

# YAKIT HÜCRELERİ VE ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE GELECEK ÖNGÖRÜSÜ

Melih Soner ÇELİKTAŞ\*

EBİLTEM, Ege Üniversitesi Bilim, Teknoloji  
Uygulama ve Araştırma Merkezi, İzmir  
soner.celiktas@ege.edu.tr

Günnur KOÇAR

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü,  
İzmir  
gunnur.kocar@ege.edu.tr

## ÖZET

Teknoloji öngörüsü; gelecekte en büyük ekonomik ve sosyal faydaları sağlayabilecek stratejik araştırma ve yeni teknoloji alanlarının tanımlanması amacıyla bilim, teknoloji, ekonomi ve toplumun uzun dönemli geleceğine sistematik bir biçimde bakma sürecidir. Türkiye'de 2050 yılı göz önüne alınarak gerçekleştirilen bu çalışmanın amacı, yakıt hücreleri ve enerji depolama teknolojileri geleceğinin öngörülerek belirlenmesidir. Bu çalışmada bibliyometrik analiz, GZFT analizi ve iki türlü Delphi anketi olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmıştır. Öncelikli olarak geriye dönük literatürün belli bir sistematik dahilinde araştırıldığı bibliyometrik çalışma, ardından uzman kişilerin görüşlerinin alındığı ve GZFT analizinin gerçekleştirildiği karşılıklı görüşmeler ve son olarak uzman sorgulamasını kapsayan iki aşamalı Delphi anketi uygulanmıştır. Bu çalışma, temel araştırmadan toplumsal etkisine kadar, yakıt hücreleri ve enerji depolama teknolojilerine yönelik gelecek konusunda kapsamlı bir görüş ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Yakıt hücresi, enerji depolama, teknoloji öngörüsü, Delphi yöntemi

## A Foresight Study On The Fuel Cells & Energy Storage Technologies

## ABSTRACT

Foresight is the process involved in systematically attempting to look into the longer-term future of science, technology, the economy, environment and society with the aim of identifying the emerging generic technologies and the underpinning areas of strategic research likely to yield the greatest economic and social benefits. The scope of this study was to eliciting the fuel cells & energy storage technologies in Turkey projected for the year 2050. Three different methods are used in this study which are bibliometric analysis, SWOT analysis and two-round Delphi survey. Bibliometric study was conducted in order to investigate the literature, one-to-one meetings were organized with the experts yielding the data for SWOT analysis and finally the two-rounded Delphi questionnaire was designed by using the results obtained from the bibliometric and SWOT analysis. This study was able to give a comprehensive view of the future of the fuel cells & energy storage technologies from basic research to social impact.

**Keywords :** Fuel cell, energy storage, technology foresight, Delphi

\* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 25.03.2010  
Kabul tarihi : 30.09.2010

## GİRİŞ

**D**ünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılamakta olan fosil yakıt rezervleri enerjiye olan talep dolayısıyla hızla tükenmektedir [1]. Enerji kaynaklarının sınırlı olması, coğrafi olarak belli bölgelerde yoğunlaşması, artan çevre ve iklim değişikliği kaygıları günümüzde enerji ve çevreyi birbirinden ayrılmaz hâle getirmektedir[2]. Dünya genelinde enerji tüketimi oranlarına bakıldığında, ülkelerin sosyo-ekonomik gelişmişliklerine göre değişiklikler gösterdiği tespit edilmektedir [3].

Dünyada 1970'lerde yaşanan petrol krizinden sonra büyük bir gelişim gösteren yenilenebilir enerjilerin, enerjide kaynak çeşitliliğine gidilebilmesi açısından büyük önem taşımaya başladığı ifade edilmektedir [4]. Uluslararası Enerji Ajansı'nın raporuna göre [5], dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi son on yılda ortalama % 7,4'lük bir artış göstermekte ve ABD, Almanya, Brezilya ve Japonya dünya üretiminin % 52'sini gerçekleştirmektedir.

Bugün, hem sürdürülebilir kalkınmanın gereklerini yerine getiren, hem de çevresel tehlikelerle enerji üretim ve tüketiminden kaynaklanan ekonomik ve sosyal maliyetleri en aza indirgeyen bir strateji oluşturmak için, çevresel kısıtlar, ekonomik ve siyasi kısıtlarla birlikte düşünülmektedir. Bu durum, en ileri teknolojileri kullanan ve belirgin biçimde etkin ekonomilere sahip olan ülkeler için de geçerlidir [6]. Öngörü, stratejik alanlarının tanımlanması amacıyla bilim, teknoloji, ekonomi ve toplumun uzun dönemli perspektifine bakmayı içeren sistematik bir süreç” şeklinde tanımlanmaktadır. Hangi geleceğe ulaşacağımız ise bir bakıma bugünkü aldığımız kararlara bağlıdır. Dolayısıyla, öngörü, bugünkü seçimlerin geleceği şekillendirebileceği hatta yaratabileceği olgusuyla, geleceğe yönelik bilinçli bir aktif yaklaşımdır [7].

