

## ELEKTRİK ÜRETİMİNDE SU TÜKETİMİ VE CO<sub>2</sub> SALIMI İLİŞKİSİ

Balkess EL-KHOZONDAR<sup>1</sup>, Merih AYDINALP KÖKSAL<sup>1(\*)</sup>

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Beytepe/Ankara

### ÖZET

Enerji sektöründe su tüketiminin yüksek olması ve su kaynaklarına erişimin sınırlı düzeyde olması nedeniyle su ve enerjinin ilişkisi son zamanlarda daha da önem kazanmıştır. Enerji üretiminde su kullanımı yakıt ekstraksiyonunda, yakıt imalatında ve elektrik üretimi işlemlerinde yoğun şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar arasında elektrik üretimi suyun en yoğun kullanıldığı prosestir. Bu nedenle, elektrik santrallerinde elektrik üretimi sırasında tüketilen su miktarının araştırılması enerji-su bağlantısı içinde önemli bir konu haline gelmiştir. Buna bağlı olarak, elektrik sektörü CO<sub>2</sub> salımlarında da önemli bir paya sahiptir. Son yirmi yıldır, Türkiye'nin enerji ve elektrik talebi hızla artmaktadır. Türkiye'de hızla artan elektrik talebini karşılamak için yakın gelecekte daha fazla termik santral inşa edilmesi beklenmektedir. Artan termik santral kaynaklı elektrik üretimi de CO<sub>2</sub> salımlarını artıracaktır. Bu çalışmada, Türkiye'de bulunan elektrik santrallerindeki elektrik üretimi için gereken su tüketimi ve bu tüketimin azaltılmasına bağlı olarak CO<sub>2</sub> salımlarındaki değişim araştırılmıştır. Çalışma kapsamında 2016 yılında işletmede olan tüm santrallerin işletme verileri toplanmış ve literatürden elde edilen su tüketimi faktörleri kullanılarak yakıt türü ve üretilen elektrik başına ve toplam su tüketimi hesaplanmıştır. Çalışmanın sonraki aşamasında, santral yakıt türü karışımlarına dayalı çeşitli senaryolar ile toplam ve üretim başına su tüketimi ve tasarrufunu belirlemek için analizler yapılmıştır. Uzun Vadeli Enerji Alternatifleri Planlama (LEAP) enerji planlaması programı kullanılarak 2017 ve 2035 yılları arasındaki en az su tüketimi sağlayan yakıt karışımı türü lineer optimizasyon yaklaşımları ile belirlenmiştir. Modele uygulanan senaryolar kapsamına 2035 yılına kadar CO<sub>2</sub> emisyonları da hesaplanmıştır. Çalışmanın sonuçlarının analizleri kapsamında artan talebi karşılamak için en düşük su tüketiminin gerçekleştiği santral yakıt karışımının CO<sub>2</sub> salımını ne ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

### ANAHTAR SÖZCÜKLER

Su tüketimi, Su yoğunluğu, Elektrik üretimi, Soğutma sistemleri, CO<sub>2</sub> Salımı

### ABSTRACT

Water-energy relationship has gained more importance due to high water consumption in the energy sector and limited availability of the water resources. The energy production is a water intensive process in which water is consumed for fuel extraction, processing, and electricity generation which results in the largest share of water consumption. Thus, investigating the amount of water consumed during electricity generation at power plants has become an important issue in energy-water nexus. Also, CO<sub>2</sub> emission from electricity sector have an important impact. Energy and electricity demand of Turkey has been increasing rapidly in the last two decades. More thermal

(\*) aydinalp@hacettepe.edu.tr

power plants are expected to be built in near future to supply the rapidly increasing electricity demand in Turkey. Increase in fossil fuelled power plants will then increase the CO<sub>2</sub> emissions. In this study, the water consumption for electricity generation and CO<sub>2</sub> emissions of Turkish power plants are investigated. First, operational data of all power plants in 2016 are gathered and water consumption factor are used to determine current water consumption. Then, various scenarios based on fuel types mixture are analyzed to determine total and per generation water consumption and savings. Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) program is used to determine the fuel type mixtures resulting in the minimum water consumption using optimization approaches between 2017 and 2035. The CO<sub>2</sub> emissions till to 2035 are also calculated based on the scenarios applied to the model. Effects of the plant fuel mixture resulting in low water consumption on CO<sub>2</sub> emissions are investigated.

## KEYWORDS

Water consumption, Water intensity, Electricity generation, Cooling systems, CO<sub>2</sub> Emission

