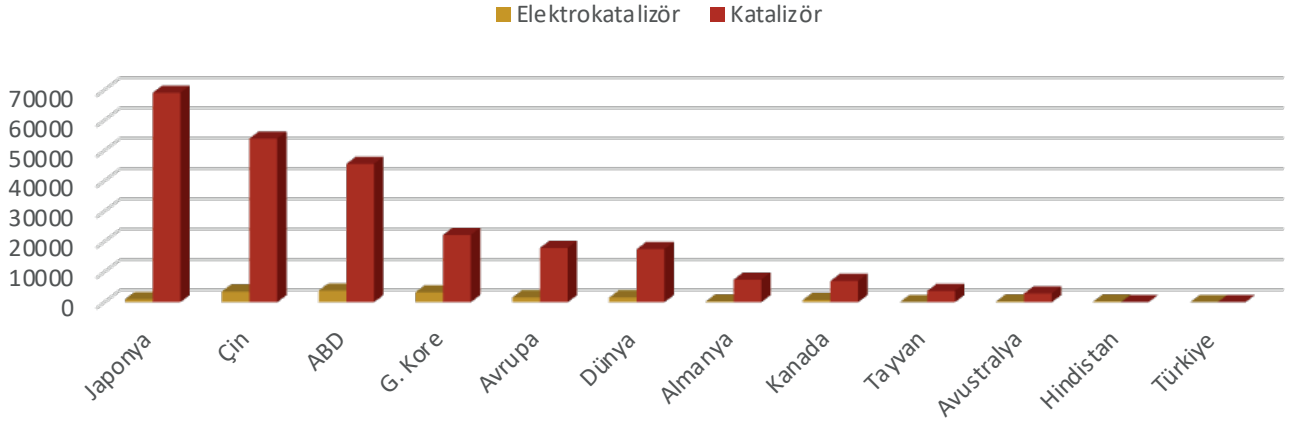
KATALİZÖRLER - YIL



Şekil 29: Katalizör ve Elektrokatalizör Konu Başlıklarına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Şekil 30'da ise "Katalizör ve Elektrokatalizör" konu başlıkları altında bulunan patent başvurularının ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010 - 2024 yılları arasında Katalizör başlığı altında bulunan patent başvuru sayısının 69.077 tanesi Japonya menşelidir. İlgili alanda Japonya'dan sonra sırası ile Çin ve ABD gelmektedir. Elektrokatalizör konusunda ise liderlik 3.855 adet patent başvurusu ile ABD'ye aittir. ABD'yi ilgili alanda sırasıyla 3.561 patent başvurusu ile Çin ve 3.304 patent başvurusuyla Güney Kore takip etmektedir. Türkiye'nin "Katalizör" konusu altında 75 adet patent başvurusu bulunurken "Elektrokatalizör" konusu altında 10 adet patent başvurusu bulunmaktadır.

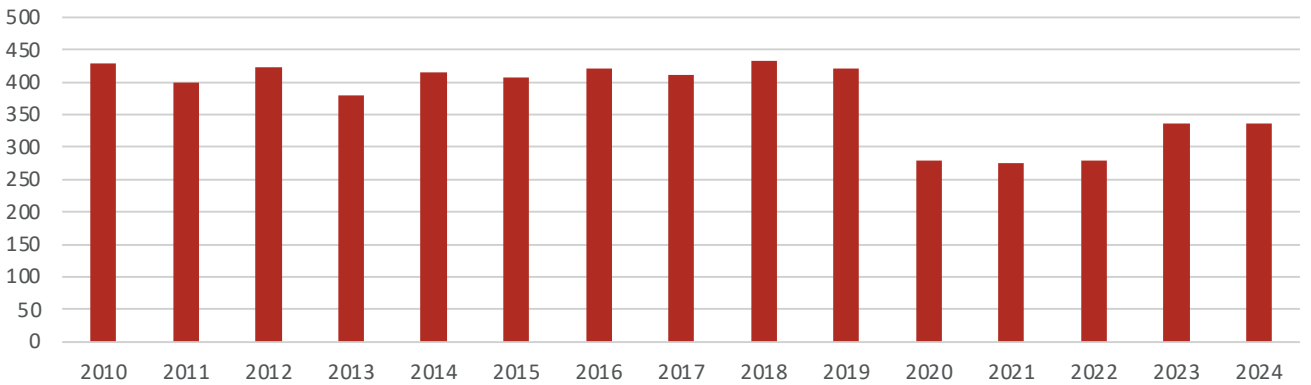
KATALİZÖRLER- ÜLKE



Şekil 30: Katalizör Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Şekil 31'de "Hücre Tasarımı" konu başlığının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. Hücre tasarımı konulu çalışmada 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2018 yılında Hücre Tasarımı için yapılan patent başvurusu sayısının 433 başvuru ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Başvuru sayısının yıllar içerisinde artan/azalan şekilde değişken bir ivme ile devam ettiği gözlemlenmektedir.

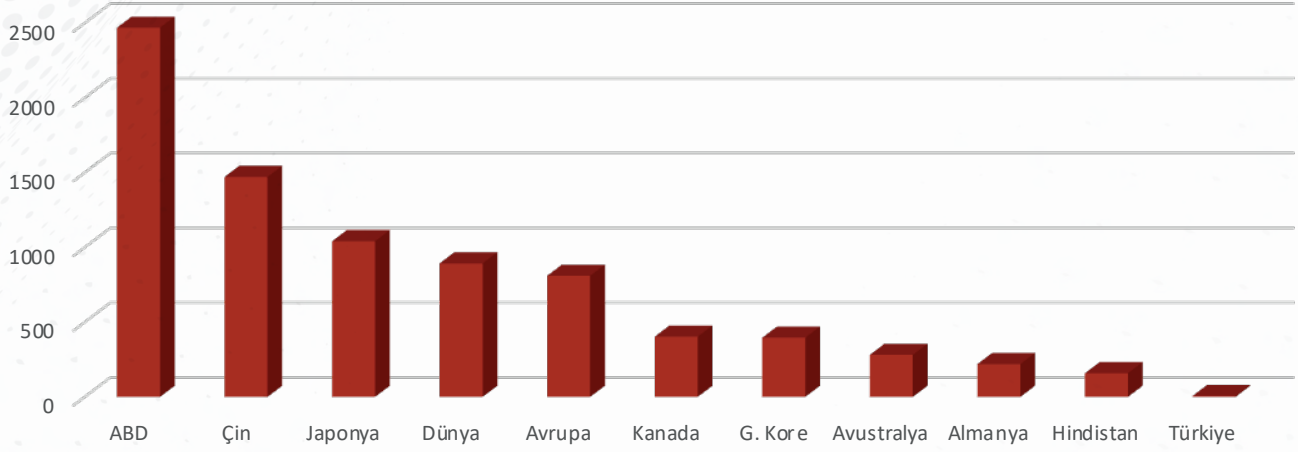
HÜCRE TASARIMI - YIL



Şekil 31: Hücre Tasarımı Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Şekil 32’de ise Hücre Tasarımı konu başlığının ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010 - 2024 yılları arasına kadar olan patent başvuru sayısının 2.469 tanesi ABD menşelidir. İlgili alanda ABD’den sonra sırası ile Çin ve Japonya gelmektedir. Türkiye’nin ise 6 adet patent başvurusu bulunmaktadır.

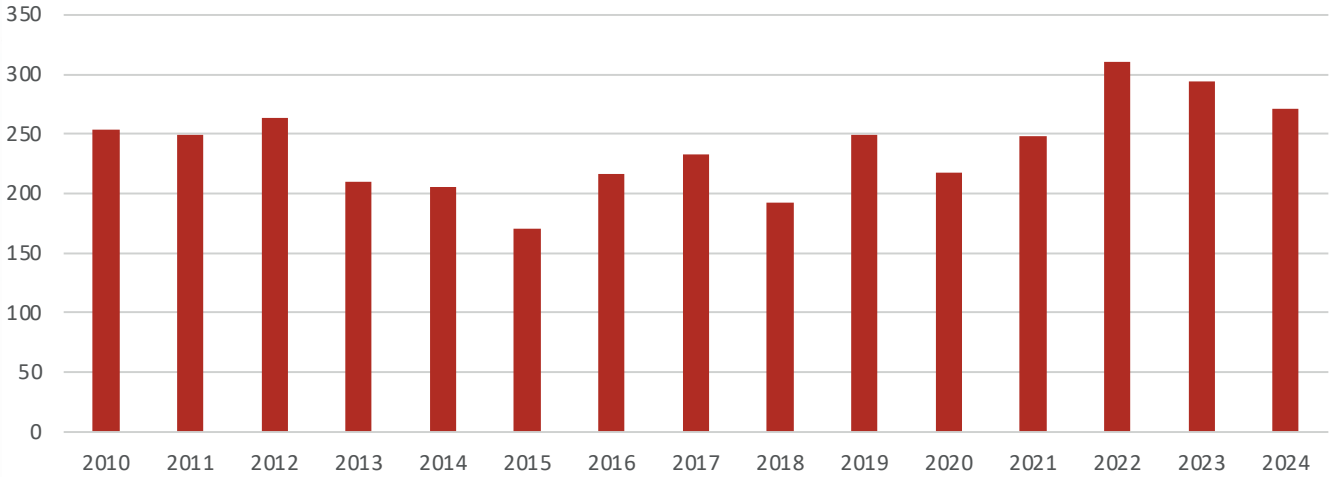
HÜCRE TASARIMI- ÜLKE



Şekil 32: Hücre Tasarımı Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Dağılımı

Şekil 33’te “Soğutma Plakası” konu başlığının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde 2022 yılında Soğutma Plakası için yapılan patent başvurusu sayısının 311 başvuru ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Başvuru sayısının yıllar içerisinde artan/azalan şekilde değişken bir ivme ile devam ettiği gözlemlenmektedir.

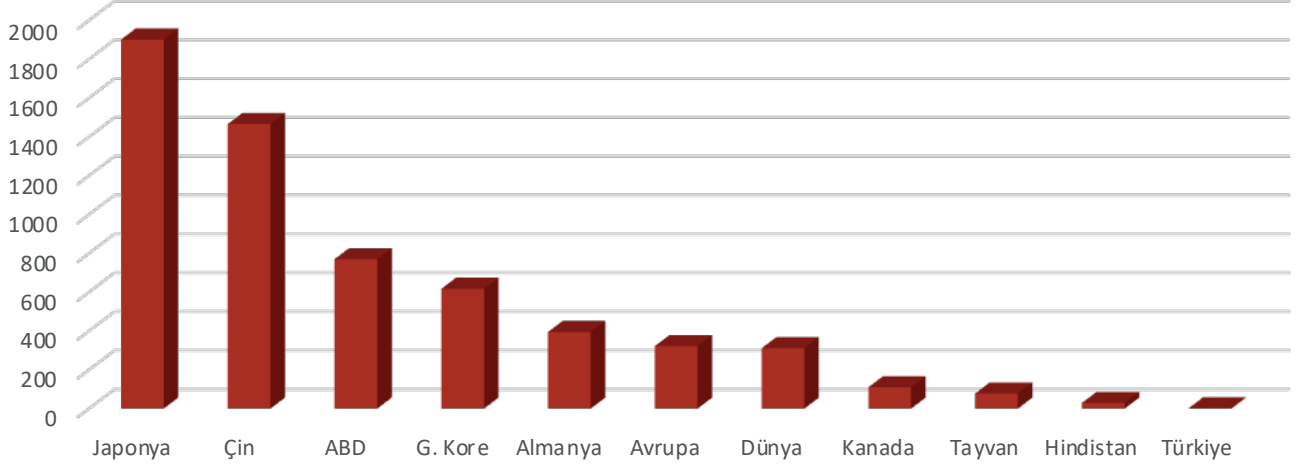
SOĞUTMA PLAKASI - YIL



Şekil 33: Soğutma Plakası Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Şekil 34'te ise "Soğutma Plakası" konu başlığının ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010 - 2024 yılları arasına kadar olan patent başvuru sayısının 1.901 tanesi Japonya menşelidir. İlgili alanda Japonya'dan sonra sırası ile Çin ve ABD gelmektedir. Türkiye'nin ise 2 adet patent başvurusu bulunmaktadır.

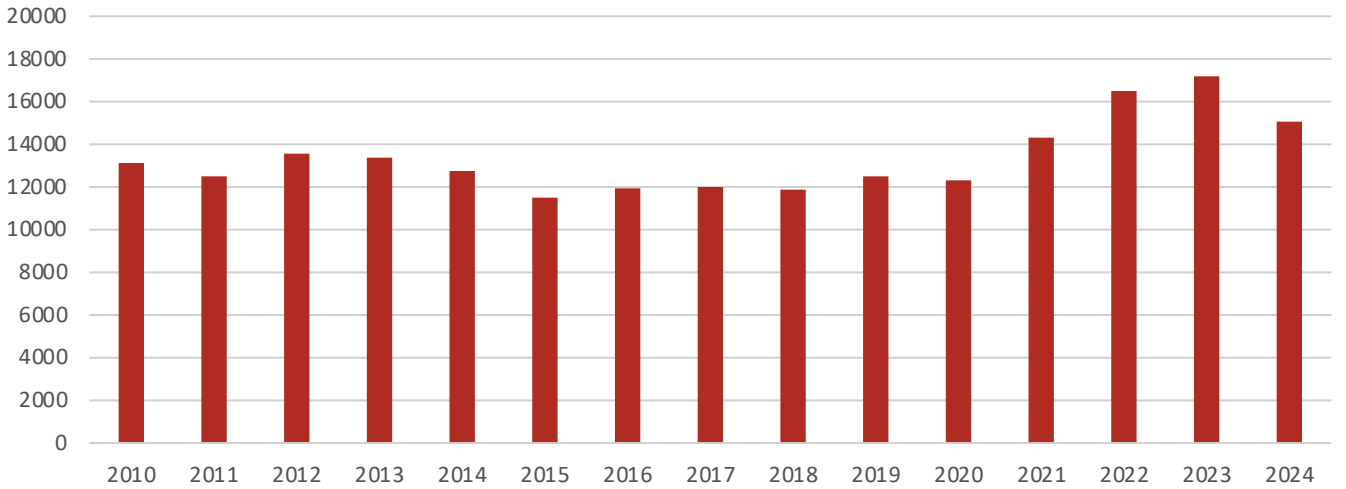
SOĞUTMA PLAKASI - ÜLKE



Şekil 34: Soğutma Plakası Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Dağılımı

Şekil 35'te "Membran" konu başlığının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. Membran konulu çalışmada 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2010 yılında 13.137 adet patent başvurusu yapılmış iken 2024 yılına gelindiğinde 15.060 adet başvurusu olduğu görülmektedir. Türkiye'nin soğutma plakası ile ilgili herhangi bir patent başvurusu yoktur.

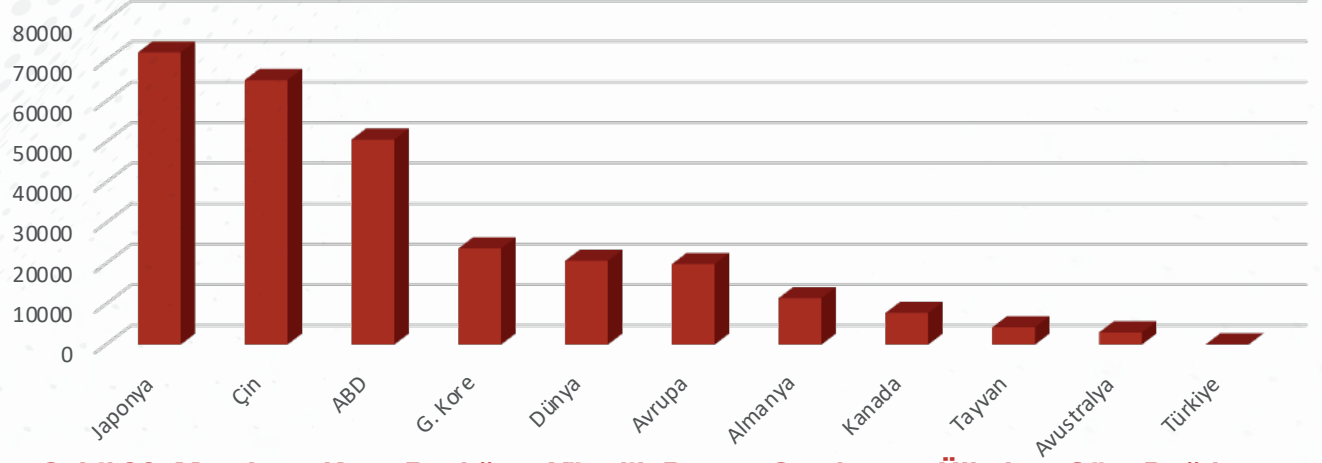
MEMBRAN - YIL



Şekil 35: Membran Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Şekil 36'da Membran Konu Başlığının Ükelere Göre Dağılımı gösterilmektedir. 2010 - 2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayısının 72.078 tanesi Japonya menşelidir. İlgili alanda Japonya'dan sonra sırası ile Çin ve ABD gelmektedir. Türkiye'nin ise 107 adet patent başvurusu bulunmaktadır.

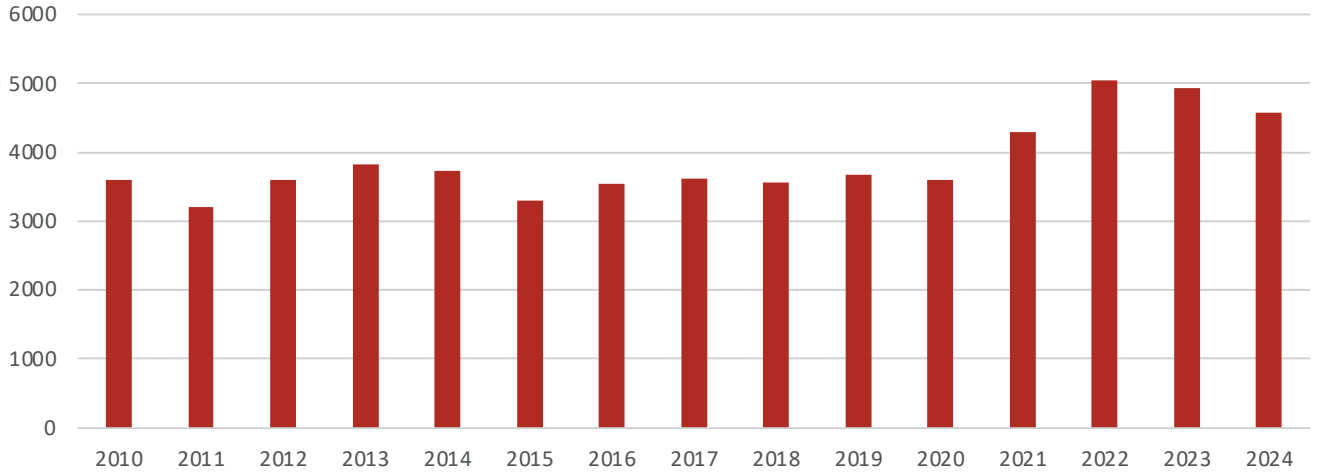
MEMBRAN - ÜLKE



Şekil 36: Membran Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Dağılımı

Şekil 37'de "Gaz Difüzyon Tabakası (GDL)" konu başlığının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde 2010 yılında 3.599 adet patent başvurusu yapılmış iken 2024 yılına gelindiğinde 4.570 adet başvurusu olduğu görülmektedir.

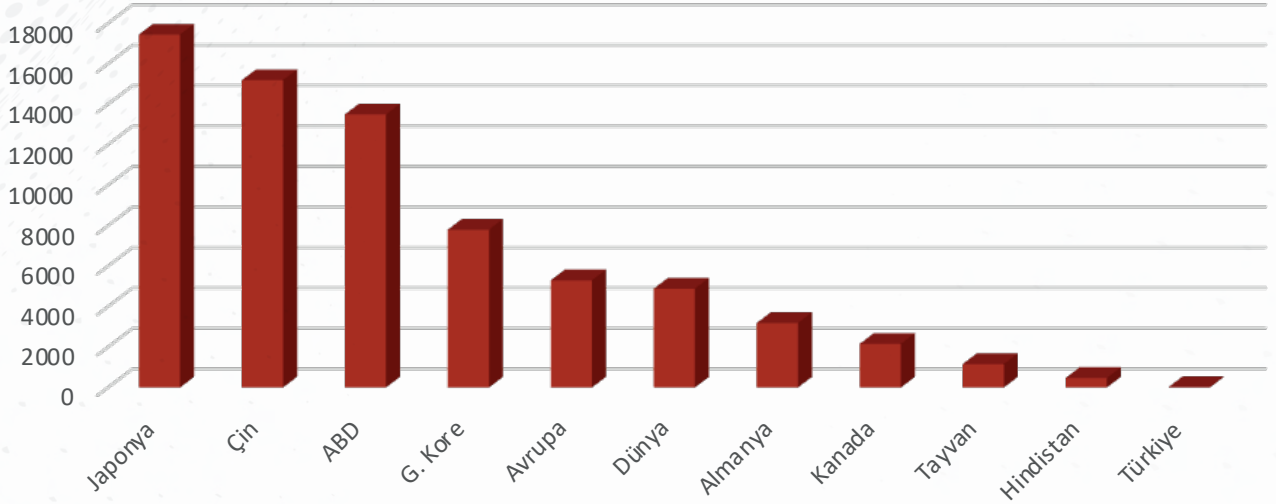
GDL - YIL



Şekil 37: GDL Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Şekil 38’de ise “Gaz Difüzyon Katmanı (GDL)” konu başlığının ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010 – 2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayısının 17.445 tanesi Japonya menşelidir. İlgili alanda Japonya’dan sonra sırası ile Çin ve ABD gelmektedir. Türkiye’nin ise 23 adet patent başvurusu bulunmaktadır.