Enerji politikalarının belirlenmesinde en önemli unsur ülkenin enerji arz ve talebinin doğru olarak belirlenmesidir. Bu bakımdan ülkenin kalkınma planlarının hazırlanmasında özellikle de enerji yatırımlarında bu durum mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Gönencin toplumun tüm kesimlerinde değer bulabilmesi için ülkenin kalkınma stratejilerinin doğru hazırlanması gerekmektedir.

Teknoloji öngörüsü, bir ülkenin uzun dönemli hedefleri doğrultusunda en büyük ekonomik, toplumsal ve çevresel faydayı yaratabilecek stratejik teknolojilerin belirlenmesine yönelik bir süreçtir. Toplumun ilgili tüm kesimlerinin (politika yapımcıların, kamu araştırma kuruluşlarının, özel kesimin, üniversitelerin ve sivil toplum kuruluşlarının) bilim ve teknolojiden beklentilerinin yansıtıldığı ve bu kesimlerin bilgi birikimlerinin paylaşıldığı bu süreçte, ülkenin mevcut konumu ve dünya ölçeğinde teknolojik değişim süreçleri de göz önüne alınarak stratejik teknolojiler belirlenmektedir.

Teknoloji öngörüsü çalışması ile saptanan stratejik teknolojilerin geliştirilmesi ve etkin bir şekilde uygulanmasını sağlamaya yönelik öneri ve önlemler, bilim ve teknoloji politikalarının temelini oluşturmaktadır. Bu niteliğiyle teknoloji öngörüsü, bilim ve teknoloji politikalarının tasarlanması ve uygulamasında büyük önem kazanmakta, son yıllarda Avrupa Birliği başta olmak üzere pek çok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de, yakıt hücre teknolojileri ve enerji depolanması konularında; bilim, teknoloji, ekonomi, çevre ve toplum geleceğiyle ilgili uzun dönemli beklentilerin dikkate alınarak, ülkeye gelecekte en fazla ekonomik, çevresel ve sosyal yararlar sağlayacak yenilenebilir enerji teknolojilerinin ve stratejik araştırma alanlarının belirlenmesidir. Geleceği tahmin ederek şekillendirmeye yönelik olarak yapılan bu öngörü çalışmasında, bir dizi tekniğin uygulandığı bir çalışma olmaktan çok, bilim toplumu, araştırmaların kullanıcıları, politika tasarımcıları ve karar vericiler arasında iletişim, etkileşim ve değerlendirmeleri içeren bir süreç işletilmiştir. Ayrıca çalışmayla yeni gelişen ve birden fazla ekonomik ve toplumsal sektörde atılım yapma imkanı sağlayabilecek olan ilgili teknolojik alanlar tanımlanmıştır. Yapılan çalışmayla bugünkü ve gelecekteki sorunların çözümü için gerekli olan bilimsel ve teknolojik altyapıyı oluşturacak stratejik (temel araştırmalar vb.) araştırma konuları ortaya konulmuş, yeni teknolojilerin, sadece ekonomi ve sanayi üzerindeki etkileri değil, aynı zamanda sosyal yararları (ve zararları) da dikkate alınmıştır.

## LİTERATÜR ÖZETİ

1990'lardan günümüze, teknolojiye yaşanan hızlı gelişmeler ve küreselleşme, değişik uluslar üzerinde çok farklı etkiler yaratmaktadır. Ulusal ve özellikle teknoloji üzerine olan politikalar, yönetimin pasif katılımıyla bu çağda mümkün görünmemekle birlikte, kaynakların daha verimli kullanılabilmesi adına planlı aktif yöntemlere geçilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Teknoloji ile bütünleşmiş bilimin yeryüzündeki yaşama giderek egemenlik kurduğu bir çağda yaşanmaktadır [9]. Ülkelerin geleceklerini biçimlendirme endişeleri veya istekleri tarih boyunca hep olagelmıştır. Bu istek veya endişelerin kaynağı lider olma, olası tehlikeler, toplumsal refah gibi güdüler olabilmektedir. Toplumsal geleceğin biçimlendirilmesini bir “lider” isteyebileceği gibi bu, toplumun ortak bir hedefi olarak da ortaya konulabilmektedir [9,10].