## 1. GİRİŞ

Enerji sektöründe yakıt ekstraksiyonu, yakıt işlenmesi ve elektrik üretimi suyun yoğun kullanıldığı süreçlerdir. Su ve atık su arıtımı, tuzsuzlaşma, suyun iletimi, pompalanması gibi proseslerde de su hizmetlerini sağlamak için enerji tüketilmektedir. Enerji ve su ile ilgili süreçler birbirine yakın etkileşimdedir ve bu nedenle bu etkileşime su-enerji bağlantısı denir. Küresel elektrik talebi ve dolayısıyla elektrik üretimi sürekli olarak artmakta, ve bu işlemlerde tüketilen su miktarında da büyük artış gözlenmektedir. Su tüketiminin miktarı elektrik üretimi için kullanılan teknolojiye bağlıdır. Küresel elektriğin büyük miktarı özellikle soğutma sistemlerinde önemli miktarda su kullanan termik santrallerde üretilmektedir. Açık devre, ıslak ve kuru soğutma sistemleri termik santrallerinde kullanılan en yaygın soğutma sistemleridir (Torcellini vd., 2004). Açık devre soğutma sistemleri okyanus, nehir, göl, gölet veya kanal gibi yakındaki bir su kaynağından büyük miktarda su çekerler. Çekilen su kondansatörden geçtikten sonra su kaynağına geri gönderilir. Bu tip soğutma sistemi, düşük sermaye ve işletme maliyetlerine sahiptir ve daha düşük su tüketimine sahiptir (Torcellini vd., 2004; Lamya vd., 2012; Mielke vd., 2010). Islak soğutma sistemlerinde, su buharı yoğunlaştırıldıktan sonra soğutma kulelerine geri pompalanır. Bu sistem büyük miktarlarda su çekmemekle birlikte açık devre soğutma sistemine göre daha fazla su tüketir (Torcellini vd., 2004; Rutberg, 2012). Termoelektrik santrallerde kullanılan bir diğer yöntem, havanın kondansatörden gelen buharı yoğunlaştırmak için boru dizilerinden geçirildiği kuru soğutma sistemidir (Havey, 2008).

Ülkemizde elektrik talebi arttıkça, yüksek su tüketimli termoelektrik santrallerin elektrik üretiminde payı fazla olduğundan su tüketimi de artmaktadır. Bazı durumlarda su kıtlığı, Türkiye gibi su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde elektrik üretimini kısıtlayan bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Buna rağmen, ülkemizde elektrik üretimi sırasında tüketilen su miktarı hakkında bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle, ülkemizde üretilen elektrik başına kullanılan toplam su miktarının belirlenmesi önem taşımaktadır. Santrallerde en fazla su tüketimi soğutma sistemlerinde gerçekleştiğinden, çeşitli soğutma sistemlerinde su tüketiminin incelenmesi önemlidir. Ayrıca, artan talebi karşılamak için yakın gelecekte inşa edilmesi planlanan santrallerde elektrik üretimi başına su tüketimini azaltmanın yolları da araştırılmalıdır. Buna ek olarak,

ülkemizin elektrik sektörünün planlanmasında düşük su tüketiminin yanında düşük CO<sub>2</sub> salımı olan teknolojilerin seçilmesi önemlidir.

Açık literatürde, santralde birim üretime başına su tüketimi miktarının (l/MWh) belirlenmesi üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Su verileri kullanılarak teknoloji türüne göre su tüketim faktörlerinin belirlendiği çalışmalar vardır (Gleick, 1994; Stiegel vd., 2005; Black, 2007; Stiegel vd., 2009; DOE, 2006; Fthenakis ve Kim, 2010; Macknick vd., 2011). Birçok güncel çalışma incelendiğinde Macknick vd. (2011) tarafından belirlenen su tüketim faktörlerinin (STF) kullanıldığı görülmüştür. Macknick vd. (2011)'in çalışmasında ıslak soğutma sistemli termik santrallerin soğutma sistemlerinden daha fazla su tükettiğini belirlenmiştir. Buna ek olarak, kömür ve linyit yakıtlı santrallerinde diğer tüm soğutma sistemli santrallerden daha yüksek su tükettikleri belirtilmiştir. Buna karşılık, fotovoltaik ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji santralleri ile konsantre güneş enerjisi, stirling motoru ve doğalgaz kombine çevrim teknolojileri ile çalışan tesislerin düşük su tüketim faktörleri olduğu ortaya çıkmıştır. Türk elektrik sektörünün su tüketiminin araştırıldığı bir çalışmada, su kaynaklarının Türkiye'de elektrik üretim sektörü üzerindeki etkilerini araştırmış, su tüketimi ile elektrik talebi arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi için bir entegre optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada Macknick vd. (2011)'de belirlenen su çekme faktörleri kullanılmış olup, santrallerin su çekme miktarları hesaplanmıştır. Delgado ve Herzog (2012) santrallerden elde edilen su tüketim verilerini analiz etmenin yanında, ayrıca termik santral başına su tüketimini belirlemek için basit bir model de geliştirdiler. Model, santrallerdeki su ve ısı akışlarının analizine dayanmaktadır. Dale vd. (2015), iklim değişikliğinin bölgesel su ve enerji sistemleri yönetimi üzerindeki etkisini tanımlamak için iki simülasyon aracını (LEAP ve WEAP) kullanarak bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, Kaliforniya'daki bazı enerji santrallerinden elde edilen veriler ile enerji ve su planlama sistemlerinin hassasiyetini kontrol etmek için kullanılmaktadır. Elektrik santrallerinin soğutma sistemlerinin karşılaştırıldığı birçok çalışma yapılmıştır. Sistemler maliyet, su tüketimi miktarı ve çevresel etkiler gibi birkaç noktadan karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaların birinde, ıslak soğutma sistemleri, kuru soğutma sistemleri ile değiştirildiğinde su tüketimi miktarı yaklaşık % 95 oranında azaldığı belirlenmiştir (CEC, 2002). Bununla birlikte, kuru soğutma sistemleri, su ve havanın ısı kapasite farkından dolayı daha düşük verime ve daha yüksek yatırım maliyetlerine sahiptirler.

