



Optimization of electricity generation for Afyonkarahisar

Utku Köker^{1*}, Halil İbrahim Kuruca¹, Egemen Sulukan²

¹Department of Industrial Engineering, Engineering Faculty, Süleyman Demirel University, 32260, Çünür, Isparta, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Turkish Naval Academy National Defense University, 34942, Tuzla, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Designing multiple scenarios for electrical energy generating system of Afyonkarahisar which includes business as usual, carbontax and 75% renewable energy conditions
- Electrical energy production portfolio including renewable and fossil fuels
- Verification of scenario outputs with ANSWER-TIMES and NEOS solvers show that OSeMOSYS is a successful tool in local scale energy modelling

Keywords:

- Local scale energy modelling
- Energy systems analysis
- Open source modeling
- Electricity generation scenarios
- OSeMOSYS

Article Info:

Research Article
Received: 06.01.2022
Accepted: 09.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1054052

Acknowledgement:

The authors thank Süleyman Demirel University Scientific Research Projects Coordination Unit
Project number: FDK-2019-6839

Correspondence:

Author: Utku Köker
e-mail: utkukr@hotmail.com
phone: +90 542 320 6345

Graphical/Tabular Abstract

In this study, optimization models of electricity generation for five scenarios consisting of the business as usual model, 75% renewable energy model and 3 different carbon tax models over a 16-year time horizon are established for Afyonkarahisar. Financial aspect of the study are presented in Figure A. Modeling has been created separately in OSEMOSSYS, ANSWER-TIMES and NEOS environments for technical, environmental and financial purposes.

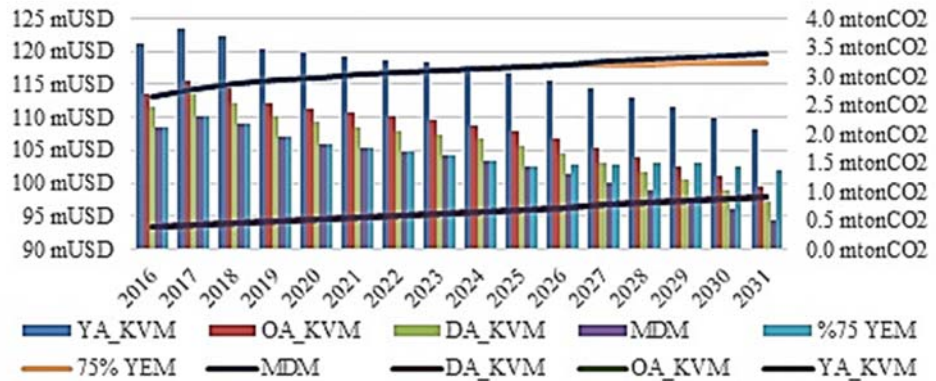


Figure A. Annual total costs of scenarios and the CO₂ emission amounts

Purpose:

The need for open source energy modeling tools is increasing since year 2000s as the prices of commercial energy planning tools exceed the budgets of students and freelance analysts. OSeMOSYS, an open source energy modeling tool is evaluated in this study to investigate the optimum technology mix of Afyonkarahisar electricity generation system for five scenarios designed for renewables and fossil fuels.

Theory and Methods:

Five scenarios were designed for Afyonkarahisar province and modeled in the OSeMOSYS environment. The OSEMOSSYS source code has been revised by changing equation groups and entering new constraints to reflect the desired costing approach. All scenarios were compared economically, technically and environmentally and tested with ANSWER-TIMES and NEOS outputs.

Results:

The business as usual model of self-sufficient Afyonkarahisar scenarios has been found to be the lowest total cost model of all scenarios. Carbon tax models are the most advantageous models for CO₂ emissions, causing significantly lower emissions than the 75% renewable energy model. In contrast, the cost of carbon tax models are the highest in five scenarios as it is given in Figure A. OSEMOSSYS, ANSWER-TIMES and NEOS results were identical in support of each other.

Conclusion:

In all five scenarios, Afyonkarahisar was able to balance the electricity supply and demand by 2031 and it was determined that the province could also meet the higher electricity demand. Therefore, it is possible to carry out studies with a longer horizon. The fact that carbon tax scenarios work better than 75% renewable energy scenarios in limiting CO₂ emissions has made further studies essential. It is thanks to the flexible structure of the OSEMOSSYS model that harmonization with ANSWER-TIMES working logic could be possible and the reconfirmability of two different environments was demonstrated with this study.



Afyonkarahisar için elektrik üretimi eniyilemesi

Utku Köker^{1*}, Halil İbrahim Koruca¹, Egemen Sulukan²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 32260, Çünür Isparta, Türkiye

²Milli Savunma Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Deniz Harp Okulu, 34942 Tuzla İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Afyonkarahisar elektrik enerjisi üretim sistemi için çeşitli senaryoların geliştirilmesi
- Elektrik enerjisi bileşiminde yenilenebilir ve fosil kaynaklara yer verilmesinin sağlanması
- OSeMOSYS çıktılarının ANSWER-TIMES ve NEOS çözdürücüleri ile teyit edilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.01.2022

Kabul: 09.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1054052

Anahtar Kelimeler:

Yerel düzey elektrik modellemesi,
enerji üretimi eniyilemesi,
açık kaynak kodlu modelleme,
enerji üretim senaryoları

ÖZ

Son yıllarda enerji güvenliği, toplum ve sürdürülebilir kalkınma arasındaki ilişki, enerji planlama arayüzlerinde geliştirmeleri beraberinde getirmiştir. Bu arayüzlerin yaygınlaştırılması, toplumların yıllar içinde enerji planlaması konularına artan katılımıyla sonuçlanmıştır. Ulusal düzeyde analizler 1970'lerden beri çalışılsa da, bölgesel düzeyde enerji analizleri ancak son yıllarda popülerlik kazanmaktadır. Bu makalede, Afyonkarahisar ilinde OSeMOSYS, TIMES ve NEOS araçlarının kullanılması ile beş farklı senaryo analizi konu edilmiştir. Çalışmada 2016-2031 yılları arasında tarım, sanayi, konut, aydınlatma ve enerji sektörleri elektrik üretimi optimizasyonu açısından incelenmiştir. Makalede mevcut durum, %75 yenilenebilir enerji kısıtlı model ve üç farklı karbon vergisi senaryosu incelenmiştir. Senaryolar teknolojik, çevresel ve ekonomik açıdan karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve bulgular, sonuçlar ve yorumlar bölümlerinde tartışılmıştır. Analiz neticesinde OSeMOSYS ve TIMES'in bölgesel modelleme için oldukça faydalı araçlar olduğu, çeşitli senaryo analizlerini yüksek doğrulukla gerçekleştirdiği gösterilmiştir.

Optimization of electricity generation for Afyonkarahisar

H I G H L I G H T S

- Designing various scenarios for Afyonkarahisar electrical energy generation system
- Electrical energy production portfolio including renewable and fossil fuels
- Verification of OSeMOSYS outputs with ANSWER-TIMES and NEOS solvers

Article Info

Research Article

Received: 06.01.2022

Accepted: 09.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1054052

Keywords:

Local scale energy modelling,
Open source modeling,
Electricity generation scenarios,
OSeMOSYS

ABSTRACT

In recent years, the relationship between energy security, society and sustainable development has brought about improvements in energy planning interfaces. The dissemination of these interfaces has resulted in increased participation of communities in energy planning issues over the years. Although national-level analysis has been studied since the 1970s, regional-level energy analysis has only gained popularity in recent years. In this article, five different scenario analyzes are discussed by using OSeMOSYS, TIMES and NEOS tools in Afyonkarahisar province. In the study, agriculture, industry, residential, lighting and energy sectors were examined in terms of electricity generation optimization between the years 2016-2031. The Business As Usual model, the 75% renewable energy constrained model and three different carbon tax scenarios are examined. The scenarios are studied comparatively from the technological, environmental and economic aspects and the findings are discussed in the conclusions and comments sections. As a result of the analysis, it has been shown that OSeMOSYS and TIMES are very useful tools for regional modeling and perform various scenario analyzes with high accuracy.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *utku.koker@afad.gov.tr, halil.koruca@sdu.edu.tr, esulukan@dho.edu.tr /
Tel: +90 542 320 6345

1. Giriş (Introduction)

Elektrik üretiminin günümüzde çeşitli yöntemleri bulunmaktadır. Konvansiyonel gaz türbini ve linyit santralleri dünyanın pek çok bölgesinde yaygın olarak kullanılmaya devam etse de, yenilenebilir enerji batı ülkelerinde uzun süredir büyük miktarlarda enerjiyi ana şebekeye aktarmaktadır. Birçok fütürist ve uzman fotovoltaik enerjiyi yarınlara ana enerjisi olarak görmekte [1-2], bazı uzmanlar da nükleer enerjinin son derece az salım vermesi nedeniyle [3, 4] yeniden tercih sebebi olacağını iddia etmektedir. Bu argümanların hepsi kendi temel varsayımları altında doğruluk taşımakla birlikte, karar vericilere hangi teknolojilerin oluşturduğu elektrik enerjisi portföylerinin en maliyet-etkin olacağı bilgisini vermemektedir. Dolayısıyla, önümüzdeki yıllarda olası enerji talebi artışlarında, ülkelerin hangi elektrik üretim teknolojisine yatırım yapmasının uygun olacağı tam olarak bilinmemektedir. Faydalı ömürlerini tamamlayarak yenilenmesi gereken santrallerin, aynı tür santraller ile mi yenilenmesi gerektiği, yoksa başka bir teknoloji ile mi değiştirileceği benzer bir ikilemdir. Günümüzde pompaj depolamalı santraller ve akıllı depolama sistemleri gibi sadece üretim yönlü değil ama enerjinin depolanmasına ve ihtiyaç halinde kullanımına yönelik de imkân ve fırsatlar mevcuttur [5, 6]. Bu açıdan bakıldığında, enerji tedarik ve depolama yöntemlerindeki artış ve emisyon kotalarına ilişkin uluslararası düzenlemeler, karar vericilerin işlerini her zamankinden daha karmaşık hale getirmiştir.

Birbirleriyle rekabet halindeki enerji santrali alternatifleri ve maliyet öğelerinin oluşturduğu çok sayıda kısıt altında en ekonomik, yani en küçük toplam net bugünkü değere sahip seçeneğin belirlenmesi, enerji sistemlerinin optimizasyonunda temel konudur. Akıllı depolama birimlerinden emisyon kotalarına ve vergileri de içine alan geniş bir yelpazeye yayılan çeşitli kısıtlamaların uygulanması, son yıllarda daha da dikkate alınması gereken bir konu haline gelmiştir. Gerek teknolojik, gerekse idari ve çevresel düzenlemelerin bir toplam olarak enerji optimizasyonu bugün, binlerce değişkeni ve çözülmesi gereken binlerce denklemiyle çok karmaşık özel bir çalışma haline gelmiştir.

İlk enerji optimizasyon aracı Energy Flow and Optimization Model (EFOM) [7] 1970'lerde piyasaya sürülmüştür. 1980-90'larda MARKAL [8] programı piyasada en önde gelirken 2000'lerde 'The Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES)' [9] ve 'Versatile Data Analysis (VEDA)' [10] programları enerji sektörü optimizasyon ihtiyaçlarında kullanılan asıl programlar olmuştur. Tüm bu programlar lisans gerektirdiğinden, gerek geliştirmek olan ülkeler, gerekse üniversite öğrencileri ve serbest çalışan analistler bu güçlü araçlara ulaşmada bütçe engelleriyle karşılaşmaktadır.

