



*Araştırma Makalesi / Research Article*

## TÜRKİYE’NİN ENERJİ ARZ GÜVENLİĞİNİN ÖLÇÜLMESİ VE ÖNGÖRÜSÜ

Serkan TAŞTAN<sup>1\*</sup>  
Yunus Emre BİROL<sup>2</sup>

### Öz

Ülkelerin önemli gündemlerinden biri olan enerji arz güvenliği kavramının doğru ölçülmesi, bir ülkenin iç veya dış dinamiklerin etkisiyle enerji sektörünü etkilemesi muhtemel risklere karşı dayanıklılığının veya kırılganlığının belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Söz konusu kavramın çok sayıda faktörden etkilenmesi nedeniyle yapılan analizlerde çok yönlü ele alınması gerekmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada ilk olarak ithal enerji tedarikinde ülke çeşitliliği dikkate alınarak Türkiye’nin enerji arz güvenliği riski hesaplanmıştır. Sonrasında, 1990-2020 dönemi için hesaplanan endeks değerleri trigonometrik fonksiyonlar ile güçlendirilmiş gri modeller ile modellenmiştir. Analizlerde iki farklı yaklaşım doğrultusunda önerilen dört farklı gri model kullanılmıştır. Belirlenen en iyi model kullanılarak 2021-2023 dönemi için Türkiye’nin enerji arz güvenliği riskine yönelik öngörüler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar enerji arz güvenliği riskinin 2020 yılı ile kıyaslandığında 2021 yılında artacağını, 2022 yılında önceki iki yıla göre azalacağını, 2023 yılında ise son üç yıla göre en yüksek seviyede olacağını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji arz güvenliği, Gri Model, Fourier Düzeltmesi, Öngörü.

**JEL Kodları:** C53, Q41, Q47

## MEASURING AND FORECASTING THE ENERGY SUPPLY SECURITY OF TURKEY

### Abstract

It is possible to determine a country's resilience or vulnerability to risks likely to affect the energy sector with the effect of internal or external dynamics by measuring accurately the concept of energy supply security, which is one of the important agendas of countries. Since the concept in question is affected by many factors, it should be handled in a versatile way in the analysis. Therefore, in this study, the energy supply security risk of Turkey was firstly calculated by taking into account the country diversity in imported energy supply. Afterwards, the index values calculated for the period 1990-2020 were modeled with grey models augmented with trigonometric functions. Four different grey models proposed according to two different approaches were used in the analyses. Using the best model determined, forecasts were made for the energy supply security risk of Turkey for the 2021-2023 period. The results show that the energy supply security risk will increase in 2021 compared to 2020, decrease in 2022 compared to the previous two years, and in 2023 it will be at the highest level compared to the last three years.

**Keywords:** Energy supply security, Grey Model, Fourier Modification, Forecast.

**JEL Codes:** C53, Q41, Q47

<sup>1</sup> Doç. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, İİBF, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü,  
ORCID: 0000-0002-0889-9191

\* **Sorumlu Yazar** (Corresponding Author): [stastan@cumhuriyet.edu.tr](mailto:stastan@cumhuriyet.edu.tr)

<sup>2</sup> Doç. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, İİBF, İktisat Bölümü, ORCID: 0000-0003-0557-3281

**Başvuru Tarihi** (Received): 10.08.2022 **Kabul Tarihi** (Accepted): 20.01.2023

## Giriş

Enerji arz güvenliği genel bir tanımla bir ülkenin ihtiyaç duyduğu enerjinin güvenilir, kesintisiz ve uygun fiyatla tedarik edilmesidir. Enerji tedarikindeki risklerin bertaraf edilmesi ve böylece enerji arz güvenliğinin tesis edilmesi noktasında satıcı ülke, nakil hattı ve enerji kaynağı çeşitlendirmesi büyük önem arz etmektedir. Bu kavramın doğru bir şekilde modellenmesi, bir ülkenin iç veya dış dinamiklerin etkisiyle enerji sektörünü etkilemesi muhtemel risklere karşı dayanıklılığının veya kırılabilirliğinin ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Bir ülkenin enerji arz güvenliği anlamında dayanıklılık veya kırılabilirlik arasındaki konumu o ülkenin enerji politikasının zayıf ve güçlü yönlerinin belirlenmesinde ülke yöneticilerine fikir vererek siyasi ve ekonomik yönden enerji sektörü özelinde alınması gereken tedbirler konusunda yol gösterici olmaktadır.

Fosil kökenli enerji kaynaklarının kullanımının artması buna karşın bu enerji kaynaklarının rezervlerinin yoğun kullanım nedeniyle azalması gelecekte dünya enerji tüketimi ile enerji üretimi arasındaki dengenin olumsuz bir şekilde etkilenmesine yol açabileceğinden enerji arz güvenliği kavramı ülkelerin önemli gündemlerinden biri haline gelmiştir. Enerji arz güvenliğinin tesisi ve mevcut durumunun daha da iyileştirilmesi için çeşitli politikalar önerilmekle beraber, enerji arz güvenliğinin sayısal olarak ifade edilmesi ve risk derecesinin ölçülmesi konusu tartışmalıdır. İçerisinde barındırdığı ve etkileşim içerisinde bulunduğu birçok faktör bu kavram hakkında çeşitli göstergelerin ülke ve dönem karşılaştırmalarında kullanılmasına yol açmaktadır. Ancak literatürde bütün risk faktörlerini içeren, üzerinde uzlaşma sağlanan ve genel kabul gören bir enerji arz güvenliği hesaplama yönteminin bulunmadığını söylemek mümkündür.

Enerji arz güvenliği; sahip olunan rezervler, enerji tüketimi ve üretimi, yenilenebilir (fosil) ve yenilenebilir enerji kullanımı, enerji verimliliği, enerji tasarrufu, enerji fiyatları, enerjide dışa bağımlılık, kara ve denizdeki enerji nakil hatları, enerji nakil hatlarının güvenliği, enerji havzalarına yakınlık, net ihracatçı ülkelerle olan siyasi ve ekonomik ilişkiler vb. gibi çok sayıda faktörden etkilenmektedir. Enerji arz güvenliğinin çok sayıda faktörden etkilenmesi söz konusu kavramın analizinin çok yönlü olmasına yol açmaktadır. Bu durum enerji arz güvenliğinin ölçülmesi için farklı bakış açılarını dolayısıyla farklı ölçütleri gündeme getirmektedir. Her yöntemin kendine has üstünlükleri olduğu gibi zayıf olduğu noktalar da söz konusu olabilmektedir. Bununla beraber 2000'lerin başından beri enerji arz güvenliğinin çeşitli kuruluşlar ve araştırmacılar tarafından çeşitli kriterler dikkate alınarak sayısal bir veri, risk göstergesi veya bir endeks olarak hesaplanmaya çalışıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada bir ülkenin ithal enerji tedarikinde ülke çeşitliliği dikkate alınarak enerji arz güvenliği riskinin hesaplanması, ardından hesaplanan değerlerden yola çıkarak geleceğe yönelik öngörü yapılması amaçlanmaktadır. Buradan hareketle dünyada ve Türkiye'de enerji tüketimi incelendikten sonra 1990-2020 yılı enerji sektörü verileri yardımıyla Türkiye'nin enerji arz güvenliği verileri hesaplanacak ardından elde edilen veriler ışığında enerji arz güvenliğinin gelecekte alabileceği değerler hakkında öngörüler yapılacaktır. Son olarak ulaşılan sonuçlar ışığında enerji politikası bağlamında öneriler sunulacaktır.