Yakıt hücreleri; temiz, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip enerji dönüşüm teknolojileri olarak ifade edilmektedir [11]. 1838'de William Robert Grove tarafından keşfedilmiş ve “Grove Hücresi” adı verilmiştir [12]. Kimyager Mond ve Charles Langer tarafından 1889 yılında

ilk hidrojen-oksijen yakıt hücresi üretilmiştir [13]. Francis Bacon'ın 1958 yılında gerçekleştirdiği yakıt hücresi çalışması ile uzaya kadar uzanan bir yolculuk başlamıştır [14]. 1960'lı yıllarda ilk yakıt hücreli traktör yapımıyla kara ulaşımında kullanıma sunulmuş; 1980'li yıllarda tren, 1990'lı yıllarda denizaltı ve uçak ile gelişim göstermiştir. Son yıllarda kara araçlarında ve güç santrallerinde yaygın araştırma ve uygulama konusu olarak günümüze kadar gelmiştir [11]. Yakıt hücreleri, geleneksel yakıt kaynaklarının yerini alacak alternatiflerden biri olarak gösterilmektedir [15].

Dünyanın çeşitli ülkelerinde gerçekleştirilen öngörü çalışmalarında kritik teknolojiler olarak belirlenen alanların içerisinde yer alan enerji tüm dünya için öncelikli araştırma alanı olarak kabul edilmektedir. Japonya'da her beş senede bir gerçekleştirilen öngörü çalışmalarının sekizincisinde [16], enerji ve kaynaklar konu başlığı altında yenilikçi nükleer santraller, temiz kömür teknolojileri ve yenilenebilir enerjiler olarak üç ana tema tanımlanmış, hidrojen enerji sistemleri ve yakıt hücrelerinde enerji dönüşümü, depolama ve kullanım, son eğilimlerde kısmen dikkate alınarak tasarlanmıştır. Enerji ve kaynaklar başlığı altında belirlenen temalarda önem derecesi ve beklentiler doğrultusunda karşılaştırma yapıldığında hidrojen enerjisi, yakıt hücreleri ile verimli enerji dönüşümü ve kullanımı başta yer alırken bunları, biyokütle ve atıkları içeren geri dönüşüm sistemleri izlemiştir. Beklentilerin en yüksek olduğu alan ise yakıt hücreleri olarak belirlenmiştir. Yenilenebilir enerjilere ait göze çarpan diğer başlıklar ve teknolojik olarak gerçekleşme hedef sürelerine bakıldığında; orta ve büyük ölçekli elektrik santralleri için molten karbonatlı yakıt hücreleri (2012), otomobillerde hidrojen yakıtının kullanılması (2013), güneş ısı kullanılarak çok yüksek sıcaklıklarda hidrojen üretimi (2014), kömürden çevreye CO<sub>2</sub> yayılımı olmaksızın hidrojen üretimi (2016), yapay fotosentez teknolojileri (2030) olduğu görülmektedir [17].

Amerika'ya bakıldığında, 1920'lerde Amerikan ordusu için kritik öneme sahip ürün ve malzemelerde bağımlı kalmamak adına önem verilmeye başlandığı görülmektedir [18]. 1990'lara gelindiğinde federal hükümete bağlı birçok kuruluşun ve sivil inisiyatiflerin ortak katılımıyla hazırlanan ulusal kritik teknolojiler raporu gelecekte özellikle hangi teknolojilere önem verilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır [19]. Buna göre Amerika için seçilmiş altı kritik teknoloji alanı 1991 yılında revize edilerek yediye çıkarılmıştır. Belirlenen kritik teknolojiler içerisinde yer alan enerji alanı içerisinde; ileri güç depolama teknolojileri, güç elektroniği, kapasitörler, yakıt hücreleri (Proton değişimli membran, fosforik asit, molten karbonat, katı oksit yakıt hücreleri gibi), güç sağlayıcılar ve yenilenebilir enerjiler (güneş enerjisi termal sistemler, rüzgar enerjisi, fotovoltaik sistemler ve biyokütle yakıtları) gibi alanlar yer almaktadır [20].

Amerika Enerji Ofisinin 2030 yılı projeksiyonlarını da içerecek şekilde Haziran 2008'de yayımladığı "yıllık enerji görünümü" raporuna göre [21], artan enerji fiyatları ve yavaşlayan büyüme nedeniyle yenilenebilir enerjilerin kullanımının artması öngörülmektedir. Yenilenebilir enerjilerden elektrik üretiminin yıllık ortalama % 2,2 büyümeyle, 2006 yılındaki 385 milyar kWh'den 2030 yılında 656 kWh'a ulaşması beklenmektedir. (AEO, 2008).