Bu çalışmanın iki ana hedefi bulunmaktadır. Bunlardan biri, halihazırda Türkiye'de kullanılan üretim teknolojilerinde 1 GWh elektrik üretmek için tüketilen su miktarını (m<sup>3</sup>) hesaplama ve artan talebi karşılamak için yakın gelecekte inşa edilmesi beklenen santrallerde elektrik üretimi başına su tüketimini azaltmanın yollarını LEAP optimizasyon programı ile belirlemektedir. Çalışmanın ikinci kısmında ise, optimizasyon programına uygulanan senaryolar bazında tahmin edilen yakıt dağılımlarına bağlı CO<sub>2</sub> salımlarının da belirlenmesidir. Bu çalışma, Türk elektrik sektöründe yakıt türüne göre en çok tercih edilen su soğutma sistemlerinin belirlenmesinde önemli bir adımdır. Bildiğimiz kadarıyla bu çalışma, Türk elektrik sektöründeki su tüketimini simülasyon yazılımı ile analiz eden ilk çalışma olmaktadır.

Bu makale dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, çalışma ile ilgili genel bilgiler sunulmuştur. İkinci bölümde, su tüketim ve CO<sub>2</sub> salımlarının hesaplamalarında kullanılan metodoloji ve optimizasyon modeline uygulanan senaryoların anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde sonuçlar ve tartışmalar sunulmaktadır. Sonuçlar, makalenin dördüncü bölümünde verilmiştir.

## 2. YÖNTEM

Bu çalışmanın yöntemi üç aşamadan oluşmaktadır; veri toplama ve analizi, model geliştirme ve senaryo uygulamaları. Aşağıdaki bölümlerde bu üç aşama ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

### 2.1. Veri toplama ve analizi

Çalışmanın ilk kısmında, 2016 yılında Türkiye'de faaliyet gösteren tüm enerji santrallerinin (361'i termik santral olmak üzere toplamda 1581 adet elektrik santrali) kurulu gücü, elektrik üretimi, soğutma sistemi türü, yakıt türü ve teknoloji türü verileri çeşitli kaynaklardan toplanmıştır (TEİAŞ, 2016; Enerji Atlası, 2016; Enka, 2016; Green Power, 2016; Ashwood ve Bharathan, 2011). Ülkemizdeki santrallerinin su tüketim verileri maalesef kamu erişimi için açık değildir. Bu nedenle, halen Türkiye'de faaliyet gösteren tüm enerji üretim teknolojileri için STF ( $m^3/GWh$ ) çeşitli çalışmalardan elde edilmiştir (Macknick vd., 2011; DOE, 2006; Feeley vd., 2008]. Bu faktörler daha sonra aşağıdaki eşitlik kullanarak 361 termik santralin su tüketimini hesaplamak için kullanılır.

$$SST = \sum_i^M \sum_j^N (\dot{U}RET_{i,j} \times STF_{i,j}) \quad (1)$$

Burada, SST tüm termik santrallerinin toplam su tüketimidir ( $m^3$ ), ÜRET termik santral başına elektrik üretimi miktarı (GWh), STF üretim teknolojisi ve soğutma sistemi türüne göre su tüketim faktörüdür ( $m^3/GWh$ ), j termik santral teknolojisi türüne göre soğutma sistemi türü, i termik santral teknolojisi türü, M termik santral sayısı ve N termik santral teknolojisi türüne göre soğutma sistemi sayısıdır.

Elektrik üretimine bağlı CO<sub>2</sub> salımlarının hesaplanmasında, Arı ve Aydınalp Köksal (2011) tarafından belirlenen üretim başına CO<sub>2</sub> salım faktörleri kullanılmıştır. Toplam CO<sub>2</sub> salımı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$STS = \sum_k^L (\dot{U}RET_k \times SF_k) \quad (2)$$

Burada, STS tüm termik santrallerden kaynaklı CO<sub>2</sub> (kg), SF yakıt türüne göre salınım faktörüdür (kg/MWh), k termik santrallerde kullanılan yakıt türleri ve L termik santrallerde kullanılan yakıt türü sayısı.

### 2.2. Modelin oluşturulması

Çeşitli üretim teknolojilerine dayanan elektrik üretim modeli, 2035'e kadar 2016 yılını temel yıl olarak alan Uzun Menzilli Enerji Alternatif Planlama (LEAP) kullanılarak geliştirildi. LEAP, çeşitli elektrik üretim teknolojilerini destekleyen ve mevcut kaynaklara ve talep tahminlerine dayanan enerji üretiminin izlenmesini kolaylaştıran bir optimizasyon programıdır. LEAP iki düzeyde çalışmaktadır; enerji, salımlar, maliyet-fayda vs. hesaplamaları için gerekli olan denklemlerin ya kullanıcı tarafından sisteme girilir veya sistemde halihazırda bulunan denklemlerin kullanılır (LEAP, 2015). Bu çalışmada, sistemde olan denklemler kullanılmıştır.