## 1. Dünyada ve Türkiye'de Enerji Görünümü

Geçmişte daha basit ama yemek, ısınma, kurutma gibi temel ihtiyaçların karşılanması amacıyla kullanılan enerji, günümüzde daha karmaşık ve çeşitlenmiş ihtiyaçları karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. Enerji, enerji kaynakları ile karşılanmaktadır. Enerji gereksinimini karşılayan kaynakların en önemlileri petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil kökenli yakıtlardır. Bu kaynaklar yeryüzünde dengesiz dağılıma sahiptir ve yoğun kullanım nedeniyle tükenme tehlikesi altındadır. Ayrıca fosil yakıt kullanımı yoğun bir şekilde sera gazı salınımına yol açmaktadır. Dengesiz dağılım, tükenme tehlikesi ve çevresel faktörler alternatif enerji kaynakları arayışını gündeme getirmiştir. Hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle, dalga ve gelgit gibi enerji kaynakları,

fosil yakıtların aksine yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları olarak son yıllarda kullanımı artan enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra nükleer enerji de bünyesinde barındırdığı potansiyel riskler bertaraf edildiği takdirde performansı yüksek ve fosil yakıtlar kadar çevre kirliliğine yol açmayan bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Fosil yakıtlar açısından zengin rezervlere sahip olmayan ülkeler için yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji, enerji arz güvenliği ve çevre politikaları ile uyumlu enerji kaynakları olarak bilinmektedir.

Dünyadaki ve Türkiye'deki enerji tüketimi, enerji kaynakları bağlamında, toplamda ve kişi başına olmak üzere çeşitli yıllar dikkate alınarak Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablolardaki veriler enerji kaynaklarının ortak bir ölçü birimi olan jul (joule) cinsinden düzenlenmiştir. Petrol, doğal gaz, kömür, hidrolik, yenilenebilir enerji kaynakları ve toplam enerji tüketimi egza ( $1 \times 10^{18}$ ) jul (EJ), kişi başına enerji tüketimi giga ( $1 \times 10^9$ ) jul (GJ) olarak tablolarda yer almaktadır. Ayrıca söz konusu tablolarda yenilenebilir enerji kaynağı olmasına rağmen çok eski yıllardan beri kullanılan hidrolik enerji ayrı olarak ele alınmıştır. Yenilenebilir enerji başlığı ise hidrolik dışındaki güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarını kapsamaktadır.

**Tablo 1: Dünya Enerji Tüketimi**

Enerji Tüketimi	1970	1980	1990	2000	2010	2015	2020	2021
Petrol (EJ)	95,419	127,852	135,389	154,371	172,422	182,867	174,171	184,214
Doğal Gaz (EJ)	34,613	51,253	70,132	86,379	113,720	125,167	138,441	145,349
Kömür (EJ)	61,411	75,087	93,256	98,739	151,187	158,596	151,070	160,104
Nükleer (EJ)	0,806	7,272	20,435	26,364	26,545	23,961	24,441	25,313
Hidrolik (EJ)	12,504	18,434	22,980	28,174	34,265	37,600	41,090	40,260
Yenilenebilir (EJ)	0,329	0,661	1,706	2,854	10,538	19,948	34,799	39,913
Toplam (EJ)	205,082	280,560	343,898	396,882	508,677	548,138	564,012	595,151
Kişi Başına (GJ)	55,444	62,936	64,557	64,559	73,107	74,284	72,366	75,606

**Kaynak:** BP, (2022).

Enerji, günümüz dünya ekonomisinin en önemli girdisidir. Enerji tüketimi, gelişen teknoloji ve artan nüfus ile gün geçtikçe artmıştır. Tablo 1 incelendiğinde genel olarak enerji tüketimindeki artış eğilimi göze çarpmaktadır. 1970-2021 dönemi boyunca en fazla artış sırasıyla yenilenebilir ve nükleer enerji tüketiminde olmuştur. 1970-2000 döneminde en yüksek artış nükleer enerjide olmasında karşın 2000 sonrasında en yüksek artış yenilenebilir enerjide, en düşük artış nükleer enerjide kaydedilmiştir. 1970-2021 döneminde kişi başına enerji tüketiminde meydana gelen artış (%36,4), enerji tüketimindeki oransal artışın nüfustaki oransal artışın üzerinde gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. 2021 yılında dünya enerji tüketiminde %31 paya sahip olan petrol en çok tüketilen enerji kaynağıdır. Petrolü sırasıyla kömür (%26,9), doğal gaz (%24,4), hidrolik enerji (%6,8), yenilenebilir enerji (%6,7) ve nükleer enerji (%4,3) izlemektedir. 1970 yılında %46,5 olan petrolün payı 2021 yılında %31'e gerilemesine rağmen petrol halen dünyanın en çok tüketilen enerji kaynağıdır. Ayrıca doğal gaz ve yenilenebilir enerjinin dünya enerji tüketimindeki payı artmıştır. Yenilenebilir enerji tüketimindeki artışa rağmen yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtların çok gerisinde kaldığı dikkat çekicidir. 2021 yılında toplam enerji tüketimi içerisinde fosil yakıt olan petrol, doğal gaz ve kömür tüketiminin payları toplamı %82,3 iken hidrolik ile beraber yenilenebilir enerji tüketiminin payları toplamı %13,5'tir. Nükleer enerji de ise belirli bir döneme kadar artış eğilimi olmasına rağmen sonrasında düşüş olduğu görülmektedir.

