

DÜŞÜK EKONOMİK VE ÇEVRESEL MALİYETLİ ELEKTRİK ÜRETİM SEÇENEKLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Gordhan DAS VALASAI¹, Merih AYDINALP KÖKSAL^{2(*)}

¹Mehran University of Engineering & Technology, Dept. of Mech. Eng., Jamshoro, Pakistan

²Hacettepe Üniversitesi, Çevre Müh. Bölümü, Beytepe, Ankara

ÖZET

Ülkemizde elektriğin çok büyük bir kısmı linyit, ithal doğalgaz ve ithal kömür ile hidroelektrik santrallerinde üretilmektedir. Yüksek miktarda yerli kömür rezervleri ile güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip olunmasına rağmen, elektrik üretiminde ulusal ekonomimize ağır bir yüke neden olan doğalgaz ve kömür ithaline bel bağlanmaktadır. Yerli linyit ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanılması ithal yakıtlara olan bağımlılığı azaltıp, sürdürülebilir bir gelişmeye yol açacaktır. Çevresel maliyetler dikkate alındığı takdirde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanımı ekonomik olarak kömür, petrol, doğalgaz ve nükleer enerji ile rekabet edebilecek hale gelebilir. Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma için elektrik üretiminde yerli fosil yakıtlar ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması yönünde yani düşük çevresel ve ekonomik maliyetli elektrik üretimi yönünde tercih yapması gerekmektedir. Çevre kirliliği ve çeşitli çevre protokolleri hakkında farkındalık arttıkça, çevresel dışsallıkların üretim maliyeti, kaynak kullanılabilirliği ve diğer makro-ekonomik ve demografik göstergeler ile birlikte güç talebi tahmininde kullanımı önemli hale gelmektedir. Bu çalışmada, Türkiye için kullanılabilir enerji kaynaklarını (fosil ve nükleer yakıtlar ile yenilenebilir enerji kaynakları), elektrik üretim teknolojilerini ve farklı senaryolar bazında elektrik talebi tahminini dikkatte alan düşük ekonomik ve çevre maliyetli elektrik üretimi modeli Uluslararası Enerji Ajansı tarafından geliştirilen *AnswerTIMES* yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı sera gazı emisyonu izin miktarları, üretim teknolojileri ile fosil yakıt ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımları bazında on adet senaryo incelenmiştir. Senaryoların sonuçlarının kıyaslanmasından sonra elektrik üretiminde ekonomik ve çevre maliyetlerini azaltan ve sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen politikalar önerilmiştir.

ABSTRACT

Major share of electricity in Turkey is generated from lignite, imported natural gas and coal, and hydro power plants. Despite availability of huge indigenous coal reserves and renewable resources of solar and wind energy, Turkey relies heavily on natural gas and coal imports, causing heavy burden on national exchequer. Use of indigenous coal reserves and renewable resources would also minimize dependence on imports and leading to the sustainable development. When environmental costs are taken into account, renewable energy sources become economically competitive with other energy sources including coal, oil, natural gas, and nuclear. For the sustainable development, Turkey has to shift power generation towards renewable energy sources along with indigenous fossil fuels, *i.e.* least environmental and economic cost power generation. As the environmental awareness about pollution and various

* aydinalp@hacettepe.edu.tr

environmental protocols, it is important to include the environmental externalities in power demand forecasting along with generation cost, resources availability, and other macro-economic and demographic indicators. In this study, a low environmental and economic cost electricity generation model is developed using *AnswerTimes* simulation program. This program is established by International Energy Agency and takes into account available energy sources (fossil and nuclear fuel and renewable energy sources), electricity generation technologies, and various electricity demand forecasts. A total of ten scenarios based on various greenhouse gas emission limitations and generation technologies using fossil fuel and renewable energy sources were analyzed. Policy suggestions on lowering environmental and economic costs of electricity generation are developed from comparative assessments of the results of the scenarios.

ANAHTAR SÖZCÜKLER

Düşük maliyetli Elektrik Üretimi, Çevresel Dışsallıklar, Elektrik Üretim Seçenekleri, Elektrik Üretim Teknolojileri

1. GİRİŞ

Türkiye’de hızlı nüfus artışı ve ekonomideki büyümeye paralel olarak enerji ve özellikle elektrik kullanımında büyük artış vardır. 1990’lardan itibaren Türkiye’deki enerji talebi yaklaşık yılda %4 artarken elektrik talebi ise yaklaşık %7 gibi daha yüksek bir hız ile artmıştır (TEİAŞ, 2015). Ülkemizin 2014 yılı sonu itibari ile toplam kurulu gücü yaklaşık 70.000 MW’a ulaşmıştır. Aynı yıl toplam elektrik üretimi ise 250.000 GWh’in üzerine çıkmış ve %48’i doğalgazdan, %29’u linyit ve taş kömüründen, %16’sı hidrolikten, geri kalan %7 ise rüzgar ve diğer kaynaklardan üretilmiştir.