Enerji optimizasyon programları, ticari olanlar ve açık kaynak modelleri olmak üzere, iki ana başlık altında gruplandırılabilir. TIMES, MARKAL ve VEDA birinci gruba dâhilken, 'Open Source Energy Modelling System (OSeMOSYS)' [11], 'Global Energy System Model (GENeSYS-MOD)' [12] ve 'Model for European Energy System Analysis (MEESA)' [13] ikinci grubun üyeleridir. Ticari ürünler iyi kategorize edilmiş ve kullanıcı dostu veri giriş/çıkış seçenekleri gibi birçok avantaj sunarken, açık kaynaklı modeller tanınmış derleyicilerin zengin kütüphanelerini kullanma imkânlarını beraberinde getirmektedir.

Avrupa Birliği, ETSAP gibi paydaşlar, Horizon inisiyatifi vb. programlarla açık kaynak kodlu enerji planlama araçlarını desteklemektedirler. Bu kurum ve kuruluşların asıl hedeflerinden birisi bedelsiz yaygınlaştırılacak ve kullanıcıların serbestçe kullanabileceği bir ortak platform ya da platformları ortaya çıkartabilmektir.

Literatürde modelleme çalışmalarının büyük bir kısmı ulusal bazda daha düşük karbon salım tedbirleri [14, 15], yenilenebilir enerji miktarını artırma politikaları [16, 17], tahminleme [18] veya yöntem karşılaştırmaları [19, 20] gibi çeşitli amaçlarla yapılmakta olup oldukça az sayıda çalışmada ise yerel birimlerin güçlendirilmesi, kendi kendine yeterliliğinin artırılarak arz güvenliğinin sağlanması ve düşük karbon salımı için tedbirlerin yerelden başlatılması gibi amaçlarla bölgesel modellemeleri odağına almıştır. Bölgesel çalışmalar dâhilinde MARKAL ve ANSWER-TIMES kullanılarak geliştirilmiş yerel modeller sayıca çoğunluktadır. Comodi vd. [21] İtalya'nın Pesaro Belediyesi üzerine üç senaryo geliştirerek TIMES ortamında 25 yıllık zaman erimi dahilinde (2005-2030) bölgesel bir optimizasyon modelini çalıştırmışlardır. Salvia vd. [22] MARKAL optimizasyon paketi ile İtalya'nın Basilicata bölgesi için 27 yıl zaman erimli bir optimizasyon modelini başarıyla uygulamıştır. Mikro anlamdaki modellemelerin yanında uluslararası bölge modelleme örnekleri de mevcuttur. Büeler [23] MARKAL-MACRO kullanarak İsveç-Hollanda-İsviçre bölgesel modelini, Rafaj ve Kypreos [24] MARKAL kullanarak, model varsayımı gereği dünyanın beş büyük bölgeye ayırdığı "Küresel Çok Bölge Markal Modeli"ni, Foyn vd. [25] yine dünyanın çok bölge olarak modellendiği ve %100 yenilenebilir enerjiye geçebilirliğin fizibilitesi durumundaki ETSAP/TIAM modelini optimize etmiştir.

MARKAL, TIMES ve VEDA gibi optimizasyon platformları ticari ürünlerdir ve kullanıcılarından ücret talep etmektedir. Bu açıdan, OSeMOSYS'nin açık kaynak kod özelliği düşük bütçeli projeler açısından avantaj sunmaktadır. OSeMOSYS platformu, KTH, Stanford ve UCL gibi pek çok paydaş tarafından ortaya konmuş bir doğrusal programlama modelidir [26]. 2008 yılında tanıtımından ardından, OSeMOSYS'in bilinirliği gün geçtikçe artmıştır. OSeMOSYS'in kaynak kodları üzerinden farklı gruplar çalışmalarına devam etmiş, GENeSYS-MOD ve MEESA gibi benzer modelleme araçları da yakın zaman önce duyurulmuştur. OSeMOSYS kullanılarak; Tunus [27], Bangladeş [28], Avustralya [29], Suudi Arabistan [30] ve Portekiz [31] modellemeleri ulusal bazda tamamlanırken, Drina Nehri [32] ve Güney Amerika (SAMBA) [33] gibi bölgeler karşılıklı etkileşimler de hesaba katılarak çok bölge modellemeye tabi tutulmuştur. Bölgesel çalışmalar kimi zaman Brezilya Curitiba Şehri [34], Hindistan Katgoon Köyü [35] veya Kolombiya'daki Choco bölge modellemesi [36] gibi küçük ölçekteki yerleşim birimlerine kadar daraltılabilirken; kimi zaman da bir nehir ya da kıtayı toplu olarak kapsayabilmektedir.

Ülkeler, gerek santrallerin teknik özelliklerinin iyileştirilmesi ve maliyet tasarrufları, gerekse çevresel kaygılarla santral bazında hibritleme gibi yollara başvursa da bu tür iyileştirmelerin bölgesel/ulusal çapta modellemeler dâhilinde ayrıntılı şekilde etkilerinin gösterilmesi gerekir [37-39]. Ülkelerin ister ulusal, ister bölgesel olsun, modellemeye konu edilen unsurları ya emisyon azaltımı bazında, ya da en ekonomik teknoloji yatırım bileşiminin seçilmesi yönünde olmaktadır. Emisyon bazında yapılan modelleme çalışmalarında uzmanlar belirli emisyon kotalarının altında kalınacak şekilde yeni yatırımlarının hangi teknolojiler lehine yapılması gerektiğini araştırmaktadır. Bu durumda mevcut bazı santrallerin atıl kapasite olarak kalabilmeleri pahasına bazı yeni yatırımlar yapılmakta ve en ekonomik olarak verilen emisyon kotalarının altında kalınmaya çalışılmaktadır. Bu kotalar uluslararası ya da ulusal birtakım politikalar ve düzenlemeler neticesinde ortaya çıkan zorlamalar dâhilinde belirlenmektedir. Emisyon çalışmaları dâhilinde karbon vergisinin enerji üretimine etkisi de bu analizlere dâhil edilmekte olup, bu verginin hangi aralıklarda olması halinde sahadaki sonuçlarının neler olacağı tespit edilmeye çalışılmaktadır. Fosil yakıtların tüketilen miktarının karbon bileşimine göre alınan karbon vergisi CO₂ emisyonunu düşürmek maksadıyla uygulanmaktadır [40].

Uygulanan vergi ile fosil yakıtlar CO₂ salımı başına konan vergiyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu ek maliyet de emisyon bakımından yüksek teknolojilerin rakipleri karşısında optimum plana girme şansını azaltmaktadır. Bir başka açıdan bakıldığında ise karbon vergisi politikaları, ilgili santrallerin sahip olduğu negatif dışsallığın bir miktarının içselleştirilmesine ve maliyet dezavantajına sahip diğer teknolojilerin optimum plana girmesine veya geliştirilmelerine zemin hazırlamaktadır. Uygulanan vergi ile emisyonlar sınırlanmamaktadır, aslında uygulamanın maksadı bir santral tipini avantajlı/dezavantajlı kılmaktan ziyade ilgili enerji elde yöntemlerinin marjinal faydaları ile maliyetlerinin örtüştüğü optimal noktanın bulunmaya çalışılmasıdır [41]. Emisyon amaçlı olmayan modellemelerde ise analistler verili teknoloji parkının yenilenmesi ya da yeni yatırımların hangi bileşimde yapılmasının ülke için verili zaman eriminde en düşük maliyete neden olacağını araştırmaktadırlar. Bu tür modellemelerde enerji arz güvenliğinin sağlanmasına yönelik olarak yenilenebilir enerjinin payının artırılması ya da sahip olunan teknoloji bileşiminin dönüştürülmesi kapsam içine alınabilmektedir.

Bu çalışmada; İç Ege'deki 725568 nüfuslu Afyonkarahisar ili için açık kaynak kodlu bir bölgesel optimizasyon modeli sunulmuş, bu açık kaynak kodlu model bulguları NEOS yöneylem analiz platformu kullanılarak üç farklı çözdürücü ile teyit edilmiş, yanında TIMES ortamında da modellenmek suretiyle sonuçların özdeşliği bu ortamda da gösterilmiştir. Gerek OSeMOSYS modellemesinin ülkemizde ilk uygulama örneği olması, gerekse bu çalışmanın, ulusal bazdaki çalışmalara görece çok daha az sayıda olan bölgesel çalışmalara bir örnek teşkil etmesi bakımından çalışma TR33 Bölgesi dâhilindeki Afyonkarahisar ili için karar vericilere önemli bir altlık sağlayabilme potansiyeline sahiptir.

Afyonkarahisar ili, 2016 yılı itibarıyla net elektrik enerjisi ithalatçısı durumundadır. Elektrik enerjisi üretimi bakımından kendi kendine yeter duruma getirmek için yenilenebilir enerji (hidroelektrik, güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle enerjisi) kaynakları ve buna ilave düşük karbon salınımı kısıtlarına uygun inceleme senaryoları geliştirilmiştir.

Bu amaçla, a) MDM-En düşük maliyetli enerji tedarikini sağlamak üzere bir mevcut durum çalışması (Mevcut Durum Modeli=MDM), b) YEM-Enerjisinin en az yüzde yetmiş beşini yenilenebilir enerjiden karşılaması durumunu gösteren “%75 Yenilenebilir Enerji Modeli” (YEM) ve c) KVM-Belirli oranda bir karbon vergisinin uygulanması durumu için üretim teknoloji bileşimini verecek “Karbon Vergisi Modeli” (KVM) senaryoları oluşturulmuştur. Senaryo c deki KVM modeli; DA_KVM-düşük azim, OA_KVM-orta azim ve YA_KVM-yüksek azim karbon vergisi modeli olarak (DA_KVM, OA_KVM, YA_KVM) üç farklı şekilde oluşturulmuştur. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak maliyet ve emisyon açısından incelenmiştir.

Senaryoların oluşturulmasında öncelikle ülkemizin ulusal ve bölgesel bazda uygulamaya koymuş olduğu stratejiler göz önüne alınmıştır. Ülkemiz kalkınma planı ve bölgesel strateji belgelerinde, bölgesel enerji arz güvenliği ve çalışmaları açıkça teşvik edildiğinden, bu çalışmada bölgesel bazda senaryolar oluşturulmuştur. Emisyon kısıtı, yenilenebilir enerji desteği gibi ilave koşulların gözönüne alınmadığı ve salt mevcut gidişatı göstermekte olan MDM senaryosu oluşturulan ilk senaryodur. İkinci senaryo yenilenebilir enerjinin teşvik edilmesi stratejik amacı üzerinden oluşturulmuş %75_YEM'dir. Bu senaryonun temel varsayımı yine gerek kalkınma planı gerekse bakanlık ve bölge stratejik planlarında zikredilmektedir. Karbon vergisi bir harici maliyet türü olarak yurtdışında tatbik edilen, ülkemizde ise Enerji Bakanlığı düzeyinde üzerinde çalışmalar yapılan bir emisyon azaltım stratejisi aracıdır. Bu kapsamda düşük, orta ve yüksek azim senaryoları oluşturulmuştur. Çalışmada, OSeMOSYS yazılımına teknolojik, mali ve çevresel parametreler girilerek maliyet optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. OSeMOSYS çerçevesi,

analistlerin kaynak kod modelinde özel değişiklikler yapmasına izin veren açık kaynak kodlu yapısı nedeniyle tercih edilmiştir. OSeMOSYS'e girdi verilerinin tanıtılması Model Management Infrastructure (MoManI) [42] arayüzü kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen çıktılar yine bu ortamdan alınarak MS Excel'e işlenmiştir. OSeMOSYS yazılımı ile senaryoların modellenmesi sonrasında bu modellere ait girdi dosyaları yeniden düzenlenerek NEOS Server üzerinde çalıştırılabilir hale getirilmiş ve CPLEX, GUROBI ve MOSEK çözümlenmelerinden yararlanılarak sonuçlar sıranmıştır. NEOS Server çıktlarına ilave olarak TIMES ortamında MDM, YEM ve KVM senaryo modelleri yeniden oluşturulmuş ve OSeMOSYS sonuçlarının TIMES sonuçları ile (ikinci bir sınamaya olarak) sınaması gerçekleştirilmiştir. OSeMOSYS yazılımı, dünyada son on yılda yayılmaya başlamış, Türkiye'de ise literatür taraması aşamasında ulusal ya da bölgesel bir çalışmaya rastlanmamıştır. OSeMOSYS yazılımı ile enerji üretimi optimizasyonu alanında Afyonkarahisar ili için beş ayrı senaryo oluşturulmuştur. Afyonkarahisar ili için verili zaman aralığında kendi kendine yeterliğin sağlanıp sağlanamayacağı, yenilenebilir enerjide %75'lik üretim oranına ulaşılma imkânı ve karbon vergisi politikasının uygulanması halinde üretim maliyetlerinin nasıl etkileneceği çalışmanın cevap aradığı sorulardır.