Dünya enerji tüketiminde olduğu gibi Türkiye'nin enerji tüketiminde de artış olduğu Tablo 2'de görülmektedir. 1970-2021 döneminde tüketimi en fazla artan enerji kaynakları doğal gaz, yenilenebilir enerji ve hidrolik enerjidir. 1970-2001 yılları arasında en yüksek artış hidrolik

enerjide, 2000 sonrasında ise yenilenebilir enerjide olmuştur. 1990 sonrası doğal gaz tüketimindeki artış da dikkat çekicidir. 1970-2021 döneminde kişi başına enerji tüketimindeki artış (%429,9) dünyadaki artışın (%36,4) çok üzerindedir. 2016 yılına kadar dünya ortalamasının altında kalan Türkiye'nin kişi başına enerji tüketimi 2016-2021 yılları arasında dünya ortalamasının üzerinde gerçekleşmiştir. 2021 yılında Türkiye'nin enerji tüketiminde en yüksek paya sahip olan enerji kaynağı %30,2 paya sahip olan doğal gazdır. Doğal gazdan sonra en yüksek paya sahip olan enerji kaynakları petrol (%27,7) ve kömürdür (%25,5). Bu enerji kaynaklarını yenilenebilir (%8,8) ve hidrolik enerji (%7,7) izlemektedir. 2021 yılında toplam enerji tüketimi içerisinde fosil yakıtların payları toplamı %83,4 iken hidrolik ile beraber yenilenebilir enerji tüketiminin payları toplamı %16,6'dır. Yenilenebilir, hidrolik ve ikisinin toplamı dikkate alındığında Türkiye'nin yenilenebilir enerji tüketiminin toplam enerji tüketimi içerisindeki payının dünya ortalamasının üzerinde olduğu göze çarpmaktadır. Bununla beraber yeterli fosil enerji kaynakları rezervlerine sahip olmayan Türkiye'nin enerji tüketiminde fosil yakıtların payının yüksek olması enerji arz güvenliği açısından risk teşkil etmektedir.

**Tablo 2:** *Türkiye'nin Enerji Tüketimi*

Enerji Tüketimi	1970	1980	1990	2000	2010	2015	2020	2021
Petrol (EJ)	0,300	0,658	0,988	1,339	1,372	1,848	1,840	1,889
Doğal Gaz (EJ)	0,000	0,000	0,116	0,502	1,290	1,655	1,664	2,064
Kömür (EJ)	0,194	0,294	0,671	0,940	1,316	1,454	1,701	1,743
Hidrolik (EJ)	0,032	0,121	0,246	0,329	0,518	0,651	0,738	0,525
Yenilenebilir (EJ)	0,002	0,002	0,001	0,003	0,040	0,165	0,499	0,608
Toplam (EJ)	0,528	1,075	2,023	3,113	4,535	5,773	6,441	6,827
Kişi Başına (GJ)	15,141	24,436	37,521	49,131	62,585	73,371	76,294	80,231

**Kaynak:** BP, (2022).

## 2. Enerji Arz Güvenliği Endeksi

Enerji arz güvenliğinin ölçülmesi konusunda ön plana çıkan çalışmalardan bazıları; Kendell (1998), von Hirschhausen ve Neumann (2003), Blyth ve Lefevre (2004), Jansen, van Arkel ve Boots (2004), Costantini, Gracceva, Markandya ve Vicini (2007), Scheepers, Seebregts, de Jong ve Maters (2007), Gnansounou (2008), Gupta (2008), Kruij, van Vuuren, de Vries ve Groenenberg (2009), Le Coq ve Paltseva (2009), Cabalu (2010), Jewell (2011) tarafından yapılan çalışmalardır. Görüldüğü üzere bu konudaki literatür çok da eski değildir. Enerji arz güvenliğinin temel dayanak noktası ithal fosil enerji kaynaklarına bağımlılıktır. Literatürdeki çalışmalardan bir kısmı fosil enerji kaynaklarından özellikle petrol ve doğal gaz ithalatı bağlamında bir enerji kaynağı özelinde dar kapsamlı olarak enerji arz güvenliğini araştırırken, bir kısmı ise tüm fosil enerji kaynaklarının ithalatı bağlamında geniş kapsamlı olarak enerji arz güvenliğini araştırmaktadır. Enerji arz güvenliği konusunun siyasi ve ekonomik açıdan kapsamı ve derinliği dikkate alındığında literatürdeki çalışmaların yöntem ve sonuç olarak ayrışmasının beklenen bir durum olduğunu söylemek mümkündür.

Enerji arz güvenliği açısından bir enerji kaynağının ithalat yoluyla az sayıda ülke veya güzergâhtan (nakil hattından) temin edilmesi risk unsuru olarak kabul edilmektedir. Bir ülke veya hattan alınan enerji kaynağında siyasi veya teknik sebeplerle yaşanabilecek kesintiler, alıcı ülkenin enerjisinin tamamen kesilmesine yol açabilir. Bu bağlamda enerji tedarikinin çok sayıda ülke veya güzergâha yayılmasının, bir ülkede veya nakil hattında meydana gelebilecek aksaklıklara karşı alıcı ülkenin karşı karşıya kalabileceği enerji arz güvenliği risk seviyesini düşürmesi beklenmektedir. Diğer bir ifadeyle enerji temininde ülke veya nakil hattı çeşitlendirilmesi riskin dağıtılması anlamına

gelmektedir. Hatta günümüzde ülke çeşitliliğinin nakil hattı çeşitliliğinden daha fazla önem kazandığını söylemek mümkündür. Ülke veya nakil hattı çeşitliliğinin yanı sıra enerji tüketiminde kaynak çeşitliliği de büyük önem arz etmektedir. Olabildiğince fazla enerji çeşidinin temin edilmesi de enerji arz güvenliği açısından olumlu bir durum olarak değerlendirilmektedir.

Enerji tedarikinde ülke çeşitliliğini dikkate alan literatürdeki bazı çalışmalarda enerji arz güvenliğinin ölçülmesinde Herfindahl-Hirschman Endeksi (HHE) kullanılmaktadır. Aslında bu endeks enerji arz güvenliğinin tespiti için geliştirilmemiş olmakla beraber son yıllarda söz konusu endeksin enerji arz güvenliği konusuna uyarlandığı görülmektedir. Herfindahl-Hirschman Endeksi ile bir ülkenin farklı ülkelerden ithal ettiği bir enerji kaynağının (i) toplam enerji ithalatı içindeki paylarının veya bir ülkenin enerji tüketiminde kullandığı farklı enerji kaynaklarının toplam yurt içi enerji tüketimi içindeki paylarının (s) karelerinin toplanması suretiyle enerji arz güvenliği riski sayısal bir veri haline dönüştürülmektedir.

$$HHE_i = \sum_{i=1}^n s_i^2 = s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_n^2 \quad (1)$$

Bu endeksin temel dayanak noktası, bir enerji kaynağının olabildiğince fazla ülkeden tedarik edilmesinin az sayıda ülkeden tedarik edilmesinden ve bir ülkede olabildiğince fazla enerji kaynağının kullanılmasının az sayıda kaynak kullanılmasından daha iyi olmasıdır. Az sayıda ülke veya enerji kaynağına bağımlı olmak enerji arz güvenliği açısından bir ülkenin kırılganlığını yani maruz kaldığı risk seviyesini artıran bir durumdur. Endeks, az sayıda ülke veya kaynağa bağımlı olunması durumunda yüksek, çok sayıda ülke veya kaynağa bağımlı olunması durumunda ise düşük değer almaktadır.