Ülkemizde elektriğin dörtte üçünden fazlası kullanılan yakıtın çıkarılması, işlenmesi, taşınması ve yakılması sırasında su, hava ve toprağa yüksek miktarda kirletici yayılmasına neden olan fosil yakıtlı güç santrallerinde üretilmektedir. Kirleticilerin çevreye olan zararlarının maliyeti de hesaba katıldığında, çevresel etkileri yok denebilecek kadar az olan yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik fosil kaynaklı olanlar ile rekabet edebilir seviyeye ulaşmaktadır. Elektrik üretiminin çevresel etkilerine ek olarak enerji güvenliği de elektrik üretiminde yakıt dağılımının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ülkemizde elektriğin yaklaşık % 60’ına yakını ithal edilen doğalgaz ve taş kömürden üretilmektedir. Elektrik üretiminde oluşan çevresel zararları azaltmak hem de enerji tedarikinin güvenliği sağlamak açısından yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretiminin önemi artmaktadır. Artan elektrik talebinin düşük çevresel etkili ve yüksek enerji güvenliği sağlanarak en az maliyetle temin edilebilmesinin planlanması Türkiye gibi ekonomisi büyüyen bir ülkenin sürdürülebilir kalkınmasında önem kazanmaktadır.

Elektrik üretiminin planlanmasında kullanılan çok kapsamlı yazılım programları mevcuttur. Bu programlar kullanılabilir enerji kaynaklarının belirlenen kısıtlamalar (ekonomik, çevresel ve güvenlik) dahilinde en uygun şekilde faydalanılmasının belirlenmesinde kullanılırlar. Bu optimizasyon tabanlı yaklaşımlar ulusal enerji ve/veya elektrik planlanmasının yapıldığı birçok çalışmada kullanılmıştır. Sağlam (2010) Market Allocation (*MARKAL*) enerji modelleme programını kullanarak elektrik üretimine bağlı sera gazı emisyonlarının azaltılmasında izlenebilecek karar destek sistemi geliştirmiştir. *MARKAL* programının

kullanıldığı başka bir çalışmada, Sulukan (2010) enerji verimliliği yüksek ve düşük maliyetli teknolojilerinin kullanımı ile sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yol açan senaryoların analizlerini yapmıştır. Elektrik üretimine bağlı CO₂ emisyonlarının azaltılmasına dair başka bir çalışmada Özer ve arkadaşları (2013) Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) enerji modelleme programı kullanarak mevcut yakıt türü dağılımı ile CO₂ emisyonlarında uzun dönemde artışın izleneceğini tahmin etmişlerdir. Elektrik tüketiminin düşürülmesi için enerji verimliliği ve tasarrufu ile birlikte elektrik fiyatlarında artışın yaşanması ile ancak CO₂ emisyonlarında azalmanın gerçekleşebileceği Saisel ve Hekimoğlu (2013) tarafında yapılan bir enerji planlaması çalışmasında belirtilmiştir.

Artan elektrik talebinin büyük oranda çevresel etkisi en az olan teknolojilerden üretilmesinin sağlanması ulusal enerji planlanmasında önemli bir adımdır. Bunun yanında üretim teknolojilerinin maliyetleri de tüketicilere yansıdığından, hem ekonomik maliyeti düşük hem de çevresel etkileri az teknolojiler enerji planlamasında tercih edilmelidir. Elektrik üretimi sırasında oluşan kirliliğin çevre ve insanlar üzerindeki etkilerinin maliyetleri çevresel dışsallıklar olarak adlandırılabilir (Baumol, 1988). Bunlar insan sağlığına ve çevreye hasar veren emisyonlar ile iklim değişikliğine yol olan emisyonların toplam maliyetidir (Owen, 2006). Çevresel dışsallıklar birçok ülkede tüketicilere karbon vergisi ve benzeri ilave vergiler olarak yansıtılmaktadır (Breeze, 2014).

Elektrik üretiminin maliyetine çevresel dışsallıkları dahil eden ilk çalışmalardan birinde Roth ve Ambs (2004) ABD'nin Kalifornia eyaletinde yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretiminin yaşam döngüsü maliyetinin fosil kaynaklı olanlardan daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Doğalgaz, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin beş farklı bölgede karşılaştırıldığı başka bir çalışmada, Rafaj ve Kypreos (2007) MARKAL programı ile bölge bazında farklı kısıtlamalara bağlı düşük maliyetli elektrik üretimi teknolojisi dağılımını belirlemişlerdir. Güney Afrika Cumhuriyeti'nde yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretiminin payının %15'e çıkarılmasının çevresel ve ekonomik maliyeti ile sera gazı emisyonundaki azalması Marquard ve arkadaşları (2008) tarafından incelenmiştir.

Bu çalışmada, ülkemizin artan elektrik talebini çevresel etkileri daha az, yüksek enerji güvenliliği olan ve düşük maliyetli elektrik üretim teknolojileri kullanılarak karşılanması ve bu teknoloji dağılımının uzun dönemde farklı senaryolar bazında belirlenmesi incelenmiştir. Çalışmanın model oluşturulması basamağında kullanılan veriler ve bu verilerin kaynakları ile model oluşturmada izlenen adımlar ikinci bölümde verilmiştir. Model sonuçları ve sonuçların değerlendirilmesi üçüncü bölümlerde, sonuçların tartışması ise son bölümde verilmiştir.

2. VERİ KAYNAKLARI VE METODOLOJİ

Bu bölümde model oluşturulma esnasında temin edilen veri türleri ve bunların kaynakları ile AnswerTIMES yazılımı ile model geliştirilmesinde ve senaryo uygulamalarında izlenen metodoloji açıklanmıştır.

2.1. Veri kaynakları

Çalışmada kullanılan veriler ekonomik parametreler, enerji talebi ve arzı, kaynak ve teknolojilerin tekno-ekonomik parametreleri, çevresel dışsallıklar ve genel global parametreler olarak sınıflandırılabilir.