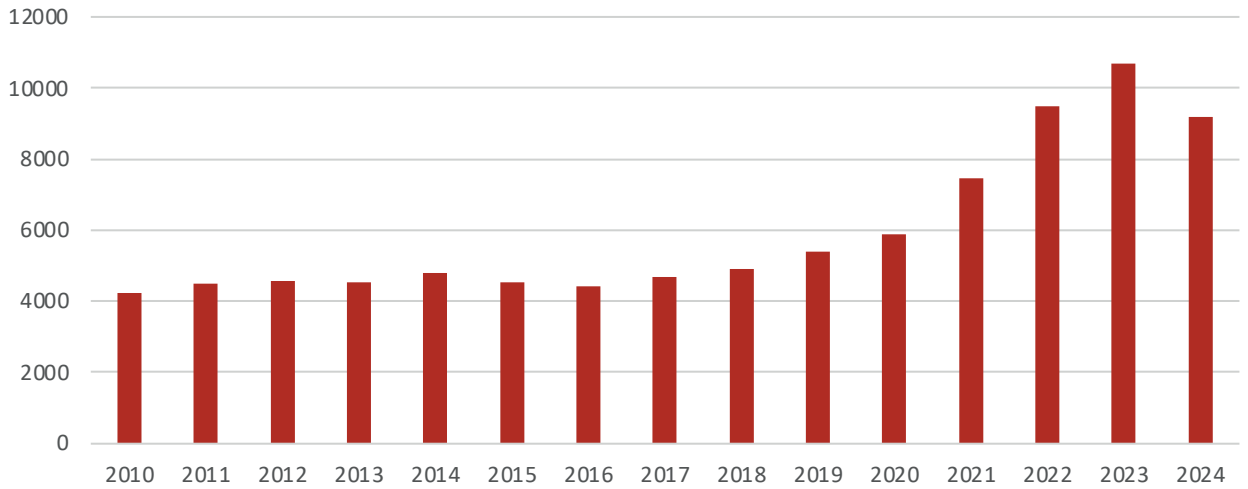
GDL - ÜLKE



Şekil 38: GDL Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ünelere Göre Dağılımı

Şekil 39’da “PEM” konu başlığının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde 2010 yılında 4.241 adet patent başvurusu yapılmış iken 2024 yılına gelindiğinde 9.165 adet başvurusu olduğu görülmektedir.

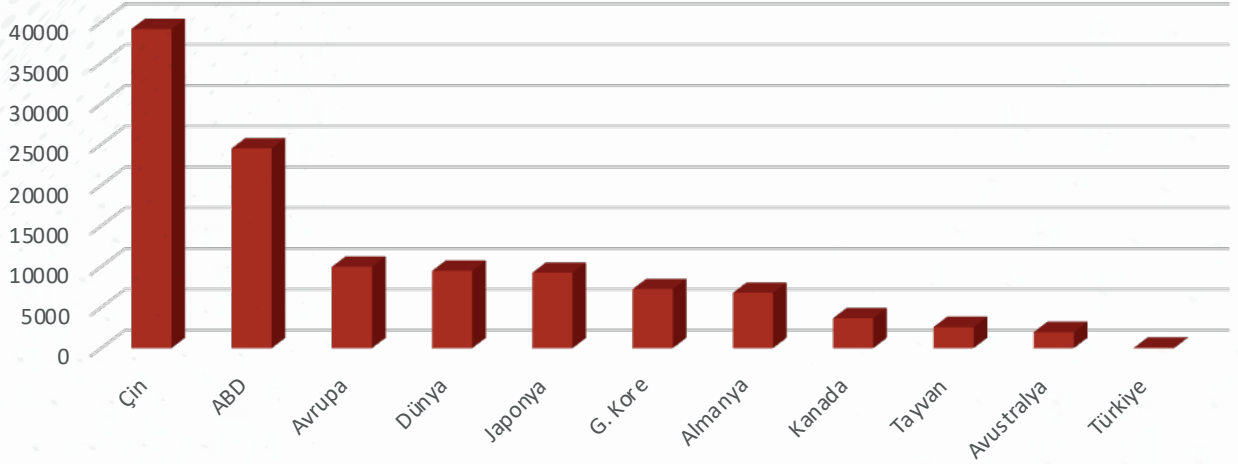
PEM - YIL



Şekil 39: PEM Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Şekil 40'ta ise "PEM" konu başlığının ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010 - 2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayısının 39.150 tanesi Çin menşelidir. İlgili alanda Çin'den sonra sırası ile ABD ve Avrupa gelmektedir. Türkiye'nin ise 59 adet patent başvurusu bulunmaktadır.

PEM - ÜLKE

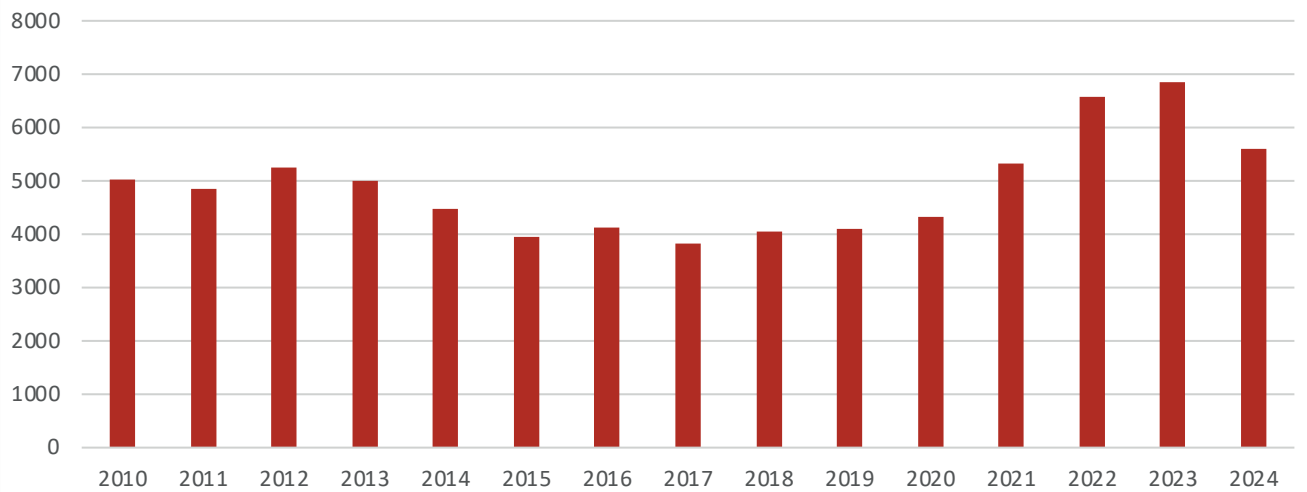


Şekil 40: PEM Konu Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Dağılımı

7.4.2.2 Depolama ve Besleme Sistemi Patent Analizi

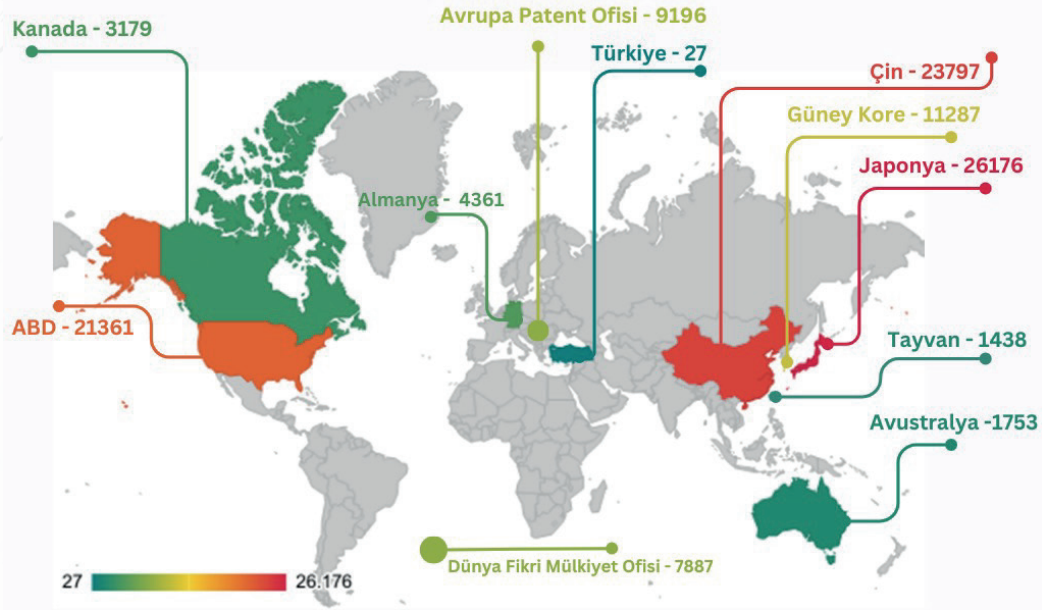
Aşağıda yer alan Şekil 41'de Depolama ve Besleme Sistemi'nin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. Depolama ve Besleme Sistemi konulu çalışmada 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2019 yılından itibaren bu konuda patent başvurularının arttığı söylenebilmektedir. En çok başvurunun 2023 yılında yapıldığı görülmektedir.

DEPOLAMA VE BESLEME SİSTEMİ - YIL



Şekil 41: Depolama ve Besleme Sistemine Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

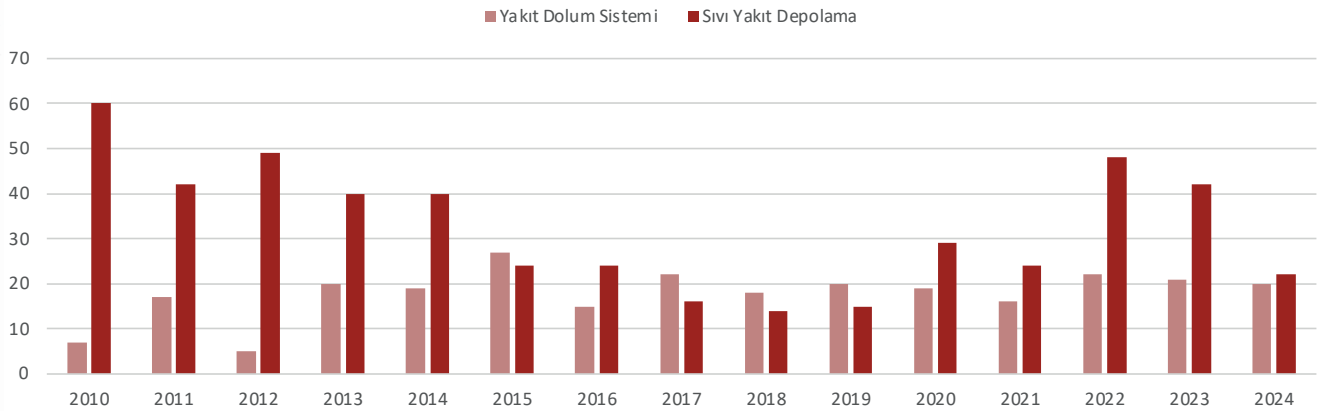
Aşağıda yer alan Şekil 42’de ise Depolama ve Besleme Sistemi’nin ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. Depolama ve Besleme Sistemleri konusundaki patent çalışmalarına bakıldığında Pasifik Kıyısı ülkelerinin bu konudaki önderliği sürerken Almanya’nın da konuyla ilgili çalışmaları bulunduğu görülmektedir. Patent başvurularının 9.196 adedi Avrupa Patent Ofisi’ne kayıtlıken 7.887 adedi Dünya Fikri Mülkiyet Ofisi’ne kayıtlıdır. Türkiye’nin konu ile ilgili 27 adet patent çalışması bulunmaktadır.



Şekil 42: Depolama ve Besleme Sisteminin Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Dağılımı

Aşağıda yer alan Şekil 43’te ‘Yakıt Dolum Sistemi ve Sıvı Yakıt Depolama’ konu başlıkları altında değerlendirilen patentlerin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde son on beş yılda Yakıt Dolum Sistemi konusunda en yüksek patent başvurusunun 27 başvuru ile 2015 yılında yapıldığı görülürken Sıvı Yakıt Depolama konusundaki en yüksek başvuru 60 başvuru ile 2010 yılında yapılmıştır. Konular üzerindeki çalışmalar 2010-2024 yılları arasında artan/azalan bir davranış sergilemektedir.

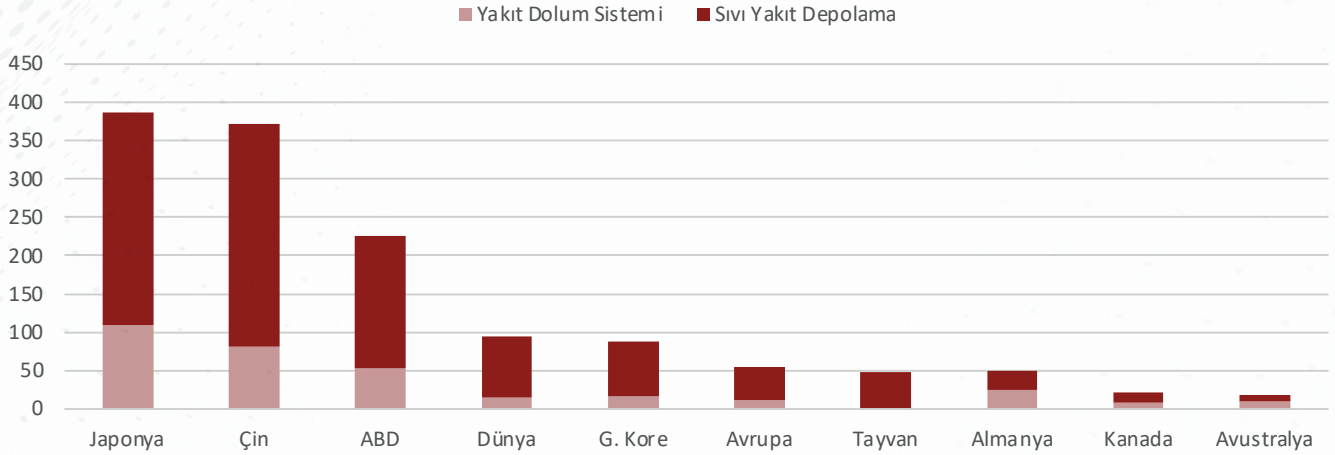
DOLUM VE DEPOLAMA - YIL



Şekil 43: Yakıt Dolum Sistemi ve Sıvı Yakıt Depolama Başlıklarına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Aşağıda yer alan Şekil 44'te ise "Yakıt Dolum Sistemi ve Sıvı Yakıt Depolama" konu başlıkları altında değerlendirilen patentlerin ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. Patent başvurularının ülkelere göre dağılımı incelendiğinde Japonya'nın iki konu alanında da liderliği gözlenmektedir. Japonya'yı sırasıyla Çin ve ABD takip ederken, Türkiye'de ise bu konu başlığı ile patenti bulunmamaktadır.

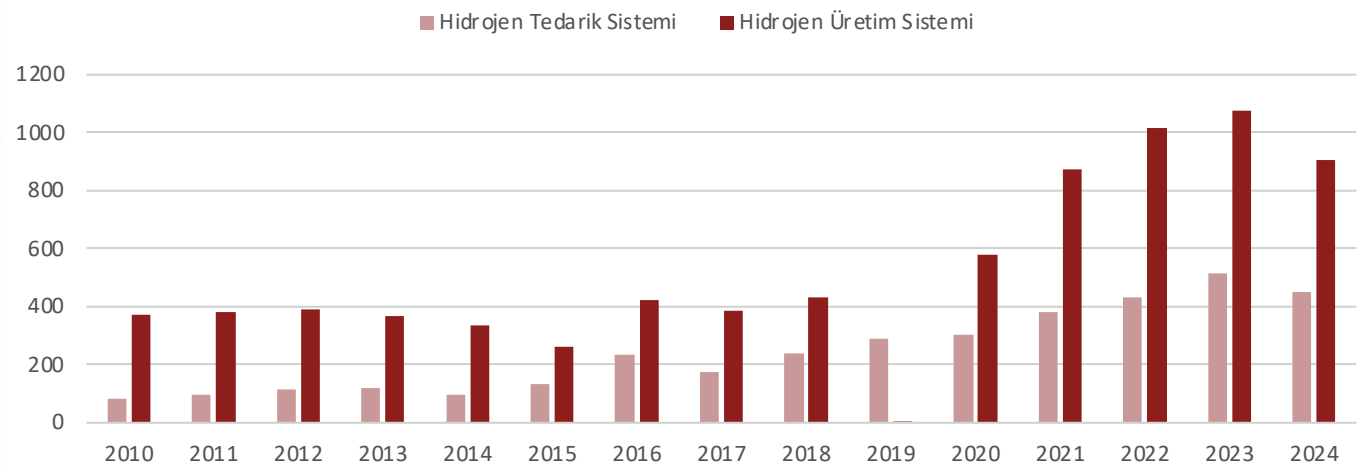
DOLUM VE DEPOLAMA - ÜLKE



Şekil 44: Yakıt Dolum Sistemi ve Sıvı Yakıt Depolama Konu Başlıklarına Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Dağılımı

Aşağıda yer alan Şekil 45'te 'Hidrojen Üretim Sistemi' ve 'Hidrojen Tedarik Sistemi' başlıkları altında değerlendirilen patentlerin patent başvurularının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde son on beş yılda Hidrojen Üretim Sistemi ve Hidrojen Tedarik Sistemi konularında en yüksek patent başvurusunun sırasıyla 515 ve 1073 başvuru ile 2023 yılında yapıldığı görülmektedir. Konular üzerindeki çalışmalar 2010-2024 yılları arasında artan bir davranış sergilemektedir.

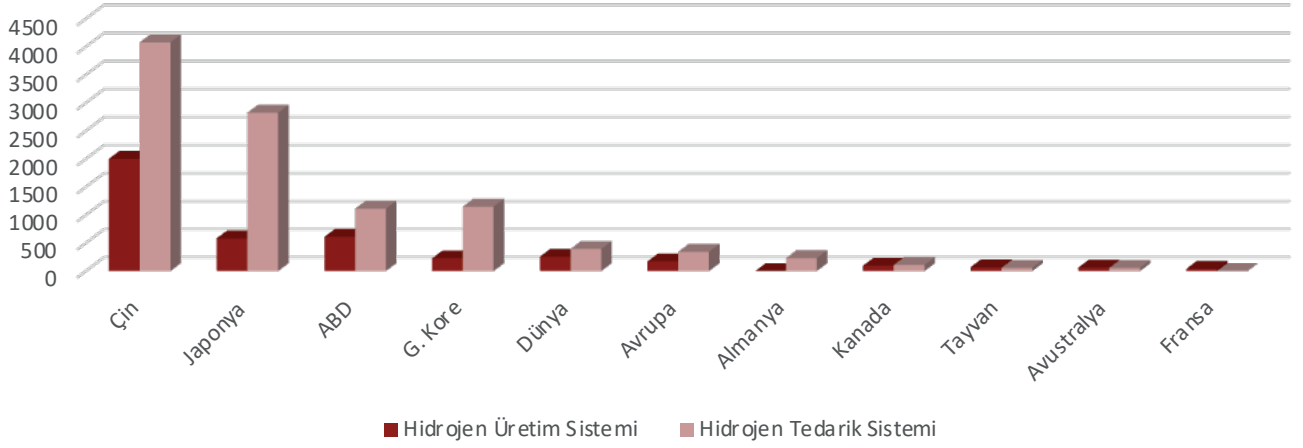
HİDROJEN DOLUM VE DEPOLAMA SİSTEMLERİ - YIL



Şekil 45: Hidrojen Üretim Sistemi ve Hidrojen Tedarik Sistemi Başlıklarına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Aşağıda yer alan Şekil 46'da "Hidrojen Üretim Sistemi" ve "Hidrojen Tedarik Sistemi" başlıkları altında değerlendirilen patentlerin ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. Patent başvurularının ülkelere göre dağılımı incelendiğinde Çin'in iki konu alanında da liderliği gözlenmektedir. Hidrojen Üretim Sistemi konu başlığı altında değerlendirilen patent başvurularında Çin'i sırasıyla ABD ve Japonya takip ederken Hidrojen Tedarik Sistemi konusu altında değerlendirilen patent başvurularında sırasıyla Japonya ve Güney Kore takip etmektedir. Türkiye'nin ise bu sıralamada yer alamadığı görülmektedir.

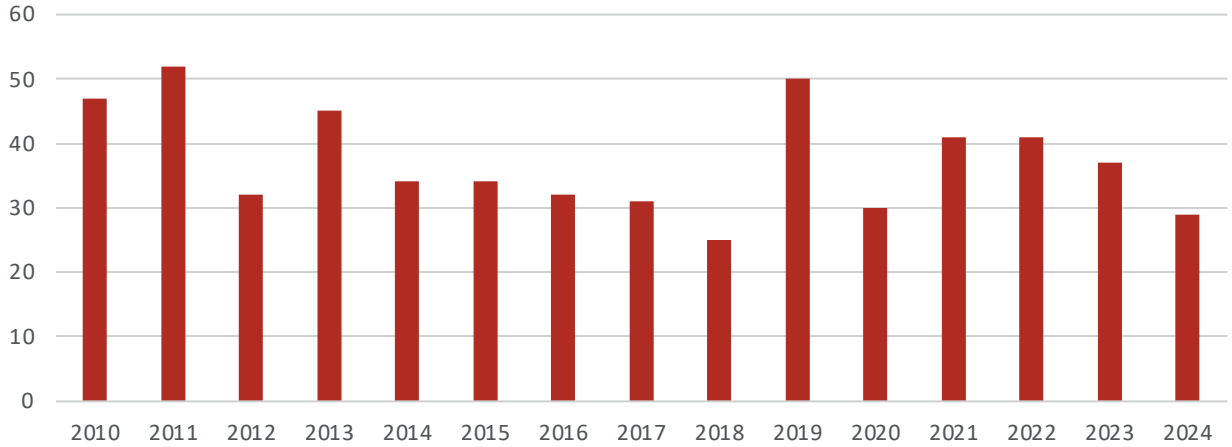
HİDROJEN DOLUM VE DEPOLAMA SİSTEMLERİ - ÜLKE



Şekil 46: Hidrojen Üretim Sistemi ve Hidrojen Tedarik Sistemi Başlıklarına Yönelik Patent Sayılarının Ünelere Göre Dağılımı

Aşağıda yer alan Şekil 47'de "Metal Hidrür Tank" konu başlığı özelinde yapılan patent başvurularının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. "Metal Hidrür Tank" konulu çalışmada 2010-2024 yılları arasında yapılan en yüksek patent başvurusunun 52 başvuru ile 2011 yılında olduğu, 2012 yılından 2024 yılına kadar ise yapılan paten başvurularının ise yılda 50 başvuruyu geçemediği görülmektedir.