Herfindahl-Hirschman Endeksi'nin enerji arz güvenliğine uyarlanmasında bazı dezavantajlar bulunmaktadır. Bir ülke yurt içi enerji tüketiminin çok azını (örneğin %1'ini) karşılayan bir enerji kaynağının tamamına yakını (örneğin %99'unu) tek bir ülkeden ithal ediyorsa veya bir ülke bir enerji kaynağının tamamına yakını (örneğin %99'unu) yurt içinden temin ediyor kalanını (%1'ini) tek bir ülkeden ithal ediyorsa hesaplanan endeks değeri maksimum çıkacaktır. Ancak genel olarak değerlendirildiğinde bu iki durumun enerji arz güvenliği riskine etkisi endeks değerinin ortaya koyduğunun aksine düşük seviyededir.

Bu çalışmada daha gerçekçi bir ölçüm için endeksin hassasiyetini artırmak üzere toplam yurt içi enerji tüketiminin içerisinde bir enerji kaynağının (i) tüketiminin payını (TP) ve o enerji kaynağının (i) tüketiminin içerisinde ithalatının payını (IP) içeren bir düzeltme katsayısı (DK) oluşturulmuştur.

$$DK_i = TP_i \times IP_i \quad (2)$$

Bir enerji kaynağının ithalatının ülke paylarından yola çıkarak hesaplanan endeks değerinin yukarıda belirtilen düzeltme katsayısı ile çarpılmasıyla her bir enerji kaynağına (i) ilişkin enerji arz güvenliği ölçümü için düzeltilmiş Herfindahl-Hirschman Endeksi (DHHE) elde edilmiştir.

$$DHHE_i = HHE_i \times DK_i \quad (3)$$

İthalatı yapılan petrol (p), doğal gaz (d) ve kömür (k) gibi enerji kaynakları için ayrı ayrı hesaplanan endeks değerleri (DHHE) toplanarak genel bir enerji arz güvenliği endeksine (EAG) ulaşılmıştır.

$$EAG = DHHE_p + DHHE_d + DHHE_k \quad (4)$$

Elde edilen enerji arz güvenliği endeksi birincil enerji tüketimi içerisinde önemli paya sahip olan tüm fosil kökenli enerji kaynaklarını kapsamaktadır. Temelinde Herfindahl-Hirschman Endeksi bulunduğu için bu endeksin de aynı şekilde düşük değer alması düşük, yüksek değer alması yüksek risk anlamına gelmektedir. Enerji arz güvenliğini olumlu gelişmelerin endeks değerini (riski) düşürmesi, olumsuz gelişmelerin ise endeks değerini (riski) yükseltmesi beklenmektedir.

### 3. GM(1,1|sin(ωt), cos(ωt)) Gri Modeli

Bu bölümde; salınım davranışı gösteren zaman serilerinde birinci dereceden tek değişkenli gri modelin (GM(1,1)) kestirimlerini iyileştirmek amacıyla Comert, Begashaw ve Huynh (2021) tarafından önerilen birinci dereceden tek değişkenli GM(1,1|sin(ωt), cos(ωt)) gri modeli, yine Comert ve diğerleri (2021) tarafından kullanılan notasyon doğrultusunda açıklanmıştır.  $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$  ve  $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$  sırasıyla bir stokastik sürece ilişkin negatif olmayan gözlem dizisi ve bu diziyeye takip eden eşitlikte verilen birinci dereceden birikim üretim operatörü uygulanarak elde edilen birikim dizisidir.

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (5)$$

$Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$  ise  $X^{(1)}$  dizisinin  $k = 2, 3, \dots, n$  için aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanan ortalama dizisidir.

$$z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)}{2} \quad (6)$$

Yukarıda tanımlanan diziler ile GM(1,1) gri modelin temel formu şu şekilde yazılır:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (7)$$

GM(1,1) modelinin ilgili denkleminin sağ tarafına sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının doğrusal birleşimini içeren trigonometrik terimler eklenmesi temeline dayanan GM(1,1|sin(ωt), cos(ωt)) gri modelinin parametreleri tahmin edilirken ilk olarak Eşitlik (8)'de verilen Y ve B matrisleri oluşturulur:

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & \sin(\omega 2) & \cos(\omega 2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & \sin(\omega 3) & \cos(\omega 3) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & \sin(\omega n) & \cos(\omega n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Devamında, söz konusu parametreler  $(a, b_1, b_2, b_3)^T$ , sıradan en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilir:

$$(\hat{a}, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{b}_3)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (9)$$

GM(1,1|sin(ωt), cos(ωt)) gri modeline ilişkin kestirimler aşağıdaki diferansiyel denklemin çözümü kullanılarak elde edilir.

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)}(k) = b_1 \sin(\omega t) + b_2 \cos(\omega t) + b_3 \quad (10)$$

Bu diferansiyel denklemin çözümü ise şu şekilde bulunur:

$$x^{(1)}(t + 1) = Ke^{-at} + \left( \frac{b_3}{a} + \frac{\cos(\omega t)(ab_2 - b_1\omega) + (ab_1 + b_2\omega) \sin(\omega t)}{a^2 + \omega^2} \right) \quad (11)$$

Burada K,  $x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$  başlangıç koşulu kullanılarak hesaplanır:

$$K = e^a \left( x^{(0)}(1) - \frac{b_3}{a} - \left( \frac{\cos(\omega)(ab_2 - b_1\omega) + (ab_1 + b_2\omega) \sin(\omega)}{a^2 + \omega^2} \right) \right) \quad (12)$$