Talep analizi bölümünde, ETKB (2015)'den temin edilen 2017-2035 arası yıllık elektrik talep tahminleri LEAP'de oluşturulan modele girilmiş ve farklı senaryolar bazında optimizasyon

programının girilen talep tahminlerine göre yıllık yakıt dağılımı tahminleri analiz edilmiştir. Elektrik üretimi, dağıtımı ve iletim kayıpları, LEAP'deki dönüşüm analizi bölümünde yer almaktadır. Enerji santralının ömrü, verimliliği, maksimum kullanılabilirlik ve işletme ve yatırım maliyetleri LEAP'deki teknik parametrelerdir ve her teknoloji için modele girilmiştir. Programdaki analizler, her yıl için elektrik gereksinimlerinin hesaplanmasından sonra maliyet hesaplamaları ile başlar. Bu adım, doğal gaz, kömür, güneş vb. her teknoloji türü için yıllık bazda hesaplanmaktadır. Çalışmada iletim kayıpları dahil edilmemiştir. Programdaki optimizasyon modeli bu çalışma için su tüketimine dayanmaktadır, ancak LEAP'de su tüketimini dikkate alan bir faktör bulunmamaktadır. Bu nedenle, modelin işletme ve bakım maliyetleri parametresi STF ile değiştirilmiş ve diğer maliyetlerin tüm modüller için bir birim değerinde olduğu varsayılmıştır. Buna ek olarak, yenilenebilir kaynakların Türkiye'deki potansiyelleri LEAP'deki maksimum kapasite bölümünde sınırlandırılmıştır (ETKB, 2015).

### 2.3. Senaryoların uygulanması

Modelin LEAP'de geliştirilmesinin ardından 2017 ve 2035 yılları arasındaki üretim teknolojisi karışımları, Tablo 1'de verilen senaryolara göre optimize edilmiştir.

**Tablo 1.** Modele uygulanan senaryoların tanımları

| Senaryo İsmi                               | Senaryo Tanımı  |
|--|---|
| Olağan Senaryo (OS)                        | Üretim teknolojilerinin dağılımı çalışma süresi boyunca değişmeyecektir ve soğutma teknolojilerinin ortalama STF'leri her üretim teknolojisi için kullanılacaktır.  |
| Optimizasyon (OPTS)                        | Üretim teknolojilerinin dağıtımı minimum su tüketimi temel alınarak optimize edilecektir.   |
| Kuru Sistem Senaryosu (KSS)                | Üretim teknolojilerinin dağılımı çalışma süresi boyunca değişmeyecektir ve nükleer santraller dışında tüm teknolojilerin soğutma sistemleri 2016 yılından itibaren kuru soğutma sistemi olarak kabul edilecektir. |
| Kuru Sistem Optimizasyonu Senaryosu (KSOS) | Optimizasyon, 2016'dan başlayarak nükleer santraller dışında tüm teknolojiler için kuru soğutma sistemine dayalı olarak yürütülecektir.   |

Tablo 1'de listelenen senaryolara uygulanan varsayımlar aşağıda verilmiştir:

- Mevcut tüm santrallerin 2017-2035 yılları arasında çalıştığı varsayılmıştır.
- Yenilenebilir enerji potansiyelinin çalışma süresi boyunca kademeli olarak kullanılması öngörülmektedir.
- Doğal gaz santrallerinin payı yüzde 30-40 arasında değişmektedir.

- Nükleer santrallerin ilk ünitesi 2022 yılında faaliyete geçecek ve kalan üniteler 2029 yılına kadar kademeli olarak faaliyete geçecektir.

### 3. SONUÇLAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmanın ilk aşamasında, halihazırda kullanılan her elektrik üretim teknolojisi veya yakıt türüne göre soğutma sistemlerine dayalı su tüketimlerini belirlemek için santral verileri analiz edilmiştir. 2016 yılı itibarı ile teknoloji veya yakıt türüne göre soğutma sistemlerinin dağılımları kurulu güç bazında hesaplanmıştır. Tablo 2'de gösterildiği gibi, doğalgaz ve jeotermal santrallerin çoğunluğunda, biyogaz santrallerin tümünde ve kömür/linyit santrallerinin yarısında en fazla su tüketen soğutma sistemi olan ıslak soğutma sistemleri kullanılmaktadır.

**Tablo 2.** Teknoloji türüne göre soğutma sistemlerinin SFT değerleri ( $m^3/GWh$ ) ve kurulu güce göre soğutma sistemlerinin dağılımı (%)

| Teknoloji/Yakıt Türü | Islak Soğutma Sistemleri | Açık Devre Soğutma Sistemleri | Kuru Soğutma Sistemleri |
|----------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Doğalgaz             | 749 $m^3/GWh$ - % 48     | 378 $m^3/GWh$ - % 16          | 7.5 $m^3/GWh$ - % 37    |
| Jeotermal            | 5299 $m^3/GWh$ - % 55    | -                             | 511 $m^3/GWh$ - % 45    |
| Kömür/Linyit         | 2600 $m^3/GWh$ - % 37    | 946 $m^3/GWh$ - % 53          | 106 $m^3/GWh$ - % 10    |
| Biyogaz              | 889 $m^3/GWh$ - % 100    | -                             | 132 $m^3/GWh$ - % 0     |
| Nükleer              | 2543 $m^3/GWh$ - % 0     | 1018 $m^3/GWh$ - % 0          | -                       |