Uzun dönem elektrik talep tahmin değerleri Aydınalp Köksal ve arkadaşları (2010) tarafından ekonometrik yaklaşım kullanılarak elde edilen model sonuçlarından temin edilmiştir. Bu ekonometrik model nüfus, gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH), hane halkı geliri, elektrik tarifi ve iklim verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan talep tahmini ve benzer çalışmalarından temin edilen talep tahminlerin karşılaştırma amaçlı Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan elektrik talep tahmini ve diğer çalışmaların tahminleri (GWh)

Yıl	Aydınalp Köksal vd. (2010)	ETKB (2014)	Dilaver vd. (2011)	Çunkaş ve Taşkıran (2011)
2010	212.297		175.000	216.204
2015	266.519	271.450		265.765
2020	316.086	357.430	259.000	315.020
2025	369.933	458.740		

Ekonomik ve teknik olarak kullanılabilen yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar, güneş, hidro, biyokütle ve jeotermalin potansiyel değerleri Tablo 2’de gösterildiği şekilde temin edilmiştir.

Tablo 2. Yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelleri (Yılmaz, 2008)

Yenilenebilir Enerji Kaynağı Türü	Brüt	Teknik	Ekonomik
Hidro	107.500 MW	53.730 MW	36.652 MW
	430 10 ⁹ kWh/yıl	215 10 ⁹ kWh/yıl	130 10 ⁹ kWh/yıl
Jeotermal	4.500 MW	500 MW	350 MW
			1,4 10 ⁹ kWh/yıl
Rüzgar	220.000 MW	115.000 MW	20.000 MW
	400 10 ⁹ kWh/yıl	290 10 ⁹ kWh/yıl	5010 ⁹ kWh/yıl
Güneş	115.000.000 MW	1.400.000 MW	116.000 MW
	977.000 10 ⁹ kWh/yıl	6105 10 ⁹ kWh/yıl	305 10 ⁹ kWh/yıl
Biyokütle	120 Mtep/yıl	50 Mtep/yıl	32 Mtep/yıl

Yenilenebilir enerji kaynaklarına ek olarak kullanılabilir linyit, taşkömür, petrol ve doğalgaz potansiyeli de temin edilmiştir. Linyit ülkemizde en yüksek rezerve sahip enerji kaynağı olup bunu taşkömürü rezervleri izlemektedir. Buna karşın doğalgaz ve petrol rezervleri oldukça sınırlıdır. 2014 yılı itibarı ile 506 milyon tonu görünür olmak üzere, yaklaşık 1,3 milyar ton taşkömürü ve 13,9 milyar tonu görünür rezerv niteliğinde toplam 14,2 milyar ton linyit rezervi bulunmaktadır (TKİ, 2015).

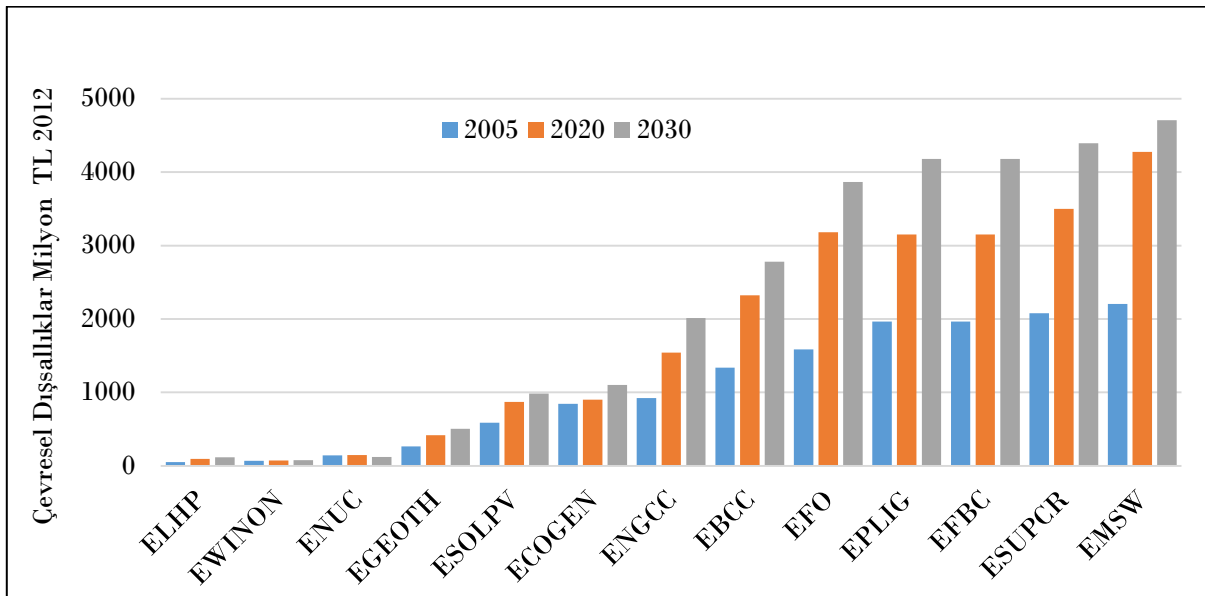
Giriş bölümünde de belirtildiği gibi elektrik üretiminin yarıya yakını doğalgaz santrallerinde üretilmektedir. Doğalgaz rezervlerimizin çok sınırlı olmasında dolayı talebin tamamına yakını

6. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu-2015 7-9 Ekim 2015, İZMİR

ithal edilmektedir. Doğalgaza ek olarak ithal kömür ile çalışan santrallerin kurulu güçteki payı %9'a çıkmış, buna karşılık fuel-oil ile çalışan santrallerde üretimi toplamda %1'in altına düşmüştür (TEİAŞ, 2015). Ülkemizde halihazırda kömür yakıtlı santrallerde pulverize kömür ve akışkan yatak teknolojileri kullanılmaktadır. Az olmakla birlikte ısı verimi yüksek süper kritik pulverize kömür yakma santraller de mevcuttur. Doğalgaz çok büyük oranda kombine çevrim santrallerinde kullanılmaktadır.