OSeMOSYS kaynak kodunda ilk yatırım maliyetleri yapıldığı döneme yansıtılmakta, sonraki dönemlerde yansıtılmamaktadır. Bu hesaplama yöntemi TIMES maliyetlendirmesinden farklı bir maliyetlendirme anlayışını göstermektedir. Bu çalışmada, elektrik üretim tesisin çalıştığı zaman süresince ilk yatırım maliyetinin dağıtılması sağlanmış ve maliyetlerin yıllara bölünmesindeki OSeMOSYS ve TIMES araçlarının hesaplama uyumsuzluğu, OSeMOSYS deflatörünün yeniden düzenlenmesi ile giderilmiştir. Bu anlamda; TIMES denklem ailesiyle OSeMOSYS arasında bir ortaklığın sağlanabildiği bu çalışmada gösterilmiştir. Enerji optimizasyonu çalışmalarında, TIMES veya OSeMOSYS ile modellemeler yapılmakta ve çıktılar sunulmaktadır. Diğer taraftan, bu çıktılardan bir başka metot ya da araçla sınanması uygulanmasına gidilmemiştir. Bu çalışmada birbirinden farklı denklem setlerine sahip TIMES ve OSeMOSYS modellerinin doğru şekilde düzenlenmesi ile birbiriyle özdeş sonuçlar verebilecekleri ve sağlıklı bir sınamaya aracı olabilecekleri gösterilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, OSeMOSYS çerçevesinin geniş bir açıklaması yapılmaktadır. Üçüncü bölümde OSeMOSYS ile Afyonkarahisar uygulamasına yer verilmiştir. Takip eden dördüncü bölümde ise modelleme çıktıları/ bulgulara, beşinci bölümde de yorumlara ve sonuçlara yer verilmiştir.

2. Senaryo Çalışmaları (Scenario Studies)

Bu çalışmada Afyonkarahisar ili için geliştirilmiş çeşitli senaryoların mümkün olup olmayacağı, alternatif elektrik üretim teknolojileri ve ilgili girdilerin OSeMOSYS ortamında modellenmesi yoluyla araştırılmıştır. Beş farklı senaryo çalışmaya konu edilmiş olup; a) MDM, b) YEM, c) DA_KVM, d) OA_KVM ve e) YA_KVM senaryoları oluşturulmuştur. a) Mevcut durum modeli senaryosunda, herhangi bir emisyon kısıtı ya da karbon vergisi uygulanmaması halinde 2016-2031 arasında elektrik enerjisi talebini karşılayacak en düşük maliyetli elektrik üretim teknoloji bileşimi araştırılmıştır. b) YEM senaryosu, Afyonkarahisar'ın elektrik enerjisinin minimum %75'ini yenilenebilir enerji seçeneklerinden karşılaması durumunu esas almakta olup, ilin sahip olması gereken ekonomik teknoloji bileşeni konu edilmiştir. c) KVM senaryolarında ise, YEM senaryosunda göz önünde tutulan yenilenebilir enerji kısıtı olmaksızın ilave karbon vergisi uygulaması altında elektrik enerjisi talebini karşılayabilecek en düşük maliyetli teknoloji bileşenleri düşük, orta ve yüksek azim senaryoları [43] için incelenmiş olup karbon

vergisinin senaryolara düşen büyüklüğü Tablo 1’de sunulmuştur. Beş senaryo da teknolojik, çevresel ve mali açılardan karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından yayımlanan 2019-2023 yıllarına şamil On Birinci Kalkınma Planı [44] 493/2 maddesinde, enerji arzında bölgesel yeterlilik sağlanmaya çalışılmasına önem verildiği ifade edilmiştir. Bu kapsamda, enerji üretimi açısından “kendi kendine yeterli Afyonkarahisar odaklı” senaryolar oluşturulmuştur. İlk hazırlanan senaryo olan MDM Senaryosu karbon vergisi gibi bir dışsallık ya da belirli bir oranda yenilenebilir şartı şeklinde bir kısıt koyulmadan mevcut gidişatı gösterir şekilde hazırlanmış bir şimdiki durum senaryosudur ve uç durumların oluşmadığı, herhangi bir teknolojiye karşı bir engellenin getirilmediği şartlar esas alınmıştır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2019-2023 Stratejik Planı [45], sürdürülebilir enerji arz güvenliğini sağlamayı ana hedeflerinden birisi olarak belirlemiş ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik kurulu gücünün artırılmasına büyük önem vermiştir. TR33 Bölgesi 2014-2023 Bölge Planı’nda [46] öncelik; yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasına uygun olarak, yenilenebilir enerji üretiminin %75’i ölçüsünde iddialı bir oranda gerçekleşmesi durumu senaryolaştırılarak incelenmiştir.

Yukarıda sayılan tüm planlar çevreye minimum zarar üzerinde hemfikir olup, emisyonların azaltılması ve çevre hedeflerinin tutturulmasını işaret etmektedir. Bu kapsamda, uluslararası anlamda kullanımı olan karbon vergisi yöntemi Enerji Bakanlığı tarafından etüt edilmiştir. Üç farklı senaryonun işlendiği ve resmi harici maliyet verisine dayanan senaryo grubu bu çalışmada DA, OA ve YA_KVM senaryoları geliştirilerek incelenmiştir.

Enerji sektöründe OSeMOSYS, orta ve uzun zaman aralıkları için bir eniyileme aracı olarak, kapasite planlama maksadıyla uygulanmaktadır. Yazılım, modüler bir yapıya sahip ve yedi sütun (blok) halinde kurgulanmıştır. Bu bloklar sırası ile “amaç fonksiyonu, maliyetler, depolamalar, kapasite uygunluğu, enerji dengesi, kısıtlar ve emisyonlar” şeklindedir. Eniyileme çalışmasında, modelleme aracı olarak OSeMOSYS tercih edilmiştir.

3. Temel Varsayımlar (Base Assumptions)

Bu çalışmada, 2016 yılı referans alınmış ve beş senaryo için 2016-2031 yılları aralığı incelenmiştir. Bu kısımda Afyonkarahisar ili kapsamında çalışılan senaryolarda referans olarak alınan temel varsayımlara değinilmiştir.

3.1. Elektrik Enerjisi Talebi (Electrical Energy Demand)

Afyonkarahisar iline ait elektrik enerjisi talebinin modele tanıtılması, yazılıma modellenmesi ve yazılımın öğrenilmesi en önemli aşamadır. 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu’nun 20. Maddesi, 3. Fıkrası, a bendi gereği Enerji Bakanlığı tarafından Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu hazırlanmaktadır [47]. Raporla, sonraki

20 yıl süresince elektrik enerjisi talebinde meydana gelecek değişimler yüzdeler olarak ifade edilmekte olup modellemede bu usul tercih edilmiştir. Buradaki rakamların resmi nitelik arz etmesi seçimde ana nedendir. Rakamlar Türkiye için tahminlendiğinden ve il bazında yayımlanmış resmi bir çalışma bulunmamasından hareketle, aynı yükselişlerin il bazında yaşanacağı temel varsayımıyla resmi rakamlar Afyonkarahisar için veri kabul edilmiştir. Bu artış oranlarının aydınlatma, konut, endüstri, tarım, ticari gibi tüm alt sektörlerle de aynı oranlarda uygulanması ile sektörel enerji taleplerinin nasıl gerçekleşeceği tahmin edilmiştir.

Afyonkarahisar ili 2016 yılına ait elektrik tüketimi verileri sektörel bazda beş gruba bölünmüş olup bunlar aydınlatma, konut, sanayi, tarım ve ticaret sektörleridir. 2016-2031 yılları arasında il toplam elektrik enerjisi talebinin 5,81PJ’den (1615010 MWh) 11,48 PJ’ye yükselmesi beklenmektedir. Referans yılda (2016) Afyonkarahisar’daki sektör bazında elektrik tüketimi Tablo 2’de gösterilmiştir [48]. Türkiye’de 2009 yılında, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından marjinal fiyatın belirlenmesi ve alı/satış talimatlarının hazırlanabilmesi için ortaya koyulan “Gün Öncesi Planlama Sistemi” ve 1 Aralık 2011’de geçiş yapılan “Gün Öncesi Piyasası” elektrik fiyatının oluşturulan en önemli mekanizmalardır. Piyasada saatlik, blok ve esnek mekanizmalar mevcut olup, elektrik fiyatının hesaplanması belli iç dinamikleri olan karmaşık süreçlerin sonunda gerçekleşmektedir.

Afyonkarahisar senaryo çalışmalarında, ilin dışarıdan elektrik ihtiyacını karşılamayacağı temel varsayımı kullanıldığı için il bir “kapalı kutu” modellemeye tabi tutulmuş ve bahsedilen piyasanın elektrik fiyatını oluşturan mekanizması modellemeye konu edilmemiş, sadece il sınırlarındaki elektrik üreticilerinin maliyetlerinin minimum olması temel varsayım alınarak modelleme gerçekleştirilmiştir.

Modelde tüm yatırımların yıllık olarak bitirileceği kabul edilmiştir. Hidroelektrik enerji santralleri (HES), biyokütle enerji santralleri (BES), (karada) rüzgâr enerji santralleri (RES), güneş (fotovoltaik) enerji santralleri (GES), jeotermal enerji santralleri (JES), linyit enerji santralleri (LES), doğal gaz santrali (DGS) ve kombine çevrim termik santralleri (DGKÇS) optimum plana girmek için yarışan alternatif teknolojilerdir.

Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması’na (YEKDEM) tabi üreticiler elektrik arzlarını “garanti fiyat” üzerinden devlete satabilmektedir. Bu kapsamda, YEKDEM’e sahip olan ve olmayan üreticiler arasında; hem arz yönlü, hem de fiyat yönlü bir fark oluşmaktadır. YEKDEM uygulamasının 2021 ardından nasıl devam edeceği ile ilgili net bir görüntü olmadığı için hem fosil hem yenilenebilir enerji üreticileri için arz garantili bir yapı (her üretilen enerjinin satılacağı) modellemede öngörülmemiş, maliyetin uygun olduğu santrallerin talebi karşılayacağı varsayımı ışığı altında modelleme yapılmıştır (santraller kapasite faktörlerinin en tepe değerinde çalışmak zorunda bırakılmamış, bu değerler sadece “bir tepe değer” olarak veri alınmıştır).