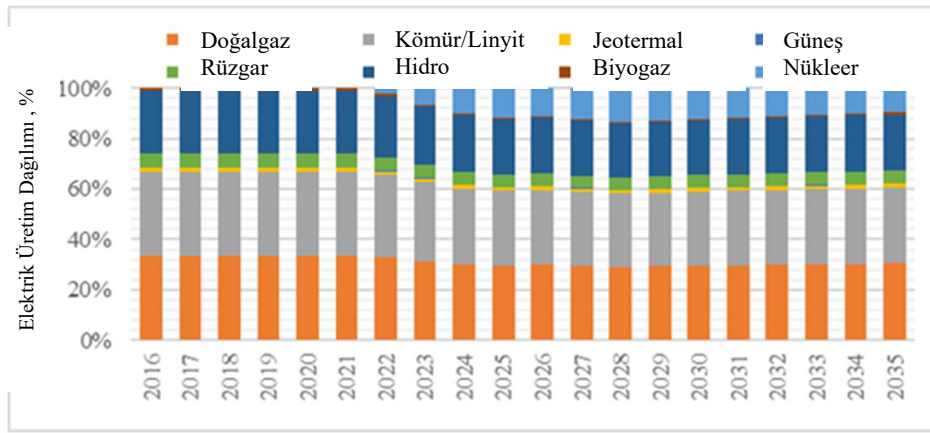
Yakıt veya teknoloji bazında kullanılan soğutma türleri için açık literatürden belirlenen STF'ler ile teknoloji başına toplam su tüketimi Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Güneş santralleri için STF değeri 96  $m^3/GWh$  olarak alınmıştır. Hesaplanan bu değerler daha sonra teknoloji başına su yoğunluğunu (SY,  $m^3/GWh$ ) belirlemek için kullanılmıştır. 2016 yılı su tüketim değerleri ve su yoğunlukları Tablo 3'de verilmiştir. Tablo 3'te görüleceği üzere, 2016 yılında elektrik santrallerinin soğutma ünitelerinin toplam su tüketimi yaklaşık 188 milyon  $m^3$  olup, 2016 yılında bir GWh elektrik üretimi için 693  $m^3$  su tüketilmiştir. Yakıt/teknoloji bazında ise, Tablo 2'de görülebileceği gibi hem yüksek STF değerlerli ıslak soğutma sistemlerinin kullanılması hem de üretimde yüksek payı olmasından dolayı en yüksek su tüketimi kömür/linyit santrallerinde gerçekleştirilmiştir. Jeotermal santrallerinin STF değerleri çok yüksek olduklarından SY değerleri de yüksek hesaplanmıştır. Ama bu tesislerin üretimde payları % 2'den daha az olduğundan dolayı toplam tüketimleri düşük hesaplanmıştır.

**Tablo 3.** 2016 yılı için toplam su tüketimleri ve su yoğunlukları (SY,  $m^3/GWh$ )

| Teknoloji/Yakıt Türü | Üretim (GWh) | Üretimde Payı (%) | Su Tüketimi (Bin $m^3$ ) | Su Yoğunluğu (SY, $m^3/GWh$ ) |
|----------------------|--------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Güneş                | 612          | % 0,2             | 59                       | 96                            |
| Rüzgar               | 15.370       | % 5,7             | 0                        | 0                             |
| Jeotermal            | 4.214        | % 1,6             | 13.333                   | 3.164                         |

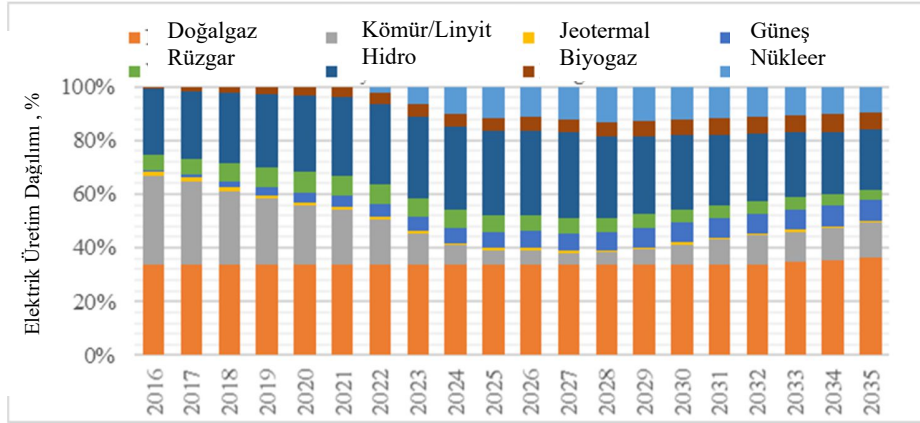
|                |         |         |         |       |
|----------------|---------|---------|---------|-------|
| Biyogaz        | 2.008   | % 0,7   | 1.790   | 891   |
| Hidro Elektrik | 67.067  | % 24,8  | 0       | 0     |
| Doğal gaz      | 90.993  | % 33,6  | 38.292  | 420   |
| Kömür/Linyit   | 90.262  | % 33,4  | 134.114 | 1.485 |
| Toplam         | 270.526 | % 100,0 | 187.588 | 693   |

Yöntem bölümünde anlatıldığı gibi, 2017-2035 yılları arasındaki yakıt dağılımı belirli senaryolar bazında LEAP optimizasyon programı kullanılarak belirlenmiştir. verildiği gibi Sunulan gibi, teknolojilerin 2017-2035 arasındaki paylaşım dağılımlarını belirlemek için LEAP programı kullanılmıştır. OS ve KSS senaryolarında, 2016 yılındaki teknolojilerin payları Şekil 1'de gösterildiği gibi 2022 yılına kadar sabit kabul edilmektedir. Nükleer santrallerin 2022 yılında çalışmaya başlamasından sonra, kademli olarak nükleer santrallerin payı artırılmakta ve geri kalan üretim ise 2016'daki paylaşım şekline dağılmaktadır.