Ülkemizde elektrik üretiminde ekonomik ve teknik olarak uygun potansiyelde olan yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlar ve nükleer enerji ile elektrik üretim teknolojileri hakkında birçok kaynaktan detaylı bilgiler toplanmıştır. Toplanan bu bilgiler yatırım maliyetleri, işletim ve bakım maliyetleri, ısı verim, özgün emisyon faktörleri, kapasite faktörleri, tahmini kullanım yılı, yakıt maliyetleri, emre amadelik ve özellikler çevresel dışsallıklar olarak listelenebilir. Özellikle her teknoloji için ülkemize özel maliyet ve performans verilerinin temini mümkün olmamıştır. Bu nedenle ülkemizin ekonomik, demografik ve iklim koşullarına yakın bölgelerde benzer teknolojiler için üretilmiş değerler kullanılmıştır.

Elektrik üretimi sırasında oluşan çevre kirliliğinin insan sağlığına, binalara, toprak mahsullerine, ormanlara olan zararlı etkilerinin maliyetleri çevresel dışsallık olarak belirtilmektedir. Ülkemizde kullanılan elektrik üretim teknolojilerinin çevresel dışsallık değerlerinin verildiği çalışmalar bulunmadığından, 27 Avrupa ülkesinde kullanılan teknolojiler için üretilen değerler kullanılmıştır (CASES, 2008). Ülkemize has çevresel dışsallıklarında hesaplanmasında ülkelerin GSYİH ve nüfus yoğunlukları bir ölçeklendirme faktörü kullanılmıştır. CASES (2008) raporunda verilen değerler kullanılarak ülkemiz için hesaplanan ölçeklendirme faktörü 0,77'dir. Bu değer kullanılarak ülkemizde kullanılan ve kullanılmasa yakın gelecekte planlanan elektrik üretim teknolojileri için çevresel dışsallıklar hesaplanmış ve Şekil 1'de 2005, 2020 ve 2030 yılları için hesaplanan değerler verilmiştir. Şekilde verilen güç santrallerinde açıklamaları KISALTMALAR bölümünde verilmiştir.



Şekil 1. Elektrik üretim teknolojilerinin çevresel dışsallıkları, Milyon TL 2012

2.2. Metodoloji

Bir önceki kısımda açıklanan veriler kullanılarak *AnswerTIMES* programında 2013 yılı baz alınarak elektrik sektörü bir sistem olarak kabul edilmiş ve bu sisteme girdi ve çıktı olan bütün parametreler belirlenmiştir. Öncelikle baz yılda kullanılan bütün elektrik üretim teknolojilerinin yakıt bilgileri, performans bilgileri, kirletici özgül emisyon faktörleri, çevresel dışsallıkları gibi verileri programa girilmiştir. Daha sonra tüm sistemin teknoloji bazında kurulu güç, elektrik üretim, yakıt ithali, elektrik ithal ve ihraç bilgileri programa girilmiştir. Baz olarak kabul edilen yıl için tahmin edilen değerler gerçek değerler ile karşılaştırılarak oluşturulan sistemin ince ayarları yapılmıştır. Daha sonra dört kategoride toplam on adet toplam senaryo geliştirilmiştir. Bu senaryolar hakkında detaylı bilgi Tablo 3’de verilmiştir. Senaryolar uygulanırken 2019-2023 yılları arasında kademeli olarak Akkuyu Nükleer Enerji Santrali’nin ve daha sonra 2024 yılında Sinop Nükleer Enerji Santrali’nin ilk kısmının işletmeye açılacağı varsayılmıştır. Senaryoların analizleri 2013-2032 arasında yıllık olarak yapılmıştır. Tüm analizlerde elektrik sisteminin şebeke olarak birbirine tamamı ile bağlı olduğu kabul edilmiştir. İletim ve dağıtım kayıpları son 25 yılın ortalaması olan %16 olarak alınmıştır. Tüm maliyet hesaplarında 2012 yılının parasal değerleri kullanılmıştır. Bazı elektrik santrallerinde kullanılan ikinci yakıtlar ihmal edilmiştir. İthal edilen elektrik toplam emisyonlara katılmamıştır.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan senaryoların kısıtlamaları ve varsayımları

Senaryo İsmi	Senaryo Açıklaması	Kısıtlamalar	Varsayımlar
BASE	Referans	2032 yılına kadar sabit değişim	Teknoloji dağılımı sabit kalır
RENMAX40, RENMAX50, RENMAX60, RENMAX70	En yüksek yenilenebilir enerji oranı (% 40, 50, 60, 70)	Yenilenebilir enerjilerin payının 2032 yılında belirli yüzdelere ulaşması	Geri kalan dağılım en uygun şekilde dağıtılır
LIMNG	Kömür ağırlıklı	2018 yılından itibaren doğalgaz ithaline kısıtlama	Yerli kaynağımız olan linyit ve taşkömürünün en yüksek seviyede kullanılması
EMISCAP10 EMISCAP20 EMISCAP30	CO ₂ Emisyonlarının kısıtlaması oranı (% 10, 20, 30)	Referans senaryoda 2032’de elde edilen CO ₂ emisyon değerlerinin belirli yüzdelerde azaltılması	Herhangi bir yakıt ve/veya teknoloji kısıtlaması bulunmamaktadır
EXTCOST	Çevresel Dışsallıklar	Çevresel dışsallıkların da maliyetlere eklenmesi	Herhangi bir yakıt ve/veya teknoloji kısıtlaması bulunmamaktadır