Yenilenebilir portfolyo standartları (RPS) olarak ifade edilen kanun, tüketicilere satılan elektriğin belli bir yüzdesinin yenilenebilir kaynaklardan gelmesini öngörmektedir. Bu şart birçok eyalette kullanılan bir yaklaşım ve 2002'den beri Senato'dan geçen taslak kanunların hepsinde yer almaktaydı. RPS kanunlaşarak federal hükümetin satın aldığı elektriğin 2007'de % 3'ünün ve 2013'te % 7,5'unun yenilenebilir kaynaklardan tedarik edilmesi şeklinde bir şart getirilmiştir [22]. Mevcutta dört farklı eyalette kullanılan RPS sisteminin diğer eyaletlerde de kurularak yayılması beklenmektedir [21]. RAND şirketi araştırmacıları tarafından yapılan bir başka araştırmada ise, 2025 yılına kadar elektrik üretimi ve taşıtlarda kullanılan yakıtların % 25'inin yenilenebilir enerjilerden karşılanacağı ifade edilmektedir [23].

Avrupa Birliğine bakıldığında, araştırmaların genellikle teknoloji ağırlıklı çalışmalar olduğu görülmektedir. AB çerçeve programlarında enerji projeleri uzun soluklu sosyo-ekonomik araştırmalar şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmaların bitiminde ortaya çıkan sonuçlar politikaların oluşturulmasında kullanılmaktadır. Enerji alanında SAPIENTIA (Enerji modelleme projesi), WETO-H<sub>2</sub> (Dünya enerji sistem analiz raporu), EurEnDel (Delphi anketi), VLEEM (Uzun dönemli kestirim yaklaşımı) gibi özel modeller ve öngörü metodolojileri geliştirilmektedir. Bu model ve yöntemler, teknolojik gelişim ve sürdürülebilir kalkınmayla ilgili olan AB politikalarının potansiyel etkisinin değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır.

EurEnDel projesi enerji sektörüne yönelik gelecekteki gelişmeleri öngörmek amacıyla, Avrupa'da gerçekleştirilen en kapsamlı Delphi çalışması olarak ifade edilmektedir. Uzman görüşlerine dayalı enerji üzerine Ar-Ge önceliklerinin belirlendiği projeye, 48 ülkeden 3400'den fazla enerji uzmanı katılmıştır. Önümüzdeki yirmi beş yıla ışık tutacak olan çalışma iki aşamalı Delphi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir [24].

Türkiye'nin ilk kapsamlı bilim ve teknoloji politikası çalışması 1983 yılında gerçekleştirilmiştir. "Türk Bilim Politikası:1983-2003" başlıklı çalışmanın en önemli sonuçlarından biri, "Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu" (BTYK) olmuştur [25]. 13 Aralık 2000 ve sonrasında 24 Aralık 2001 tarihli, BTYK altıncı ve yedinci toplantıları neticesinde, Cumhuriyetimizin 100. yılında Atatürk'ün işaret

ettiği muasır medeniyet seviyesine ulaşmak üzere, Ulusal Bilim ve Teknoloji Politikaları: 2003-2023 Strateji Belgesi'nin hazırlanması kararlaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde, Türkiye'nin enerji ve çevre alanındaki 2023 hedefi, geleceğin enerji pazarlarında yarışabilecek enerji teknolojileri geliştiren, su kaynaklarını sürdürülebilir şekilde yönetecek ve kirliliği önleyecek teknolojilere sahip olan bir ülke konumuna gelmektir. Enerji ve çevre kapsamında aşağıdaki teknoloji alanlarına odaklanılması önerilmiştir. Ayrıca öncelikli olarak üzerinde çalışılması gereken teknoloji alanları olarak; Hidrojen teknolojileri, yakıt hücreleri, enerji depolama teknolojileri, güç elektroniği ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin öne çıktığı görülmektedir [8,25,26].

## YÖNTEM

Türkiye'de geleceğe yönelik yenilenebilir enerji teknolojilerini açığa çıkarmak için gerçekleştirilen bu çalışma esas itibarıyla üç inceleme altında ele alınmaktadır. Öncelikle, Türkiye'nin yakıt hücre teknolojileri ve enerji depolama konularındaki durumu, geriye dönük çok yönlü literatürün belli bir sistematik dahilinde araştırıldığı bibliyometrik çalışma [27], ardından belirlenen uzman kişilerin görüşlerinin alınarak SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) analizinin [28] gerçekleştirildiği karşılıklı görüşmeler ve son olarak kantitatif bir çalışma kapsamında; kamu, üniversite, özel sektör ve sosyal taraflardan yenilenebilir enerji teknolojileri konusunda çalışan kişilere iki aşamalı olmak üzere Delphi anketi uygulanmıştır (Şekil 1).