Tablo 1. Senaryolarda kullanılan karbon vergisi değerleri (Carbon tax amounts included in the scenarios)

| Senaryolar | MDM | %75 YEM | DA_KVM | OA_KVM | YA_KVM |
|--|-----|---------|--------|--------|--------|
| Karbon Vergisi (USD/tCO ₂) | - | - | 5 | 10 | 30 |

Tablo 2. Afyonkarahisar’ın referans yılda sektörel bazda elektrik tüketimi (MWh) değerleri (Electrical energy consumption figures of Afyonkarahisar based on main sectors in MW)

| YIL | AYDINLATMA | KONUT | ENDÜSTRİ | TARIM | TİCARİ | TOPLAM |
|------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 2016 | 52005,48 | 359914,47 | 470858,76 | 123516,80 | 608714,65 | 1615010,15 |

Her teknoloji zaman içinde maliyet açısından farklılaşmaktadır. Bu farklılaşmalar maliyetlerin düşmesi şeklinde olabildiği gibi maliyetlerin yükselmesi (nükleer enerji santralleri vb.) şeklinde de kendini gösterebilmektedir. Teknoloji maliyetlerinin yıllar içinde nasıl gelişeceği yönlü olarak yapılan çalışmalar mevcut olmakla birlikte burada bir spekülatif olgudan kaçınmak üzere teknoloji maliyetleme süresi içinde sabit alınması yoluna gidilmiştir.

3.2. Maliyetler (Costs)

Modellemeye konu enerji maliyetleri, sabit operasyon ve bakım (O&M) (mUSD/GWyıl), girdi (doğalgaz kömür vb.) (mUSD/PJ) ve yeni ilk yatırım maliyetlerinden (mUSD/GW) oluşmaktadır. İktisadi İş Birliği ve Gelişme Teşkilatı (OECD) başta olmak üzere çeşitli kaynaklardan alınmıştır [49, 50] (Tablo 1).

3.3. Referans Yıl Kurulu Güç Değerleri (Installed Power Capacities Of The Reference Year)

Afyonkarahisar'da elektrik enerjisi üretimi için referans yıl itibarıyla faal santraller mevcut olup ilde kurulabilecek teknolojilerin teknik, çevresel ve mali parametreleri Tablo 3'te sunulmuştur.

İlin referans yıl itibarıyla mevcut enerji teknolojileri güneş, rüzgâr ve hidrolik enerji teknolojileridir. Bunların haricinde ilde biyokütle, jeotermal, linyit, doğal gaz termik ve doğal gaz kombine çevrim santrallerinin de yapılması mümkündür. Her bir teknoloji tipi kendi içinde çok sayıda farklı çeşide ayrılabilir. Birlikte bu teknolojiler şablon olarak tek tip halinde modellemeye tanıtılmıştır. İldeki enerji teknolojileri ve kurulu güçleri Tablo 4'te sunulmuştur:

Tablo 4. Afyonkarahisar ilinin referans yıla ait kurulu güç değerleri

(Total installed power amount of Afyonkarahisar power supply technologies in the reference year)

| Teknoloji | Kurulu Güç (MW) |
|------------------------|-----------------|
| Rüzgar Santrali | 208,62 |
| Güneş Santrali | 2,56 |
| Hidroelektrik Santrali | 3 |

3.4. Teknoloji Kapasite Maksimum Değerleri (Maximum Limits of the Technology Capacities)

Enerji santrallerinin ileriye yönelik maliyet optimizasyonu yapılacak yıllar içinde enerji talebindeki artışa cevap verip veremeyeceği, bunun yanında enerji üretiminin dayanacağı bir üst sınırın söz konusu olup olmadığı modelleme açısından oldukça önemlidir. Mevcut rezerv, ya da taşıma yoluyla linyit ve doğal gaz santralleri teorik olarak bir üst

kurulu kapasite limitine sahip olmasa da; rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal santralleri için bir üst limit söz konusudur.

Referans yılda ilin mevcut ve kurulabilecek santral tiplerinin tavan güç değerleri hususunda ülkemizde sunulmuş raporlar oldukça kısıtlı olup ZAFER Kalkınma Ajansı vb kaynakların sunduğu veriler büyük kıymet arz etmektedir. Bu kaynaklar ışığında ilin adı geçen enerji üretim teknolojilerinin tavan kapasite değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Girdi kaynaklarının taşıma yoluyla da gelebilmesi imkânı nedeniyle doğal gaz ve kömür santrallerinin tavan kurulu güç kapasiteleri YÜKSEK olarak tanımlanmıştır.

Tablo 5. Afyonkarahisar ilinin enerji üretim teknolojilerinin tavan kurulu güç kapasiteleri
(Total maximum installed power capacities of Afyonkarahisar power supply technologies)

| Teknoloji | Kurulu Güç (GW) |
|------------------------------------|-----------------|
| Doğal Gaz(DG) Güç Santrali (basit) | Yüksek |
| DG Güç Santrali (kombine çevrim) | Yüksek |
| Jeotermal Güç Santrali | 0,100 |
| Rüzgâr Santrali | 1 |
| Güneş Santrali | 0,400 |
| Biyokütle Güç Santrali | 0,100 |
| Kömür Santrali | Yüksek |
| Hidroelektrik Santrali | 0,003 |

Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyon Raporunda [46] Düşük Senaryo, Referans Senaryo ve Yüksek Senaryo talep tahminleri ülke geneli için sunulmaktadır. Bu tahmin serilerinin hazırlanmasında verimlilik, iş tüketim ve şebeke kayıpları, hane halkı sayısı, nüfus, büyüme oranı ve ulaştırma sektörünün elektrik tüketimine katkısı parametrelerinin hesaba katıldığı ifade olunmaktadır. Ekonometrik, ARİMA, Karşılaştırma, Regresyon ve Esneklik modelinin her üç senaryo için de hazırlandığı ve yıllık bazda bu serilerin ağırlıklandırılması ile Türkiye düşük, orta ve yüksek talep serileri ele edildiği belirtilmektedir. Geçmiş yıl il verileri üzerinden yapılacak bir tahminleme yerine resmi olarak paylaşılan bu projeksiyonun kullanılması tercih edilmiştir. Tablo 6'da ülke geneli için yapılan bu senaryo tahmini Afyonkarahisar ili için referans alınmış, talep serisi olarak "Senaryo 3" ismiyle geçen "Yüksek Talep" eğrisi kullanılmıştır. İl için en yüksek talep miktarlarını içeren bu zorlayıcı senaryonun eniyileme sonucunda karşılanması diğer iki talep serisinin de senaryolarda başarılacağını gösterecektir.

İlave hidroelektrik santrallerin finansal, çevresel veya akış rejimleriyle ilgili nedenlerle yapılmaları mümkün olmayabileceğinden mevcutların üstüne yeni kapasite yatırımı öngörülmemiştir. Bu üst değerler ışığında modelin çalışma sonuçları

Tablo 3. Senaryolarda kullanılan enerji santrallerinin teknik, çevresel ve mali verileri
(Technical, environmental and financial parameters of the power plants included in the scenarios)

| Teknoloji | Yatırım Maliyeti \$/kW | Sabit Operasyonel Maliyetler \$/kWyıl | Faydalı Ömür (yıl) | Verim (%) | Kapasite Oranı (%) | Emisyon Faktörü (ktCO ₂ /PJ) |
|-------------------------------------|---------------------------|--|--------------------|-----------|--------------------|---|
| Doğal Gaz (DG) Güç Santrali (basit) | 950 | 34 | 30 | 39 | 85 | 53,060 |
| DG Güç Santrali (kombine çevrim) | 1100 | 30,570 | 30 | 56 | 85 | 53,060 |
| Jeotermal Güç Santrali | 4500 | 100 | 40 | 15 | 75 | 138,890 |
| Rüzgar Santrali | 2500 | 21,380 | 25 | 100 | 25 | - |
| Güneş Santrali | 3500 | 30,081 | 25 | 100 | 15 | - |
| Biyokütle Güç Santrali | 4500 | 100 | 25 | 39 | 85 | 111,840 |
| Kömür Santrali | 3800 | 37,818 | 40 | 38 | 85 | 95,520 |
| Hidroelektrik Santrali | 2936 | 14,130 | 80 | 100 | 65,600 | - |

Tablo 6. Afyonkarahisar elektrik enerjisi projeksiyonu (Afyonkarahisar electrical energy projection)

| Yıllar | Senaryo 3Değişim | Enerji Kullanımı (MWh) | Enerji Kullanımı (PJ) |
|--------|------------------|------------------------|-----------------------|
| 2016 | 100% | 1.615.010,1500 | 5,8140 |
| 2017 | 5,2% | 1.744.292,2800 | 6,2794 |
| 2018 | 4,6% | 1.824.913,8060 | 6,5697 |
| 2019 | 3,6% | 1.890.622,6500 | 6,8062 |
| 2020 | 4,9% | 1.983.809,7380 | 7,1417 |
| 2021 | 5,0% | 2.082.970,3600 | 7,4987 |
| 2022 | 5,1% | 2.188.701,8610 | 7,8793 |
| 2023 | 5,1% | 2.301.004,2490 | 8,2836 |
| 2024 | 5,0% | 2.415.098,6960 | 8,6943 |
| 2025 | 4,5% | 2.522.622,2590 | 9,0814 |
| 2026 | 4,4% | 2.632.535,2400 | 9,4771 |
| 2027 | 4,1% | 2.741.253,5040 | 9,8685 |
| 2028 | 4,1% | 2.852.958,5390 | 10,2706 |
| 2029 | 4,0% | 2.966.455,6340 | 10,6792 |
| 2030 | 3,8% | 3.078.758,0220 | 11,0835 |
| 2031 | 3,6% | 3.189.865,7000 | 11,4835 |

açısından ulaşabileceği yenilenebilir enerji miktarı tavanı belli olup bu tavanın aşılması ya da yenilenebilir enerji seçeneklerinin daha pahalı olması halinde fosil girdilerin linyit ve doğal gaz santrallerinde yakılmak suretiyle enerji eldesinin önünde bir engel bulunmamaktadır.

3.5. Teknik Parametreler (Technical Parameters)

Modellemeye konu enerji santralleri çalışma prensipleri gereğince belirli verim değerlerinde çalışmakta, sonuç olarak bazı santraller yüksek CO₂ emisyonu üretirken, bazıları daha az CO₂ emisyonuna neden olmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisiyle elektrik üreten santraller ihmal edilebilir emisyon değerlerinde çalışmakta olup, buna mukabil diğer tüm santraller görece yüksek CO₂ salımı yapmaktadır. Modellemeye konu olan emisyon değerleri, verimlilik ve kapasite faktörleri verileri çeşitli kaynaklardan alınmıştır [51, 52].

Gerek bölgesel gerekse ulusal bazda hazırlanabilecek modeller başlangıç varsayımlarıyla sınırlıdır. Verimlilik, emisyon gibi mevcut teknolojilerin baz aldığı oranlar modele girildiğinde sonuçlar doğrudan bu değerler ışığında hazırlanacak, bu girdilerde yıllar içinde bir değişme öngörülürse sonuçlar daha farklı oluşabilecektir. Teknolojilere ait maliyet değerlerinin yıllar içinde değişmesi olağan bir durum olup bu değişikliklerin ne yönde ve ne kadar olabileceğine dair pek çok çalışma yapılmaktadır. Kimi teknolojilerin yıllar içinde güvenlik vb gerekçelerle maliyetleri yukarı yönde seyredebilirken, kimisi de daha ekonomik malzeme seçimleri vb nedenlerle ucuzlayabilmektedir. Kullanılan teknolojilerin devreye alınması gibi ihtimallerin verilerle desteklenmesi ile bu durumların her birinin senaryolaştırılarak optimizasyonlarının hazırlanması önce ulusal sonar yerel bazda büyük öneme haizdir ve bu konuyla ilgili resmi makamlar mevcuttur. Bu çalışmada 2031 yılına kadar olabilecek teknoloji ve maliyet taraflı sonsuz farklı ihtimal bir gerçeklik olarak tespit edilmekte ancak olası beş duruma ilgili veri kümeleri ışığında odaklanılmaktadır.