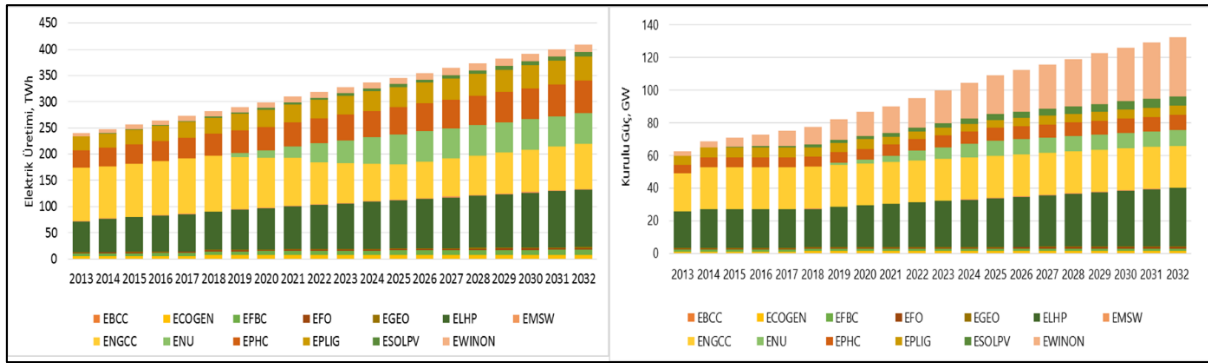
3. SONUÇLAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

AnswerTIMES enerji planlama yazılım programı kullanılarak oluşturulan modelde Tablo 3’de açıklanan senaryoların uygulanması ile 2013 – 2032 arası üretim teknolojisi bazında elektrik

6. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu-2015 7-9 Ekim 2015, İZMİR

üretimi, kurulu güç, CO₂, SO_x ve NO_x emisyonları, yatırım, işletim ve bakım maliyetleri ile çevresel dışsallıklar belirlenmiştir.

2032 yılına kadar teknoloji dağılımının 2013 yılındaki oranda devam edeceği varsayımı ile kurgulanan BASE senaryo uygulamasından elde edilen teknoloji bazında elektrik üretimi ve kurulu güç Şekil 2’de verilmiştir. Buradan görüleceği gibi 2019 yılından itibaren nükleer enerji güç santralleri doğalgaz kombine çevrim güç santrallerinin yerini alarak üretim dağılımında önemli bir pay almaktadır. Kurulu güç dağılımında ise nükleer güç santrallerine ek olarak rüzgar santrallerinin payı artmaktadır.

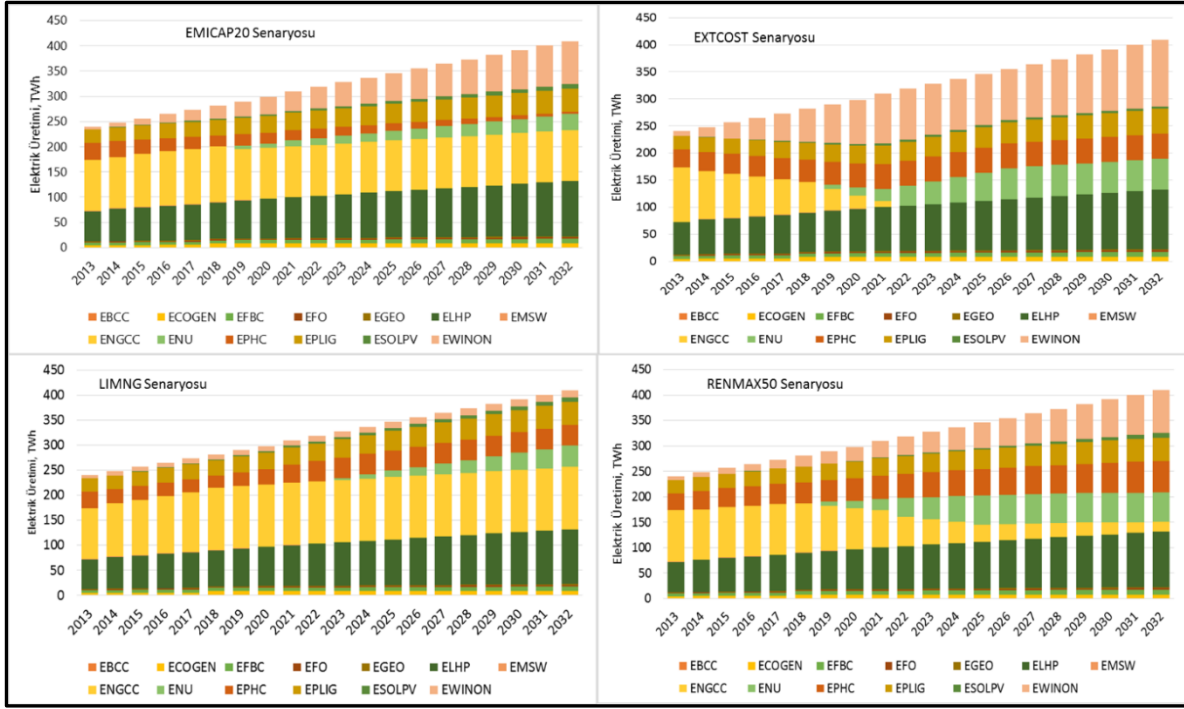


Şekil 2. BASE senaryosu bazında teknoloji türüne göre elektrik üretimi ve kurulu güç