Son olarak GM(1,1|sin( $\omega t$ ), cos( $\omega t$ )) modelinin zaman tepki dizisi ( $\hat{x}^{(0)}(k)$ ) bir başka ifadeyle kestirim veya öngörü değerleri birikimli zaman tepki dizisinden,  $\hat{x}^{(1)}(k)$ , hareketle  $\hat{x}^{(0)}(k + 1) = \hat{x}^{(1)}(k + 1) - \hat{x}^{(1)}(k)$  eşitliği yardımıyla aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k + 1) &= Ke^{-ak}(1 - e^a) \\ &+ \frac{1}{a^2 + \omega^2} ((\cos(\omega k) - \cos(\omega(k - 1)))(ab_2 - b_1\omega) \\ &+ (ab_1 + b_2\omega)(\sin(\omega k) - \sin(\omega(k - 1)))) \end{aligned} \quad (13)$$

Yüksek dalgalanmalar içeren ya da doğrusal olmayan davranış gösteren zaman serisinin, gri modelden elde edilen hata terimlerinin Fourier serisi ile düzeltilmesi, ilgili modelin kestirim başarımını arttırmak amacıyla sıklıkla uygulanan bir yaklaşımdır. Fourier serisi ile hatalar frekans spektrumuna dönüştürülerek yüksek frekanslı terimler filtrelenerek düşük frekanslı terimler seçilir. Dolayısıyla, daha yüksek performanslı bir modele ulaşmak için periyodik hareketlerin ayrıştırıldığı veri, düzensiz hareketlerden arındırılır (Phan, Malara ve Nguyen, 2020). GM(1,1|sin( $\omega t$ ), cos( $\omega t$ )) gri modeline bu yaklaşım uygulanırken ilk aşamada,  $x^{(0)}(k)$  dizisinin  $\varepsilon^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)$  şeklinde hesaplanan hata dizisi  $\varepsilon^{(0)} = \varepsilon^{(0)}(1), \varepsilon^{(0)}(2), \dots, \varepsilon^{(0)}(n)$ ,  $T=n-1$  ve  $z = \left(\frac{n-1}{2}\right) - 1$  olmak üzere  $k = 2, 3, \dots, n$  için Fourier serisi kullanılarak modellenir (Kayacan, Ulutas ve Kaynak, 2010):

$$\varepsilon^{(0)}(k) \cong \frac{1}{2} a_0 + \sum_{i=1}^z \left[ a_i \cos\left(k \frac{2\pi i}{T}\right) + \left[ b_i \sin\left(k \frac{2\pi i}{T}\right) \right] \right] \quad (14)$$

Burada, z ile T tam sayılardır. Eşitlik (14)'te verilen matematiksel ifade matris formunda aşağıdaki gösterilebilir:

$$\varepsilon^{(0)} = PC \quad (15)$$

Eşitlik (15)'te yer alan P matrisi ve C vektörü,

$$P = \begin{bmatrix} 0,5 & \cos\left(2 \frac{2\pi}{T}\right) & \sin\left(2 \frac{2\pi}{T}\right) & \dots & \cos\left(2 \frac{2\pi z}{T}\right) & \sin\left(2 \frac{2\pi z}{T}\right) \\ 0,5 & \cos\left(3 \frac{2\pi}{T}\right) & \sin\left(3 \frac{2\pi}{T}\right) & \dots & \cos\left(3 \frac{2\pi z}{T}\right) & \sin\left(3 \frac{2\pi z}{T}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0,5 & \cos\left(n \frac{2\pi}{T}\right) & \sin\left(n \frac{2\pi}{T}\right) & \dots & \cos\left(n \frac{2\pi z}{T}\right) & \sin\left(n \frac{2\pi z}{T}\right) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$C = [a_0 a_1 b_1 a_2 b_2 \dots a_n b_n]^T$$

şeklinde tanımlanır. C katsayılar vektörünün elde edilmesinde sıradan en küçük kareler yönteminden yararlanır:

$$C \cong (P^T P)^{-1} P^T \varepsilon^{(0)} \quad (17)$$

Son aşamada, GM(1,1|sin( $\omega t$ ), cos( $\omega t$ )) gri model ile ulaşılan kestirimler aşağıdaki gibi düzeltilerek Fourier serisi düzeltmesi içeren modelin  $k = 2, 3, \dots, n$  için kestirimleri elde edilir:

$$\hat{x}_f^{(0)}(k) = \hat{x}^{(0)}(k) + \hat{\varepsilon}^{(0)}(k) \quad (18)$$

Gri modelin performansını yükseltmek adına önerilen yöntemlerden bir diğeri de kayan pencere yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, gri modelin tahmininde tüm gözlemlerin yerine her adımda belirli sayıda son gözlem kullanılır. Burada pencere uzunluğu (s) olarak ifade edilen gözlem sayısı belirlendikten sonra ilk adımda  $x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(s)$  gözlemleri ile gri model tahmin edilir ve  $x^{(0)}(s+1)$  için kestirim yapılır. Böylece; her adımda model tahmin aşamasına, pencere uzunluğu sabit kalacak şekilde, bir gözlemin dâhil edilip bir gözlemin çıkarılması suretiyle tüm kestirimler elde edilir.

#### 4. Veri ve Bulgular

Çalışmada, Türkiye için Avrupa İstatistik Ofisi'nden (Eurostat) temin edilen enerji sektörü verilerinden hareketle hesaplanan ve 1990-2020 dönemini kapsayan enerji arz güvenliği endeksine ait yıllık gözlemlerden oluşan zaman serisi kullanılmıştır. Analiz dönemi, söz konusu endeks değerlerinin hesaplanmasında kullanılan değişkenlere ilişkin mevcut veri durumuna göre belirlenmiştir. Enerji arz güvenliği endeksine ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3:** Tanımlayıcı İstatistikler

Minimum	Maksimum	Medyan	Ortalama	Standart Sapma
0,0939	0,1803	0,1327	0,1327	0,0234

Bu çalışma kapsamında, enerji arz güvenliği iki farklı yaklaşım doğrultusunda önerilen dört farklı gri model kullanılarak analiz edilmiştir. Model kısaltmaları ve açıklamaları şu şekildedir:

**RSCGM Gri Modeli:** Kayan pencere yöntemi kullanılarak oluşturulan GM(1,1|sin( $\omega t$ ), cos( $\omega t$ )) gri modelidir. Bu model tahmin edilirken  $\omega$  parametresinin değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Tercih edilen ilk yaklaşım, model tahmin sürecinde Comert ve diğerleri (2021) tarafından uygulandığı üzere söz konusu parametre için sabit tek bir değer belirlenmesidir. Bu amaçla ilgili parametrenin en uygun değeri bulunurken ızgara aramasından yararlanılmaktadır.

**FRSCGM Gri Modeli:** RSCGM gri modelinin hata terimlerine Fourier serisi düzeltmesi uygulanarak tahmin edilen gri modeldir.