4. OSeMOSYS Modeli (OSeMOSYS Model)

OSeMOSYS orta ve uzun zaman sürecinde enerji modellemesi yapılabilmesi için geliştirilmiş bir optimizasyon modeli olup açık kaynaklı bir "aşağıdan yukarıya" (bottom up) model çerçevesidir [11]. 2008 yılından günümüze kadar OSeMOSYS üzerinde birçok iyileştirme yapılmıştır. Modelin ilk sürümü GNU Mathprog ile yazılmış olup çözdürücüye girdi olarak mod (model) ve dat (veri) dosyalarını kullanır. Bu dosyalar çıktı üretmek için çözdürücü "GNU

Lineer Programlama Kiti" ne (GLPK) tanıtılır. Yöneylem araştırmaları bilgisine sahip öğrenciler ve uzmanlar bu sürümü etkin şekilde çalıştırabilmektedir. OSeMOSYS'in ikinci sürümü, ilk sürümde çözdürücü olarak faaliyet gösteren GLPK'nın yerine GAMS ve CPLEX kullanır [53]. GAMS'ın açık kaynaklı bir kit olmadığı ve lisans gerektirdiği göz önüne alınmalıdır. OSeMOSYS'in üçüncü sürümü, geniş kütüphane olanaklarından istifade etmek maksadı ile Python ortamında hazırlanmıştır. Bu sürümde PYOMO arayüzü üzerinden veri girişi gerçekleştirilmektedir. Sözü edilen OSeMOSYS sürümlerine ilaveten JULIA programlama dili ortamında NEMO adlı dördüncü bir sürüm de mevcut olup [54] LEAP yazılımı ile birlikte çalışmaktadır. Bu çalışma, model ve veri dosyalarını girdi olarak kabul ederek GLPK çözdürücüsü üzerinden sonuçları hesaplayan (birinci sürüm) OSeMOSYS ortamında hazırlanmıştır. OSeMOSYS model dosyalarında, 1 amaç fonksiyonu, 13 farklı set, 67 değişken ve 52 parametre mevcut olup model denklem setleri, 18 genel, 68 uzun dönem denklem grubunu kapsamaktadır [55].

OSeMOSYS, amaç fonksiyonunun kısıtların ışığında çözülmesi ile sonuçları veren bir doğrusal programlama modeldir. Sözü edilen amaç fonksiyonu, Eş. 1'de verilmiş olup, ilgili zaman zarfında ortaya çıkan net bugünkü değeri en küçükleyen maliyetler toplamıdır. Bu ifade seviyelendirilmiş maliyet verisidir ve baz aldığı üç temel kriter, bölge (r), teknoloji (t) ve zamandır (y). İndirgenmiş toplam maliyet (TDC) denklemi Eş. 1'de gösterilmektedir:

$$Z_{\min} = \sum_y \sum_t \sum_r TDC_{y,t,r} \quad (1)$$

Amaç fonksiyonu alt grup maliyetler seviyesinde ifade edilmek istendiğinde Eş. 4'de gösterilen referans yıla indirgenmiş genişletilmiş formu elde edilir [11]. DOC indirgenmiş işletme maliyeti, DSV indirgenmiş hurda maliyetini, DCI indirgenmiş sermaye yatırımlarını ve DTEP indirgenmiş teknoloji emisyon maliyetlerini temsil etmektedir.

$$\forall_{y,t,r} TDC(1)_{y,t,r} = DOC_{y,t,r} + DSV_{y,t,r} \quad (2)$$

$$\forall_{y,t,r} TDC(2)_{y,t,r} = DCI_{y,t,r} + DTEP_{y,t,r} \quad (3)$$

$$\forall_{y,t,r} TDC_{y,t,r} = TDC(1)_{y,t,r} + TDC(2)_{y,t,r} \quad (4)$$

Modelin oldukça zengin kısıt havuzunun genel bir gösterimi Eş. 5-13 arasında verilmiştir. VOC değişken işletme maliyetini, AVOC yıllık değişken işletme maliyetini, RoA faaliyet oranını, AFOC, yıllık sabit işletme maliyetini, TCapA toplam yıllık kapasite büyüklüğünü, FC sabit maliyeti, VC değişken maliyeti, OC işletme maliyetini, DR iskonto oranını, CC sermaye maliyetini, NewCap yeni kapasite büyüklüğünü, CI sermaye yatırımlarını, DSV indirgenmiş hurda maliyetini, SV hurda maliyetini temsil etmektedir. Orijinal kısıt ifadeleri tek tek incelemeye konu olmamakla birlikte bu eşitsizlikler OSeMOSYS bloklarına konu edilen koşullu ifadelerdir:

$$\forall_{y,i,t,r} VOC_{y,i,t,r} = \sum_m RoA_{y,i,t,m,r} * VC_{y,t,m,r} \quad (5)$$

$$\forall_{y,t,r} AVOC_{y,t,r} = \sum_m RoA_{y,i,t,m,r} \quad (6)$$

$$\forall_{y,t,r} AFOC_{y,t,r} = TCapA_{y,t,r} * FC_{y,t,r} \quad (7)$$

$$\forall_{y,t,r} OC_{y,t,r} = AFOC_{y,t,r} + AVOC_{y,t,r} \quad (8)$$

$$\forall_{y,t,r} DOC_{y,t,r} = \frac{OC_{y,t,r}}{(1+DR_{t,r})^{(y-StartYear+0.5)}} \quad (9)$$

$$\forall_{y,t,r} CI_{y,t,r} = CC_{y,t,r} * NewCap_{y,t,r} \quad (10)$$

$$\forall_{y,t,r} DCI_{y,t,r} = \frac{CI_{y,t,r}}{(1+DR_{t,r})^{(y-StartYear)}} \quad (11)$$

$$\forall_{y,t,r} DSV_{y,t,r} = \frac{SV_{y,t,r}}{(1+DR_{t,r})^{(1+card(Year))}} \quad (12)$$

$$\forall_{y,t,r} DTEP_{y,t,r} = \frac{ATEP_{y,t,r}}{(1+DR_{t,r})^{(y-StartYear+0.5)}} \quad (13)$$

Bu çalışmada MoManI veri girişi ve raporlama platformundan istifade edilmiştir. MoManI ile zaman kesiti kullanıcı isteği doğrultusunda tanımlanabilmekte olup sonraki aşamalarda her bir zaman kesitine dair verilerin sisteme girilmesi zorunlu kılınmaktadır. Çalışmada temsil yetkisine sahip tek zaman kesiti seçilmiş ve “yıllık model” uygulaması tercih edilmiştir. OSeMOSYS denklem setleri çalışmada şablon halinde kullanılmamış, giriş kısmında ifade edildiği üzere bazı eşitliklerin değiştirilmesi ve TIMES platformuna uygun olarak yeniden düzenlenmesi gerekmiştir. Yapılan değişiklikler aşağıdaki gibidir:

- TIMES’da yatırım maliyetinin faydalı ömre yayılması sağlayan maliyetlendirme metodu OSeMOSYS yatırım maliyeti denklem sistemine uyarlanmış, OSeMOSYS teorik arka planındaki Eş. 10 ve onun model dosyasındaki hali olan ilgili denklem sistemi Eş. 14’teki şekilde yeniden düzenlenmiştir.

$$\forall_{y,t,r} CI_{y,t,r} = CC_{y,t,r} * TCapA_{y,t,r} \quad (14)$$

- OSeMOSYS denklem sisteminde Afyonkarahisar için “%X yenilenebilir enerji şartını (çalışmada %75)” sağlayacak bir denklem grubu mevcut değildir. Bu nedenle OSeMOSYS model dosyasına bu koşulu sağlayan denklem Eş. 17’de gösterilmiş ve denklem gruplarına ilave edilmiştir.

$$TT1 = 0.75 * \sum_y \sum_t \sum_r^{Tech3} TTA_{y,i,t,m,r} \quad (15)$$

$$TT2 = \sum_y \sum_t \sum_r^{Tech2} TTA_{y,i,t,m,r} \quad (16)$$

$$TT1 \leq TT2 \quad (17)$$

- OSeMOSYS’te hurda maliyetinin otomatik olarak hesaplanması ve toplam maliyete etkimesi söz konusudur. Bu maliyetin toplam maliyete dâhil olması tercih edilmemiş olup, ilgili hesabı yapan denklem satırları şablon OSeMOSYS kodundan çıkartılmıştır.
- Net bugünkü değere seviyelendirme safhasında operasyon maliyetlerindeki 0,5 parametresi TIMES’da mevcut olmadığından Eş. 9’dan 0,5 çıkartılmıştır. Teorik denklem seti ve OSeMOSYS model dosyasındaki eşitliğin yeniden düzenlenmiş hali Eş. 18’de gösterilmiştir.

$$\forall_{y,t,r} DOC_{y,t,r} = \frac{OC_{y,t,r}}{(1+DR_{t,r})^{(y-StartYear)}} \quad (18)$$

Çalışma kapsamında oluşturulan ve revize edilmiş OSeMOSYS model dosyaları, GitHub repo alanında [56] sunulmuştur.

5. Model Çıktıları (Model Outputs)

Senaryo girdileri OSeMOSYS modeline MoManI ortamında tanıtılmıştır. Bu aşamayı takiben sonuçların elde edilmesinde aşağıdaki üç adım uygulanmıştır:

- Senaryolar OSeMOSYS-GLPK ortamında çalıştırılmış, tüm senaryoların olurlu çözümünün var olduğu gösterilmiş ve çıktılar alınmıştır.
- İnternet ortamındaki yöneylem çözdürücü sitesi NEOS Server’a GLPK model ve veri dosyaları doğrudan girdi olarak tanıtılmamaktadır. Bu nedenle bu dosyalar NEOS çözdürücülerinin kabul edeceği AMPL biçiminde yeniden düzenlenmiş, bu yeni model ve veri dosyaları GUROBI, CPLEX ve MOSEK çözdürücülerinde çalıştırılarak senaryo sonuçlarına ulaşılmıştır.
- ANSWER TIMES platformunda tüm senaryolar modellenmiş ve çıktılara ulaşılmıştır.

OSeMOSYS GLPK bulguları ile NEOS ve TIMES ortamlarında elde edilmiş çıktılar, maliyet, emisyon ve yeni teknoloji yatırımları bazında özdeştir. Çıktıların incelemesi teknik, çevresel ve finansal açıdan yapılacaktır.

5.1. Teknik Boyut (Technical Dimension)

Teknik boyut planların hangi teknolojileri kapsadığını göstermektedir. Tablo 7 bu bakımdan önemli olup zaman ufkundaki her bir yıl için hangi teknoloji ile ne kadar enerji üretildiğini göstermektedir. Yıllar sütunun yanında her bir teknoloji tek tek dizilmiş ve ilgili teknolojinin hangi senaryoda ne kadar enerji ürettiği alt kolonlarda ifade edilmiştir.