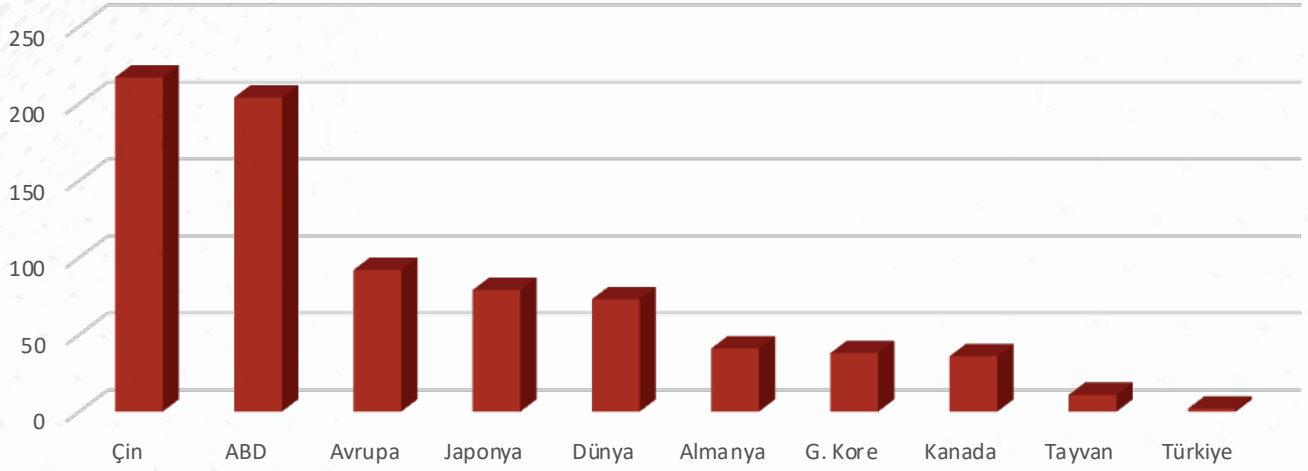
METAL HİDRÜR TANK - YIL



Şekil 47: Metal Hidrür Tank Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Aşağıda yer alan Şekil 48’de “Metal Hidrür Tank” konu başlığı özelinde yapılan patent başvurularının ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. Patent başvurularının ülkelere göre dağılımı incelendiğinde en yüksek başvuruya sahip ülkenin Çin olduğu, daha sonra sırasıyla ABD ve Avrupa olduğu görülmektedir. Türkiye’nin ise ilgili konuda 2 başvurusu bulunmaktadır.

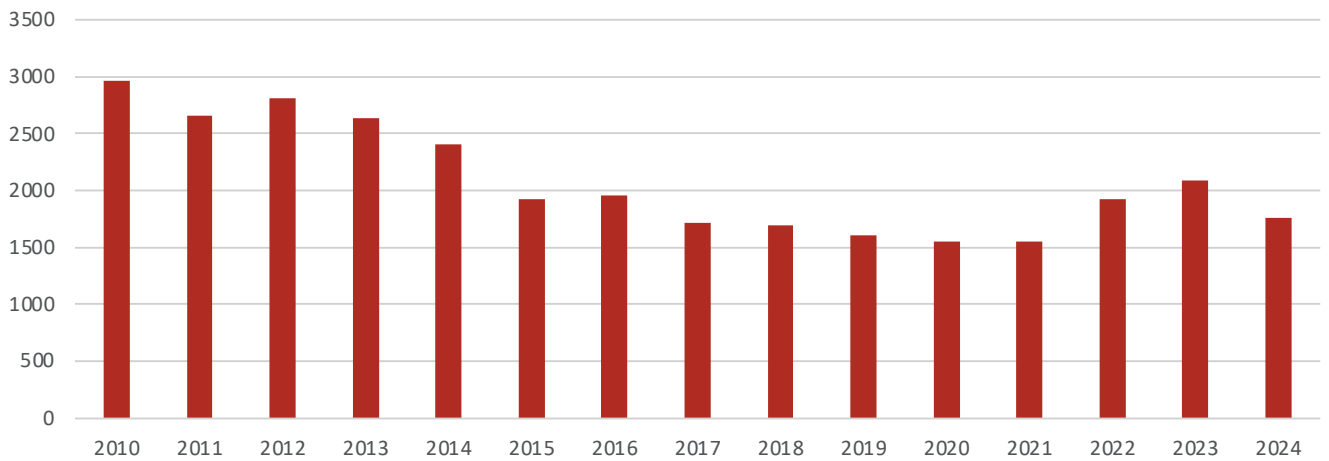
METAL HİDRÜR TANK - ÜLKE



Şekil 48: Metal Hidrür Tank Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Dağılımı

Aşağıda yer alan Şekil 49’da “Reformer” konu başlığı özelinde yapılan patent başvurularının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. “Reformer” konulu çalışmada 2010-2024 yılları arasında yapılan en yüksek patent başvurusunun 2.961 başvuru ile 2010 yılında yapıldığı, 2010-2024 yılları arasında ise yıllık başvuru sayısının ortalama 2.000 başvuru olduğu görülmektedir.

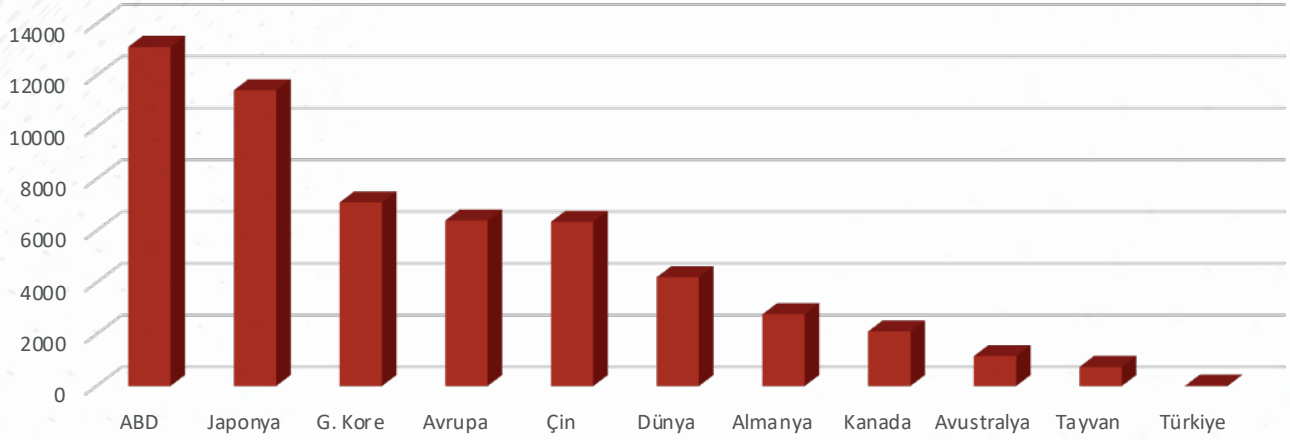
REFORMER - YIL



Şekil 49: Reformer Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Aşağıda yer alan Şekil 50’de “Reformer” konu başlığı özelinde yapılan patent başvurularının ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. Patent başvurularının ülkelere göre dağılımı incelendiğinde ise en yüksek başvuruya sahip ülkenin 13.103 başvuru ile ABD olduğu, daha sonra sırasıyla 11.433 başvuru ile Japonya ve 7.094 başvuru ile Güney Kore olduğu görülmektedir. Türkiye’nin ise ilgili alanda 15 başvurusu bulunmaktadır.

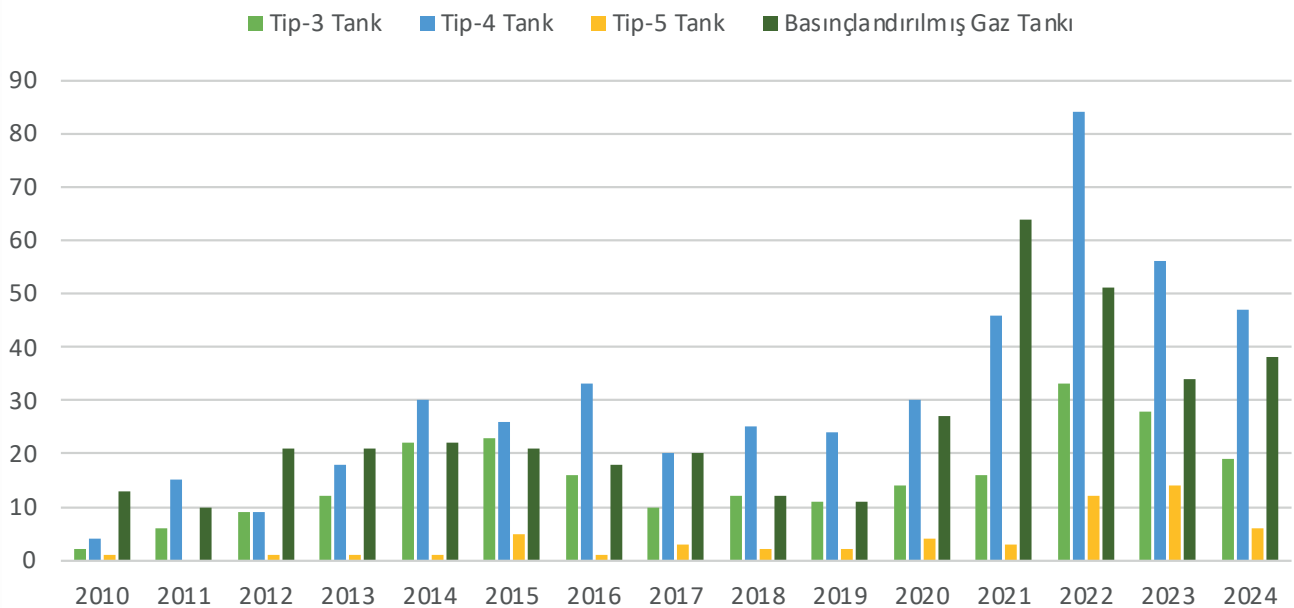
REFORMER - ÜLKE



Şekil 50: Reformer Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ünelere Göre Dağılımı

Aşağıda Şekil 51’de “Basınçlı Gaz Tankları” konusu altında bulunan Tip-3, Tip-4, Tip-5 ve Basınçlı Gaz Tankları başlıkları kapsamında yapılan patent başvurularının yıllara göre dağılımı gözükmeektedir. 2010 yılında Tip-3 Tankı konusunda 2; Tip-4 Tankı konusunda 4 ve Tip-5 Tankı konusunda 1; Basınçlandırılmış Gaz Tankı konusunda 13 adet patent çalışması bulunmaktadır. 2010-2024 yılları arasında artan patent çalışmaları 2022 yılında tavan yapmıştır. 2024 yılında ise Tip-3 Tankı, Tip-4 tankı, Tip-5 tankı ve Basınçlandırılmış Gaz Tankı konuları için sırasıyla 19, 47, 6 ve 38 patent çalışması mevcuttur. Bu kapsamda en çok Tip-4 tankla ilgili çalışma yapıldığı anlaşılmaktadır.

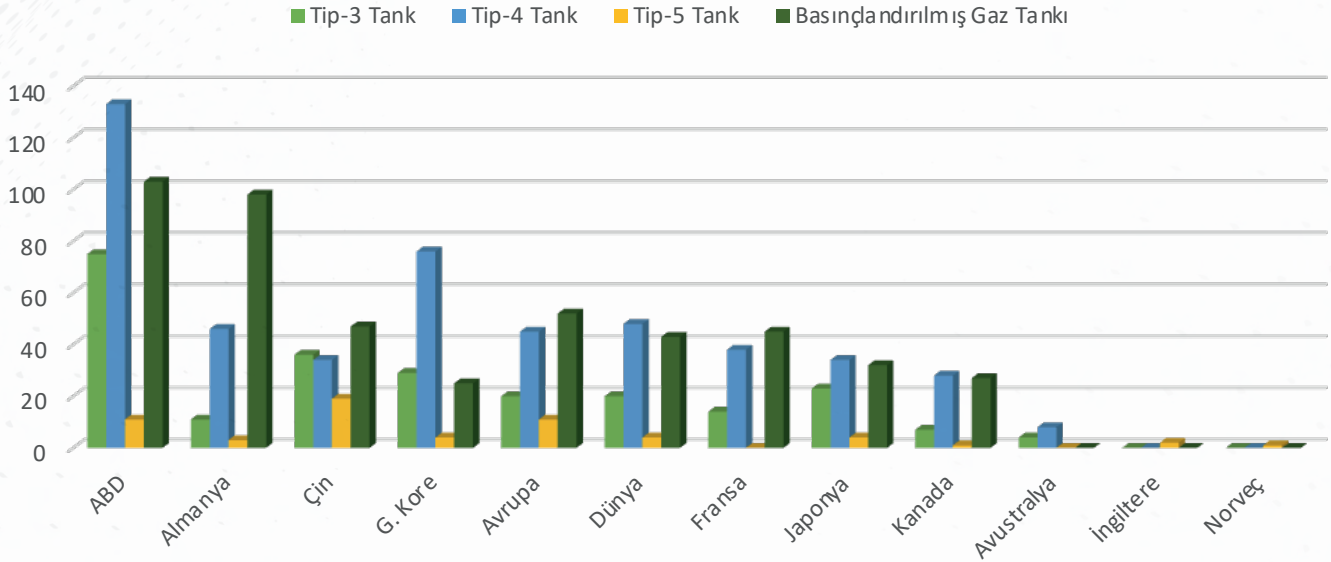
BASINÇLI GAZ TANKLARI - YIL



Şekil 51: Basınçlı Gaz Tankları Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Aşağıda Şekil 52’de Tip-3, Tip-4, Tip-5 ve Basınçlı Gaz Tankları başlıkları kapsamında değerlendirilen patent başvurularının ülkelere göre dağılımı görülmektedir. Bahsi söz konusu olan başlıklarda Pasifik Kıyı ülkelerinin dominantlığı söz konusu grafikten anlaşılabılır. Tip-3 Tankı , Tip-4 Tankı ve Basınçlandırılmış Gaz Tankı konusundaki patentlerde Amerika Birleşik Devletlerinin öncülük yaptığı görülürken; Tip-5 Tank konusundaki patentlerde liderlik Çin’e aittir.

BASINÇLI GAZ TANKLARI - ÜLKE

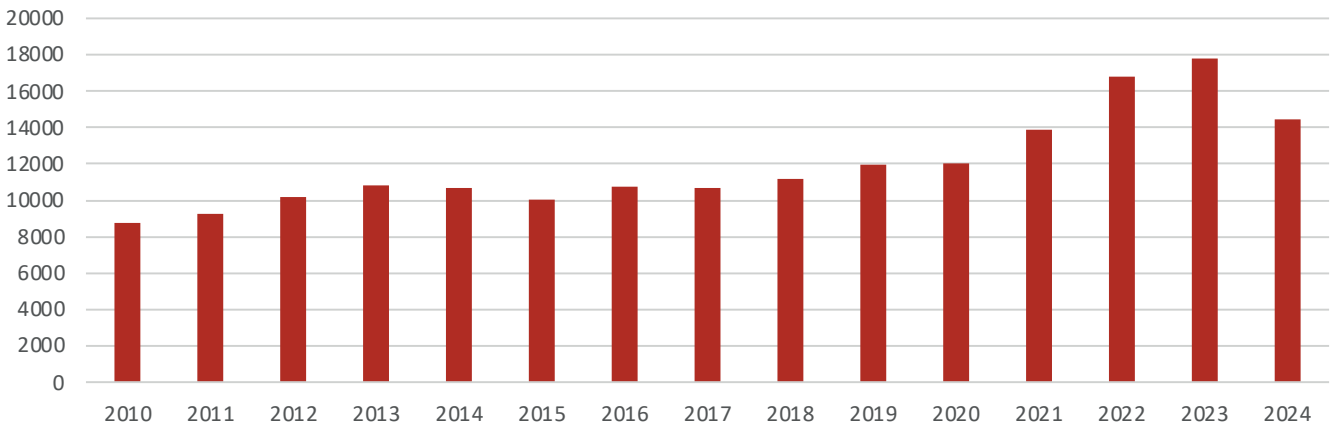


Şekil 52: Basınçlı Gaz Tankları Başlığına Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Dağılımı

7.4.2.3 Yakıt Hücresi Yardımcı Elemanlar Patent Analizi

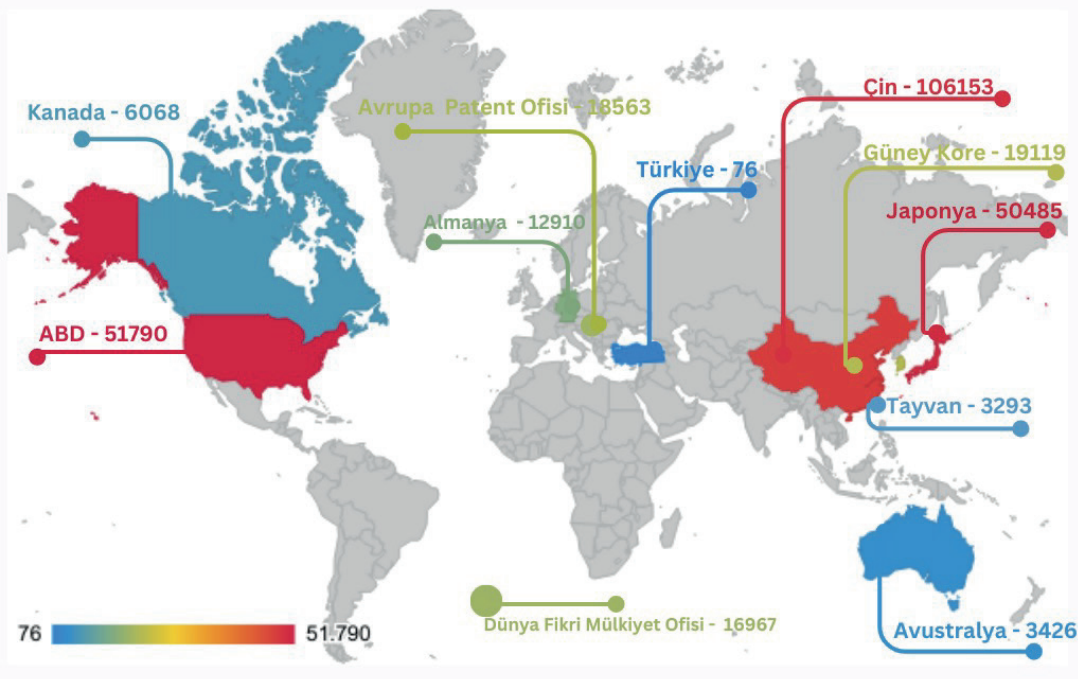
Şekil 53’te “Yakıt Hücresi Yardımcı Elemanlar” konu başlığı ile alakalı patentlerin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2010 yılında 8.796 adet patent başvurusu yapılmış iken 2024 yılına gelindiğinde 14.427 adet patent başvurusu olduğu görülmektedir.

YARDIMCI ELEMANLAR - YIL



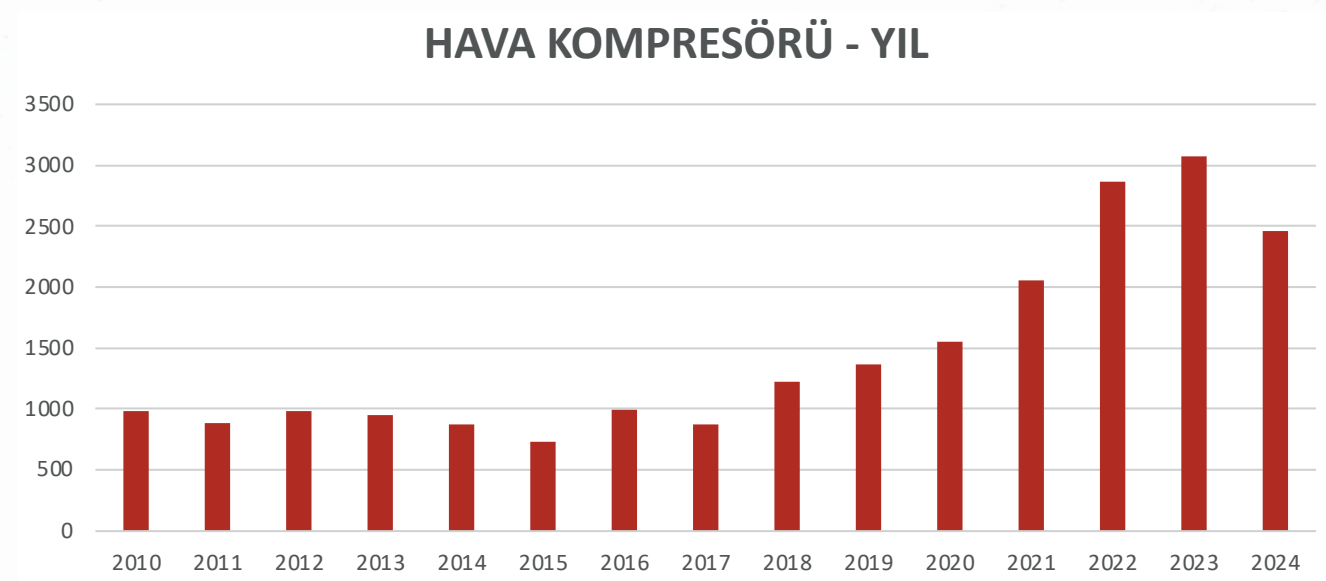
Şekil 53: Yakıt Hücresi Yardımcı Elemanlar Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi

Şekil 54'te "Yakıt Hücresi Yardımcı Elemanlar" konu başlığı ile alakalı patentlerin ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. Yardımcı Elemanlar konusundaki patent çalışmalarına bakıldığında Pasifik Kıyısı ülkelerinin bu konudaki önderliği sürerken Almanya'nın da konuyla ilgili çalışmaları bulunduğu gözlemlenmektedir. 18.563 adet patent Avrupa Patent Ofisine kayıtlıken 16.967 adet patent Dünya Fikri Mülkiyet Ofisi'ne kayıtlıdır. Türkiye'nin ise 76 adet patent çalışması bulunmaktadır.