**DRSCGM Gri Modeli:** RSCGM modelinde olduğu gibi kayan pencere yaklaşımı kullanılarak tahmin edilen GM(1,1|sin( $\omega t$ ), cos( $\omega t$ )) gri modelidir. RSCGM modelinden farklı olarak tahmin aşamasında  $\omega$  parametresi için sabit bir değer kullanılmamıştır. Model performansını arttırmak amacıyla yeni bir parametre belirleme ve kullanım yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşıma göre kayan pencere yönteminin her adımında farklı bir  $\omega$  değeri belirlenmiştir. Yine parametre değerleri ızgara araması aracılığıyla bulunmuştur.



DRSCGM Gri Modeli: FRSCGM modelinde olduğu gibi DRSCGM modelinin hata terimlerine Fourier serisi düzeltilmesi uygulanarak oluşturulan modeldir.

Açıklanan modellerin kestirim ve öngörü başarımları, zaman serisi iki gruba ayrılarak incelenmiştir. Zaman serisinin %80'i yani 1990-2015 dönemine ait 26 yıllık veri, modellerin tahmininde, diğer bir deyişle modelleme veya kestirim başarımlarını kıyaslamak için kullanılmıştır. Beş yıllık, 2016-2020 dönemini kapsayan veri ya da zaman serisinin %20'lik kısmı üzerinden ise modellerin öngörü yetenekleri araştırılmıştır. Dört gri modelin kestirim ve öngörü performansları değerlendirilirken kök ortalama hata (RMSE),

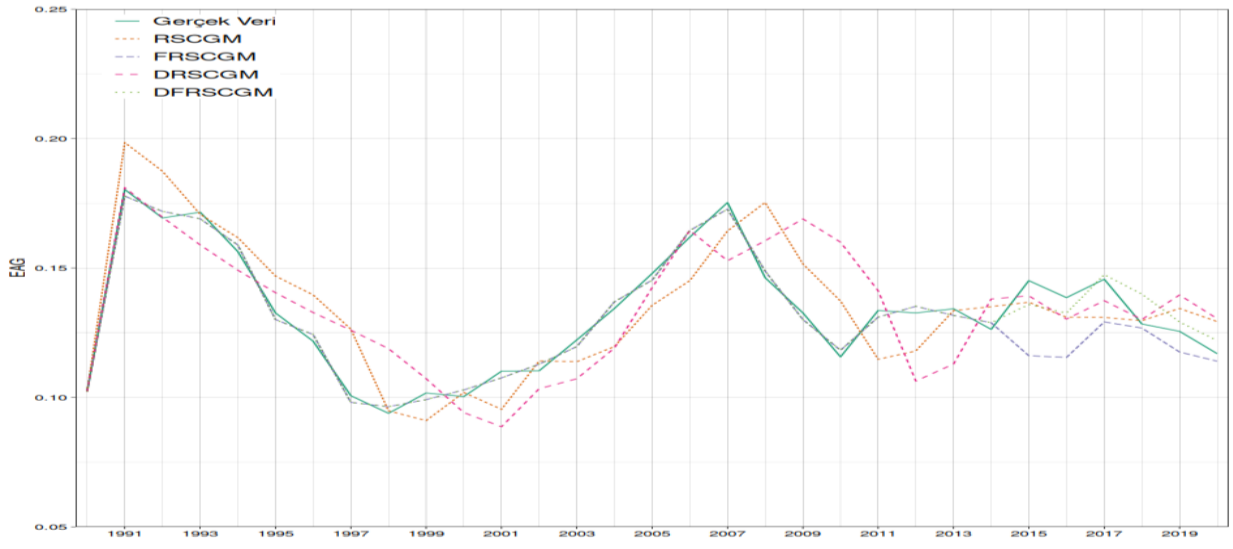
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k))^2} \quad (19)$$

ile ortalama mutlak yüzde hata (MAPE),

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \right| 100 \quad (20)$$

kriterleri dikkate alınmıştır. Model tahminlerinde kullanılan pencere uzunluğu yedidir. Buna bağlı olarak belirlenen  $\omega$  parametresinin en uygun değerleri ile modellerin 1990-2015 yılları kestirimleri ve 2016-2020 yılları öngörülerinin doğruluk düzeyleri Tablo 4'te verilmiştir. Grafik 1'de ise analiz dönemi için enerji arz güvenliği endeksi ile dört gri modelden elde edilen kestirim ve öngörü değerlerine ilişkin grafik sunulmuştur.

**Grafik 1:** Enerji Arz Güvenliği Endeksi İle Gri Modellerin Kestirim ve Öngörü Değerleri



Grafik 1'de sunulan grafik ve Tablo 3'te verilen istatistikler birlikte ele alındığında, Türkiye'nin enerji arz güvenliği riskinin en yüksek olduğu yıl 1991 yılıdır. Bu yıldan itibaren analiz dönemi için riskin en düşük olduğu yıl olan 1998 yılına kadar ve 2007 ile 2010 yılları arasında bir azalış trendi görülürken, 1999-2007 döneminde artış trendi göze çarpmaktadır. 2011 yılı sonrasında 2017 yılına kadar ise risk düzeyi dalgalı bir seyir izlemektedir. Son yıllarda ise yine bir azalış trendi gözlenmektedir.

1991 yılında enerji arz güvenliği endeksi değerinin (riskin) yüksek değer almasında belirleyici olan petrol kullanımınıdır. 1991 yılında toplam enerji tüketimi içerisinde doğal gaz tüketiminin payı çok düşüktür. Ayrıca kömür tüketiminde dışa bağımlılık oranı yüksek düzeyde değildir. Söz konusu yılda toplam enerji tüketimi içerisinde en yüksek paya (neredeyse yarısına) sahip olan enerji kaynağı petroldür. O dönemde ithal petrol bağımlılığının yüksek ve bağımlı olunan ülke sayısının düşük olması enerji arz güvenliği riskinin yüksek olmasına yol açmıştır. 1990-1998 döneminde toplam enerji tüketiminde petrolün payında azalış ve doğal gazın payında artış meydana gelmiştir. 1998 yılında enerji ithalatında ülke çeşitliliği konusunda riskin en yüksek olduğu enerji kaynağı doğal gazdır. Doğal gazı kömür ve petrol izlemektedir. Bununla beraber önceki yıllara göre tüm enerji kaynakları açısından enerji tedarikinde ülke çeşitliliğinde artış yaşanmıştır. Bu durum enerji arz güvenliği riskinin 1990-2020 dönemi boyunca en düşük seviyede gerçekleşmesine neden olmuştur. 1998-2007 döneminde toplam enerji tüketiminde petrolün payında azalış, doğal gazın payında artış devam etmiştir. 2007 yılında ithal petrol ve doğal gaz bağımlılığı çok yüksek düzeydedir. Aynı yıl ithal kömür bağımlılığı 1990 yılına kıyasla neredeyse iki kat artmıştır. 2007 yılında petrol ithalatında ülke çeşitliliği azalmış ve enerji arz güvenliği riski artmıştır. Sonraki yıllarda toplam enerji tüketiminde petrolün payında önce azalış sonra artış, doğal gazın payında artış ve kömürün payında azalış ortaya çıkmış; ithal enerjiye bağımlılıkta petrolde bir miktar azalış, doğal gazda bir miktar artış ve kömürde önemli bir artış yaşanmış; ithal enerji tedarikinde ülke çeşitliliği konusunda petrolde genel olarak artış olmakla beraber dalgalı bir seyir, doğal gazda artış ve kömürde bir miktar artışın ardından ciddi bir azalış kaydedilmiştir.