MDM senaryosunda referans dönemden itibaren ilde hali hazırda kurulu santraller olan hidroelektrik, güneş ve rüzgâr santralleri maliyet avantajlarını koruyarak çalışmaya devam etmiştir. Bir harici maliyetin (karbon vergisi) ya da yenilenebilir şartının söz konusu olmaması halinde plana ilk olarak dâhil edilecek (en ekonomik) santraller olan biyokütle ve jeotermal enerji santral yatırımları öncelikle devreye alınmıştır. Bir santrallerin üst kapasite limitlerine

Tablo 7. Afyonkarahisar ilinde her bir senaryo için teknoloji bazında üretilen enerji miktarlarının gösterimi (PJ)
(Demonstration of energy amounts generated by the specific technologies for each scenario in Afyonkarahisar)

| Yıllar | Güneş Enerjisi Santrali | Rüzgâr Enerjisi Santrali | Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali | | | Hidro, Enerji Santrali | Biyokütle Enerji Santrali | | | Jeotermal Enerji Santrali | |
|--------|--|--------------------------|-----------------------------------|------------|--------|----------------------------|--|-------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | %75 YEM MDM YA KVM OA KVM DA KVM | %75 YEM | MDM YA KVM OA KVM DA KVM | %75 YEM | MDM | YA_KVM OA KVM DA KVM | MDM %75 YEM YA KVM OA KVM DA KVM | MDM %75 YEM | YA KVM OA KVM DA KVM | MDM %75 YEM | YA KVM OA KVM DA KVM |
| 2016 | 0,1211 | 1,6448 | 1,6448 | 0 | 0 | 3,9821 | 0,0621 | 1,6169 | - | 2,3652 | - |
| 2017 | 0,1211 | 1,6448 | 1,6448 | 0 | 0 | 4,4521 | 0,0621 | 2,0869 | - | 2,3652 | - |
| 2018 | 0,1211 | 1,6448 | 1,6448 | 0 | 0 | 4,7421 | 0,0621 | 2,3769 | - | 2,3652 | - |
| 2019 | 0,1211 | 1,6448 | 1,6448 | 0 | 0 | 4,9821 | 0,0621 | 2,6169 | - | 2,3652 | - |
| 2020 | 0,1211 | 1,6448 | 1,6448 | 0,2663 | 0,2663 | 5,3121 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2021 | 0,1211 | 1,6448 | 1,6448 | 0,6263 | 0,6263 | 5,6721 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2022 | 0,1211 | 1,6448 | 1,6448 | 1,0063 | 1,0063 | 6,0521 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2023 | 0,1211 | 1,6448 | 1,6448 | 1,4063 | 1,4063 | 6,4521 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2024 | 0,1211 | 1,6448 | 1,6448 | 1,8163 | 1,8163 | 6,8621 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2025 | 0,1211 | 1,6448 | 1,6448 | 2,2063 | 2,2063 | 7,2521 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2026 | 0,1211 | 1,8811 | 1,6448 | 2,37 | 2,6063 | 7,6521 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2027 | 0,1211 | 2,1736 | 1,6448 | 2,4675 | 2,9963 | 8,0421 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2028 | 0,1211 | 2,4736 | 1,6448 | 2,5675 | 3,3963 | 8,4421 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2029 | 0,1211 | 2,7811 | 1,6448 | 2,67 | 3,8063 | 8,8521 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2030 | 0,1211 | 3,0811 | 1,6448 | 2,77 | 4,2063 | 9,2521 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |
| 2031 | 0,1211 | 3,3811 | 1,6448 | 2,87 | 4,6063 | 9,6521 | 0,0621 | 2,6806 | - | 2,3652 | - |

gelindiğinde kombine çevrim doğalgaz santraline yatırım yapılmaya başlanmış ve zaman ufkunun sonuna dek (2031) enerji açığı bu teknolojinin kullanılması ile kapatılmıştır.

YEM senaryosunda %75'lik bir yenilenebilir enerji üretim payının her dönemde korunması temel varsayım olduğundan, optimum plan bu dengeye göre oluşmuştur. Afyonkarahisar'da yapılan ilk yeni teknoloji yatırımlarda biyokütle ve jeotermal enerji teknolojilerinin optimum planda olması ile son derece yüksek bir ilk durum yenilenebilir payı yakalanmış, bu pay, doğal gaz kombine çevrim santralinin yıllar içinde kurulu gücünün artması ile azalmaya başlamıştır. Doğal gaz santralinin enerji miktarının toplam enerji miktarının %25'ini geçememesi şartı nedeniyle kritik eşiğe 2026 yılında ulaşılmış ve bu yıldan itibaren yapılan her doğalgaz yatırımına orantılı olmak üzere yenilenebilir rezervlerin kalan en uygun maliyetli seçeneği olan rüzgâr enerjisi santraline yatırımlar başlamıştır. 2031 yılı sonuna dek artan enerji talebi doğrultusunda YEM senaryosunda doğalgaz ve rüzgâr enerjisine her yıl yeni yatırımlar yapıldığı optimum planda görülmektedir.

Karbon vergisi modelinde salınacak emisyon karşılığında teknolojilere yapılan 0,05, 0,1 ve 0,3 \$/tCO₂ ek maliyetlendirme politikası optimum plandaki teknoloji bileşimini değiştirmiştir. Jeotermal ve biyokütle enerji santralleri yüksek CO₂ salınımı açığı çıkartması nedeniyle optimum plan dışında kalmıştır. KVM senaryolarında CO₂ maliyetlendirmesi nedeniyle ilave kapasite yatırımları sadece doğalgaz çevrim santrallerine yapılmış ve diğer teknolojiler yeni yatırımlardan mahrum kalmıştır. Rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinin referans yılda (2016) çalışabilir durumda olan mevcut kapasiteleri ise enerji üretimine devam etmiştir.

5.2. Çevresel Boyut (Environmental Dimension)

Çevresel boyut planların kapsadığı teknolojilerin neden olduğu CO₂ emisyonlarını göstermektedir. Tablo 8, milyon ton CO₂ emisyonu cinsinden 2016-2031 zaman ufkı boyunca beklenen emisyonları senaryolara ayrılmış sütunlarda sunmaktadır.

MDM senaryosu biyokütle, jeotermal ve doğal gaz kombine çevrim teknolojileri neticesinde yüksek emisyon toplam değeri ile başlayıp 2031 yılına dek artan bir emisyon seyri izlemektedir.

%75_YEM senaryosu MDM senaryosu ile teknik boyut itibarıyla çok benzer olup 2026 yılından itibaren ayrışma gösterdiğinden emisyon değerleri de 2026 yılına kadar özdeş bir seyir izlemiştir. 2026 yılından itibaren kısmen yapılan rüzgâr enerjisi yatırımları nedeniyle MDM senaryosuna görece daha düşük ama yine de toplamda yüksek bir emisyon görünümü arz etmektedir.

Karbon vergisi senaryoları özdeş bir teknik boyuta sahip olduğundan emisyon değerleri hem düşük hem de orta ve yüksek azim senaryolar için zaman ufkı boyunca aynıdır. Bütün senaryolar içinde rüzgâr enerjisini önceliklendiren ana senaryo karbon vergisi senaryolarıdır ve bu durum tüm zaman ufkı boyunca emisyon değerlerinin oldukça düşük çıkmasına neden olmuştur.

5.3. Mali Boyut (Financial Dimension)

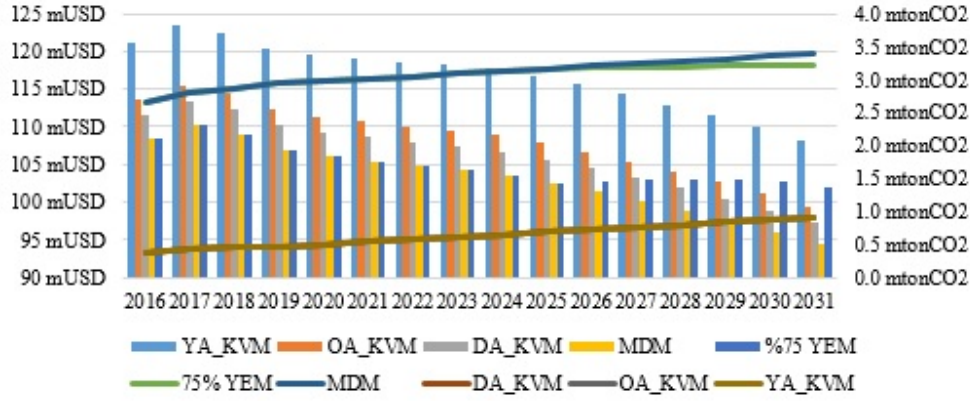
Mali boyut planların kapsadığı teknolojilerin neden olduğu maliyet görünümüne işaret etmektedir. Şekil 1'de zaman ufkı boyunca senaryolar beşli gruplar halinde yıllık maliyetleri ile gösterilmiştir. Şekilde ayrıca senaryoların yıllık neden olduğu CO₂ emisyonu da işlenmiştir. Yıllık maliyetler 2016 yılına endekslenmiş net bugünkü değerlerle Şekil 1'de ifade olunmuştur.

Şekil incelendiğinde YA_KVM maliyet göstergesinin tüm zaman ufkı boyunca en yüksek maliyetli seçenek olduğu görülmektedir. 2026 yılına dek MDM ve %75_YEM senaryoları en düşük maliyetli özdeş iki senaryo olarak hareket etmiş ancak bu yıldan itibaren (yeni rüzgâr enerjisi yatırımlarının her yıl artması ve kombine çevrim doğal gaz santralinden göreceli olarak çok yüksek olması nedeniyle) %75_YEM senaryosu giderek artan bir maliyet seyri göstermiştir. Bu artış zaman ufkunun sonlarına doğru DA ve OA_KVM senaryolarını dahi geride bırakmıştır.

Her bir senaryo olurlu planlarına göre yıllar bazında yenilenebilir ve fosil yakıt kaynaklı santrallerden üretilen enerji miktarları Tablo 9'da sunulmuştur. Tablonun altını çizdiği üzere MDM, %75_YEM ve KVM senaryoları kendilerine has farklı optimum planlar üretmişlerdir. MDM ve %75_YEM senaryoları optimum çözümden biyokütle ve jeotermal santrallere yeni yatırımların yapılmasını emretmiştir. %75_YEM senaryosu temel varsayımı olan %75 yenilenebilir enerji çıktısının üretilmesi zorunluluğu karşısında 2026

Tablo 8. Afyonkarahisar ilinde her bir senaryo sonucunda üretilen CO₂ emisyonu (Mt)
(Amount of CO₂ produced as the output of each scenario in Afyonkarahisar)

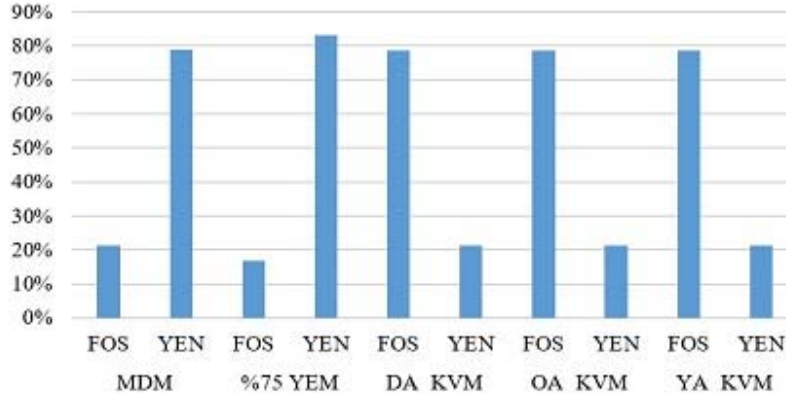
| Yıl | 75% YEM | MDM | DA KVM | OA KVM | YA KVM |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2016 | 2,653687 | 2,653687 | 0,377302 | 0,377302 | 0,377302 |
| 2017 | 2,788469 | 2,788469 | 0,421834 | 0,421834 | 0,421834 |
| 2018 | 2,871632 | 2,871632 | 0,449312 | 0,449312 | 0,449312 |
| 2019 | 2,940456 | 2,940456 | 0,472052 | 0,472052 | 0,472052 |
| 2020 | 2,983952 | 2,983952 | 0,503319 | 0,503319 | 0,503319 |
| 2021 | 3,018062 | 3,018062 | 0,537429 | 0,537429 | 0,537429 |
| 2022 | 3,054067 | 3,054067 | 0,573434 | 0,573434 | 0,573434 |
| 2023 | 3,091967 | 3,091967 | 0,611334 | 0,611334 | 0,611334 |
| 2024 | 3,130814 | 3,130814 | 0,650182 | 0,650182 | 0,650182 |
| 2025 | 3,167767 | 3,167767 | 0,687134 | 0,687134 | 0,687134 |
| 2026 | 3,183276 | 3,205667 | 0,725034 | 0,725034 | 0,725034 |
| 2027 | 3,192514 | 3,242619 | 0,761987 | 0,761987 | 0,761987 |
| 2028 | 3,201989 | 3,280519 | 0,799887 | 0,799887 | 0,799887 |
| 2029 | 3,211701 | 3,319367 | 0,838734 | 0,838734 | 0,838734 |
| 2030 | 3,221176 | 3,357267 | 0,876634 | 0,876634 | 0,876634 |
| 2031 | 3,230651 | 3,395167 | 0,914534 | 0,914534 | 0,914534 |