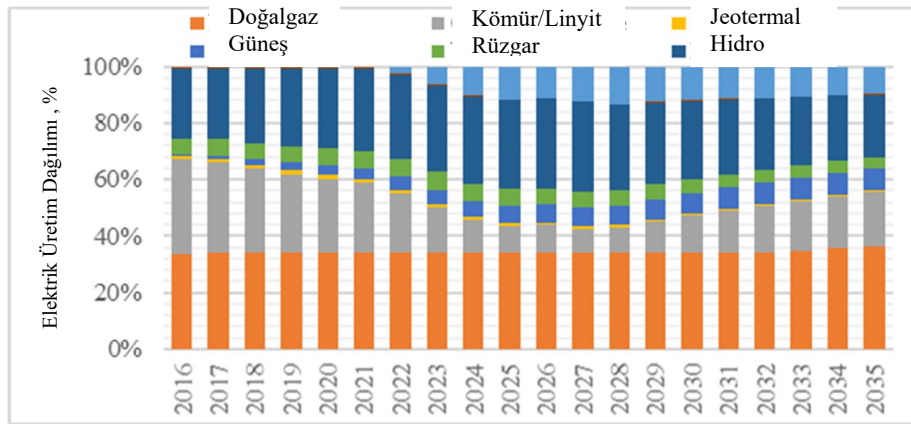
Şekil 1. OS ve KSS senaryolarında için yıllık elektrik üretim dağılımları

LEAP optimizasyon programı kullanılarak en az su tüketiminin optimize edildiği OPTS senaryosu sonucu ortaya çıkan teknoloji/yakıt türlerinin payı Şekil 2'de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, jeotermal ve kömür/linyit santralleri gibi yüksek STF'li santrallerin payı daha düşük STF'li santraller ile değiştirilmiştir. Her ne kadar, kömür/linyit santrallerinin yüksek STF'leri olsa da, diğer kaynakların kullanım potansiyelleri 2029'dan sonra kalmadığından dolayı artan talebi karşılamak için kömür/linyit santrallerinin paylarında hafif bir artış görülmektedir.



Şekil 2. OPTS senaryosu için yıllık elektrik üretim dağılımları

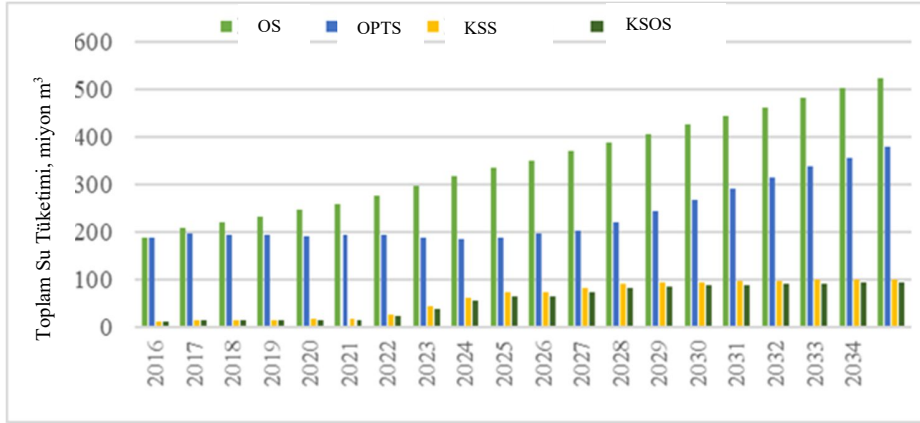
LEAP optimizasyon modeline uygulanan son senaryo, tüm teknolojiler için kuru soğutma sistemlerini kullanarak su tüketimini optimize etmeye dayanan KSOS senaryosudur. Şekil 3'te görülebileceği gibi OPTS senaryosu sonuçlarının aksine, biyogaz ve jeotermal santrallerinin payları kuru soğutma sistemleri için yüksek STF'lerinden dolayı tahmin yılları boyunca azalmaktadır. OPTS senaryosunun sonuçlarına benzer şekilde, kömür/linyit santrallerinin payı 2029'dan sonra artmaya başlamıştır.



Şekil 3. KSOS senaryosu için yıllık elektrik üretim dağılımları

Her teknolojinin tahmini üretimini LEAP optimizasyon programından senaryo bazında temin edildikten sonra, teknoloji başına yıllık su tüketimi 2017-2035 yılları arasında hesaplanmış ve Şekil 4'te verilmiştir. .