Şekil 54: Yakıt Hücresi Yardımcı Elemanlar Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi

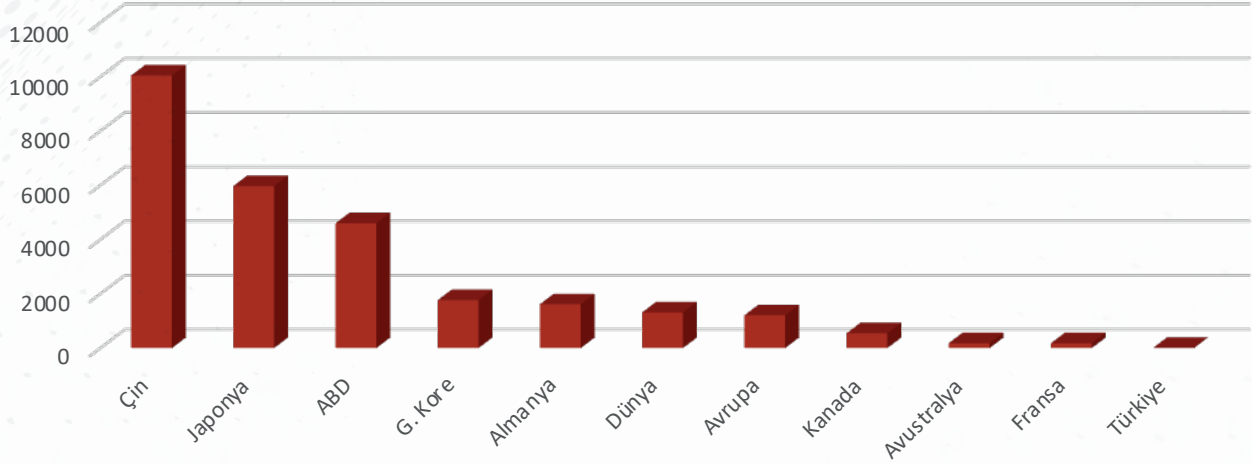
Şekil 55'te "Hava Kompresörü" konu başlığı ile alakalı patentlerin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2010 yılında 980 adet patent başvurusu yapılmış iken 2024 yılına gelindiğinde 2.458 adet patent başvurusu olduğu görülmektedir.



Şekil 55: Yakıt Hücresi Hava Kompresörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi

Şekil 56'da "Hava Kompresörü" konusuna yönelik çalışmanın ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde Hava Kompresörü konusuyla ilgili patentlerin 10.043 tanesi Çin'e aittir. İlgili alanda Çin'i 5.969 adet patentle Japonya; 4.600 adet patent ile ABD takip etmektedir. Türkiye'de ise 7 adet patent alınmıştır.

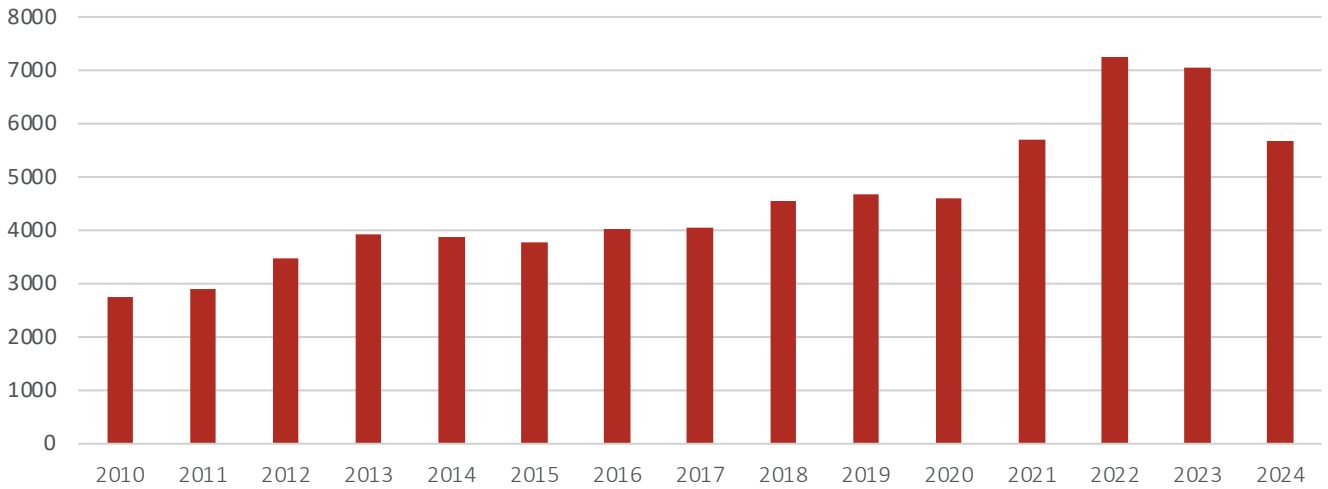
HAVA KOMPRESÖRÜ - ÜLKE



Şekil 56: Yakıt Hücresi Hava Kompresörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi

Şekil 57'de "Kontrol Ünitesi" konu başlığı ile alakalı patentlerin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2010 yılında 2.731 adet patent başvurusu yapılmış iken 2024 yılına gelindiğinde 5.680 adet patent başvurusu olduğu görülmektedir.

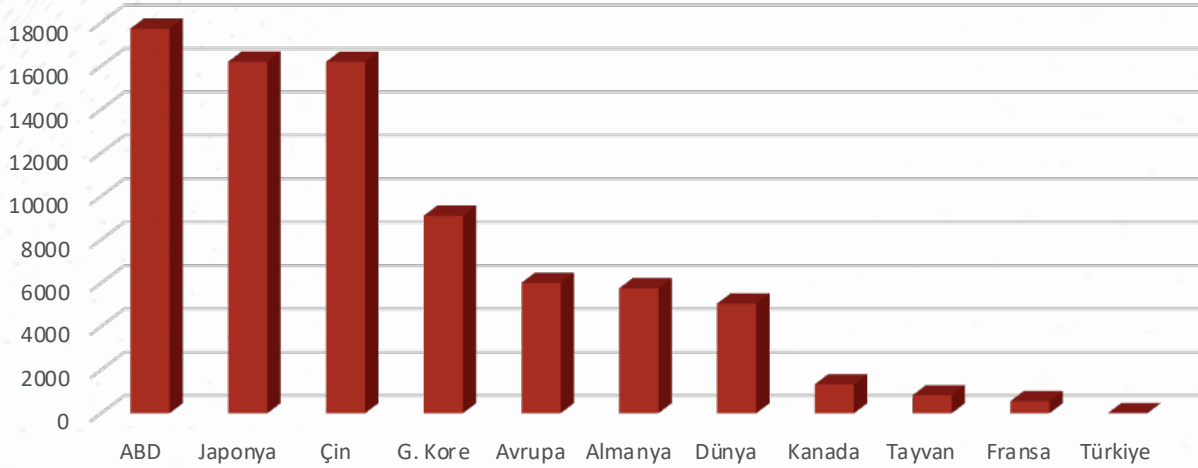
KONTROL ÜNİTESİ - YIL



Şekil 57: Yakıt Hücresi Kontrol Ünitesi Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi

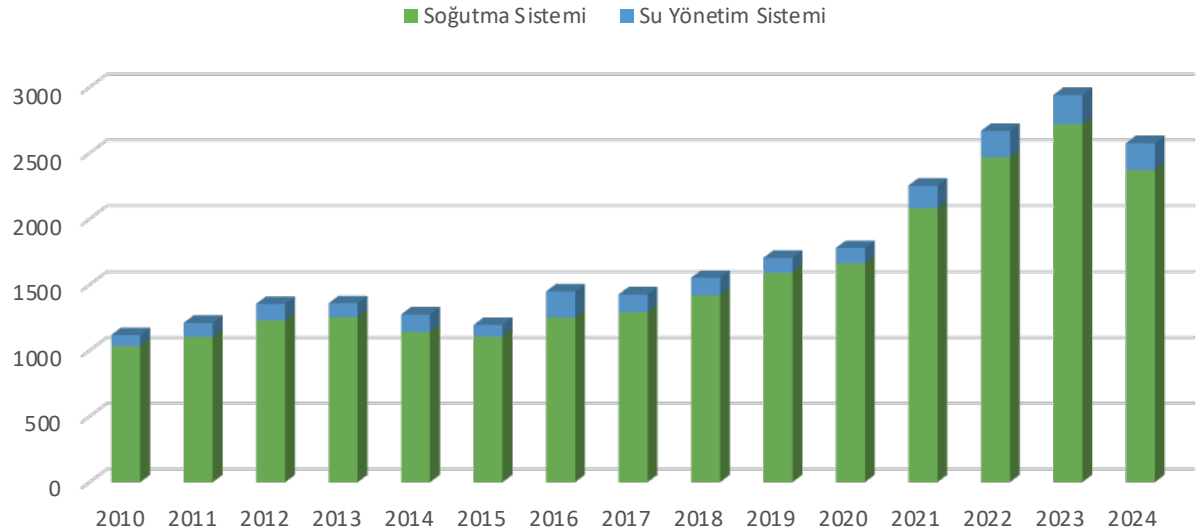
Şekil 58’de “Kontrol Ünitesi” konu başlığına yönelik çalışmanın ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde Kontrol Ünitesi konusuyla ilgili patentlerin 17.731 tanesi ABD’ye aittir. İlgili alanda ABD’yi 16.206 adet patentle Japonya; 16.197 adet patent ile Çin takip etmektedir. Türkiye’de ise 17 adet patent alınmıştır.

KONTROL ÜNİTESİ - ÜLKE



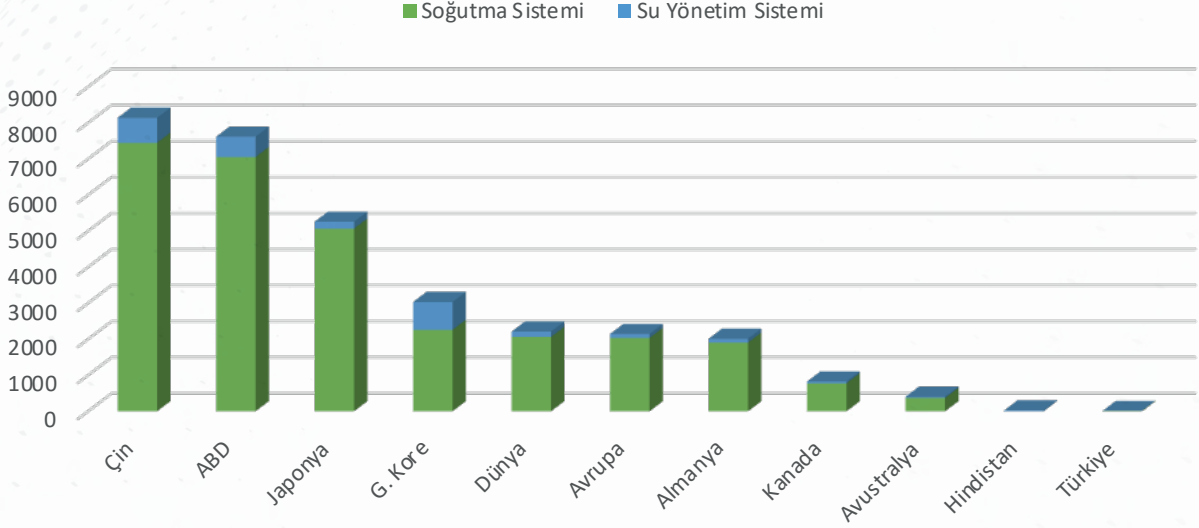
Şekil 58: Yakıt Hücresi Kontrol Ünitesi Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi

Şekil 59’da “Soğutma Sistemi ve Su Yönetimi” konu başlıkları altında değerlendirilen patentlerin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde Soğutma Sistemi ve Su Yönetimi konuları için son on beş yılda en yüksek patent başvuru sayısı sırasıyla 2.720 ve 221 başvuru ile 2023 yılı olmuştur. İki konu hakkında yapılan patent çalışmaları 2010-2024 yılları arasında artan bir davranış sergilemiştir.



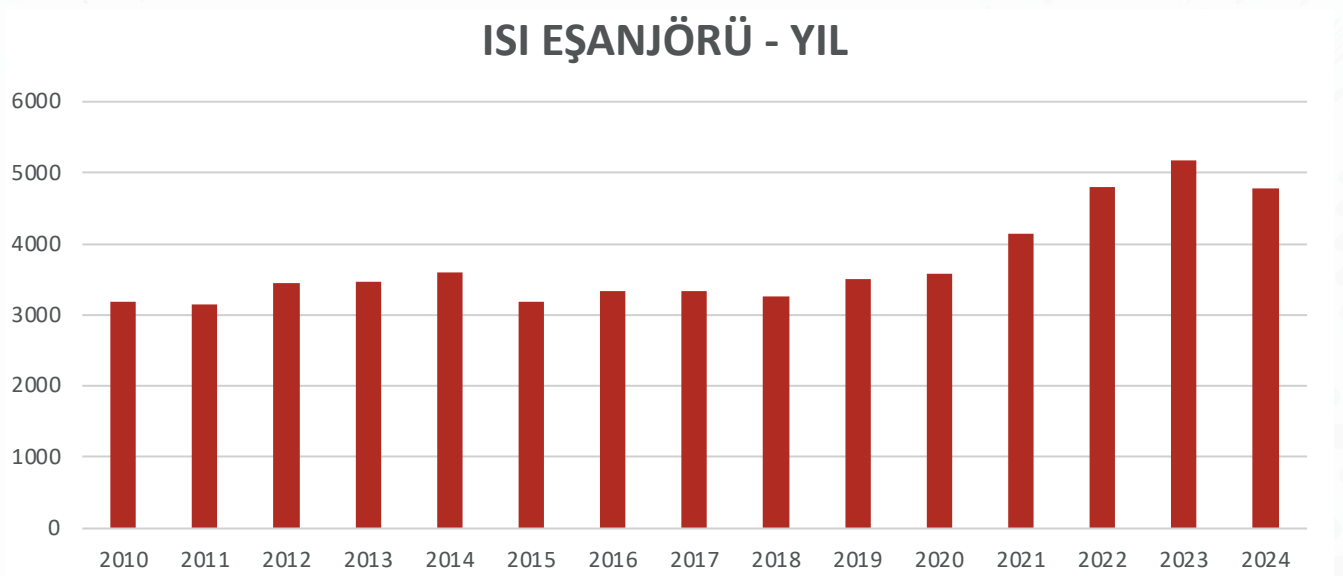
Şekil 59: Yakıt Hücresi Soğutma Sistemi ve Su Yönetim Sistemi Konularına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi

Şekil 60'ta Soğutma Sistemi ve Su Yönetim Sistemi konu başlıkları altında değerlendirilen patentlerin ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuruları incelendiğinde Soğutma Sistemi konusunda ilgili patentlerin 7.444'ü Çin'e ait olduğu gözükmemektedir. İlgili alanda Çin'i 7.050 adet patentle ABD; 5.065 adet patent ile Japonya takip etmektedir Su Yönetimi Sistemi konusunda ise 773 adet patent ile Güney Kore lider durumundadır. Güney Kore'nin liderliğini 695 adet patentle Çin; 565 adet patentle ABD takip etmektedir. Türkiye'nin Soğutma Sistemi konusu altında 10 adet patent başvuru bulunurken Su Yönetim Sistemi konusu altında bir başvurusu bulunmamaktadır.



Şekil 60: Yakıt Hücresi Soğutma Sistemi ve Su Yönetim Sistemi Konularına Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Değişimi

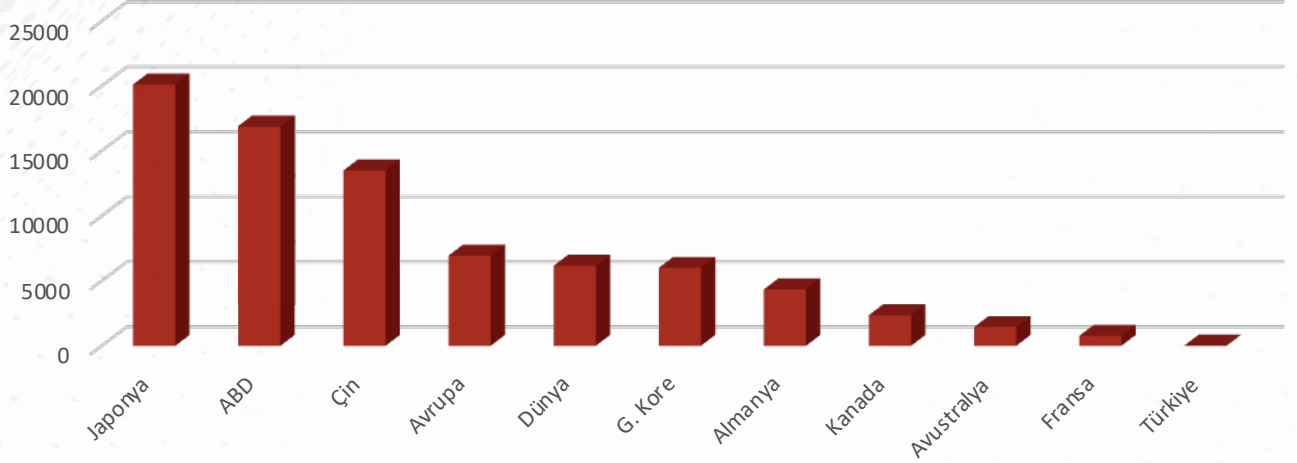
Şekil 61'de Isı Eşanjörü konusu ile alakalı patentlerin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. Isı Eşanjörü konusu ile alakalı çalışmada 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2010 yılında 3.182 adet patent başvurusu yapılmış iken 2024 yılına gelindiğinde 4.775 adet patent başvurusu olduğu görülmektedir.



Şekil 61: Yakıt Hücresi Isı Eşanjörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi

Şekil 62’de Isı Eşanjörü konusuna yönelik çalışmanın ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde Isı Eşanjörü konusuyla ilgili patentlerin 20.121 tanesi Japonya’ya aittir. İlgili alanda Japonya’yı 15.798 adet patentle ABD; 13.499 adet patent ile Çin takip etmektedir. Türkiye’de ise 25 adet patent alındığı görülmektedir.

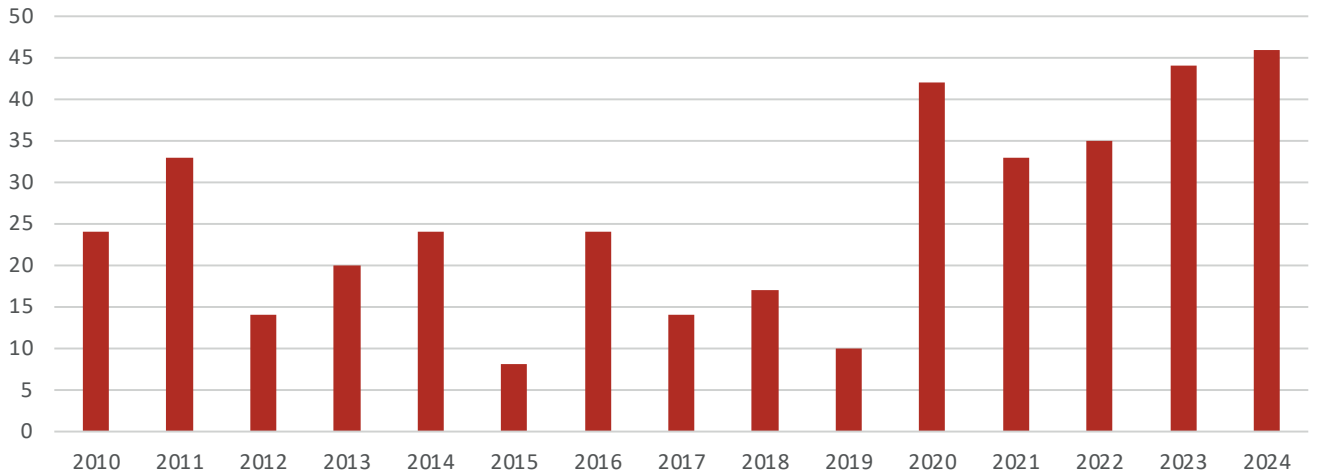
ISI EŞANJÖRÜ - ÜLKE



Şekil 62: Yakıt Hücresi Isı Eşanjörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ülkelere Göre Değişimi

Şekil 63’te “Nemlendirme Ünitesi” konusu ile alakalı patentlerin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. Nemlendirme Ünitesi konusu ile alakalı çalışmada 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2010 yılında 24 adet patent başvurusu yapılmış iken 2024 yılına gelindiğinde 46 adet patent başvurusu olduğu görülmektedir.

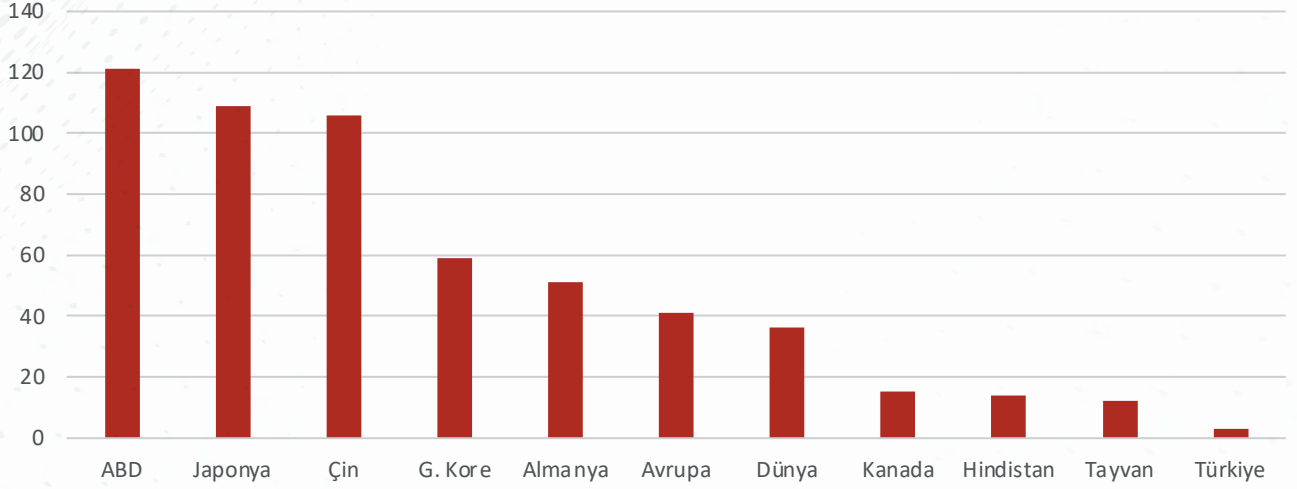
NEMLENDİRME ÜNİTESİ - YIL



Şekil 63: Yakıt Hücresi Nemlendirme Ünitesi Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi

Şekil 64'te "Nemlendirme Ünitesi" konusuna yönelik çalışmanın ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde Nemlendirme Ünitesi konusuyla ilgili patentlerin 121 tanesi ABD'ye aittir. İlgili alanda ABD'yi 109 adet patentle Japonya; 106 adet patent ile Çin takip etmektedir. Türkiye'de ise 3 adet patent alındığı gözükmemektedir.