Gerçekleştirilen Delphi sorgulaması, geniş bir uzman grubuyla, öngörülen teknolojik gelişmeler ve etkileri üzerine yapılan, iki turlu bir anket çalışması olarak tanımlanabilmektedir. Teknoloji öngörüsünün ilk başladığı Japonya'da, bugüne kadar sekiz kez [16] yürütülen teknoloji öngörü çalışmalarının hepsinde, Delphi sorgulaması yöntemi kullanılmıştır.

Adımı eski Yunan'da, geleceğe ilişkin kehanetlerde bulunan ünlü bir Yunanlı kahin'in yaşadığı yerden alan bu teknik, bilimsel araştırmalarda yaklaşık elli yıldır yönetim, tıp, askeri konular ve eğitimin çeşitli alanlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır [29,30]. Delphi tekniğinin, 1950'li yıllarda ABD'de RAND firmasında çalışan Olaf Helmer ve Norman Dalkey adındaki iki araştırmacı tarafından özellikle askeri konulara ilişkin çalışmalarda bulunmak amacıyla geliştirildiği ve bu araştırmacıların Delphi tekniği yönteminin geliştirilmesinde öncü katkılarda buldukları ifade edilmektedir [31-34].

Delphi tekniği katılımı gizlilik, grup tepkisinin istatistiksel analizi ve kontrollü geri besleme olmak üzere üç özelliğe sahiptir [35]. Delphi tekniği, özellikle politik ya da duygusal

ortamlarda karar verme durumunda kaldığında veya kararların güçlü gruplar tarafından etkilenme olasılığının olduğu durumlarda kullanılmaktadır [36].

Delphi tekniğinin kullanımında, genellikle uzmanlara uygulanan ardışık anketler yer almaktadır. Her bir uygulama sonrasında uygulama sonuçları katılımcılara iletilmektedir [37]. Delphi tekniğinin uygulanması, odaklaşılan alanda uzman olan kişilerin [36] ya da hedef kitle temsilcilerinin [38] problem durumuna ilişkin yaklaşımlarını, bakış açılarını ortaya çıkarmaya, incelemeye ve uzlaşma sağlamaya yönelik bir dizi aşamadan oluşmaktadır.

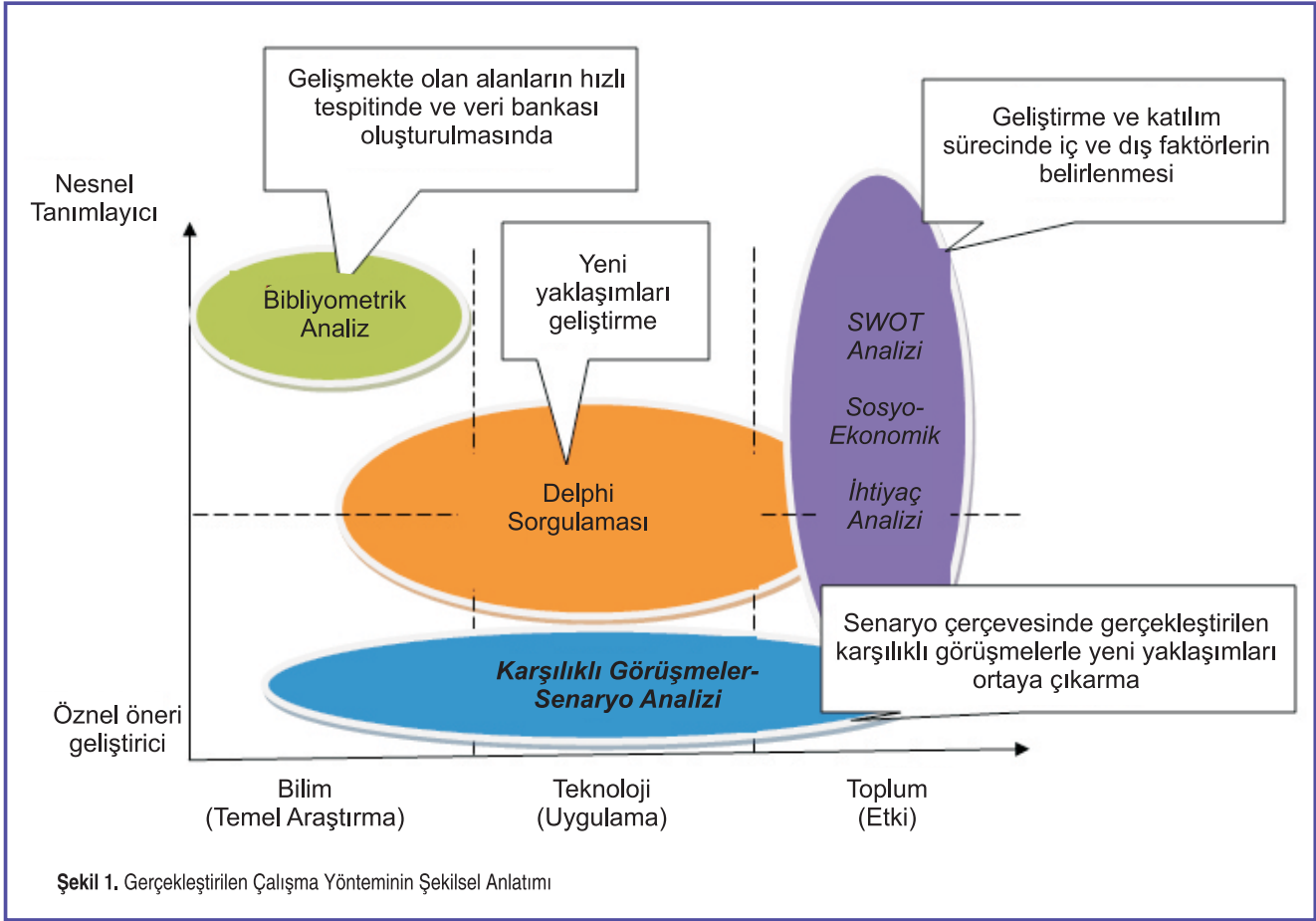
Gizlilik, Delphi'nin başarı anahtarı olarak görülmektedir. Araştırma süresince öne sürülen düşüncelerin kime ait olduğu gizli tutulmaktadır. Bireylerden çok fikirlerin öne çıkması sağlanmakta ve bu şekilde grup içinde çok iyi tanınan, saygı duyulan kişilerin görüşlerine koşulsuz onay engellenebilmektedir. Hiç bir çekince olmadan değişik, yeni fikirlerin herkesten gelmesi, katılımı gizlilik özelliği ile güvence altına alınmaktadır [37,39,40].