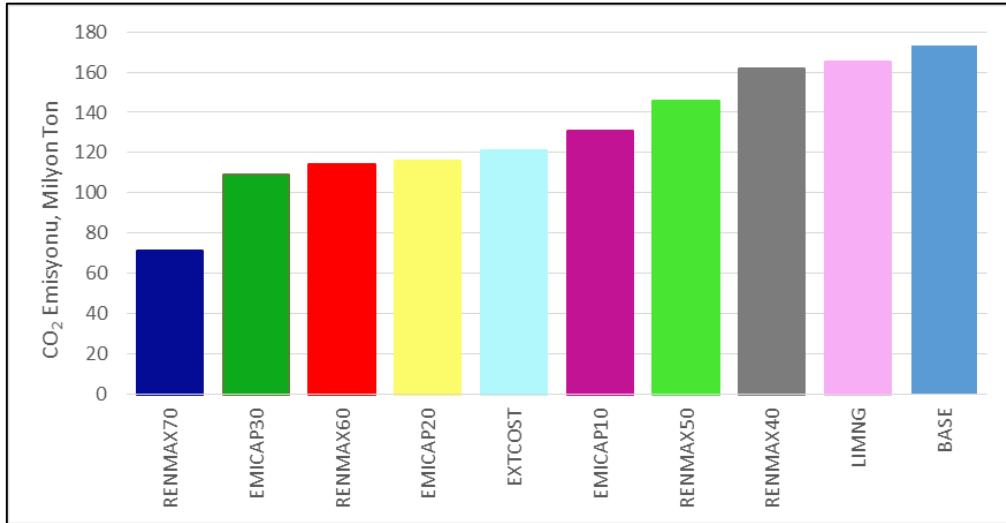
Emisyonların 2032 yılında %20 azalmasını öngören EMISCAP20 senaryosu, çevresel dışsallıkların da üretim maliyetine eklendiği EXTCOST senaryosu, 2018 yılından itibaren doğalgaz ithaline kısıtlama getiren LIMNG senaryosu ile yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretiminin oranını %50 kabul edildiği RENMAX50 senaryosu bazında elektrik üretiminin teknoloji bazında 2013-20312 arası dağılımı Şekil 3’de verilmiştir. EMISCAP20 senaryosunda rüzgar güç santrallerinin üretimde payı artmakta ve taş kömürü santrallerin payı büyük ölçüde düşürülmektedir. RENMAX50 senaryosunda da rüzgar güç santrallerinin üretimde payı artmakta ama buna karşın taş kömürü santrallerin payı azaltılmaktadır. Çevresel dışsallıklarının göz önüne alındığı EXTCOST senaryosunda doğalgaz yakıtlı güç santrallerinin payı 2022 yılı itibarı ile sıfırlanmış ve taş kömürü santrallerinin payı düşürülmektedir. Buna karşın bu senaryoda eksik talep büyük oranda rüzgar santralleri ile karşılanmaktadır. LIMNG senaryosunda da doğalgaz yakıtlı güç santrallerinin payı düşmekte, buna karşın taş kömürü santrallerin payı artmaktadır.

On farklı senaryo bazında belirlenen 2013-2032 arası teknoloji dağılımları ve özgül CO₂ emisyon faktörleri kullanılarak elektrik üretimine bağlı toplam CO₂ emisyonları hesaplanmıştır. 2013 yılında 117 milyon ton olarak hesaplanan emisyon değerleri Şekil 4’de görüldüğü gibi 2032 yılında farklı senaryolar bazında 72 ile 173 milyon ton arasında olabileceği tahmin edilmiştir. En düşük emisyon yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretiminin oranını %70 kabul edildiği RENMAX70 senaryosu sonucunda ve en yüksek emisyonlar ise 2013 yılı teknoloji dağılımlarının sabit kaldığı BASE senaryosu sonucunda gerçekleşmiştir.

6. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu-2015
7-9 Ekim 2015, İZMİR



Şekil 3. EMISCAP20, EXTCOST, LIMNG ve RENMAX50 senaryoları bazında teknoloji türüne göre elektrik üretimi