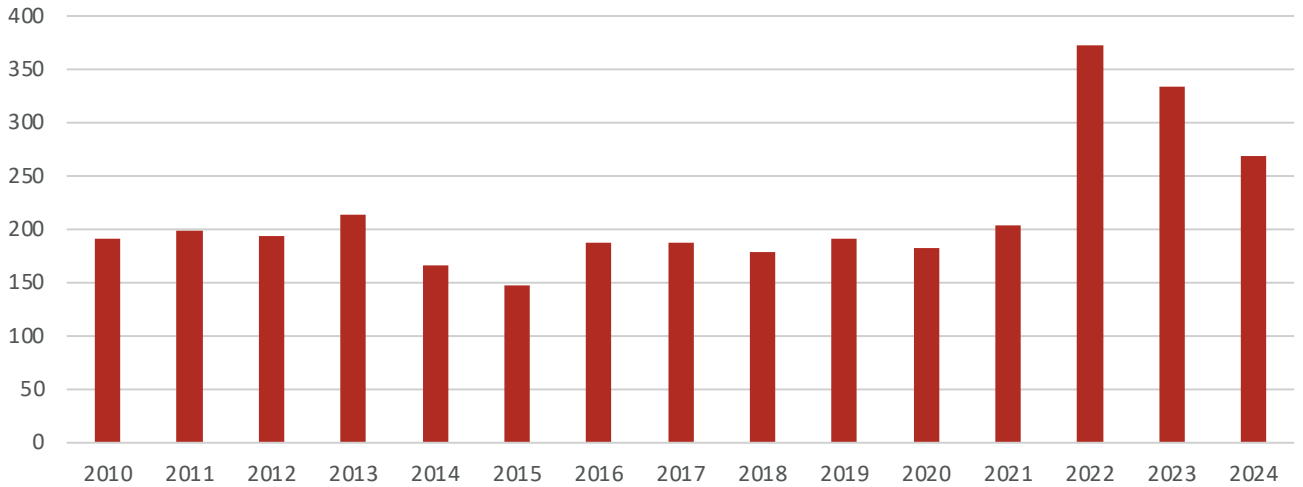
NEMLENDİRME ÜNİTESİ - ÜLKE



Şekil 64: Yakıt Hücresi Nemlendirme Ünitesi Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Değişimi

Şekil 65'te Hidrojen Sensörü konusu ile alakalı patentlerin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. Hidrojen Sensörü konusu ile alakalı çalışmada 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2010 yılında 191 adet patent başvurusu yapılmış iken 2024 yılına gelindiğinde 268 adet patent başvurusu olduğu görülmektedir.

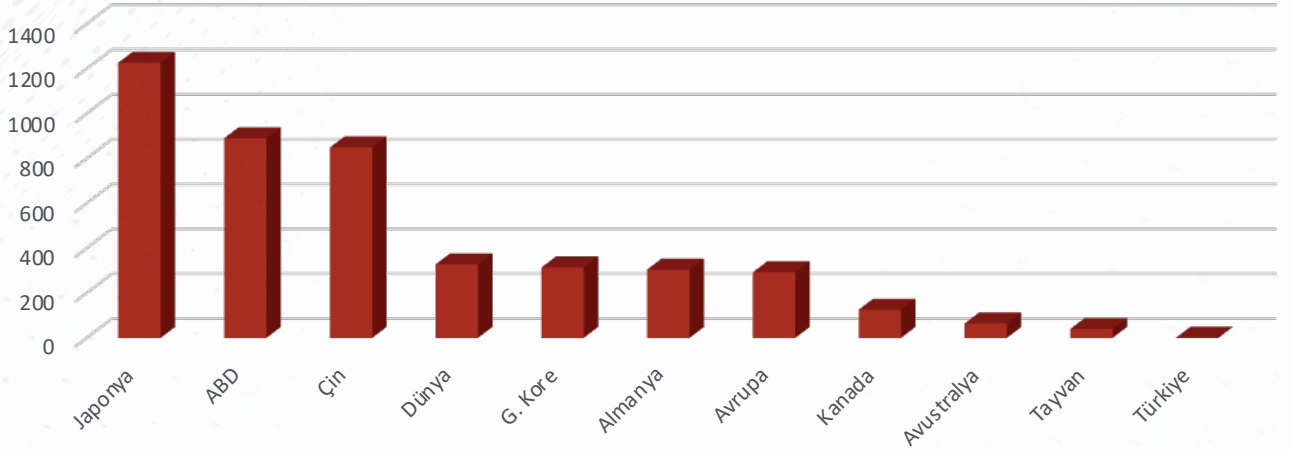
HİDROJEN SENSÖRÜ - YIL



Şekil 65: Yakıt Hücresi Hidrojen Sensörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi

Şekil 66'da "Hidrojen Sensörü" konusuna yönelik çalışmanın ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde Hidrojen Sensörü konusuyla ilgili patentlerin 1.227 tanesi Japonya'ya aittir. İlgili alanda Japonya'yı 890 adet patentle ABD; 849 adet patent ile Çin takip etmektedir. Türkiye'de ise 1 adet patent alındığı gözükmemektedir.

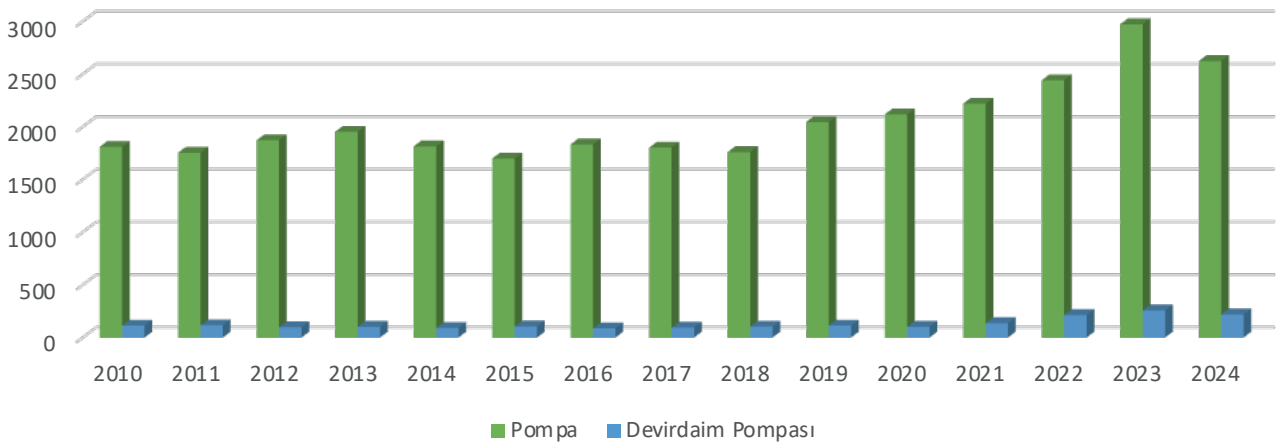
HİDROJEN SENSÖRÜ - ÜLKE



Şekil 66: Yakıt Hücresi Hidrojen Sensörü Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Değişimi

Şekil 67'de "Pompa ve Devirdaim Pompası" konuları ile alakalı patentlerin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde son on beş yılda Pompa ve Devirdaim Pompası konularında en yüksek patent başvurusunun sırasıyla 2.972 ve 257 başvuru ile 2023 yılında yapıldığı görülmektedir. Konular üzerindeki çalışmalar 2010-2024 yılları arasında artan bir davranış sergilemiştir.

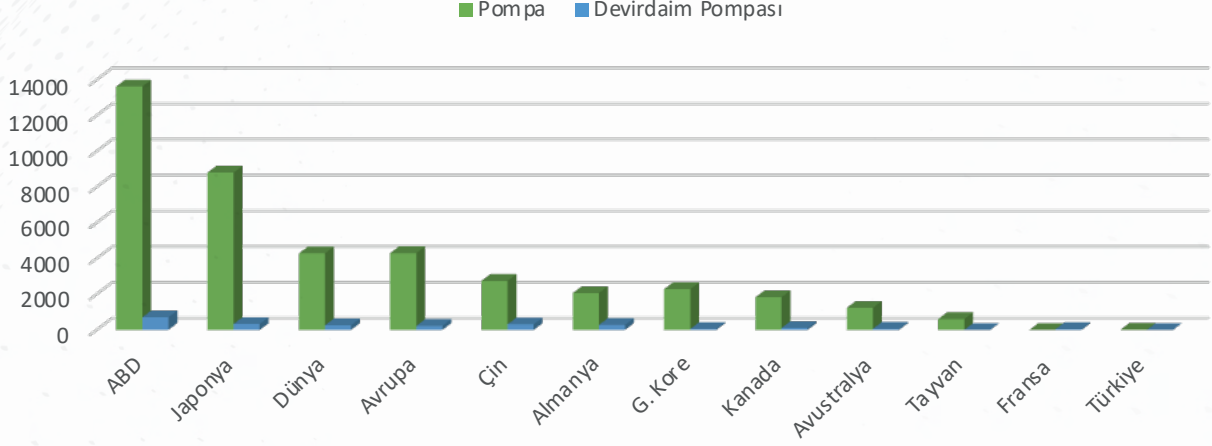
POMPALAR - YIL



Şekil 67: Yakıt Hücresi Pompa ve Devirdaim Pompası Konularına Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi

Şekil 68’de “Pompa ve Devirdaim Pompası” konuları ile alakalı patentlerin ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelendiğinde Pompa ve Devirdaim Pompası konularında sırasıyla 13.620 ve 703 adet patent ile ABD lider konumdadır. ABD’yi 8.805 ve 333 adet patent ile Japonya takip etmektedir. Türkiye ise ilgili konularda sırasıyla 20 ve 2 adet patente sahiptir.

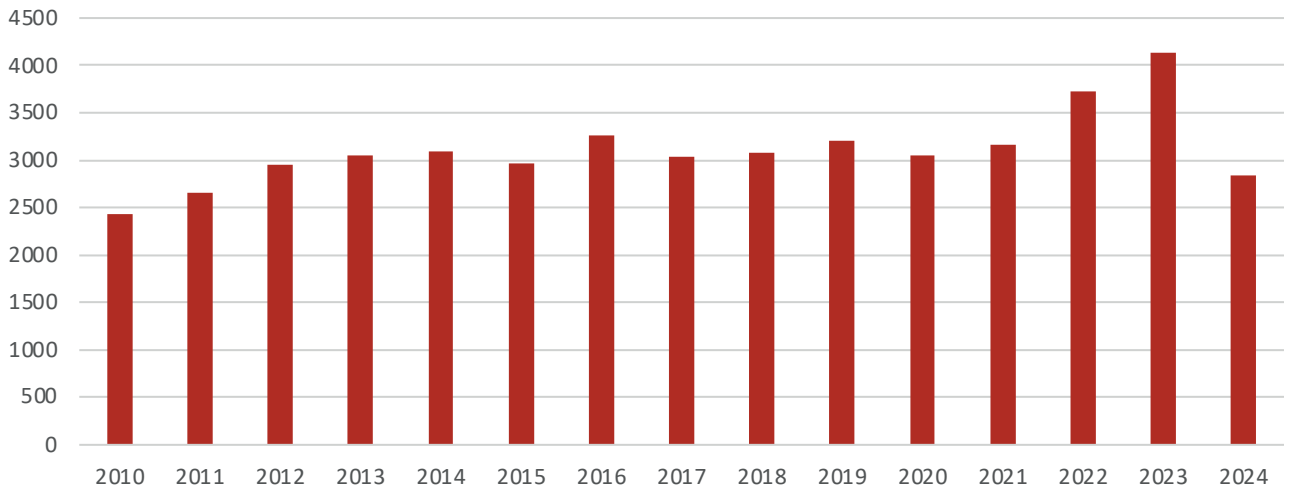
POMPALAR - ÜLKE



Şekil 68: Yakıt Hücresi Pompa ve Devirdaim Pompası Konularına Yönelik Patent Sayılarının Ükelere Göre Değişimi

Şekil 69’da “Regulatör/Valf Sistemleri” konusu ile alakalı patentlerin yıllara göre dağılımı gösterilmektedir. Regulatör/Valf Sistemleri konusu ile alakalı çalışmada 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları incelenmiştir. 2010 yılında 2.427 adet patent başvurusu yapılmış iken 2024 yılına gelindiğinde 2.838 adet patent başvurusu olduğu görülmektedir.

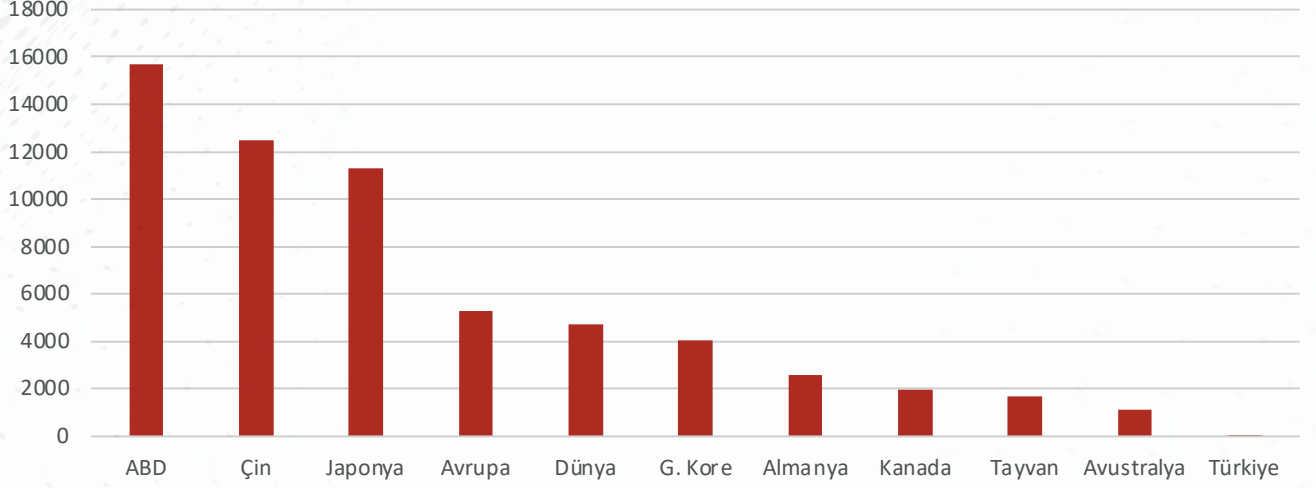
REGÜLATÖR/VALF SİSTEMLERİ- YIL



Şekil 69: Yakıt Hücresi Regülatör/Valf Sistemleri Konusuna Yönelik Patent Sayılarının Yıllara Göre Değişimi

Şekil 70’de “Regulatör/Valf Sistemleri” konusuna yönelik çalışmanın ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir. 2010-2024 yılları arasında yer alan patent başvuru sayıları Regulator/Valf Sistemleri konusu ile ilgili patentlerin 15.671 tanesi ABD’ye aittir. İlgili alanda ABD’yi 12.471 adet patentle Çin; 11.270 adet patent ile Japonya takip etmektedir. Türkiye’de ise 30 adet patent alındığı gözükmemektedir.

REGÜLATÖR/VALF SİSTEMLERİ- ÜLKE



Şekil 70: Yakıt Hücresi Regulator/Valf Sistemleri Konularına Yönelik Patent Sayılarının Ünelere Göre Değişimi

8. YAKIT HÜCREŞİ TEKNOLOJİLERİ ÖNCELİKLENDİRME ANALİZİ

Yakıt Hücresi Teknolojileri OTAĞ çalışmaları kapsamında Odak Çalışma Grup (OÇG) toplantılarında önerilen toplam 52 teknoloji konusu; Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme alanında önerilen 24 teknoloji konusu 16 alt konu başlığı; Depolama ve Besleme Sistemleri kapsamında önerilen 17 teknoloji konusu 6 alt konu başlığı; Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri alanında önerilen 11 teknoloji konusu 10 alt konu başlığı altında sınıflandırılmıştır.

Belirlenen teknoloji konuları daha önce 5. Bölümde bahsedilen ve ortak çalışmalar kapsamında ele alınan AHP, DEMATEL ve TOPSİS metotlarının entegrasyonu kullanılarak oluşturulan önceliklendirme metodolojisi ile Yakın ve Uzak vade olarak önceliklendirilmiştir.

Bir teknoloji konusu kritik olarak değerlendirilebildiği, altyapı ve insan kaynağı yeterli olduğu durumlarda kazanımı yakın vadede değerlendirilir. Teknoloji konusunun kritik olarak değerlendirilmediği, insan gücü ve altyapısının hazır bulunmadığı durumlarda ise kazanımı uzak vadede gerçekleştirilebilir şeklinde değerlendirilir.

Teknoloji konuları Tablo 9'daki minimum öznitelik değerlerine sahip olduğunda yakın vadede kazanılabilecek şekilde değerlendirilir.

Tablo 9: Yakın/Uzak Vade Kesme Noktası Parametreleri

Kriter Listesi	Yakın/Uzak Kesme Noktası Parametreleri			
Kritiklik	Kritik bir teknolojidir, kazanılmasının teknolojik yetkinliğe önemli katkısı olacaktır			
Dünyadaki Durum	Ömür devrinin başında olan, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı, mevcut ticari ürünlerin olduğu teknolojidir.			
İnsan Kaynağı	Yetişmiş insan gücü bulunmaktadır.			
Altyapı	Temel araştırma fazı için üniversite laboratuvarı ve araştırma merkezi gibi altyapılar mevcuttur.			
Çift Kullanım	Teknolojinin çift amaçlı olarak kullanım imkânı vardır.			
Projelerde Kullanım	Projelerde kullanılacaktır.			
Temin Riski	Uluslararası anlaşmalarla transferi kontrol altına alınmıştır.	Ulusal ihracat lisansına veya ITAR düzenlemelerine tabidir.	Üreticisi tek kaynaktır.	Temin süresi uzundur.
	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır

8.1 Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme

Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme faaliyetleri altında toplam 16 adet alt konu başlığı bulunmaktadır. Bu alt konu başlıklarının altında 24 adet teknoloji konusu yer almaktadır. Teknoloji konuları, önceliklendirme metodolojisi kullanılarak Yakın ve Uzak vade olarak sonuçlandırılmıştır.

8.1.1 Yakın Vade Alt Konu Başlıkları

Yakın vade için 10 adet alt konu başlığı ve 15 adet teknoloji konusu bulunmaktadır.

Tablo 10: Yakın Vade Alt Konu Başlıklarına Ait Teknoloji Konuları

Alt Konu Başlıkları	Konu Sayısı	Teknoloji Konuları
Akım Toplayıcılar	1	Akım toplayıcıların üretimi
Bağlantı Elemanları	1	Yakıt hücresi korozyon dayanımı yüksek bağlantı elemanı
Bipolar Plakalar	3	Bipolar plaka üretimi
		Akış alanı tasarımı
		Metal plaka ön işlem ve kaplama
Katalizörler	1	Elektrokatalizör üretimi
Membran	1	Elektrolit/Membran üretim
Membran Elektrot Ataçları (MEA)	2	MEÜ üretimi için mürekkep hazırlama
		Membran elektrot ünitesi (MEÜ) geliştirilmesi
Yakıt Hücresi Yapısal Tasarımı	1	Kapatma plakalarının tasarımı ve üretimi
Farklı Uygulama Alanları İçin Yakıt Hücresi Teknolojileri	3	Farklı tasarım yakıt hücreleri (tübüler yapı)
		Araç uygulamaları için yakıt hücresi
		Mikrokojenerasyon yakıt hücresi (Düşük sıcaklık PEM, yüksek sıcaklık PEM, katı oksit yakıt hücresi)
Modelleme ve Simülasyon	1	Hücre bazında modelleme ve simülasyon
Sıvı Beslemeli Yakıt Hücreleri	1	Sıvı beslemeli yakıt hücreleri

8.1.2 Uzak Vade Alt Konu Başlıkları

Uzak vade için 7 adet alt konu başlığı ve 9 adet teknoloji konusu bulunmaktadır.

Tablo 11: Uzak Vade Alt Konu Başlıklarına Ait Teknoloji Konuları

Alt Konu Başlıkları	Konu Sayısı	Teknoloji Konuları
Gaz Difüzyon Tabakası	1	Gaz difüzyon tabakası geliştirilmesi (karbon temelli, metal temelli)
Membran Elektrot Ataçları (MEA)	1	Seri üretim için membran/elektrolit kaplama
Sızdırmazlık Elemanları	2	Yakıt hücresi sızdırmazlık elemanı üretimi
		Yüksek sıcaklık yakıt pilleri için sızdırmazlık elemanı üretimi
Modül, Hücre ve Sistem Testleri	1	Yakıt hücresi için modül, hücre ve sistem testleri
Farklı Uygulama Alanları İçin Yakıt Hücresi Teknolojileri	2	Mikro yakıt pilleri
		Yüksek güçlü yakıt hücresi sistemlerinin geliştirilmesi (1MW ve üzeri)
Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik	1	Yakıt hücresi bileşenlerinin geri dönüşümü
Giyilebilir Teknolojiler	1	Giyilebilir yakıt hücresi teknolojisi (DMYP vb.)

8.2 Depolama ve Besleme Sistemleri

Depolama ve Besleme Sistemlerinde 6 adet alt konu başlığı bulunmaktadır. Bu alt konu başlıklarının altında toplam 17 adet teknoloji konusu yer almaktadır.

8.2.1 Yakın Vade Alt Konu Başlıkları

Yakın vade için 6 adet alt konu başlığı bulunmaktadır ve bu alt konu başlıklarına ait 12 farklı teknoloji konusu vardır. Tablo 12’de yakın vade ile sonuçlanan alt konu başlıkları ve bu konu başlıklarına ait teknoloji konularına detaylı olarak yer verilmiştir.

Tablo 12: Yakın Vade Alt Konu Başlıklarına Ait Teknoloji Konuları

Alt Konu Başlıkları	Konu Sayısı	Teknoloji Konuları
Depolama Sistemi Bileşenleri	1	Aerojel, karbojel, kriyojenik depolamaya yönelik alt bileşenlerin (vakum, izolasyon panelleri, sızdırmazlık, yapıştırıcı, bağlantı vb) geliştirilmesi
Depolama Tankları için Malzeme Geliştirilmesi	2	Depolama ve Besleme Sistemleri için 2B malzemelerin geliştirilmesi Depolama tanklarında kullanıma uygun polimerik malzeme (örn. poliüretan, epoksi, polibenzoksazin) veya çok işlevsel malzeme (esnek, hafif, yanma dayanımı olan) kullanılması
Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik	1	Katı hidrojen depolama malzemelerinin (Metal hidrürler ve kimyasal hidrürler) geri dönüşümü
Hidrojen Depolama Teknolojileri	6	Tip-5 tank üretimi yapılması Tip-4 tank üretimi yapılması Tip-3 tank üretimi yapılması Yüksek basınçlı hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi Yüksek basınçlı hidrojen depolanması (basınçlandırma sistemi) Metal hidrür içeren tankta hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi
Hidrojen Üretim Teknolojileri	1	Sodyum borhidrürden hidrojen üretim sistemi geliştirilmesi
Modelleme ve Simülasyon	1	Termal kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi. Simülasyonlarla etkin ısı, yakıt ve enerji yönetimi sağlanması

8.2.2 Uzak Vade Konu Başlıkları

Uzak vade için 3 adet alt konu başlığı bulunmaktadır ve bu alt konu başlıklarına ait 5 farklı teknoloji konusu vardır. Tablo 13’de uzak vade ile sonuçlanan alt konu başlıkları ve bu konu başlıklarına ait teknoloji konularına detaylı olarak yer verilmiştir.