**Şekil 1.** Senaryo yıllık maliyetleri (mUSD) ve CO₂ emisyon değerleri (mt) (Annual total costs of scenarios and the CO₂ emission amounts)**Tablo 9.** Senaryo optimum planlarına göre PJ cinsinden fosil ve yenilenebilir yakıtlı santrallerin enerji çıktıları
(Energy outputs of technologies consuming fossil inputs and renewables according to the scenario optimum plans in PJ)

| Senaryo | MDM | | %75 YEM | | DA KVM | | OA KVM | | YA KVM | |
|---------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| | Fosil Enj. | Yen. Enj. | Fosil Enj. | Yen. Enj. | Fosil Enj. | Yen. Enj. | Fosil Enj. | Yen. Enj. | Fosil Enj. | Yen. Enj. |
| 2016 | 0,00 | 5,81 | 0,00 | 5,81 | 3,98 | 1,83 | 3,98 | 1,83 | 3,98 | 1,83 |
| 2017 | 0,00 | 6,28 | 0,00 | 6,28 | 4,45 | 1,83 | 4,45 | 1,83 | 4,45 | 1,83 |
| 2018 | 0,00 | 6,57 | 0,00 | 6,57 | 4,74 | 1,83 | 4,74 | 1,83 | 4,74 | 1,83 |
| 2019 | 0,00 | 6,81 | 0,00 | 6,81 | 4,98 | 1,83 | 4,98 | 1,83 | 4,98 | 1,83 |
| 2020 | 0,27 | 6,87 | 0,27 | 6,87 | 5,31 | 1,83 | 5,31 | 1,83 | 5,31 | 1,83 |
| 2021 | 0,63 | 6,87 | 0,63 | 6,87 | 5,67 | 1,83 | 5,67 | 1,83 | 5,67 | 1,83 |
| 2022 | 1,01 | 6,87 | 1,01 | 6,87 | 6,05 | 1,83 | 6,05 | 1,83 | 6,05 | 1,83 |
| 2023 | 1,41 | 6,87 | 1,41 | 6,87 | 6,45 | 1,83 | 6,45 | 1,83 | 6,45 | 1,83 |
| 2024 | 1,82 | 6,87 | 1,82 | 6,87 | 6,86 | 1,83 | 6,86 | 1,83 | 6,86 | 1,83 |
| 2025 | 2,21 | 6,87 | 2,21 | 6,87 | 7,25 | 1,83 | 7,25 | 1,83 | 7,25 | 1,83 |
| 2026 | 2,61 | 6,87 | 2,37 | 7,11 | 7,65 | 1,83 | 7,65 | 1,83 | 7,65 | 1,83 |
| 2027 | 3,00 | 6,87 | 2,47 | 7,40 | 8,04 | 1,83 | 8,04 | 1,83 | 8,04 | 1,83 |
| 2028 | 3,40 | 6,87 | 2,57 | 7,70 | 8,44 | 1,83 | 8,44 | 1,83 | 8,44 | 1,83 |
| 2029 | 3,81 | 6,87 | 2,67 | 8,01 | 8,85 | 1,83 | 8,85 | 1,83 | 8,85 | 1,83 |
| 2030 | 4,21 | 6,87 | 2,77 | 8,31 | 9,25 | 1,83 | 9,25 | 1,83 | 9,25 | 1,83 |
| 2031 | 4,61 | 6,87 | 2,87 | 8,61 | 9,65 | 1,83 | 9,65 | 1,83 | 9,65 | 1,83 |

yılından itibaren rüzgâr enerjisi yatırımları ile doğal gaz santral yatırımlarını dengelemek durumunda kaldığından MDM senaryosundan farklılaşmıştır. KVM senaryoları Afyonkarahisar'da yeni jeotermal santral yatırımları yüksek emisyon maliyetleri nedeni

ile gerçekleşmemiş, enerji talebiyle birlikte kombine çevrim santraller bu açığı kapatmak üzere devreye alınmışlardır. Üç karbon vergisi senaryosunun da ortak sonuç üretmiş olması tesadüfi bir durumdur. Zira eğer Afyonkarahisar'da mevcut bir jeotermal santral olsa idi, bu



Şekil 2. % olarak fosil ve yenilenebilir yakıtlı santrallerin enerji çıktıları
(Percentage of energy outputs of technologies consuming fossil inputs and renewables)

santrallerin DA_KVM’de çalışır halde tutulacakları ancak OA_KVM ve YA_KVM’lerde karbon vergisinin ağırlığı karşısında çalıştırılmayacakları görülebilecektir. Dolayısıyla KVM senaryolarının ortak sonuç üretmesinin mevcutta çalışır bir santral olmaması ile yakından ilişkili olduğu görülmüştür. Bu senaryoların fosil ve yenilenebilir enerji girdilerine göre 2016-2031 döneminde ürettikleri enerji çıktıları yüzde olarak Şekil 2’de gösterilmiştir.

2016 yılında elektrik üretimi açısından kendi kendine yeterli olmayan Afyonkarahisar ili referans yıl ilk yatırımı ile kendine yeterli hale gelmiştir. Arz-talep dengesi sağlandıktan sonra 2017 ve takip eden yıllarda talep artışı kadar yeni yatırıma gidilmiştir. “Yeni yatırımların” yıllık düşüşü sağlanmıştır. Net bugünkü değer maliyetlendirmesi gereği olarak maliyetlerin yıldan yıla azaldığı görülmüştür. Zaman erimi boyunca katlanılan maliyetlerin 2016 yılına indirgenmiş net bugünkü değeri (OSeMOSYS, NEOS ve TIMES sonuçları özdeşdir) MDM senaryosu için 1,6489152 milyar USD, YEM senaryosu için 1,6771492 milyar USD, DA_KVM senaryosu için 1,6993151 milyar USD, OA_KVM senaryosu için 1,7335071 milyar USD ve YA_KVM senaryosu için 1,8702753 milyar USD olarak bulunmuştur.

2016 yılından önce GES, RES ve HES santralleri ile çok kısıtlı bir elektrik enerjisi üretimi kurulu gücüne sahip Afyonkarahisar’ın maksimum üretebileceği enerji miktarı verili teknik parametreler altında 1,828 PJ olup 2016 elektrik enerjisi talebi 5,81 PJ, 2031 yılı talebi ise 11,48 PJ’dür. Bu yetersiz kurulu güç ortamında her senaryo kurulu arz gücünü öncelikle talebi karşılayacak hale getirmiş, sonrasında da yıldan yıla kapasite geliştirmeleri öngörmüştür.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışma, OSeMOSYS ortamında oluşturulmuş bölgesel bir “çoklu senaryo” uygulamasıdır. Çalışmanın NEOS Server ve TIMES platformlarında kurulmuş modellerle sınaması gerçekleştirilmiştir. OSeMOSYS platformunun açık kaynak kodlu esnek yapısı model üzerinde değişiklikler yapmaya elverişlidir. AMPL dili üzerinden kodlanmış modelin gerek OSeMOSYS’in kendi uyumlu olduğu GLPK çözdürücüsü ile gerekse model ve veri dosyalarının yeniden düzenlenmesinin ardından NEOS üzerinden farklı çözdürücüleri kullanılabilmesi ile benzer ticari programlara ticari güçlü bir alternatif olabileceği görülmüştür.

Veri girişinde MoManI arayüzünün kullanılması kullanıcılara bir ölçüde rahatlık getirmektedir. Buna karşın MoManI arayüzünün şablon OSeMOSYS modeli üzerine kurgulanmış olması nedeniyle

ilave edilecek denklem setlerinin (%75 YEM senaryosunda olduğu gibi) elle girilmesi gerekmektedir. Bunun sonucu ise OSeMOSYS ile çalışacak kişilerin yöneylem bilgisi ile donanımlı olması ve olası hatalarla başa çıkabilecek deneyim ile bilgiye sahip olması gerekliliğidir.

Afyonkarahisar ili ölçeğinde küçük şehirler sınırlı miktarda elektrik enerjisi tüketmektedir. Bu enerji tüketiminin salt yenilenebilir enerji kullanılarak karşılanabilmesi de mümkündür, ancak enerjinin en olurlu maliyetle üretilmesi söz konusu olduğunda optimum teknoloji bileşiminde sadece yenilenebilir enerji değil, fosil yakıtlı santralleri de dikkate almak gerekir. Fotovoltaik ve rüzgâr enerji kaynaklarının kullanılmayan kısmı, gelecekte oluşabilecek daha yüksek elektrik enerjisi talepleri için rezerv enerji potansiyeli olarak kalmaya devam etmektedir. Sanayi, ısıtma soğutma ya da elektrikli ulaşım gibi sektörlerde meydana gelebilecek talep artışları bu kapsamda değerlendirilebilir. Karbon vergisi senaryosunda çevresel olarak en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Karbon vergisinin eklenmesi ile jeotermal ve biyokütle santralleri sahip oldukları maliyet avantajını kaybetmiş ve sonuçta optimum plana giremeyerek KVM senaryolarında yerini doğal gaz kombine çevrim santraline terk etmişlerdir. Yenilenebilir enerjinin devreye alınması ile ilgili olarak yapılacak planlama sonuçlarının bu şekilde optimizasyon sonuçları üzerinden görülebilmesi oldukça önemli olup karar vericilere yatırımların sonucunda katlanılacak maliyetler ve çevresel sonuçları detaylı olarak sunulabilmektedir. Bu çalışmada, bölgesel OSeMOSYS yazılım modelinde çıktı doğruluğunun sınaması işleminin NEOS Server ve TIMES modelleme araçlarıyla sağlanabileceği gösterilmiştir. Çalışmanın sonucunda karar vericiler iddialı yenilenebilir enerji hedeflerine varıp varamayacakları hakkında (%75 yenilenebilir enerji hedefi) maliyet, teknolojik ve çevresel açılardan cevaplar alabilmektedir. Senaryo sonuçlarından ilin kısa vadede daha yüksek hedefleri de karşılayabileceği anlaşılmaktadır. Diğer yandan, daha iddialı oranlar uzun vadede şehrin maksimum yenilenebilir sınırlarına daha kısa sürede ulaşmasına neden olacağından bu tür sert politikaların çok boyutlu olarak değerlendirilmesi gerekecektir.