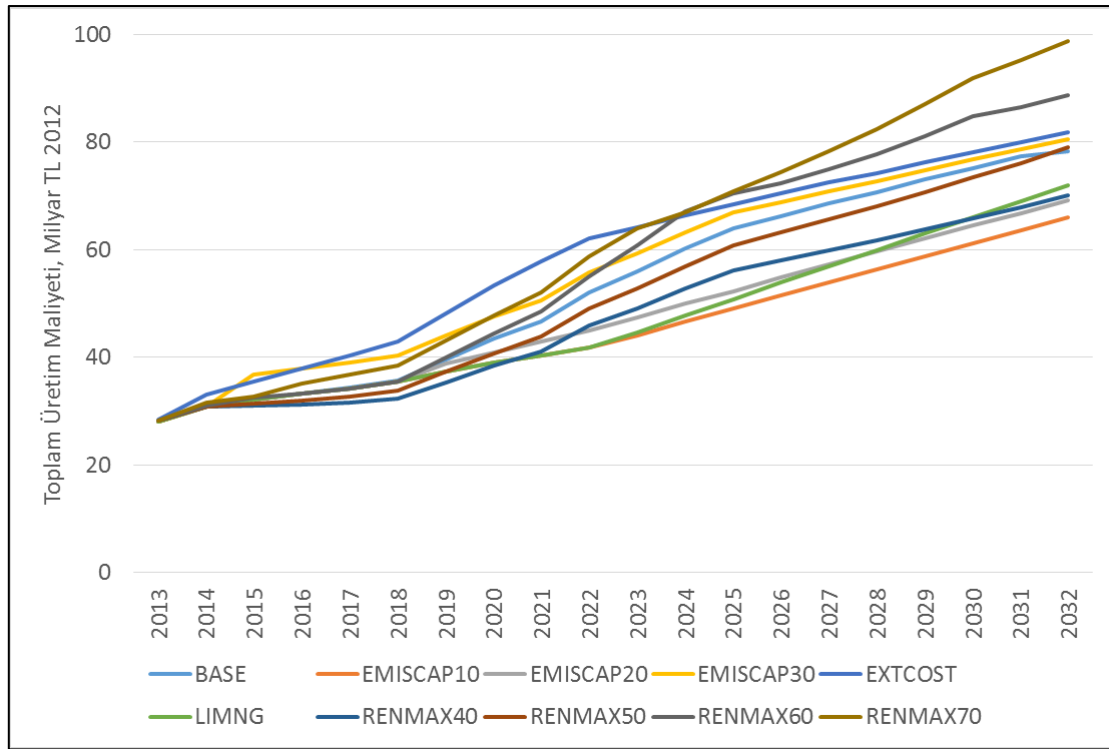


Şekil 4. 2032 yılında farklı senaryolar bazında toplam CO₂ emisyonu

Elektrik üretimine bağlı NO_x ve SO_x emisyonları da teknoloji bazında on senaryo sonuçları için hesaplanmıştır. CO₂ emisyonlarında olduğu gibi 2032 yılında en düşük emisyonlar yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırıldığı RENMAX70 senaryosunun uygulandığı durumda gerçekleşebileceği belirlenmiştir. En yüksek NO_x ve SO_x emisyonları ise CO₂ emisyonlarında olduğu gibi BASE senaryosunun uygulanması sonucunda ortaya çıkmaktadır.

Elektrik üretiminde yatırım, işletim ve bakım ile yakıt maliyetlerini içeren toplam maliyetler on senaryo bazında 2013-2032 yılları için hesaplanmış ve Şekil 5'de verilmiştir. Çevresel

dışsallıkların göz önüne alındığı EXTCOST senaryosu 2024 yılına kadar en yüksek maliyetli teknoloji dağılımı bulunduran senaryo olarak görünmektedir. 2023 yılı itibarı ile doğalgaz santralleri kullanılmadığından ve üretimin üçte biri rüzgar güç santralleri tarafından karşılanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretim teknolojilerinin payını 2032 yılında %70 olarak kabul eden RENMAX70 senaryosu 2024 yılı itibarı ile en yüksek maliyetle ile elektriğin üretildiği teknoloji dağılımına sahip senaryo olarak ortaya çıkmaktadır. EXTCOST senaryosu ile karşılaştırıldığında RENMAX70 senaryosunda rüzgar ve güneş güç santrallerinin payları daha yüksektir. Bu iki tür santralin 2032 yılında EXTCOST senaryosunda oranı %31 iken RENMAX70’de %43’e çıkmaktadır. Bu oran artışı da elektrik üretiminin maliyetini yükselmektedir.



Şekil 5. 2013-2032 yılları arası elektrik üretiminin farklı senaryolar bazında toplam maliyeti

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada artan elektrik talebini karşılamak için farklı teknoloji dağılımlarının çevresel ve ekonomik maliyetlerinin analizleri yapılmıştır. Elektrik üretim teknolojilerinin dağılımları on farklı senaryo bazında *AnswerTIMES* enerji planlama yazılım programı kullanılarak optimize edilmiştir. Senaryoların modele uygulanması sonucunda farklı kısıtlamalar ve varsayımlar göz önüne alınarak teknoloji bazında 2013-2032 yılları arasında elektrik üretimi, kurulu güç, CO₂, SO_x ve NO_x emisyonları, yatırım, işletim ve bakım maliyetleri ile çevresel dışsallıklar belirlenmiştir.

2013 yılındaki teknoloji dağılımının 2019 yılı itibarı ile nükleer santrallerin işletmeye alınması dışında değişmemesini öngören BASE senaryosu diğer senaryolar ile kıyaslandığında yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimi en düşük ve buna bağlı olarak en yüksek CO₂, SO_x ve NO_x emisyonlarına neden olan uygulamadır. Buna karşılık en yüksek

6. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu-2015 7-9 Ekim 2015, İZMİR

toplam maliyetli senaryolar yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretim teknolojilerinin oranının yüksek olduğu senaryolardır.