1990-2020 yıllarında toplam enerji tüketimi içerisinde en büyük paya sahip olan petrolü sırasıyla doğal gaz ve kömür izlemektedir. İthal enerjiye en yüksek bağımlılık sırasıyla doğal gaz ve petrolde olup ithal kömür bağımlılığı nispeten daha düşüktür. Herfindahl-Hirschman Endeksi açısından yüksek riskten düşük riske sıralama doğal gaz, kömür ve petrol şeklinde olmakla beraber son yıllarda doğal gaz risk seviyesi düşmekte ve kömür risk seviyesi artmakta, hatta ülke çeşitliliği açısından en yüksek riskli enerji kaynağı olarak kömür dikkat çekmektedir. Bu çerçevede bu çalışmada Herfindahl-Hirschman Endeksi'ne uygulanan düzeltme katsayısının bu hususları içerdiği, böylece daha gerçekçi ve hassas bir enerji arz güvenliği ölçümü yaptığını söylemek mümkündür.

**Tablo 4:** Gri Modellerin Kestirim ve Öngörü Doğruluk Dereceleri

Model	$\omega$	1990-2015		2016-2020	
		RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
RSCGM	9,370	0,015	9,353	0,010	6,660
FRSCGM		0,003	1,895	0,017	9,676
DRSCGM	5,720 5,720 5,350 5,670 7,380 4,920 3,920 3,740 9,340 6,800 0,170 5,470 6,560 3,790 4,540 5,190 3,150 4,780 4,040 9,390 9,400 9,490 9,470 3,130	0,018	11,385	0,010	6,633
DFRSCGM	3,080	0,003	1,932	0,007	4,674

Modellere ait tahmin sonuçları incelendiğinde; Tablo 4'te görüldüğü üzere 1990-2015 döneminde 0,003 RMSE değeri ve 1,895 MAPE değeri ile en başarılı model FRSCGM gri modelidir. Bu modeli sırasıyla DFRSCGM, RSCGM ve DRSCGM gri modelleri izlemektedir. Ancak her iki kriter açısından da FRSCGM ve DFRSCGM modelleri arasında gözlenen fark çok küçüktür. Diğer taraftan, gri model hatalarının Fourier serisi ile düzeltilmesi yoluyla tahmin edilen bu modeller ile hata terimlerinin elde edildiği diğer iki model arasında ise önemli performans farkı bulunmaktadır. Dolayısıyla, Fourier serisi düzeltmesi modellerin kestirim başarısını kayda değer oranda yükseltmiştir. Ayrıca MAPE kriteri bağlamında yorumlandığında; DRSCGM modelinin iyi düzeyde kestirimler sağladığı, diğer üç modelle ise yüksek doğruluğa sahip kestirimlere ulaşıldığı

söylenbilir. Yine aynı kriter çerçevesinde değerlendirildiğinde, tüm gri modellerin 2016-2020 dönemi öngörülerinin doğruluk düzeyinin yüksek olduğu açıktır. Bu dönemde en başarılı model 0,007 RMSE ve 4,674 MAPE değeri ile DFRSCGM modeli iken bu modelden sonra sırasıyla 0,010 ve 6,633 RMSE ve MAPE değerleri ile DRSCGM modeli gelmektedir. Her iki modelde önerilen parametre belirleme ve kullanım yaklaşımı izlenerek tahmin edilmiştir. Bu nedenle söz konusu yaklaşımın kayan pencere yöntemiyle tahmin edilen gri modellerin öngörü performansı üzerindeki olumlu etkisi açıkça görülmektedir. Son olarak; FRSCGM gri modelinin modelleme başarısı en yüksek model olmasına rağmen, model öngörülerini noktasında yapılan sıralamada son sırada yer alması dikkat çekicidir.

Tablo 4'te sunulan sonuçlar her iki dönem için birlikte değerlendirildiğinde, tahmin edilen modeller içerisinde genel olarak performansı en iyi olan DFRSCGM gri modelidir. Bu yüzden bu model kullanılarak 2021, 2022 ve 2023 yılları için enerji arz güvenliği endeksinin alacağı değerler öngörülmüştür. Bu amaçla zaman serisinin tüm gözlemleri kullanılarak DFRSCGM modeli yeniden tahmin edilmiştir. 1990-2020 yılları verileri kullanılarak tahmin edilen bu modele göre, endeks değeri söz konusu yıllarda sırasıyla 0,120, 0,109 ve 0,127 olacaktır.

## 5. Sonuç

Bu çalışma kapsamında ilk olarak Herfindahl-Hirschman Endeksi temel alınarak geliştirilen enerji arz güvenliği endeksinin 1990-2020 dönemine ait değerleri Türkiye için hesaplanmıştır. Endeks değerlerinin oluşturduğu zaman serisi trigonometrik fonksiyonlar ile güçlendirilmiş gri modeller kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sürecinin ilk aşamasında mevcut zaman serisi iki döneme ayrılmış, ilk dönem üzerinden tahmin edilen modeller her iki dönem verileri ışığında karşılaştırılmıştır. İlk aşamada belirlenen en iyi model kullanılarak ikinci aşamada 2021-2023 dönemine ilişkin öngörülerden hareketle Türkiye için enerji arz güvenliği noktasında çıkarımlarda bulunulmuştur.