Bu çalışma, ulusal ve bölgesel düzeyde daha ayrıntılı çalışmalarını tetikleyebilecek, gerek açık kaynaklı projelerin yaygınlaştırılmasında, gerekse optimizasyon metodolojisinin enerji sektörüne uygulanmasında kullanışlı bir araç olan OSeMOSYS yazılım ortamı kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanış itibarıyla ulusal düzeyden bölgesel düzeye ağırlığın kaydığı enerji optimizasyon modeli uygulamalarının ülkemizde az sayıda olması ve OSeMOSYSin uygulama olarak yerli enerji literatürümüzde geride kaldığı dikkate alındığında, OSeMOSYS ve diğer açık kaynak kodlu uygulamaların

zaman içinde yaygınlaşacağı tahmin edilmektedir. Bu incelemenin içerdiği senaryo çalışmalarının zenginleştirilmesi (zaman kesitinin artırılması, farklı emisyon ve vergi uygulamaları, yeni teknolojilerin tanımlanması vb) karar vericilere daha detaylı bilgiler sağlayacaktır. Benzeri geliştirmeler ışığında hazırlanacak yeni modeller TR33 Bölgesi ve Türkiye enerji sektörü için büyük öneme sahiptir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu makaledeki tüm bulgular FDK-2019-6839 proje numaralı araştırmaya ait olup Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar (References)

- Palz W., *The Triumph of the Sun: The Energy of the New Century*, CRC Press, Florida, A.B.D., 2018.
- Lovins L.H., *The Triumph of Solar in the Energy Race*, *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 5 (187), 2, 2015.
- Brook B. W. ve Bradshaw C.J., Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation, *Conservation Biology*, 29 (3), 702-712, 2015.
- Xie H., Yu Y., Wang W., Liu Y., The substitutability of non-fossil energy, potential carbon emission reduction and energy shadow prices in China, *Energy Policy*, 107, 63-71, 2017.
- Kocaman A.S., Optimization of hybrid energy systems with pumped hydro storage- A case study for Turkey, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 53-68, 2019.
- Özdemir E., Aktaş A., Erhan K., Özdemir Ş., Opportunities and challenges for energy storage applications in smart grid, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (2), 499-506, 2017.
- Jimenez I., Electric power system planning in the framework of the overall energy system, 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington-A.B.D., 2943-2948, 6-11 Ağustos, 1989.
- International Energy Agency. Documentation for the MARKAL Family of Models. https://www.iea-etsap.org/MrkIDoc-I_StdMARKAL.pdf. Erişim Tarihi Ocak 8, 2021.
- International Energy Agency. Documentation for the times model part ii. https://www.iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-II.pdf. Erişim Tarihi Ocak 8, 2021.
- International Energy Agency. Documentation for the times model part iv. http://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-IV_October-2016.pdf. Erişim Tarihi Ocak 10, 2021.
- Howells M., Rogner H., Strachan N., Heaps C., Huntington H., Kypreos S., ... ve Roehrl A., OSeMOSYS: the open source energy modeling system: an introduction to its ethos, structure and development, *Energy Policy*, 39 (10), 5850-5870, 2011.
- Löffler K., Hainsch K., Burandt T., Oei P.Y., Kemfert, C., Von Hirschhausen C., Designing a model for the global energy system—GENESYS-MOD: an application of the open-source energy modeling system (OSeMOSYS), *Energies*, 10 (10), 1468, 2017.
- Centre for Climate and Energy Analyses. The model for European energy system analysis MEESA. https://climatecake.ios.edu/wp-content/uploads/2020/05/CAKE_MEESA_energy-model_documentation.pdf. Erişim Tarihi Temmuz 10, 2021.
- Maïzi N. ve Assoumou E., Future prospects for nuclear power in France, *Applied Energy*, 136, 849-859, 2014.
- Tsai, M.S. ve Chang, S.L., Taiwan's 2050 low carbon development roadmap: An evaluation with the MARKAL model, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 178-191, 2015.
- Contaldi M., Gracceva F., Tosato G., Evaluation of green-certificates policies using the MARKAL-MACRO-Italy model, *Energy Policy*, 35 (2), 797-808, 2007.
- Labriet M., Cabal H., Lechón Y., Giannakidis G., Kanudia A., The implementation of the EU renewable directive in Spain. Strategies and challenges, *Energy Policy*, 38 (5), 2272-2281, 2010.
- Vaillancourt K., Alcocer Y., Bahn O., Fertel C., Frenette E., Garbouj H., ... ve Waaub, J.P., A Canadian 2050 energy outlook: Analysis with the multi-regional model TIMES-Canada, *Applied energy*, 132, 56-65, 2014.
- Kannan R. ve Turton, H., A long-term electricity dispatch model with the TIMES framework. *Environmental Modeling & Assessment*, 18 (3), 325-343, 2013.
- Kannan R., The development and application of a temporal MARKAL energy system model using flexible time slicing, *Applied Energy*, 88 (6), 2261-2272, 2011.
- Comodi G., Cioccolanti L., Gargiulo M., Municipal scale scenario: Analysis of an Italian seaside town with Markal-TIMES, *Energy Policy*, 41, 303-315, 2012.
- Salvia M., Pietrapertosa F., Cosmi C., Cuomo V., Macchiato, M., Approaching the Kyoto targets: a case study for Basilicata region (Italy), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8 (1), 73-90, 2004.
- Büeler B.P., Computing economic equilibria and its application to international trade of CO2 permits: an agent-based approach, *Doktora Tezi*, ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 1997.
- Rafaj P., Kypreos S., Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL Model, *Energy Policy*, 35 (2), 828-843, 2007.
- Føyn, T.H.Y., Karlsson K., Balyk O., Grohnheit P.E., A global renewable energy system: A modelling exercise in ETSAP/TIAM. *Applied energy*, 88 (2), 526-534, 2011.
- Gardumi F., Shivakumar A., Morrison R., Taliotis C., Broad O., Beltramo A., ... ve Alfstad T., From the development of an open-source energy modelling tool to its application and the creation of communities of practice: The example of OSeMOSYS, *Energy Strategy Reviews*, 20, 209-228, 2018.
- Dhakouani A., Gardumi F., Znouda E., Bouden C., Howells M., Long-term optimisation model of the Tunisian power system, *Energy*, 141, 550-562, 2017.
- Olsson J.M. ve Gardumi F., Modelling least cost electricity system scenarios for Bangladesh using OSeMOSYS, *Energy Strategy Reviews*, 38, 100705, 2021.
- Emodi N.V., Chaiechi T., Beg A.R.A., Are emission reduction policies effective under climate change conditions? A backcasting and exploratory scenario approach using the LEAP-OSeMOSYS Model, *Applied Energy*, 236, 1183-1217, 2019.
- Groissböck M. ve Pickl M.J., An analysis of the power market in Saudi Arabia: Retrospective cost and environmental optimization, *Applied Energy*, 165, 548-558, 2016.
- Anjo J., Neves D., Silva C., Shivakumar A., Howells M., Modeling the long-term impact of demand response in energy planning: The Portuguese electric system case study, *Energy*, 165, 456-468, 2018.
- Almulla Y., Ramos E., Gardumi F., Taliotis C., Lipponen A., Howells M., The role of Energy-Water nexus to motivate transboundary cooperation: An indicative analysis of the Drina River Basin, *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 18, 3-28, 2018.
- De Moura G.N.P., Legey L.F.L., Howells M., A Brazilian perspective of power systems integration using OSeMOSYS SAMBA—South America Model Base—and the bargaining power of neighbouring countries: A cooperative games approach, *Energy Policy*, 115, 470-485, 2018.
- Dreier D. ve Howells M., OSeMOSYS-PuLP: A Stochastic Modeling Framework for Long-Term Energy Systems Modeling, *Energies*, 12 (7), 1382, 2019.
- Riva F., Gardumi F., Tognollo A., Colombo E., Soft-linking energy demand and optimisation models for local long-term electricity planning: An application to rural India, *Energy*, 166, 32-46, 2019.
- Tomei J., Cronin J., Arias H.D.A., Machado S.C., Palacios M.F.M., Ortiz Y.M.T., ... ve Anandarajah G., Forgotten spaces: How reliability, affordability and engagement shape the outcomes of last-mile electrification in Chocó, Colombia, *Energy Research & Social Science*, 59, 101302, 2020.
- Cetin B., Avcı H., Technical and economic analysis of the conversion on an existing coal-fired thermal power plant to solar-aided hybrid power plant, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 1027-1046, 2019.
- Sen O., Yılmaz C., Thermodynamic analysis of geothermal and solar assisted power generation and heating system., *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (3), 1625-1638, 2022.

39. Yılmaz C., Life cycle cost analysis of combined flash binary geothermal plant and integrated hydrogen generation system, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 1-16, 2020.
40. Tekin A. ve Vural İ.Y., Global Kamusal Malların Finansman Aracı Olarak Global Vergi Önerileri. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 12, 323-337, 2004.
41. Kovancılar B., Küresel Isınma Sorununun Çözümünde Karbon Vergisi ve Etkinliği. Yönetim ve Ekonomi: Celal Bayar Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 8 (2), 7-20, 2001.
42. KTH Royal Institute of Technology, Model Management Infrastructure (MoManI) Training Manual. http://www.osemosys.org/uploads/1/8/5/0/18504136/momani_training_manual_rev170612.pdf. Erişim Tarihi Şubat 7, 2019.
43. Sabancı Üniversitesi, Karbon Piyasalarına Hazırlık Ortaklığı (PMR) Türkiye Projesi, https://cdpturkey.sabanciuniv.edu/sites/cdpturkey.sabanciuniv.edu/files/Tuba%20Seyyah%20CDP%20sunumu_20190416%20%281%29.pdf. Erişim Tarihi Şubat 1, 2021.
44. Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı resmi websitesi. <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/OnbirinciKalkinmaPlani.pdf>. Erişim Tarihi Mart 28, 2022.
45. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı resmi websitesi., https://sp.enerji.gov.tr/ETKB_2019_2023_Stratejik_Plani.pdfErişim Tarihi Mart 28, 2022.
46. Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü, Kalkınma Kütüphanesi websitesi., <https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/assets/upload/dosyalar/tr33-bolge-si-bolge-plani-2014-2023.pdf>. Erişim Tarihi Mart 28, 2022.
47. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı websitesi., <http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FE%2C4%B0GM%20Ana%20Rapor%2FT%2C3%BCrkiye%20Elektrik%20Enerjisi%20Talep%20Projeksiyonu%20Raporu.pdf>. Erişim Tarihi Şubat 1, 2019.
48. Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) websitesi.http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FSekt%C3%B6r%20Raporu%2FEUAS-Sektor_Raporu2016.pdf. Erişim Tarihi Haziran 1, 2019.
49. İktisadi İş Birliği ve Gelişme Teşkilatı websitesi. <https://www.oecd-nea.org/>. Erişim Tarihi Şubat 1, 2021.
50. ETSAP websitesi. <https://iea-etsap.org/>. Erişim Tarihi Ocak 12, 2021.
51. Zorlu Enerji websitesi. <https://www.zorluenerji.com.tr/fileuploads/kizildere/teknik-olmayan-ozet-tr.pdf>. Erişim Tarihi Temmuz 15, 2021.
52. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) Websitesi. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/stationaryemissions_3_2016.pdf. Erişim Tarihi Temmuz 10, 2021.
53. OSEMOSSYS GitHub websitesi. <https://github.com/OSeMOSYS/OSeMOSYS>. Erişim Tarihi Mayıs 03, 2021.
54. NEMO GitHub websitesi. <https://github.com/sei-international/NemoMod.jl>. Erişim Tarihi Mayıs 05, 2021.
55. Open Source Energy Modelling System (OSEMOSSYS) Documentation Release 0.0.1. <https://www.osemosys.org/> Erişim Tarihi Aralık, 2021.
56. Github ukoker repo alanı. https://github.com/ukoker/OSEMOSSYS/upload/main/Gazi_Afyonkarahisar. Yayın tarihi: Nisan 7, 2022. Erişim tarihi: Nisan 7, 2022.