Gerçekleştirilen Delphi sorgulaması öncesinde, kullanılacak ifadelerin oluşturulması için dört farklı kesimin görüşüne başvurulmuştur. Bunlar; bibliyometrik yöntemle tespit edilmiş olan araştırmacılar, yenilenebilir enerjiler alanında faaliyet gösteren sivil toplum kuruluşlarının (STK) temsilcileri, ilgili sanayi kuruluşlarının yetkilileri ve kamu kurum ve kuruluşlarından ilgili kişilerdir.

Gerçekleştirilen karşılıklı görüşmelerde; ülke olarak bilim ve teknolojiye ne talep ettiğimiz ortaya çıkarılmaya çalışılmış, Delphi sorgulaması ile de bu taleplerin arz durumunun sorgulanması gerçekleştirilmiştir. Türkiye'de yenilenebilir enerjiler üzerine teknoloji öngörüsünü konu alan ikili görüşmeler ve Delphi sorgulamasıyla hem iktisadi faaliyet alanlarında hem de bilim ve teknoloji bazlı teknoloji öngörüsü gerçekleştirilmiştir.

Grup tepkisinin istatistiksel analizinin çıkarılabilmesi için oluşturulmuş olan Delphi sorgulaması, toplam 1955 kişilik e-posta havuzuna gönderilmiştir. Birinci tur Delphi anketi uygulamasından sonra istatistiksel analizi gerçekleştirilmiş her bir ifade için katılımcıların görüş ve önerilerini de kapsayan analiz sonuçları grafik haline dönüştürülerek cevaplar üzerinde uzlaşma sağlanabilmesi için birinci tur'a katılan tüm katılımcılara e-posta aracılığı ile tekrar gönderilmiştir. Bu şekilde birinci tur anketi yanıtlayanların genel eğilimleri bir sonraki anketle birlikte katılımcılara iletilmiştir. Böylelikle ankete dahil olan kişiler düşüncelerini kendilerine iletilen sonuçlarla, farklı görüş ve yaklaşımlarla karşılaştırarak yeniden gözden geçirmişlerdir.

Katılımcılara elektronik yolla iletilen Delphi anketinde, niceliksel ya da niteliksel maddeler oluşturulmuştur. Bu



maddelere ilişkin benzer ya da farklı ölçekler bulunmaktadır. Ankette öncelikle demografik yapıyı ortaya koymaya yönelik yaş, cinsiyet, bulunduğu şehir, çalıştığı kurum ve uzmanlık alanı gibi temel bilgiler içeren sorular sorulmaktadır. İfadelerle birlikte katılımcının uzmanlık düzeyini, ifadenin gerçekleşme süresini, ifadenin farklı alanlardaki etki seviyelerini, ifadenin gerçekleşmesi için gerekli olan faaliyetleri ve ifadenin Türkiye için önemini belirlemeye yönelik Delphi sorgulaması gerçekleştirilmiştir.