Tablo 13: Uzak Vade Alt Konu Başlıklarına Ait Teknoloji Konuları

Alt Konu Başlıkları	Konu Sayısı	Teknoloji Konuları
Hidrojen Depolama Teknolojileri	2	Amonyak ile hidrojen taşıma ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi Kriyojenik olmayan koşullarda H ₂ taşınması için hidrojenasyon ve dehidrojenasyon teknolojilerinin geliştirilmesi
Depolama Tankları için Malzeme Geliştirilmesi	2	3D Baskı Grafen, CVD Bazlı Grafen Tozu kullanılması teknolojilerinin geliştirilmesi Hidrojen depolama sistemlerinde karbon elyaf teknolojisi kullanılarak depolama tanklarının geliştirilmesi
Hidrojen Üretim Teknolojileri	1	Yakıt işlemcisi ile LPG’den hidrojenin onboard elde edilmesi

8.3 Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri

Yakıt Hücresi Sistem Bileşenlerinde 10 adet alt konu başlığı bulunmaktadır. Bu alt konu başlıklarının altında toplam 11 adet teknoloji konusu yer almaktadır. Teknoloji konuları, önceliklendirme metodolojisi kullanılarak Yakın ve Uzak vade olarak sonuçlandırılmıştır.

8.3.1 Yakın Vade Alt Konu Başlıkları

Yakın vade için 5 adet alt konu başlığı bulunmaktadır ve bu alt konu başlıklarına ait 5 farklı teknoloji konusu vardır. Tablo 14’de yakın vade ile sonuçlanan alt konu başlıkları ve bu konu başlıklarına ait teknoloji konuları detaylı olarak yer verilmiştir.

Tablo 14: Yakın Vade Alt Konu Başlıklarına Ait Teknoloji Konuları

Alt Konu Başlıkları	Konu Sayısı	Teknoloji Konuları
Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik	1	Yakıt geri dönüş stratejileri geliştirilmesi
Kompresörler	1	Kompresörler için Hava Yatağı Kullanılması
Proses Kontrol Yöntemleri	1	Kontrol Algoritmalarının Oluşturulması
Regülatör ve Valfler	1	Regülatör ve Valf Sistemlerinin Geliştirilmesi
Sensörler	1	Hidrojen Sensörü (katı hal) Geliştirilmesi

8.3.2 Uzak Vade Konu Başlıkları

Uzak vade için 5 adet alt konu başlığı bulunmaktadır ve bu alt konu başlıklarına ait 6 farklı teknoloji konusu vardır. Tablo 15’de uzak vade ile sonuçlanan alt konu başlıkları ve bu konu başlıklarına ait teknoloji konular detaylı olarak yer verilmiştir.

Tablo 15: Uzak Vade Alt Konu Başlıklarına Ait Teknoloji Konuları

Alt Konu Başlıkları	Konu Sayısı	Teknoloji Konuları
AC/DC ve DC/DC Dönüştürücüler	1	DC-AC, DC-DC Çeviriciler için Yarı İletken Malzeme Geliştirilmesi
Adsorbsiyon Teknolojileri	1	Hidrojen Sülfür Tutucu
Filtreler	1	Filtre Geliştirilmesi
Modelleme ve Simülasyon	2	Simülasyon ve Matematiksel Modelleme Su, Isı ve Yakıt Yönetiminin Sinyal İşleme Metodu ile Takibi
Nemlendiriciler	1	Nemlendirici Geliştirilmesi

9. KAZANIM PLANI ÇALIŞMALARI

Başkanlığımızın 2024 – 2028 Stratejik Planı kapsamında Ar-Ge ve Teknoloji alanında geleceğe yön verecek teknoloji ve yetenekleri milli imkanlarla geliştirmek amacıyla, günümüz ve geleceğin teknolojilerine yönelik kapsayıcı ve istikrarlı gelişimin sürdürülmesi ve çığır açan teknoloji alanlarında yetenek kazanımının sağlanması hedeflenmektedir.

Savunma sanayii alanında dışa bağımlılığı asgari seviyeye indirmek, ana sistemlerin ve tüm kritik alt sistemlerin yerlileştirilmesi ile mümkündür. Bunun yanı sıra, teknolojiyi takip eden değil teknolojide öncü olan bir ülke olmak için, ileri teknolojiye yatırım yapmak büyük önem arz etmektedir.

Bu doğrultuda, Başkanlığımız tarafından günümüzdeki teknolojik gelişimin hızıyla 3-5 yıl olarak tanımlanabilecek yakın vadeden ötesini ve o yılların harekât ortamlarını tasvir etmek ve bu ortamlarda etkin olacak konseptler ile onların gerçekleştirilmesini sağlayacak teknolojileri belirlemek amacı ile Geleceğin Harekât Ortamını Şekillendirecek Teknolojiler (GHOST) etkinliği gerçekleştirilmektedir.

GHOST kapsamında geleceğe etki potansiyeli yüksek olarak belirlenen teknolojiler Savunma Sanayii Başkanlığı Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı tarafından düzenlenmekte olan Odak Teknoloji Ağı (OTAĞ) çalışmaları kapsamında ele alınmaktadır. Her yıl belirlenen teknoloji alanlarında; üniversiteler, araştırma kuruluşları, ihtiyaç makamları, sanayi ve KOBİ'lerden ilgili temsilcilerin katılımıyla OTAĞ faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. OTAĞ faaliyetlerine ilişkin bilgilere, Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Portalı'ndan (<https://arge.ssb.gov.tr/>) ulaşılabilmektedir.

OTAĞ faaliyetleri ile ele alınan teknolojiler bütüncül bir yaklaşımla, ekosistemde yer alan tüm paydaşların katkıları ile, belirlenen ve önceliklendirilen konu önerileri doğrultusunda Teknoloji Bazlı Ar-Ge Yol Haritaları oluşturulmaktadır.

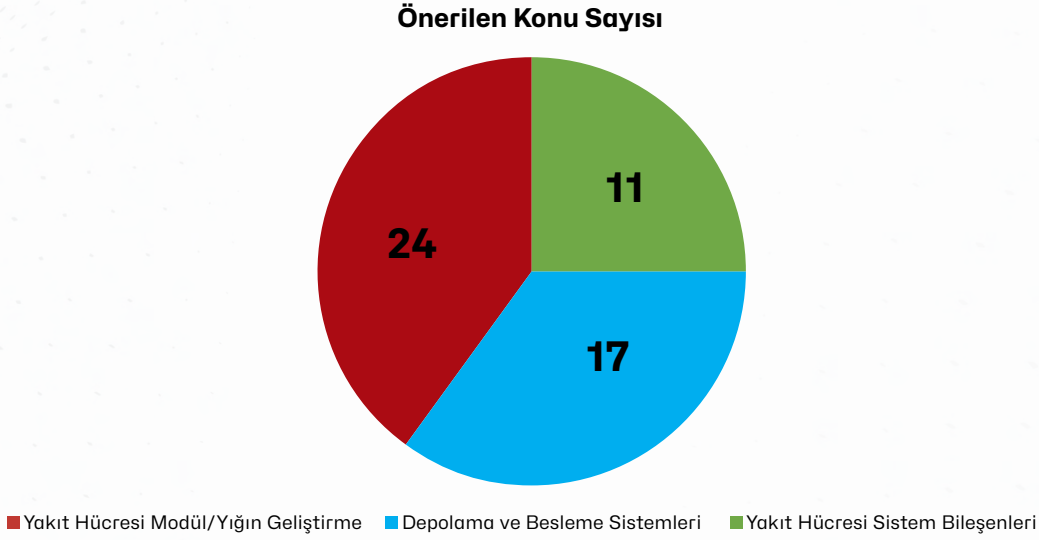
Ar-Ge Paneli'ne sunulacak konuların belirlenmesinde, Teknoloji Bazlı Ar-Ge Yol Haritaları öncelikli girdidir.

Gereksinimleri net olarak belirlenmemiş ya da belirlenemeyen konular, Savunma Sanayii Ar-Ge Geniş Alan (SAGA) Çağrısı olarak, diğer durumlarda, Ar-Ge Projesi Önerisi olarak Ar-Ge Paneli'ne sunulur. Ar-Ge Paneli Kararları alındıktan sonra SSB projelendirme faaliyetleri gerçekleştirilir.

Başkanlığımız tarafından sektörel yetkinlik ve kapasitelerin değişik aşamalarda, farklı kategorilerde ve süreklilik içinde değerlendirilmesi ve puanlandırılması amacıyla Endüstriyel Yetkinlik Değerlendirme ve Destekleme Programı (EYDEP) yürütülmektedir. EYDEP ile savunma sanayiinde faaliyet gösteren firmaların, sektörde nitelikli tedarikçi olabilmelerini teminen durum analizleri yapılmakta ve gelişme planlarının oluşturulması amaçlanmaktadır. EYDEP'e başvurular "<https://yeten.ssb.gov.tr/eydepinfo>" internet adresinden yapılabilmektedir. Ayrıca, Savunma Sanayii Yetenek Envanteri (YETEN) kapsamında birçok kamu kurum ve kuruluşu ile entegrasyon sağlanarak mevcut veri tabanlarından bilgi transferi sağlanmaktadır. Bu kapsamda, savunma sanayii alanında faaliyet gösteren firmaların ürünlerinin, üretim ve test altyapılarının, finans ve insan kaynağı bilgilerinin YETEN'e kayıt etmesi gerekmektedir. Böylece TSK'nın ihtiyaç duyacağı her türlü harp sanayii ürününün ve hizmetlerinin milli sanayiinin kaynak ve imkânları ile azami ölçüde yurt içinden karşılanması için mevcut sanayiinin kapasitesi ayrıntılı olarak ortaya çıkarılmakta, açık teknoloji alanları belirlenmekte, sanayii içinden yapay zekâ teknolojisi ile potansiyel firma önermesi yapılabilmekte ve teknoloji transferi ile yurt içinde imal edilebilecek olan ürünler ile bu ürünleri üretebilecek potansiyel firmalar belirlenebilmektedir. YETEN ile ilgili detaylı bilgi "<https://yeten.ssb.gov.tr/>" adresinde yer almaktadır.

10. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

14 Nisan 2023 tarihinde Lansman Toplantısı ile başlayan ve 19 Kasım 2024'te sonuçlanan Yakıt Hücresi OTAĞ'da "Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme", "Depolama ve Besleme Sistemleri" ve "Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri" olmak üzere 3 farklı Odak Çalışma Grubu (OÇG) ile süreç yürütülmüştür. Yakıt Hücresi Modül/Yığın Geliştirme OÇG için TÜBİTAK MAM, Depolama ve Besleme Sistemleri OÇG için ROKETSAN ve Yakıt Hücresi Sistem Bileşenleri OÇG için SSB liderlik yapmıştır. Lansman Toplantısının ardından katılımcılar tarafından Teknoloji Konu Önerileri sunulmuş ve tüm kurum, kuruluş ve üniversitelerin katılımları ile değerlendirilmiştir. OÇG'ler bazında konu öneri dağılımı Şekil 71'de verilmiştir. 3 farklı OÇG için toplam 52 konu önerisi sunulmuştur.



Şekil 71 Odak Çalışma Grupları ve Konu Öneri Sayıları

Yakıt Hücresi OTAĞ çalışmaları kapsamında belirlenen Teknoloji Konuları için insan kaynağı, kritiklik, dünyadaki durum, altyapı, projelere uygulama, temin riski ve çift kullanım kriterleri doğrultusunda önceliklendirme çalışması 5. Bölüm'de detayları yer alan AHP, DEMATEL ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak tamamlanmıştır. AHP ve DEMATEL yöntemleri ile kriter, alt kriter ve öznitelik ağırlıkları belirlenmiş, belirlenen pozitif ve negatif ideal Teknoloji Konuları referans alınarak TOPSIS metodu ile öncelik ve vade düzeylerine göre teknoloji konuları sıralanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda bulunan nicel değerler ile kazanılması gereken teknolojiler arasında önceliklendirme sıralaması yapılmıştır. Tablo 14 ve Tablo 15'te sırası ile yakın ve uzak vade teknoloji konuları görülmektedir. Sıralama, her iki tabloda da nicel değerler değil alfabetik sıralama göz önüne alınarak yapılmıştır.

Tablo 16: Yakın Vade Teknoloji Konuları

Aerojel, karbojel, kriyojenik depolamaya yönelik alt bileşenlerin (vakum, izolasyon panelleri, sızdırmazlık, yapıştırıcı, bağlantı vb) geliştirilmesi
Akım toplayıcıların üretimi
Akış alanı tasarımı
Araç uygulamaları için yakıt hücresi
Bipolar plaka üretimi
Depolama tanklarında kullanıma uygun polimerik malzeme (örn. poliüretan, epoksi, polibenzoksazin) veya çok işlevsel (esnek, hafif, yanma dayanımı olan) kullanılması
Depolama ve Besleme Sistemleri için 2B malzemelerin geliştirilmesi
Elektrokatalizör üretimi
Elektrolit/Membran üretim
Farklı tasarım yakıt hücreleri (tübüler yapı)
Hidrojen Sensörü (katı hal) Geliştirilmesi
Hücre bazında modelleme ve simülasyon
Kapatma plakalarının tasarımı ve üretimi
Katı hidrojen depolama malzemelerinin (Metal ve kimyasal hidrürler) geri dönüşümü
Kompresörler için Hava Yatağı Kullanılması
Kontrol Algoritmalarının Oluşturulması
Membran elektrot ünitesi (MEÜ) geliştirilmesi
Metal hidrür içeren tankta hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi.
Metal plaka ön işlem ve kaplama
MEÜ üretimi için mürekkep hazırlama
Mikrokojenerasyon yakıt hücresi (Düşük sıcaklık PEM, yüksek sıcaklık PEM, katı oksit yakıt hücresi)
Regülatör ve Valf Sistemlerinin Geliştirilmesi
Sıvı beslemeli yakıt hücreleri
Sodyum borhidrürden hidrojen üretim sistemi geliştirilmesi.
Termal kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi. Simülasyonlarla etkin ısı, yakıt ve enerji yönetimi sağlanması
Tip-3 tank üretimi yapılması
Tip-4 tank üretimi yapılması
Tip-5 tank üretimi yapılması
Yakıt geri dönüş stratejileri geliştirme
Yakıt hücresi korozyon dayanımı yüksek bağlantı elemanı
Yüksek basınçlı hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi
Yüksek basınçlı hidrojen depolanması (basınçlandırma sistemi)

* Teknoloji konuları alfabetik sırayla verilmiştir.

Tablo 17: Uzak Vade Teknoloji Konuları

3D Baskı Grafen, CVD Bazlı Grafen Tozu kullanılması teknolojilerinin geliştirilmesi
Amonyak ile hidrojen taşıma ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi
DC-AC, DC-DC Çeviriciler için Yarı İletken Malzeme Geliştirilmesi
Filtre Geliştirme
Gaz difüzyon tabakası geliştirilmesi (karbon temelli, metal temelli),
Giyilebilir yakıt hücresi teknolojisi (DMYP, vb.)
Hidrojen depolama sistemlerinde karbon elyaf teknolojisi kullanılarak depolama tanklarının geliştirilmesi
Hidrojen Sülfür Tutucu
Kriyojenik olmayan koşullarda H ₂ taşınması için hidrojenasyon ve dehidrojenasyon teknolojilerin geliştirilmesi
Mikro yakıt pilleri
Nemlendirici Geliştirme
Seri üretim için membran/elektrolit kaplama
Simülasyon ve Matematiksel Modelleme
Su, Isı ve Yakıt Yönetiminin Sinyal İşleme Metodu ile Takibi
Yakıt hücre için modül, hücre ve sistem testleri
Yakıt hücresi bileşenlerinin geri dönüşümü
Yakıt hücresi sızdırmazlık elemanı üretimi
Yakıt işlemcisi ile LPG'den hidrojenin onboard elde edilmesi
Yüksek güçlü yakıt hücresi sistemlerinin geliştirilmesi (1MW ve üzeri).
Yüksek sıcaklık yakıt pilleri için sızdırmazlık elemanı üretimi

* Teknoloji konuları alfabetik sırayla verilmiştir.

Yakın vadede kazanılması gereken teknoloji konularından biri “Aerojel ve karbojel hidrojen depolama hidrojenin gözenekli yapı içerisine tutunarak, kriyojenik hidrojen depolama ise 1 atm basınç ve -253 °C sıcaklık altında hidrojenin sıvılaştırılarak depolanmasıdır. İnsan kaynağına bakıldığında yetişmiş insan gücü bulunduğu görülmektedir.

Teknoloji konuları arasında yakın vadede kazanılması gereken bir diğer konu başlığı ise “Akım toplayıcıların üretimi”dir. Yakıt hücresi dizinlerinin başına ve sonuna yerleştirilen, elektronik iletkenliği yüksek plakalara akım toplayıcı plakalar denilmektedir. Bu plakalar yakıt hücresi dizininin (-) ve (+) kutupları olmaktadır. Akım toplayıcının ana rolü, yakıt hücresinde üretilen akımı toplamaktır. Verimli bir akım toplayıcı tasarlamak için, bir malzemenin hafif olması, yüksek derecede iletken olması ve yüksek elektrokimyasal ve mekanik stabiliteye sahip olması gerekmektedir. Dünya üzerinde bakıldığında bu teknoloji konusunun ömür devrinin ortalarında olduğu, ülkemizde bakıldığında ise benzer veya tamamlayıcı teknolojilere ilişkin altyapıların mevcut olduğu görülmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, bu teknolojinin kısa vadede ülkemize kazandırılabilmesi düşünülmektedir.

Yakın vadede yer alan bir diğer teknoloji konusu “Akış Alanı Tasarımı”dır. Akış alanı tasarımı yakıt hücrelerinde kullanılan bipolar plakaların yüzeyinden geçen hidrojen ve oksijen gazlarının doğru

yönetilebilmesi için önemli parametrelerden biridir. Gaz yönetimi doğrudan yakıt hücresinin performansına etki etmektedir. Dünya'daki durumuna bakıldığında ömür devrinin başında kritik bir teknoloji olduğu görülmektedir. Altyapı olarak henüz yalnızca temel araştırma fazı için üniversite laboratuvarı ve araştırma merkezi gibi altyapılar mevcut olduğu bilinmektedir.

“Araç uygulamaları için yakıt hücresi” teknoloji konu önerisi ülkemizde yakın vadede kazanılması gereken konulardan biridir. Önceliklendirme çalışmasına bakıldığında mevcut ticari ürünlerin olduğu görülmektedir. Mevcut ticari ürünlerden biri olan Toyota markasının hali hazırda yakıt hücresi ile çalışan Mirai modeli dikkat çekmektedir. Kritik bir teknoloji olmakla birlikte kazanılmasının teknolojik yetkinliğe önemli katkısı olacağı belirtilmiştir.

Bir diğer yakın vade teknoloji konusunun ise “Bipolar Plaka Üretimi” olduğu görülmektedir. Bipolar plaka yakıt hücresinde bulunan her bir hücreyi ayıran ve üzerinde akış kanalları bulunan plakalardır. Bipolar plakalar grafit veya metalik malzemelerden üretilirler. İnsan kaynağına bakıldığında yetişmiş insan gücünün yetersiz olduğu görülmektedir.

“Depolama tanklarında kullanıma uygun polimerik (örneğin poliüretan, epoksi, polibenzoksazin) veya çok işlevsel (örneğin esnek, hafif, yanma dayanımı olan) malzeme kullanılması” konu önerisi yapılan önceliklendirme çalışmasına istinaden yakın vade ile sonuçlanan liste içerisinde yer almıştır. Depolama tanklarında polimerik veya çok işlevsel malzemelerin kullanılması, tankların daha güvenli, dayanıklı, hafif ve verimli olmasını sağlayacaktır. Hidrojen gazı yüksek basınçla depolandığından ve yanıcı bir gaz olduğundan tankların hem içeriği güvenli bir şekilde tutması hem de dış etkenlere karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Bu malzemelerin çok işlevsel özellikleri, depolama verimliliği ve proses güvenliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ülkemizde benzer teknolojiler için mevcut bir altyapı bulunmakta olup, bu teknolojinin kısa vadede kazanılması, hidrojen ekonomisinin gelişimine önemli katkılar sağlayacaktır.

“Depolama ve besleme sistemleri için 2B malzemelerinin geliştirilmesi” teknoloji konu önerisi ülkemizde yakın vadede kazanılması gereken bir konu olarak sonuçlanmıştır. İki boyutlu (2B) malzemeler, yalnızca bir veya birkaç atom kalınlığında olan ve yüksek yüzey alanı, olağanüstü elektriksel iletkenlik, mekanik dayanıklılık ve kimyasal stabilite gibi benzersiz özelliklere sahip malzemelerdir. Bu özellikler, hidrojen depolama, yakıt hücresi besleme sistemleri ve enerji dönüşüm teknolojilerinde belirleyici bir öneme sahiptir. Hidrojen depolama ve besleme sistemleri için 2B malzemelerinin geliştirilmesi dünya üzerinde bakıldığında araştırma ve geliştirme aşamasında olan ve ömür devrinin başında sayılabilecek bir teknolojidir. 2B malzemeler, özellikle grafen, bor nitrid (h-BN) gibi materyaller, hidrojen depolama kapasitesini artırma potansiyeline sahip olsa da bu teknolojilerin endüstriyel ölçekte kullanılabilir hale gelmesi için daha fazla gelişim ve ticari testlere ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkemizde 2B malzemelerin hidrojen depolama ve besleme sistemleri için geliştirilmesi, ekonomik kalkınmaya katkı sağlarken, ülkemizin teknolojik alanda da önemli bir atılım gerçekleştirmesine imkân tanıyabilecektir.

Yakın vadede kazanılması öncelikli olan bir diğer konu ise “Elektrokatalizör üretimi”dir. Özellikle proton değişim membranlarında kullanılan katalizörler dünyada çalışılan öncelikli konular arasındadır. Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde kullanılan katalizörler genellikle platin katkıdır. Katalizör, membrana veya gaz difüzyon tabakasına kaplanarak anottan beslenen hidrojenin elektron ve proton olarak ayrılmasını sağlamaktadır. Dünyadaki durumuna bakıldığında gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı ve mevcut ticari ürünlerin olduğu bir teknoloji olmadığı görülmektedir.