Şekil 4. Dört senaryo bazında toplam yıllık su tüketimleri

Şekil 3'ten de açıkça görülebildiği gibi OS senaryosu tahmin periyodu boyunca tüm yıllarda en yüksek su tüketimine neden olmaktadır. 2035 yılındaki elektrik talebinin 2016'daki tüketiminin iki katının olması beklendiğinden dolayı toplam su tüketiminin OS senaryosuna göre 2035 yılına kadar yaklaşık üç kat artacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca, nükleer santraller, 2022 ile 2028 yılları arasında kademeli olarak çalışmaya başladıklarında su tüketimini de artıracaktır. OPTS ve KSOS senaryolarında olduğu gibi, teknoloji dağılımları STF'lerine dayalı olarak optimize edildiğinde, toplam su tüketimi önemli ölçüde azalmaktadır. Tüm teknolojilerde kuru soğutma sistemlerinin kullanılması, su tüketimini yaklaşık %80 oranında düşürdüğü belirlenmiştir. Senaryoya bazında belirlenen yıllık SY değerleri Tablo 4'te verilmektedir. Burada görüldüğü gibi, 2035 yılında OS senaryosuna dayanan SY yaklaşık %5 artarken, OPTS senaryosunda ise % 25 oranında azalma gözlenmiştir.

Tablo 4. Dört senaryo bazında su yspğunluğu (SY, m<sup>3</sup>/GWh) değerleri

| Senaryo İsmi | 2016 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 |
|--------------|------|------|------|------|------|
| OS           | 693  | 693  | 731  | 732  | 726  |
| OPTS         | 693  | 539  | 414  | 460  | 525  |
| KSS          | 47   | 47   | 159  | 163  | 141  |
| KSOS         | 47   | 41   | 142  | 150  | 132  |

California, ABD'de yapılan benzer bir projede, yıllık SY değerleri uzun dönem elektrik talep tahminleri belirlendi (Cooley vd., 2011). Yazarlar, SY'nun 2010'da 1083 m<sup>3</sup>/GWh'den 2035'te 965 m<sup>3</sup>/GWh'ye düşeceğini tahmin etmiştir. Teksas, ABD'de yapılan bir başka araştırmada, 2010 yılında elektrik üretimi için SY 1287 m<sup>3</sup>/GWh olarak ölçüldü (Scanlon vd., 2013). Bu çalışmalarda belirlenen SY değeri bu çalışmada öngörülenden göreceli olarak daha yüksektir. Bunun nedeni, nükleer santrallerin üretim karışımındaki yüksek payı ve ıslak soğutma sistemlerinin büyük çoğunlukta tercih edilmesidir.

Dört senaryo bazında belirlenen teknoloji/yakıt türü dağılımları ile yakıt türüne göre birim üretim başına oluşan salım faktörleri (Arı ve Aydınalp Köksal, 2011) Eşitlik 2'de kullanılarak yıllık toplam CO<sub>2</sub> salımları hesaplanmış ve bu değerler Şekil 5'de verilmiştir. OS ve KSS senaryolarına

göre, CO<sub>2</sub> salımları 2035 yılında 2,4 kat artarak 130 milyon tondan 313 milyon tona ulaşacaktır. Buna karşın, OPT ve KSOS senaryolarında ise özellikle kömür/linyit santrallerinin payının 2020-2029 arası azaltılmasından dolayı CO<sub>2</sub> salımlarında önemli düşüş görülmektedir. OPT ve KSOS senaryolarında, sırası ile CO<sub>2</sub> salımları 2035 yılında 1,6 ve 1,9 kat artarak 130 milyon tondan 212 ve 242 milyon tona ulaşacaktır



Şekil 4. Dört senaryo bazında toplam CO<sub>2</sub> salımları

#### 4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, mevcut tüm santrallerin su tüketimini belirlemek için santral verileri çeşitli kaynaklardan toplanmıştır. Veri analizi ile Türk santrallerindeki en yaygın soğutma sisteminin diğer tüm soğutma sistemleri arasında en fazla su tüketen ıslak soğutma sistemi olduğu ortaya çıkmıştır. 2016 yılında toplam su tüketimi 187 milyon m<sup>3</sup>, 2016 için SY ise 693 m<sup>3</sup>/GWh olarak hesaplanmıştır. 2017 ve 2035 yılları arasındaki yakıt/teknoloji dağılımı dört senaryo bazında LEAP optimizasyon programı kullanılarak optimize edilmiştir. İlk senaryo, 2016 teknoloji dağılımının sabit kalacağı varsayılan OS senaryosudur. OS senaryosu teknoloji dağılımına dayanarak, tahmini talep artışına paralel olarak toplam su tüketiminin yaklaşık üç misli artması beklenmektedir. Su tüketiminin optimize edildiği senaryoda (OPTS), 2035'te su tüketiminde yaklaşık% 25'lik bir azalma olabileceği tahmin edilmektedir. Üçüncü ve dördüncü senaryolarda nükleer santraller dışında tüm santraller için kuru soğutma sistemlerinin kullanıldığı kabul edilmiştir. Bu senaryolarda SY'nun yaklaşık % 80 oranında azaltıldığı hesaplanmıştır. Kuru soğutma sistemleri su tüketiminde yüksek bir düşüşe neden olsa da, su ve hava arasındaki ısı kapasitesi farkından dolayı verimlilikleri düşüktür. Ayrıca, bu sistemlerin ıslak soğutma sistemlerinde daha yüksek sermaye maliyeti vardır. Yakıt/teknoloji dağılımlarına bağlı olarak dört senaryo bazında hesaplanan CO<sub>2</sub> salımlarında da, en yüksek oran OS ve KSS senaryolarında görülmüştür. Buna karşın OPTS ve KSOS senaryolarında ise daha düşük CO<sub>2</sub> salım artışı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi en düşük su tüketiminin optimizasyonu yapıldığı OPTS ve KSOS senaryolarında hem düşük su tüketimi hem de düşük CO<sub>2</sub> salım miktarları elde edilmesi mümkündür.