Kirletici emisyonları ve toplam maliyetler göz önüne alındığında en uygun senaryo sonuçları emisyonların 2032 yılında %20 azalmasını öngören EMISCAP20 senaryosunun uygulanması ile ortaya çıkmaktadır. Bu senaryo RENMAX70 senaryosundan sonra en düşük SO_x ve NO_x emisyonlarına, BASE senaryosunun üçte ikisi kadar CO₂ emisyonlarına ve ikinci en düşük toplam maliyetli enerji üretim dağılımına sahiptir. Bunlara ek bu senaryonun teknoloji dağılımı, olarak enerji güvenliğinden dolayı risk taşıyan ithal doğalgaz ve kömür yakıtlı güç santrallerinin 2013 yılı üretimindeki toplam paylarını 2032 itibarı ile yarıya düşürmektedir.

Bu çalışmada yazarların bilgisi dahilinde açık literatürde ülkemize has elektrik üretim teknolojilerinin çevresel dışsallıklar ile ilgili bilgi mevcut olmadığından dolayı diğer ülkeler için belirlenen değerler ülkemiz için ölçülendirilip kullanılmıştır. Bu nedenle ileride bu konuda yapılacak çalışmalarda ülkemize has değerlerin kullanılması ülkemizin durumuna daha uygun sonuçlar verecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 2226 Uluslararası Araştırmacılar İçin Araştırma Burs Programı ve Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi 6081 - Otomasyon Ve Yazılım Desteği Programı tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a ve Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi'ne teşekkür ederiz.

KISALTMALAR

CASES	Cost Assessment for Sustainable Energy Systems
EBCC	Biyokütle kombine çevrim güç santrali
ECOGEN	Kojenerasyon – kombine ısı ve güç santrali
EFBC	Akışkan yataklı güç santrali
EFO	Fuel-oil güç santrali
EGEO	Jeotermal güç santrali
ELHP	Hidroelektrik güç santrali
EMSW	Katı atıkları yakma tesisi
ENGCC	Doğalgaz kombine çevrim güç santrali
ENU	Nükleer enerji güç santrali
EPHC	Taş kömürü güç santrali
EPLIG	Pulverize linyit güç santrali
ESOLPV	Fotovoltaik güç santrali
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EWINON	Rüzgar güç santrali
GSYİH	Gayri safi yurtiçi hasıla
LEAP	Long-range Energy Alternatives Planning
MARKAL	MARKet ALlocation
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri

KAYNAKLAR

Aydınalp Köksal, M., Baker, D.K., Erdil, E., 2010, Yük Dağıtım Bölgelerinde Saatlik Kısa ve Uzun Dönem Elektrik İhtiyacının Modellenmesi, TÜBİTAK 108M001 Proje Raporu, Ankara.

Baumol, W.J., 1988. The theory of environmental policy, Cambridge University Press, Cambridge, İngiltere.

Breeze, P. 2014. Power generation technologies, Elsevier, Londra, İngiltere.

CASES, 2008, Cost Assessment for Sustainable Energy Systems
<http://www.feem-project.net/cases/index.php>, Erişim Tarihi: 2 Şubat 2015

Çunkaş, M., Taşkiran, U., 2011. Turkey's Electricity Consumption Forecasting Using Genetic Programming. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 6, 406-416

Dilaver, Z., Hunt, L.C., 2011. Modelling and forecasting Turkish residential electricity demand. *Energy Policy*, 39, 3117-3127

ETKB, 2014, ETKB İle Bağlı ve İlgili Kuruluşlarının Amaç ve Faaliyetleri 2014, <http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2f1%2fDocuments%2fMavi+Kitap%2fMAV%2f4%2fB0+K%2fB0TAP+2014+bask%2fB1.pdf>. Erişim Tarihi, 15 Aralık 2014.

Marquard, A., Merven, B., Tyler, E. 2008. Costing a 2020 target of 15% renewable electricity for South Africa. Energy Research Centre, University of Cape Town. http://www.eri.uct.ac.za/Research/publications/08-Marquardetal-costing_a_2020_target.pdf
Erişim Tarihi: 19 Temmuz 2014

Owen, A.D. 2006. Renewable energy: Externality costs as market barriers. *Energy Policy*, 34, 632-642.

Ozer, B., Gorgun, E., Incecik, S. 2013. The scenario analysis on CO₂ emission mitigation potential in the Turkish electricity sector: 2006–2030. *Energy*, 49, 395-403.

Rafaj, P., Kypreos, S. 2007. Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model. *Energy Policy*, 35, 828-843.

Roth, I. Ambs, L.L. 2004. Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing. *Energy*, 29, 2125-2144.

Sağlam, M. 2010. *Establishing mitigation strategies for energy related emissions for Turkey using the MARKAL family of models*. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Saysel, A. K., Hekimoğlu, M. 2013. Exploring the options for carbon dioxide mitigation in Turkish electric power industry: System dynamics approach. *Energy Policy*, 60, 675-686.

6. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu-2015 7-9 Ekim 2015, İZMİR

Sulukan, E. 2010. *Establishing energy efficient utilization and cost-effective energy technologies selection strategies for Turkey using MARKAL family of models*. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

TEİAŞ, 2015, Türkiye Elektrik İstatistikleri, <http://www.teias.gov.tr/TurkiyeElektrikIstatistikleri.aspx>, Erişim Tarihi: 31 Ağustos, 2015.

TKİ Genel Müdürlüğü, 2015, <http://www.tki.gov.tr/tr/Enerji-ve-Komur/Sektor/4>, Erişim Tarihi: 1 Eylül 2015.

Yılmaz, A. O., 2008. Renewable energy and coal use in Turkey. *Renewable Energy* 33, 950-959.