“Elektrolit/Membran üretim” konusu ise önceliklendirme çalışması sonucunda yakın vadede kazanılması gereken teknoloji konularından biri olarak belirlenmiştir. Yakıt hücresinde kullanılan membranların anyon değişim membran ve proton değişim membran gibi çeşitleri bulunmaktadır. Adlandırılmasından da anlaşılacağı üzere proton değişim membran protonların anottan katoda geçişine izin verirken anyon değişim membranı anyonların geçişine izin vermektedir. Kritiklik seviyesine bakıldığında kazanılmasının teknolojik yetkinliğe önemli bir katkısı olacağı görülmektedir.

Bir diğer yakın vade teknoloji konusunun ise “Farklı tasarım yakıt hücreleri (tübüler yapı)”

olduğu görülmektedir. Son dönemlerde yaygın olarak üzerinde çalışılan yakıt hücresi tipinin proton değişim membranlı yakıt hücresi olmasının yanı sıra birçok farklı yakıt hücresi çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları alkali yakıt hücresi, katı oksit yakıt hücresi, fosforik asit yakıt hücresi ve doğrudan metanol yakıt hücresidir. Kullanılan elektrolit tipi, yakıt tipi, verimlilik ve çalışma sıcaklıkları gibi özelliklerle birbirlerinden ayrılmaktadır. Dünyadaki durumuna bakıldığında mevcut ticari ürünlerin olmadığı bir teknoloji olduğu görülmektedir.

Yakın vadede kazanılması öncelikli bir diğer konu ise “Hidrojen sensörü geliştirilmesi” başlıklı konu olmuştur. Hidrojen sensörleri yakıt ikmal istasyonlarında, hidrojen depolama tanklarında ve yakıt hücresi sistemlerinde hidrojen basıncını takip edebilmek için kullanılmaktadır. Hidrojen yanıcı bir gaz olduğundan, sızıntı veya anormal durumların tespit edilmesi proses güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Geliştirilen sensörlerin, hidrojen gazına karşı duyarlılığının yüksek olması ve hızlı tepki vermesi, sıcaklık, basınç, nem gibi zorlu çalışma koşullarına dayanıklı olması, düşük enerji tüketimli olması, hafif olması, boyut olarak küçük olması ve yerli üretiminin mevcut olması beklenmektedir. Bu hususta, ülkemizde pilot ölçekte üretim altyapıları mevcuttur. Yakın vadede bu teknolojinin kazanılabileceği değerlendirilmektedir.

“Hücre bazında modelleme ve simülasyon” teknoloji konu önerisi ülkemizde yakın vadede kazanılması gereken bir konu olarak değerlendirilmiştir. Bu konuda dünya üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde konunun ömür devrinin ortalarında olduğu, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı teknolojiler arasında yer aldığı görülmektedir. Modelleme ve simülasyon yakıt hücresinin çalışma koşullarını optimize etmek, performansı ve verimliliğini artırmak ve tasarımları iyileştirmek için kritik bir araçtır. Modelleme sayesinde sistemdeki potansiyel tasarım hataları önceden tespit edilebilmekte ve prototip üretimine geçilmeden önce tasarımda iyileştirmeler yapılabilmektedir. Simülasyonlar ile, yakıt hücresinde farklı çalışma koşullarının etkileri incelenebilmekte ve bu sayede prototiplerin üretim süresinde kısalma ve maliyetlerinde önemli oranda düşme sağlanmaktadır. Ülkemizde bu kapsamda ilgili alt teknolojilere yönelik altyapılar mevcuttur ve kısa vadede bu teknoloji konusunun ülkemize kazandırılabilmesi düşünülmektedir.

Yakın vadede kazanılması öncelikli bir diğer konu ise “Kapatma plakalarının tasarımı ve üretimi” başlıklı konu olmuştur. Kapatma plakaları, yakıt hücrelerinin kritik bileşenlerinden birisidir. Kapatma plakaları yakıt hücresinin iç yapısını korurken, elektrotlar üzerine uygulanan basıncı optimize etmektedir. Bu plakalar yakıt ve oksitleyici gazların sızmasını engellemekte ve sistemin güvenli ve verimli çalışmasına olanak tanımaktadır. Kapatma plakaları bir yakıt hücresi yığınının ağırlık açısından önemli bir yer kaplamaktadır. Tasarım çalışmaları yapılırken olabildiğince hafif ve mukavemetli bir sıkıştırma plakası tasarımı yapılması beklenmektedir. Ülkemizde bu konu kapsamında yetişmiş insan gücü ve benzer teknolojilere sahip altyapılar bulunmaktadır. Bu hususta, bu teknoloji konusunun kısa vadede ülkemize kazandırılabilmesi değerlendirilmektedir.

“Katı hidrojen depolama malzemelerinin (Metal hidrürler ve kimyasal hidrürler) geri dönüşümü” konusu ise yakın vadede yer alan bir diğer teknoloji konusudur. Metal hidrür tanklar hidrojeni gözenekli yapı içerisine hapsederek katı olarak depolanmasına olanak sağlamaktadır. Hidrojen kullanılacağı zaman tank ısıtılır ve endotermik bir tepkime sonucu hidrojen metal hidrür yapısından ayrılarak dışarı salınır. Bu teknoloji konusunun dünyadaki durumuna bakıldığında mevcut ticari ürünlerin olduğu bir teknoloji olduğu görülmektedir.

Önceliklendirme çalışması sonucu yakın vadede kazanılması gereken bir diğer teknoloji konusu ise “Kompresörler için Hava Yatağı Kullanılması” konusudur. Yakıt hücresi kompresöründeki hava yatağı, dönen ve sabit yüzeyleri ayıran basınçlı bir gaz filmi oluşturarak düşük sürtünme ve yüksek hızlı dönüşler sağlayan bir bileşendir. Önceliklendirme çalışması sonucu dünyadaki durumuna bakıldığında ise ömür devrinin ortalarında olan, gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı bir teknoloji olduğu görülmektedir.

Yakın vade ile sonuçlanan teknoloji konuları arasında yer alan “Kontrol algoritmalarının oluşturulması” başlığı ile yer alan öneri yakıt hücresi teknolojisi için kısa vadede kazanılması zorunlu olan konulardan birisidir. Yakıt hücresi teknolojisi birden fazla alt sistem içeren bir

teknolojidir. Sistem yapısında birden fazla alt yapı olması sistemi kompleks hale getirirken tüm sistemin verimli çalışabilmesi için alt sistemlerin birbirleri ile etkileşimlerinin devamlı ve kontrollü bir şekilde izlenmesi ve yönetilmesi gerekmektedir. Bu hususta kontrol algoritmalarının oluşturulması yakıt hücresinin yakıt ve hava akışı, sıcaklık ve nem gibi çalışma koşullarını optimize etmek ve oluşabilecek arızaları tespit ederek önüne geçebilmek adına sistem maliyeti, teknoloji ve güvenlik açısından kritik bir öneme sahiptir. Hidromobil yarışları kapsamında ekipler kendi kontrol algoritmalarını oluşturmaktadır. Bu konunun hem hibrit hem de modüler sistemler bazında çalışılması gerekmektedir. Ayrıca, yapay zekâ destekli kontrol algoritmalarının çalışması da bu kapsamda büyük fayda sağlayacaktır. Yerli yazılım ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ulusal savunma ve enerji sektörlerinde bağımsızlık elde edilmesinde olanak tanıyacaktır.

Bir diğer yakın vade teknoloji konusu ise “Membran elektrot ünitesi (MEÜ) geliştirilmesi” konusudur. MEÜ biri anot biri katot olmak üzere iki gaz difüzyon tabakasından ve bu iki gaz difüzyon tabakasının ortasında yer alan membrandan oluşmaktadır. Kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği kısım olmakla birlikte en kritik bileşenlerdendir. Dünyadaki durumuna bakıldığında ömür devrinin başında olan ve mevcut ticari ürünlerin olduğu bir teknoloji olduğu görülmektedir.

Yakıt hücresinin içerisinde yer alan bipolar plakalar yakıt hücrelerinde gaz akışını yönlendirme, elektrik iletimi ve mekanik destek sağlamaları nedeni ile kritik bir bileşendir. Ticari olarak bipolar plakalar genellikle paslanmaz çelik, titanyum ve alüminyum gibi metallerden üretilmektedir. Bu metallerin doğrudan kullanımı yüzey direnci, korozyon ve gaz sızdırmazlığı gibi problemlere yol açabilmektedir. Bu nedenle, bu plakalara yakın vade konuları arasında yer alan “Metal plaka ön işlem ve kaplama” teknoloji başlığı ile bahsi geçen ön işlem ve kaplama prosesleri gerçekleştirilmektedir. Özellikle kaplama prosesi yüksek performanslı ve uzun ömürlü yakıt hücrelerinin üretimi için vazgeçilemez bir süreçtir ve bu sürecin dışa bağımlı kalmadan yürütülmesi yakıt hücresi teknolojisinin ülkemizde sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından kısa vadede kazanılması gereken bir teknolojidir.

Membran Elektrot Ünitesi (MEÜ), yakıt hücresinde elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bileşen olması ile kritik bir öneme sahiptir. Yakıt hücresinin performansı bu bileşene doğrudan bağlıdır. MEÜ’nün ana bileşenlerinden biri olan gaz difüzyon elektrotları firmaların kendi bilgi birikimleri, araştırmaları ve tecrübeleri ile oluşturdukları katalizör içeren bir mürekkep ile kaplanmaktadır. Bu mürekkebin doğru bir reçete ile hazırlanması yakıt hücresinin verimliliği, dayanıklılığı ve üretim maliyetleri açısından hayati bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda, yakın vade konuları arasında yer alan “MEÜ üretimi için mürekkep hazırlama” başlıklı teknoloji konusunun kısa vadede yakıt hücresi teknolojisinin ülkemizde ilerleme kaydedebilmesi ve bu sektörde adını duyurabilmesi için kazanılması gereken bir yetkinliktir. Eğer mürekkep üretiminde dış ülkelere bağımlı kalınır ise yerli yakıt hücresi üretiminin ekonomik anlamda sürdürülemez hale gelmesi olasıdır. Bu yetkinliğin kazanılması yüksek performanslı, uzun ömürlü ve verimli bir MEÜ üretimine olanak sağlayacak ve ülkemizi yenilenebilir enerji sektöründe küresel bir oyuncu haline getirecektir.

“Mikrojenerasyon yakıt hücresi konu başlığı” önceliklendirme çalışması sonucu yakın vadede yer alan teknoloji konularından biridir. Mikrojenerasyon yakıt hücresi aynı anda elektrik ve ısı üreten bir enerji sistemidir. Yüksek verimlilik ve düşük karbon salınımı gibi avantajları bulunmaktadır. Kritiklik açısından değerlendirildiğinde teknolojik yetkinliğe önemli katkısı olacağı öngörülmektedir. Dünyadaki durum değerlendirildiğinde ise ömür devrinin başında olan ve mevcut ticari ürünlerin olduğu bir teknoloji olduğu görülmektedir.

“Regülatör ve valf sistemlerinin geliştirilmesi” konusu ise bir diğer yakın vade teknoloji konusudur. Regülatörler basınç kontrolünün sağlanması, valfler ise yakıt akışının kontrolü açısından büyük önem taşımaktadır. Dünyadaki durumu değerlendirildiğinde ömür devrinin ortalarında olduğu, altyapı durumu değerlendirildiğinde ise benzer veya tamamlayıcı teknolojiler için altyapılar bulunduğu bilinmektedir.

Önceliklendirme çalışması sonucu yakın vadede yer alan teknoloji konularından bir diğeri ise “Sıvı beslemeli yakıt hücreleri” konusudur. Bu yakıt hücreleri doğrudan sıvı yakıtların kullanıldığı

veya sıvı elektrolitlerle çalışan sistemlerdir. Sıvı beslemeli yakıt hücrelerine doğrudan metanol yakıt hücresi, fosforik asit yakıt hücresi, alkali yakıt hücresi ve erimiş karbonat yakıt hücresi örnek verilebilir. Kritikliği değerlendirildiğinde ulusal güvenliğimize doğrudan etkisi bulunan, milli olarak kazanılması zorunlu bir teknoloji olarak belirlenmiştir. Ömür devrinin başında, mevcut ticari ürünlerin ve yetişmiş insan gücünün bulunduğu bilinmektedir.

“Sodyum borhidrürden hidrojen üretim sistemi geliştirilmesi” konusu ise bir diğer yakın vade teknoloji konularındandır. Sodyum bor hidrürden hidrojen üretiminin yüksek hidrojen içermesi ve reaksiyonun kolay kontrol edilmesi gibi avantajları bulunurken reaksiyon sırasında oluşan yan ürünlerin yönetiminin zorluğu ve hidrojen üretim hızının nispeten yavaş olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Kritikliği değerlendirildiğinde bu konunun da ulusal güvenliğimize doğrudan etkisi bulunan, milli olarak kazanılması zorunlu bir teknoloji olduğu görülmektedir. Mevcut ticari ürünlerin olduğu ancak yetişmiş insan gücünün yetersiz olduğu bilinmektedir. Temel araştırma fazı için üniversite laboratuvarı gibi altyapısı bulunduğu bilinmektedir.

“Termal kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi, simülasyonlar ile etkin ısı, yakıt ve enerji yönetimi sağlanması” teknoloji konu önerisi de ülkemizde yakın vadede kazanılması gereken bir konu olarak sonuçlanmıştır. Yakıt hücreleri sistemi çalışırken reaksiyonlar sonucu ısı açığa çıkmaktadır ve bu ısının sistemin verimli çalışabilmesi için dengeli bir şekilde dağıtılması gerekmektedir.

Sistemde aşırı ısınma, membranın zarar görmesine ve verimliliğin düşmesine neden olabilmektedir. Termal kontrol yöntemleri, bu sorunları önlemek için kritik bir araçtır. Simülasyon destekli ısı yönetimi, farklı koşullar altında sıcaklık profillerinin analiz edilmesini ve optimum çalışma koşullarının belirlenmesini sağlayacaktır. Yakıt yönetimi ve enerji tönemini de yakıt hücresi sistemi için kritik olan diğer parametrelerdir. Düzensiz yakıt yönetimi, hücrede verim kaybına ve sistem hatalarına yol açabilmektedir. Yakıt yönetim algoritmaları ve simülasyon sistemleri, yakıtın en verimli şekilde kullanılması ve atıkların minimuma indirilmesi için fayda sağlayacaktır. Sistemde enerji yönetimi için simülasyonlar kullanmak ise, sistemlerin farklı senaryolar altında nasıl tepki vereceğini öngörerek, en uygun kontrol algoritmalarının oluşturulmasına olanak tanıyacaktır. Bu alanda ülkemizde benzer teknoloji altyapıları mevcut olup, aynı zamanda nitelikli ve deneyimli insan kaynağı da bulunmaktadır.

Hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt hücresi sistemleri sürdürülebilir enerji üretimi ve temiz ulaşım için büyük bir potansiyel vaat etmektedir ancak hidrojenin güvenli, verimli ve yüksek yoğunlukta depolanması bu teknolojinin yaygınlaşmasındaki en kritik zorluklardan birisidir. Yakıt hücresinin günlük hayatımıza entegre olabilmesi için güvenli, yüksek yoğunluklu ve ekonomik hidrojen depolama çözümlerinin geliştirilmesi ve halihazırda var olan teknolojilerin ülkemize kazandırılması gerekmektedir. Bu hususta, yakın vade konuları arasında yer alan “Tip-3 tank üretimi yapılması”, “Tip-4 tank üretimi yapılması”, “Tip-5 tank üretimi yapılması” ve “Yüksek basınçlı hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi” başlıklı teknoloji konularının ülkemize kazandırılması önem arz etmektedir. Hidrojen, hacimsel olarak düşük yoğunluklu bir gaz olduğu için yüksek basınçta ve hafif tanklar ile depolanmalıdır. Tip -3, Tip-4 ve Tip-5 tankların her birisi hidrojenin yüksek basınçlar altında depolanmasına olanak sağlamaktadır. Hidrojen depolama sistemlerinde Tip-3 tanklar dayanıklı yapıları ile, Tip-4 tanklar hafif yapıları ile, Tip-5 tanklar ise gelecekteki potansiyelleri ile dikkat çekmektedir. Ayrıca, hidrojen depolama teknolojileri arasında katı hidrojen depolama başlığı altında listelenen ve teknoloji konuları arasında yakın vade konuları arasında yer alan “Metal hidrür içeren tankta hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi” de bu hususta kritiktir. Tip-3, Tip-4 ve Tip-5 tanklardan farklı olarak metal hidrür bazlı hidrojen depolama teknolojileri hidrojenin genellikle <10 bar gibi düşük basınçlar altında depolanmasına olanak tanımaktadır. Bu özelliği nedeni ile metal hidrür bazlı depolama tanklarında patlama ve sızıntı riski düşerken, hidrojen altyapısı daha güvenli hale gelmektedir. Sonuç olarak, hidrojen depolama teknolojileri altında yer alan tüm bu tanklar için ülkemizde geliştirme faaliyetlerinin yapılması ve yerli üretim kapasitesi oluşturulması, hidrojen ekonomisinde bağımsızlık, ekonomik büyüme, ihracat potansiyeli ve teknolojik gelişim açısından önemli avantajlar sağlayacaktır. Yerinde üretim ve dağıtım için hidrojen tankları olmadan hidrojen ekosisteminin gelişmesi mümkün olmayacaktır.

Yakın vadede yer alan teknoloji konularından bir diğeri ise “Yakıt geri dönüşüm stratejileri geliştirme” konusudur. Yakıt geri dönüşümü sistemde kullanılamayan hidrojeni tekrar sisteme besleyerek kullanılmasını sağlamaktır. Bu sayede yakıt için maliyet tasarrufu sağlanmaktadır. Dünyadaki durumu değerlendirildiğinde ömür devrinin ortalarında olan ve gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı teknolojiler arasında olduğu görülmektedir.

Yakın vadede kazanılması öncelikli bir diğer konu ise “Yakıt hücresi korozyon dayanımı yüksek bağlantı elemanı” başlıklı konu olmuştur. Yakıt hücreleri, yüksek sıcaklık, nem ve kimyasal reaksiyonlara maruz kalan sistemlerdir. Bağlantı elemanları (civata, somun, conta, bağlantı plakaları vb.), bu sistemlerin mekanik bütünlüğünü sağlamak, elektriksel iletkenliği artırmak ve uzun ömürlü olmasını temin etmek için kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, bu elemanların korozyona karşı dayanıklı olması kritik bir gerekliliktir. Korozyona dayanıklı bağlantı elemanlarının geliştirilmesi hem yakıt hücresi performansı hem de sistem güvenilirliği açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bağlantı elemanlarının ithal edilmesi, maliyetleri artırırken dışa bağımlılığı da beraberinde getirmektedir. Bu teknoloji kazanıldığında, bağlantı elemanlarının yerli üretimi mümkün olacak ve dışa bağımlılık önemli ölçüde azalacaktır.

“Yüksek basınçlı hidrojen depolanması (basınçlandırma sistemi)” konusu ise yakın vadede yer alan teknoloji konularından biridir. Basınçlı hidrojen Tip-3, Tip-4 ve Tip-5 tanklarda depolanabilmektedir. Bu tankların biririnden farkı Tip-3 tankın astarının metal, Tip-4 tankın astarının kompozit, Tip-5 tankın ise astarının olmamasıdır. Dünyadaki duruma bakıldığında ömür devrinin ortalarında olan, gelişmiş ülkelerin çalıştığı bir teknoloji olduğu ancak insan kaynağı açısından yetişmiş insan gücünün yetersiz olduğu görülmektedir.

“3D baskı grafen, CVD bazlı grafen tozu kullanılması teknolojilerinin geliştirilmesi” başlıklı depolama ve besleme sistemlerine yönelik sunulan teknoloji konu önerisi tüm paydaşların katılımı ile yapılan önceliklendirme çalışmalarının sonucunda uzak vade konuları içerisinde yer almıştır. Hidrojen depolamada 3D baskı grafen ve CVD bazlı grafen tozu kullanımı, grafenin yüksek yüzey alanı, hafiflik, dayanıklılık ve kimyasal stabilite gibi üstün özelliklerinden faydalanarak hidrojen depolama teknolojilerini daha güvenli ve verimli hale getirmeyi amaçlayan ileri düzey araştırma alanlarıdır. 3D baskı ile grafen kullanımı ve CVD bazlı grafen tozu teknolojileri hâlâ araştırma aşamasında olan teknolojilerdir. Bu nedenle, bu teknolojilerin ticari hale gelmesi, yeni malzeme mühendisliği ve üretim teknikleri gerektirecektir. Bu teknolojilerin araştırma, geliştirme ve üretim aşamalarının olgunlaşması, zaman alacak bir süreçtir ve bu nedenle uzun vadede sonuçlanması beklenen bir gelişme olarak değerlendirilmiştir.

Uzak vadede kazanılması değerlendirilen bir diğer konu ise “Amonyak ile hidrojen taşıma ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi” başlıklı konu olmuştur. Amonyak, hidrojen depolamak için potansiyel bir ortam olarak kabul edilmektedir ve gelecekte CO₂'siz enerji sistemlerini kolaylaştırma potansiyeline sahiptir. Amonyak, yüksek hacimsel hidrojen yoğunluğu, düşük depolama basıncı ve uzun vadeli depolama stabilitesi gibi hidrojen depolama için avantajlı özelliklere sahiptir[6]. Hidrojenin doğrudan depolanması ve taşınması, düşük yoğunluklu ve yanıcı bir gaz olması nedeniyle oldukça tehlikeli ve zordur. Amonyak, hidrojenin taşınması için güvenli ve verimli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Çünkü sıvı amonyak daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve daha kolay depolanabilmekte ve taşınabilmektedir. Ayrıca, amonyak, yapısal olarak stabil bir bileşen olup, daha düşük basınçta ve daha düşük sıcaklıklarda sıvı hale gelebilmektedir, bu da hidrojen taşımacılığını çok daha ekonomik hale getirecektir. Bu teknoloji, hidrojen ekonomisinin gelişimine önemli katkılar sağlayacaktır. Ancak tam olarak olgunlaşabilmesi için taşıma teknolojilerinin geliştirilmesi, altyapı yatırımlarının yapılması ve uluslararası taşımacılık ağlarının oluşturulması gibi süreçlere adapte olunması gerektiğinden, uzun vadede sonuçlanabilecek bir teknolojidir.