## KAYNAKLAR

- Arı I., Aydinalp Koksall M, 2011. Carbon dioxide emission from Turkish electricity sector and its mitigation options, *Energy Policy*, 39, 6120 – 6135.
- Ashwood, A., Bharathan, D., 2011. Hybrid cooling systems for low-temperature geothermal power production. Technical Report. National Energy Technology Laboratory, USA. sf. 62.
- Black, J. 2007. Cost and performance baseline for fossil energy plants. Bituminous coal and natural gas to electricity. Technical Report. National Energy Technology Laboratory, USA, sf. 508.
- CEC, 2002. Comparison of alternate cooling technologies for California power plants; Economic, Environmental and Other Tradeoffs, California Energy Commission, Consultant Report, Palo Alto, CA, USA.
- Cooley, H., Fulton, J., Gleick, P.H., 2011. Water for energy: Future water needs for electricity in the Intermountain West. Technical Report. Pacific Institute, Oakland, California, USA.
- Dale, L.L., Karali, N., Millstein, D., Carnall, M., Vicuna, S., Borchers, N., Eduardo, B., Hagan, J.O., Purkey, D., Heaps, C., Sieber, J., Collins, W.D., Sohn, M.D., 2015. An integrated assessment of water-energy and climate change in Sacramento, California: how strong is the nexus?, *Climatic Change*, 132, 223-235.
- Delgado, A., Herzog, H.J. 2012. Simple model to help understand water use at power plants. Technical Report, Cambridge. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- DOE, 2006. Energy demands on water resources. Report to Congress on the interdependency of energy and water. US. Department of Energy, USA, sf. 80.
- Enerji Atlasi, 2016. <http://www.enerjiatlasi.com/> Erişim Tarihi: 30 Aralık 2016.
- Enka, 2016. Enka Mühendislik, <http://www.enka.com/> Erişim Tarihi: 5 Ocak 2017.
- ETKB, 2015. Mavi Kitap. [www.enerji.gov.tr](http://www.enerji.gov.tr) Erişim Tarihi: 20 Aralık 2016.
- Feeley, T.J., Skone, T.J., Stiegel, G.J., McNemar, A., Nemeth, M., Schimmoller, B., Murphy, J.T., Manfredo, L., 2008. Water: A critical resource in the thermoelectric power industry, *Energy*, 33, 1-11.
- Fthenakis, V., Kim, C. H., 2010. Life-cycle uses of water in US electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 7, 2039-2048.
- Gleick, P.H. 1994. Water and energy. *Annual Review of Energy and the Environment* 19.

- Green Power, 2016. <http://exergy-orc.com> Erişim Tarihi: 5 Ocak 2017.
- Havey, T. 2008. California's Coastal Power Plants: Alternative cooling system analysis. Technical Report, Tetra Tech, Inc., Golden, Colorado, USA, sf. 749.
- Karakas, H., Tilki, T. 2012. An analysis of effect of water resources constraint on energy production in Turkey. MBS Professional Report. Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, sf. 115.
- Lamya, B., Boardman, G., Bigger, J. 2012. Review of water use in US thermoelectric power plants. *Journal of Energy Engineering*, 138, 246-257.
- LEAP, 2015. User guide for LEAP, [www.energycommunity.org](http://www.energycommunity.org) Erişim Tarihi: 20 Aralık 2016.
- Macknick, J., Newmark, R., Heath, G., Hallet, K., 2011. A review of operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies. Technical Report. National Energy Technology Laboratory, USA. sf. 290.
- Mielke, E., Anadon, L.D., Narayanamurti, V. 2010. Water consumption of energy resource extraction, processing, and conversion. Teknik Rapor, Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, Boston, MA, USA, sf. 52.
- Rutberg, M.J. 2012. *Modeling water use at thermoelectric power plants, USA*. MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- Scanlon, B.R., Reedy, R.C., Duncan, I.J., Mullican, W.F., Young, M.H., 2013. Controls on water use for thermoelectric generation: case study Texas, U.S. *Environmental Science & Technology*, 47, 11326–11334.
- Stiegel, G.J., Longanbach, J.R., Rutkowski, M.D., Klett, M.G., Kuehn, N.J., Schoff, R.J., Vaysman, V., White, J.S. 2005. Power plant water usage and loss study. Technical Report National Energy Technology Laboratory, USA, sf. 104.
- Stiegel, G.J., McNemar, A.J., Nemeth, M., Schimmoller, B., Murphy, J., Manfredo, J. 2006. Estimating freshwater needs to meet future thermoelectric generation requirements. Technical Report. National Energy Technology Laboratory, USA. sf. 90.
- TEİAŞ, 2016. Türkiye'nin beş yıllık elektrik üretim kapasitesi (2015 - 2019). [www.teias.gov.tr](http://www.teias.gov.tr) Erişim Tarihi: 16 Aralık 2016.
- Torcellini P.A., Long, N., Ron, J. 2004. Consumptive water use for US power production. *ASHRAE Winter Meeting*, January 24-28 2004, Anaheim, California, USA.