Katılımcıların uzmanlık düzeyi; uzman, bilgi sahibi, az bilgili ve hiç bilmiyor şeklinde tanımlanmıştır. Anket sırasında bu bilgiler katılımcıların kolaylıkla erişebilecekleri bir şekilde elektronik ortamda konumlandırılmıştır.

Teknolojilerin gerçekleşme süreleri 2010 yılı ile 2050 yılları arasında 10'ar yıllık zaman dilimleri halinde ölçeklendirilmiş ve katılımcılardan ifadelerin her biri için hangi tarih aralığında gerçekleşme beklentilerinin olduğu sorgulanmıştır. İfadenin gerçekleşme ihtimalinin olmadığını düşünlüğü durumlar içinde bir seçenek katılımcılara sunulmuştur.

Katılımcılardan her bir ifadenin; refah seviyesinin yükselmesine, çevreye, yaşam kalitesi ve enerjinin güvenli

temini üzerine olan etkilerinin ayrı ayrı ortaya konulması istenmiştir. Ankette, verilen ifadelerin gerçekleşebilmesi için gerekli olan politika araçları irdelenmeye çalışılmıştır. Katılımcılara özellikle birden fazla maddeyi işaretleyebilmeleri için çoklu seçim şansı sunulmuştur.

Ayrıca katılımcılardan; Ar-Ge proje destekleri, nitelikli iş gücünün yetiştirilmesi, mali yaklaşımlar, Ar-Ge ve inovasyon uygulamalarının artırılması, Ar-Ge desteklerinin artırılması ve altyapının güçlendirilmesi; Ar-Ge çalışmalarının uluslararasılaştırılması, kurumlar arası işbirliklerinin güçlendirilmesi, disiplinler arası çalışmaların teşviki, yasal ve yönetmelikler üzerinde gerçekleştirilecek düzenlemelerle toplumsal kabuller gibi on başlık altında toplanan maddeler üzerinde tercih yapmaları istenmiştir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen çalışmanın bir parçası olarak tasarlanılan Delphi anketi, % 59'u üç büyük şehirden olmak üzere tüm ülke çapında toplam 49 farklı ilden ve yurt dışındaki 12 farklı konumda görevleri nedeni ile bulunan uzmanlarımızın katkıları ile gerçekleştirilmiştir. Toplam 505 katılımcının % 80,6'sı erkek ve % 19,4'ü bayanlardan oluşmaktadır. Ankete katılım büyük çoğunlukla üniversitelerden (% 62,8) daha

sonrada özel sektör temsilcilerinden (% 17,8) oluşmaktadır. Bunun yanında kamu (% 11,3) ve araştırma merkezlerinin (% 3,8) katılımıyla da geniş bir yelpazeye ulaşılmıştır. Sivil toplum kuruluşlarının katılım oranının (% 0,2) düşük olmasının altında yatan neden bu kurumlarda görev yapan kişilerin aynı zamanda üniversitelerde araştırmacı olarak çalışmalarından kaynaklanmaktadır. İlgili kişiler ankete genellikle araştırmacı kimlikleri ile katılmışlardır. Katılımcıların çalışma konuları ise ağırlıklı olarak teknoloji (% 55,8) olarak karşımıza çıkmaktadır.

*Yakıt Hücreleri Teknolojilerine* ait soruların bulunduğu I. tur anketine 33 kişi katılmış ve bu kişilerden de II. tur sorgulamada 17'si uzman olmak üzere toplam 27 kişiden geri dönüş sağlanmıştır. Katılımcılar tarafından cevaplanan her bir ifade için bu rakamlar değişmektedir. Benzer şekilde Enerji Depolama Teknolojilerine ait soruların bulunduğu I. tur anketine ise 36 kişi katılmış ve bu kişilerden de II. Tur sorgulamada 8'i uzman olmak üzere toplam 30 kişiden geri dönüş sağlanmıştır. Katılımcılar tarafından cevaplanan her bir ifade için bu rakamlar değişmektedir.

Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular sırasıyla verilmiştir. Şekil 2 ve 3'te ilgili teknolojilere ait gerçekleşme süreleri, teknolojilerin önem dereceleri ile etkileri ifade edilmeye çalışılmıştır. Doğrudan metanol yakıt hücrelerinin geliştirilerek kullanılmaya başlanması, katı oksit yakıt hücrelerinin kullanılmaya başlanması ve seramik bazlı malzemelerin (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) kullanılarak SOFC yakıt hücreleri üretilmesi için öngörülen süreler 2020 ile 2030 yılları arası olarak ifade edilmektedir (Şekil 2). Katılımcı uzmanlara göre bu gelişmelerin sağlanabilmesi için, Ar-Ge odaklı çalışmaların ve Ar-Ge'ye olan desteklerin artırılması gerekmektedir. Yakıt hücrelerinin kullanımlarına yönelik beklentilerde ise, katılımcılar genellikle 2030 yılından sonra toplumsal alanlarda kullanılabilmesini düşünmektedirler. Yakıt hücrelerinin araçlarda kullanımı ve PEM'lerin yaygın bir şekilde kullanıma geçmesi uzmanlara göre toplum üzerinde ekonomik, sosyal ve çevresel açıdan çok olumlu etkiler yaratacaktır.