Kayan pencere yöntemi ile tahmin edilen gri modellerin parametreleri iki farklı yaklaşım kullanılarak belirlenmiştir. Modellerden elde edilen kestirim ya da öngörülerini daha da iyileştirmek adına model hataları Fourier serisi ile düzeltilmiştir. Kayan pencere yöntemi uygulanırken her adımda model parametresinin yeniden belirlenmesine yönelik önerilen yaklaşımın ve model hatalarının düzeltilmesi yönteminin birlikte kullanıldığı DFRSCGM gri modeli en iyi sonuçlara ulaşılan model olmuştur. Bu modelin 2021-2023 yılları için enerji arz güvenliği endeksinin ait öngörülerini, 2020 yılının endeks değeri olan 0,117 ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Buna göre enerji arz güvenliği açısından riskin 2020 yılı ile kıyaslandığında; 2021 yılında artacağı, 2022 yılında önceki iki yıla göre azalacağı, 2023 yılında ise son üç yıla göre en yüksek seviyede olacağı söylenebilir. Dahası, bu üç yıl için öngörülen endeks değerleri 31 gözlemden oluşan zaman serisinin ortalamasının altındadır.

1990-2020 dönemi boyunca Türkiye'nin enerji arz güvenliği riski 1998 yılında minimum, 1991 ve 2007 yıllarında maksimum, 2007 yılı sonrasında ise dalgalı ve istikrarlı değerler almıştır. 2010-2020 döneminde risk seviyesinde büyük bir yükseliş veya düşüş yaşanmamış, enerji arz güvenliği riski ortalama seviyede hareket etmiştir. Bu durum önceki yıllara kıyasla Türkiye'nin ithal enerji tedariki bağlamında enerji kırılganlığının nispeten azaldığını göstermektedir. 2021-2023 dönemi enerji arz güvenliği endeks öngörülerine göre de ilgili dönemde çok ciddi bir artış veya azalış beklenmemekle beraber 2023 yılında risk değerinin artacağı değerlendirilmektedir. Enerji arz güvenliği riskinin azaltılması için Türkiye'nin ithal fosil yakıtlara bağımlılığının azaltılması, bunun için de; yurt içi kara ve deniz sahalarında rezerv arama faaliyetlerinin artırılması, teşvik mekanizmasının işletilmesi ile yenilenebilir enerji üretiminin desteklenmesi, nükleer santrallerin tamamlanması ve kullanıma alınması büyük önem arz etmektedir. Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de enerji tüketiminin büyük bir kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Alınacak tedbirlerle enerjide dışa bağımlılık azaltılabilirse de zengin petrol ve doğal gaz rezervlerine sahip

olmayan Türkiye'nin ithal enerjiye bağımlılığının devam edeceği beklenmektedir. Bu bağlamda enerji arz güvenliği riskinin azaltılması için ithal enerji tedarikinde ülke ve güzergâh çeşitliliğinin artırılması üzerinde önemle durulması gereken bir konudur. Bununla beraber özellikle petrol ve doğal gaz depolama tesislerinin kapasitelerinin artırılması, kamu ve özel sektörde enerji verimliliği ve tasarrufuna yönelik uygulamaların teşvik edilmesi ve kamuoyunun bu konuda bilgilendirilmesi diğer önemli konulardır. Ayrıca Türkiye'nin zengin rezerve sahip olduğu toryumun nükleer santrallerde yakıt olarak kullanılma potansiyeli dikkate alınarak bu konudaki çalışmaların desteklenmesinin ithal enerjiye bağımlılıktan kurtulması noktasında Türkiye'nin enerji sektöründe dönüşüm sağlayabileceğini söylemek mümkündür.

**Yazarlık Katkıları** (Authorship Contributions): Serkan Taştan, Yunus Emre Birol

### **Kaynakça**

- Blyth, W. ve Lefevre, N. (2004). *Energy security and climate change policy interactions: An assessment framework* (IEA Information Paper). Erişim adresi: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20647734>.
- BP. (2022). Statistical review of world energy. Erişim adresi: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- Cabalu, H. (2010). Indicators of security of natural gas supply in Asia. *Energy Policy*, 38(1), 218-225.
- Comert, G., Begashaw, N. ve Huynh, N. (2021). Improved grey system models for predicting traffic parameters. *Expert Systems with Applications*, 177, 114972.
- Costantini, V., Gracceva, F., Markandya, A. ve Vicini, G. (2007). Security of energy supply: Comparing scenarios from a european perspective. *Energy Policy*, 35(1), 210-226.
- Gnansounou, E. (2008). Assessing the energy vulnerability: Case of industrialised countries. *Energy Policy*, 36(10), 3734-3744.
- Gupta, E. (2008). Oil vulnerability index of oil-importing countries. *Energy Policy*, 36(3), 1195-1211.
- Jansen, J. C., van Arkel, W. G. ve Boots, M. G. (2004). *Designing indicators of long-term energy supply security* (Report No. ECN-C--04-007). Erişim adresi: <http://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-C--04-007>.
- Jewell, J. (2011). *The IEA model of short-term energy security (MOSES): Primary energy sources and secondary fuels* (International Energy Agency Working Paper No. 2011/17). Erişim adresi: [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/iea-energy-papers\\_20792581](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/iea-energy-papers_20792581).
- Kayacan, E., Ulutas, B. ve Kaynak, O. (2010). Grey system theory-based models in time series prediction. *Expert Systems with Applications*, 37(2, 2), 1784-1789.
- Kendell, J. M. (1998). *Measures of oil import dependence*. EIA Department of Energy. Erişim adresi: <http://www.eia.gov/oiaf/archive/issues98/oimport.html>.
- Kruyt, B., van Vuuren, D. P., de Vries, H. J. M. ve Groenenberg, H. (2009). Indicators for energy security. *Energy Policy*, 37(6), 2166-2181.
- Le Coq, C. ve Paltseva, E. (2009). Measuring the security of external energy supply in the European Union. *Energy Policy*, 37(11), 4474-4481.

- Phan, V.-T., Malara, Z. ve Nguyen, N. T. (2020). Using fourier series to improve the discrete grey model (1, 1). M. Hernes, K. Wojtkiewicz ve E. Szczerbicki (Ed.), *Advances in computational collective intelligence* içinde (ss. 99–109). Springer International Publishing.
- Scheepers, M., Seebregts, A., de Jong, J. ve Maters, H. (2007). *EU standards for energy security of supply: Updates on the crisis capability index and the supply/demand index quantification for EU-27* (Report No. ECN-E-07-004/CIEP). Erişim adresi: <http://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-E--07-004>.
- von Hirschhausen, C. ve Neumann, A. (2003). *Security of (gas) supply: Conceptual issues, contractual arrangements, and the current EU situation*. INDES Workshop (6-7 May 2003), Amsterdam. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/228800213\\_Security\\_of\\_Gas\\_Supply\\_Conceptual\\_Issues\\_Contractual\\_Arrangements\\_and\\_the\\_Current\\_EU\\_Situation](https://www.researchgate.net/publication/228800213_Security_of_Gas_Supply_Conceptual_Issues_Contractual_Arrangements_and_the_Current_EU_Situation).