“DC-AC, DC-DC çeviriciler için yarı iletken malzeme geliştirilmesi” konusu ise uzak vadede yer alan teknoloji konularından biridir. Yarı iletken malzemelerin kullanılmasının yüksek verimlilik, küçük boyut, hafiflik ve düşük gürültü seviyesi gibi avantajları bulunmaktadır. Kritiklik durumuna bakıldığında kazanılmasının teknolojik yetkinliğe önemli bir katkısı olacağına karar verilmiştir. Dünyadaki duruma bakıldığında ise ömür devrinin ortalarında olan ve gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı bir teknoloji olduğu görülmektedir.

Önceliklendirme çalışması sonucu uzak vadede yer alan teknoloji konularından bir diğeri ise “Filtre geliştirme” konusudur. Filtre geliştirilmesi sistemin safsızlıklardan korunarak çalışma ömrünün artırılması, sistem verimliliği ve hassas bileşenlerin korunması açısından büyük öneme sahiptir. Dünyadaki duruma bakıldığında ömür devrinin ortalarında olan, gelişmiş ülkelerin çalıştığı bir teknoloji olduğu ancak insan kaynağı açısından yetişmiş insan gücünün yetersiz olduğu görülmektedir. Kritiklik durumuna bakıldığında ise kazanılmasının teknolojik yetkinliğe önemli bir katkısı olacağına karar verilmiştir.

“Gaz difüzyon tabakası geliştirilmesi” konusu ise bir diğer uzak vade teknoloji konularındandır. Yakıt hücresi sisteminde tek bir hücrede anot ve katot olmak üzere iki adet gaz difüzyon tabakası bulunmaktadır. Bu tabakalara veya membrana katalizör kaplanması sonucu yakıt hücresinde anot ve katot reaksiyonların gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Dünyadaki durumuna bakıldığında ömür devrinin ortalarında olan ve gelişmiş ülkelerin üzerinde çalıştığı bir teknoloji olduğu görülmektedir.

“Giyilebilir yakıt hücresi teknolojisi (DMYP vb.)” başlıklı teknoloji konu önerisi uzak vade ile sonuçlanan teknoloji konu önerileri arasında yer almıştır. Giyilebilir yakıt hücresi teknolojisi (DMYP vb.), taşınabilir enerji sağlamak amacıyla kullanılan bir teknolojidir ve genellikle giyilebilir cihazlar için enerji kaynağı olarak geliştirilmektedir. Ancak, geliştirme ve üretim süreçleri, henüz deneysel aşamalarda olan bu teknolojilerin ticari kullanıma geçmesi için gereken malzeme geliştirme, güvenlik, enerji verimliliği ve altyapı adaptasyon süreçlerinin uzun vadede zaman ile olgunlaşması beklenmektedir.

“Hidrojen depolama sistemlerinde karbon elyaf teknolojisi kullanılarak depolama tanklarının geliştirilmesi” konusu ise bir diğer uzak vade konusudur. Karbon elyafın hafiflik, dayanıklılık, yüksek basınç dayanımı gibi avantajları varken sızdırmazlık sorunları ve üretim zorlukları gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Dünyadaki durumuna bakıldığında ömür devrinin ortalarında olduğu görülmektedir. İnsan kaynağı açısından ise yetişmiş insan gücünün yetersiz olduğu belirlenmiştir.

Önceliklendirme çalışması sonucu uzak vadede yer alan teknoloji konularından bir diğeri ise “Hidrojen sülfür tutucu” konusudur. Hidrojen sülfür katalizörde zehirlenmeye ve performans kaybına neden olabilmektedir. Dünyadaki durumuna bakıldığında ömür devrinin ortalarında olduğu, altyapı açısından ise temel araştırma fazı için üniversite laboratuvarı gibi altyapılar mevcut olduğu görülmektedir.

Uzak vade ile sonuçlanan konular içerisinde “Kriyojenik olmayan koşullarda H₂ taşınması için hidrojenasyon ve dehidrojenasyon teknolojilerinin geliştirilmesi” başlıklı öneri yer almaktadır. Bu teknoloji, hidrojenin sıvı organik hidrojen taşıyıcıları veya kimyasal bileşikler içinde bağlanarak (hidrojenasyon) taşınmasını ve gerektiğinde tekrar serbest bırakılmasını (dehidrojenasyon) sağlamaktadır. Bu yöntem, hidrojenin düşük sıcaklıklarda ve yüksek basınç gerektirmeden taşınmasını ve depolanmasına olanak sağladığı için kriyojenik depolama gibi zorlu ve maliyetli çözümlere alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Ancak, bu teknolojinin yaygın olarak kullanılması için hidrojenasyon ve dehidrojenasyon süreçlerinde verimli ve düşük maliyetli katalizörlerin geliştirilmesi, dehidrojenasyon sırasında enerji tüketiminin azaltılması ve uluslararası taşımacılık ile güvenlik standartlarının belirlenmesi gibi konularda kapsamlı çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda, dünyada da ömür devrinin başında olan bu teknolojinin ticari olarak olgunlaşması uzun vadeli bir süreç olarak değerlendirilmektedir.

“Mikro yakıt pilleri” teknoloji konu önerisi ülkemizde uzak vadede kazanılması gereken bir konu olarak değerlendirilmiştir. Mikro yakıt pilleri, dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları ve hibrit pil şarj cihazları gibi yüksek enerji tüketen yeni nesil taşınabilir ürünler için benzersiz, yüksek enerji yoğunluklu güç kaynaklarıdır. Hem bağımsız hem de entegre şekilde kullanılabilen bu sistemler, 1-50 W arasında maksimum güç sağlayabilmektedir [24]. Mikro yakıt pillerinin ticari olarak yaygınlaşması, malzeme, üretim, yakıt depolama, entegrasyon, maliyet ve güvenlik gibi kritik konuları çözülmesini, Ar-Ge çalışmalarının tamamlanmasını ve üretim süreçlerinin olgunlaşmasını gerektirdiğinden, bu teknolojinin olgunlaşması uzun vadeli bir süreç olarak sonuçlanmıştır.

Uzak vadede yer alan teknoloji konularından bir diğeri “Nemlendirici geliştirme” konusudur. Yakıt hücresi sisteminde yer alan nemlendiricinin membranın nemlendirilmesi, su yönetimi, gaz difüzyon tabakasının korunması, elektrokimyasal reaksiyon hızının ve veriminin optimize edilmesi gibi birçok işlevi bulunmaktadır. Kritiklik olarak kazanılmasının teknolojik yetkinliğe önemli bir katkısı olacağı değerlendirilmiştir. Ayrıca dünyadaki durumunun ömür devrinin ortalarında ve gelişmişmiş ülkelerin çalıştığı teknolojiler arasında olduğu görülmüştür.

Uzak vade ile sonuçlanan bir diğeri konu başlığı “Seri üretim için membran/elektrolit kaplama” olmuştur. Ülkemizde yakıt hücresi membran/elektrot kaplama yöntemleri halen temel araştırma aşamasındadır. Mevcut durumda Ar-Ge kapsamında yürütülen bu çalışmaların, seri üretim sürecine geçişinin zaman alacağı ve ancak uzun vadede gerçekleşebileceği öngörülmektedir.

“Simülasyon ve matematiksel modelleme” konusu ise uzak vadede yer alan teknoloji konuları arasındadır. Yakıt hücresi sistemi geliştirirken her bir komponentin doğru şekilde çalıştığından emin olunmalıdır. Gerek araştırma geliştirme aşamasında olan bileşenlerin performans ve verim gibi analiz sonuçlarının ön bilgi sağlaması açısından gerekse gerçekleştirilen testlerin doğrulanması yapılması açısından simülasyon ve matematiksel modelleme aşaması kritik bir aşamadır. Dünyadaki durumuna bakıldığında ömür devrinin ortalarında olduğu görülmektedir. İnsan kaynağı açısından ise yetişmiş insan gücünün yetersiz olduğu belirlenmiştir.

Uzak vade ile sonuçlanan teknoloji konuları arasında “Su, ısı ve yakıt yönetiminin sinyal işleme metodu ile takibi” başlıklı konu önerisi yer almaktadır. Su, ısı ve yakıtın etkili bir şekilde yönetilebilmesi, yakıt hücresinin performans ve verimliliğini artırmak için kritik bir öneme sahiptir. Su, ısı ve yakıt yönetimine yönelik kontrol stratejileri geliştirmek, yakıt hücresi sisteminin güvenilirliğini artırmaya yardımcıdır. Su, ısı yönetimi gibi konular yıllardır üzerinde çalışılan konular olmakla birlikte sinyal işleme teknolojilerine yapay zekâ açısından bakıldığı zaman teknolojinin ömür devrinin başında olduğu görülmektedir.

Önceliklendirme çalışması sonucu uzak vadede yer alan teknoloji konularından bir diğeri ise “Yakıt hücresi için modül, hücre ve sistem testleri” konusudur. Hücre testinde tek hücre sistemi test edilmekte, modül testinde hücrelerin bir araya gelerek oluşturduğu kısa yığın sistemi test edilmekte, sistem testlerinde ise yakıt hücresi sisteminin tamamı test edilmektedir. Dünyadaki duruma bakıldığında ömür devrinin ortalarında olan, gelişmiş ülkelerin çalıştığı bir teknoloji olduğu, insan kaynağı açısından ise yetişmiş insan gücünün bulunduğu görülmektedir. Kritiklik durumuna bakıldığında ise kazanılmasının teknolojik yetkinliğe önemli bir katkısı olacağı sonucuna varılmıştır.

“Yakıt hücresi bileşenlerinin geri dönüşümü” başlıklı teknoloji konu önerisi yapılan önceliklendirme çalışması sonucunda uzak vade içerisinde yer almıştır. Günümüzde, membran elektrot ünitelerinin (MEÜ) geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar artmaktadır ve bu, yakıt hücrelerinin uzun vadeli kullanımını sürdürülebilir bir ekonomiye entegre etmeyi amaçlamaktadır. Platin grubu metallerin geri dönüştürülmesi, yakıt hücresi teknolojilerinin yaygınlaştırılması için kritik öneme sahiptir. Bunun nedeni, bu metallerin yüksek maliyetleri ve sınırlı kaynaklarıdır [25]. Dünya çapında da ömür devrinin başında olarak değerlendirilen bu konu hâlâ gelişim aşamasındadır. Bu süreçte, özellikle platin grubu metallerin geri dönüşümü için uygun teknolojilerin geliştirilmesi, süreçlerin ekonomik olarak sürdürülebilir hale getirilmesi, geri dönüşüm altyapısının oluşturulması ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik kazanması da zaman alacak önemli faktörlerdir. Bu nedenle, ülkemizde yakıt hücresi bileşenlerinin geri dönüşümünün tam anlamıyla yaygınlaşması ve verimli hale gelmesi uzun vadeli bir hedef olarak değerlendirilmektedir.

“Yakıt hücresi sızdırmazlık elemanı üretimi” konusu ise bir diğeri uzak vade teknoloji konusudur. Yakıt hücrelerinde sızdırmazlık elemanı olarak conta yaygın şekilde kullanılmaktadır. Sızdırmazlık elemanının asıl görevi gaz sızdırmazlığının sağlanması, basınç yönetimidir. Bu elemanın doğrudan yakıt hücresi performansına etkisi bulunmaktadır. Dünyadaki durumuna bakıldığında ömür devrinin ortalarında olduğu, altyapı açısından ise ilgili alt teknolojilere yönelik altyapılar mevcut olduğu görülmektedir.

Uzak vade ile sonuçlanan bir diğer teknoloji konu önerisi ise “Yakıt işlemcisi ile LPG’den hidrojenin yerinde elde edilmesi” başlıklı konu olmuştur. Bu yöntemde, LPG gibi fosil yakıtlar, bir yakıt işlemcisi (ing. fuel processor) kullanılarak hidrojen ve diğer yan ürünlere dönüştürülmektedir. Yakıt hücresi sistemlerinde hidrojen depolama ve besleme sistemlerinin dezavantajları arasında, enjektör ve depolama tankı gibi enjeksiyon sistemi bileşenleri için alan gereksinimi, hidrojen sızıntısı ve hidrojen tankı patlama riski bulunmaktadır. Bu problemleri çözmek amacıyla, gerçek zamanlı besleme için araç içi hidrojen üretim sistemleri geliştirilmiştir [26]. Ancak, bu yöntemin de bazı çevresel ve ekonomik zorlukları bulunmaktadır çünkü LPG’nin reformlanması sırasında karbon salınımı olabilir ve bu da sürdürülebilirlik açısından bazı endişelere yol açabilecektir. Bu teknoloji, dünyada da ömür devrinin başında olarak değerlendirilen, henüz olgunlaşmamış ve geniş çapta uygulanabilir hale gelmemiş bir teknolojidir. Bu nedenle, teknolojinin olgunlaşması ve yaygınlaşması uzun vadede gerçekleşebilecek bir süreçtir.

Uzak vadede yer alan teknoloji konularından bir diğeri ise “Yüksek güçlü yakıt hücresi sistemlerinin geliştirilmesi (1 MW ve üzeri)” konusudur. Hali hazırda yakıt hücresi sistemleri geliştirme çalışmaları yürütülmektedir ancak bu sistemler belirli elektrik gereksinimlerini karşılamak için yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple yüksek güçlü yakıt hücresi sistemlerinin geliştirilmesi ilerleyen zamanlar için kritik bir konu haline gelecektir. Dünyadaki duruma bakıldığında ömür devrinin ortalarında olan, gelişmiş ülkelerin çalıştığı bir teknoloji olduğu ancak insan kaynağı açısından yetişmiş insan gücünün yetersiz olduğu görülmektedir.

“Yüksek sıcaklık yakıt pilleri için sızdırmazlık elemanı üretimi” uzak vade ile sonuçlanan bir diğer konu önerisi olmuştur. Yüksek sıcaklık yakıt pilleri (örneğin katı oksit yakıt pilleri (SOFC)) yüksek sıcaklıklarda çalıştıkları için, sistemin içinde gazların sızmasını önlemek amacıyla dayanıklı sızdırmazlık elemanlarına ihtiyaç duymaktadırlar. Sızdırmazlık elemanlarının üretimi, bu tür yakıt pillerinin performansını artırmak, güvenliğini sağlamak ve uzun ömürlü olmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Bu teknolojilerin yerli üretimi, dışa bağımlılığın azaltılması için faydalı olacaktır.

Teknoloji envanteri çalışması ile ülkemizde Yakıt Hücresi Teknolojisi için dünya ve ülkemizdeki mevcut durumunun ve bu alanda yapılması gerekli çalışmaların alan uzmanları ile değerlendirilerek yol haritasının oluşturulmuştur. Sonuç olarak, Ülkemizin Yakıt Hücresi Teknolojisi konusunda çoğunlukla THS 1-4 düzeyinde olduğu görülmüştür. Bu seviyelerde teknolojinin sadece teorik aşamada olmadığı, yapılan bilimsel çalışmalar ile laboratuvar düzeyi çalışmaların olduğu, ancak henüz endüstriyel veya ticari ölçekte uygulanabilir hale gelmediğini göstermektedir. Bu teknolojinin ülkemize kazanımı için THS 4-6 seviyesi çalışmaların gerçekleştirilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, enstitü-araştırma kurumları iş birlikleri ile matematiksel modellerin geliştirilmesi, simülasyonların yapılması ve prototip oluşturulması beklenmektedir.

Ülkemizde Yakıt Hücresi Teknolojisi Yol Haritası için belirlenen kriterler doğrultusunda yapılan önceliklendirme çalışmasının çıktılarına göre teknoloji kazanım çalışmalarının ivedilikle başlatılmasının önemli olduğu değerlendirilmektedir.

11. REFERANSLAR

- [1] Kompozit OTAĞ Sonuç Raporu, T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı, Ankara, 2025.
- [2] A. Gabus and E. Fontela, "World Problems, an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL", Geneva, Switzerland: Battelle Geneva Research Centre, 1972.
- [3] T. Saaty, "The analytic hierarchy process", McGraw-Hill, New York, 1980.
- [4] C.-L. Hwang and K. Yoon, "Multiple attribute decision making: Methods and applications", Springer-Verlag, Heidelberg, 1981.
- [5] L. Pérez, "SynerHy", Feb. 10, 2022. [Çevrimiçi]. Available: <https://synerhy.com/en/2022/02/hydrogen-storage-methods>. [Erişildi: 2025].
- [6] M. Aziz, A. T. Wijayanta, and A. B. D. Nandiyanto, "Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization", *Energies*, cilt 13, no. 12, 2020.
- [7] S.-Y. Lee, J.-H. Lee, Y.-H. Kang, J.-W. Kim, K.-J. Lee, and S.-J. Park, "Recent Progress Using Solid-State Materials for Hydrogen Storage: A Short Review. Processes", *Processes*, cilt 10, no. 2, p. 304, 2022.
- [8] Hyfindr, "Hydrogen tank - types, technologies and applications", 15 01 2023. [Çevrimiçi]. Available: <https://hyfindr.com/en/hydrogen-knowledge/hydrogen-tank>.
- [9] L. Vidas, R. Castro, and A. Pires, "A Review of the Impact of Hydrogen Integration in Natural Gas Distribution Networks and Electric Smart Grids. *Energies*", *Energies*, cilt 15, no. 9, 2025.
- [10] A. G. Rao, F.Yin and H.G.C. Werji, "Energy transition in aviation: The role of cryogenic fuels", *Aerospace*, cilt 7, no. 12, 2020.
- [11] A. Patonia and R. Poudineh, "Hydrogen storage for a net-zero carbon future", April 2023. [Çevrimiçi].
- [12] E. M. Dematteis, N. Berti, F. Cuevas, M. Latroche, and M. Baricco, "Substitutional effects in TiFe for hydrogen storage: a comprehensive review"» *Materials Advances*, cilt 2, no. 8, 2021.
- [13] "Making and breaking NH3 Ammonia and its place in the low carbon economy", *Decarbonisation Technology*, 2022.
- [14] E. Parliament, "Directive (EU) 94/9/EC of the European Parliament and the Council of 23 March on the approximation of the laws of the Member States concerning equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres", *Official Journal of the European Parliament*, 1994.
- [15] "Hydrogen Storage Tanks: the Types, the Pitfalls, and the Solutions", *Didion's Mechanical*, 2021 March 2021. [Çevrimiçi]. Available: <https://didionvessel.com/hydrogen-storage-tanks/>.
- [16] Y. Jia, R. Zhang, T. Zhang, and Z. Fan, "Coordinated Control of the Fuel Cell Air Supply System Based on Fuzzy Neural Network Decoupling", *ACS Omega*, cilt 6, no. 50, pp. 344438-34446, 2021.
- [17] T.Vidović, I. Tolj, G. Radica and N. B. Čoko, "Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Balance of Plant and Performance Simulation for Vehicle Applications", *Energies*, cilt 15, no. 21, pp. 8110-8110, 2022.

- [18] W. Yu, X. Sichuan and H.S. Ni, "Air Compressors for Fuel Cell Vehicles: A Systematic Review", SAE International Journal of Alternative Powertrains, cilt 4, no. 1, pp. 115-122, 2015.
- [19] Z. Yuanyang, L. Yunxia, L. Guangbin, Y. Qichao, L. Liansheng and H. Zhicheng "Air and Hydrogen Supply Systems and Equipment for PEM Fuel Cells: A Review", International Journal of Green Energy, cilt 19, no. 4, pp. 331-348, 2021.
- [20] H. Yuan, H. Dai, P. Ming, J. Zhan, X. Wang and X. Wei "A Fuzzy Extend State Observer-Based Cascade Decoupling Controller of Air Supply for Vehicular Fuel Cell System", Energy Conversion and Management, cilt 236, pp. 114080-114080, 2021.
- [21] S.M.H. Hashmi, "Cooling Strategies for PEM FC Stacks", 2010
- [22] CB, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/plate-heatexchangers/brazed-plate-heat-exchangers/cb/>.
- [23] S. Borkovski and M. Erkechova, "Control Approaches of PEM Fuel Cells: A Review", STUME Journals, cilt 3, pp. 126-131, 2020.
- [24] A. Kundu, J.H. Jang, J.H. Gil, C.R. Jung, H.R. Lee, S.H. Kim, B. Ku and Y. S. Oh, "Micro-fuel cells—Current development and applications", cilt 170, no. 1, pp. 67-68, 2007.
- [25] P. A. García-Salaberri, "Proton exchange membranes for polymer electrolyte fuel cells: Analysis of perfluorosulfonic acid and aromatic hydrocarbon ionomers", Sustainable Materials and Technologies, cilt 35, p. e00727, 2023.
- [26] S. Woo, S. Baek and K. Lee, "On-board LPG reforming system for an LPG-hydrogen mixed combustion engine", International Journal of Hydrogen Energy, cilt 45, no. 21, pp. 12203-11215, 2020
- [27] M. Aziz, A.T. Wijayanta and A.B.D. Nandiyanto, "Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization", Energies, cilt 13, no. 12, 2020.

Ek : Katılımcı Listesi

No	Kurum/Üniversite/Firma
1	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
2	Armelsan Enerji
3	Aselsan
4	Aspilsan
5	Atatürk Üniversitesi
6	Atılım Üniversitesi
7	BASDEC
8	Biasis Enerji
9	BMC Otomotiv A.Ş.
10	Boğaziçi Üniversitesi
11	BPLAS
12	BTSO
13	BUTEKOM
14	Coşkunöz Arge
15	Çukurova Üniversitesi
16	FNSS
17	Ford Otosan
18	Gazi Üniversitesi
19	Gebze Teknik Üniversitesi
20	Güney Marmara Kalkınma Ajansı
21	Hacettepe Üniversitesi
22	Hema Endüstri
23	İGSAŞ
24	İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi
25	İnci GS Yuasa
26	İskenderun Teknik Üniversitesi
27	Kim Teknoloji A.Ş.
28	Koç Üniversitesi
29	Lentatek
30	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
31	Ondokuz Mayıs Üniversitesi
32	Otokar
33	Roketsan
34	Sabancı Üniversitesi
35	SASAD
36	STM
37	TEI
38	Tenmak Boren
39	Teksis
40	Tusaş
41	TÜBİTAK MAM
42	TÜBİTAK SAGE
43	Tümosan Motor ve Traktör Sanayi
44	Tüpraş
45	Yıldız Teknik Üniversitesi

* Kurum/Üniversite/Firma adları alfabetik sırayla verilmiştir.



YAKIT HÜCRESİ OTAĞ

SONUÇ RAPORU

EKİM 2025

TASNİF DIŞI