Türkiye'deki *Yakıt Hücreleri Teknolojilerine* yönelik olarak düzenlenen Delphi anketinde belirtilen teknolojilerin, 2011 ile 2045 yılları arasında gerçekleşmesi öngörülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmayla 2020'lerin sonlarında yakıt hücreli araçların pazardaki oranının % 20 civarında olması ve Avrupa enerji sistemlerinde hidrojenin önemli bir rol alması öngörülmektedir. Kullanılan hidrojenin büyük bir kısmının da yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi düşünülmektedir. 2010'ların ortasından itibaren yenilenebilir enerjilerde, enerji depolama teknolojilerinin büyük bir oranda kullanılabilmesi öngörülmektedir. Avrupa'da toplam tüketilen enerjinin 2010 yılına kadar % 12 ve 2030 yılında %

25 olacak şekilde yenilenebilir enerjilerden sağlanması öngörülmektedir (Şekil 2).

Bu çalışmaya katılan uzmanların öngörülerine göre; yakıt hücreleri teknolojileri alanında "*Elektron transferi mekanizması ile (ets) biyoyakıt pillerin üretiminin gerçekleştirilmesi*" teknolojisinin 2040'lı yılları bulması beklenmektedir. Amerika'da gerçekleştirilen bir çalışmada [41], 2010 yılından sonra yüksek verimli yakıt hücrelerinin Ar-Ge'sinin tamamlanarak sanayileştirileceği ifade edilmektedir. Yine aynı çalışmada, yakıt hücrelerinin 2020'li yıllar için öncelikli teknolojiler olduğu belirtilmektedir. Avrupa'da gerçekleştirilen Futures projesinde, PEM yakıt hücreli araçların 2010'lu yıllarda geniş bir kitle tarafından kullanılacağı, dolayısıyla seri üretimine geçileceği öngörülmüş ve günümüzde de bu öngörünün gerçekleşmekte olduğu görülmektedir.

Aynı çalışmada 2020 yılı sonrası çok büyük bir pazar payına ulaşılacağı ifade edilmektedir. Finlandiya'da gerçekleştirilen araştırmada ise, 2020'li yıllardan sonra yeni araç satışlarında elektrikli ve yakıt hücreli (FC-Evs) araçların pazarda baskın olacağı ifade edilmektedir [42]. Danimarka Mühendisler Odası tarafından yürütülen enerji teknolojileri öngörü çalışmasında, mikro kojenerasyon sistemleri için yakıt hücreleri üretilip ticari hâle getirilmesi işleminin 2015 ile 2020 yılları arasında gerçekleştirileceği ifade edilmektedir [43]. Coates ve arkadaşları [44] tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise yakıt hücrelerinin 2025 yılında elektrokimyasal enerji dönüşümünde baskın bir konumda olacağı ifade edilmektedir.

Ankete katılan uzmanlar, "Proton değişimli membran (PEM) yakıt pilleri çok yaygın olarak kullanılmaktadır" ifadesinin etki seviyesinin 3,47 (Çizelge 1) ile en yüksek değerde olacağı görüşünde birleşmektedirler.

Fuel Cell - Electric Vehicle Avrupa Birliği tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 2020'lerin sonlarına doğru yakıt hücreli araçların pazar payının % 20 olması beklenmektedir [45]. Japonya'da gerçekleştirilen çalışmada ise yakıt hücrelerinin araçlarda kullanımı için öngörülen süre 2020'li yıllar olarak ifade edilmektedir. Yakıt hücre teknolojileri Japonya'da son beş yılda, Avrupa ve Amerika'ya göre network'ten sonra en çok gelişme gösterilen ikinci alan olarak ifade edilmektedir. Ayrıca tüm taşınabilir ekipman pillerinin 2018 yılına kadar yakıt hücreleri ile değiştirileceği, 2022 yılında da katı oksit hücrelerin istasyonlarda kullanılacağı ifade edilmektedir. Yakıt hücre teknolojileri, Japonya'da önem sıralamasında temiz kömür teknolojilerinden sonra gelmektedir [17].

Vizyon 2023 çalışmasında, "güç üretim tesislerinde kullanılacak yakıt pilleri üretimi," dördüncü öncelikli teknolojik faaliyet konusu olarak ifade edilmiştir. İlgili