



Makale / Research Paper

**Hibrit Mikro Şebekeler için Optimal Enerji Depolama
ve GES Boyutu Analizi Çalışması**

**Rabia Şeyma YILMAZ^{1a}, Şafak BAYKAL^{2b}, Alper TERCİYANLI^{2c},
Rifat Anıl AYDIN^{1d}, Ertuğrul ÇAM^{3e}**

¹inavitas Enerji A.Ş., Ankara

²Endoks Enerji Ltd, Ankara

³Kırıkkale University, Electrical and Electronics Engineering, Kırıkkale

cam@kku.edu.tr

Received/Geliş: 23.02.2021

Accepted/Kabul: 26.04.2021

Öz: Ülkelerin kırsal veya şebekeden bağımsız alanlarına temiz ve uygun fiyatlı enerji sağlama problemi yavaş yavaş gündeme gelmektedir. Bununla birlikte, bu sistemlerin planlanması ve işletilmesi süreci, çoğu zaman yenilenebilir kaynakların ve kırsal bölgelerdeki elektrik tüketiminin stokastik yapısından kaynaklanan belirsizlikler nedeniyle birtakım zorluklarla karşı karşıyadır. Bu çalışmada, bu problemi ele almakta ve kaynak kısıtlarını düşünerek enerji talebini karşılarken toplam maliyeti enazlamaya çalışılmaktadır. Kurulan modelde solar enerjisi, jeneratör, batarya ve gerekli durumda şebekeden tedarik edilmeye çalışılan enerji talebi, enerji bileşenlerinin ilk kurulum, işletme ve operasyon maliyetlerini gözden geçirerek sağlamaktadır. Bu çalışmadaki çözüm yaklaşımı Çamlıbel Elektrik Dağıtım Şirketi bölgesindeki bir köyün verilerine göre uygulanmıştır. Çözüm yaklaşımı ve uygulama sonuçları farklı senaryolar analizleriyle çalışmada detaylandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikro şebeke, Off-Grid, Batarya, Solar Enerji, Optimizasyon, Depolama Sistemleri

**Optimal Energy Storage and PV Capacity Analysis
for Hybrid Micro Grids**

Abstract: The problem of providing clean and affordable energy to rural and off-grid areas of countries is gradually growing. However, the planning and operation of these systems face with a number of difficulties, often due to uncertainties stemming from the stochastic nature of renewable energy sources and electricity consumption in rural areas. This study focuses this problem and tries to minimize the total cost while meeting energy demand by considering resource constraints. In the proposed model, PV, generator, energy storage system and energy demand, which is tried to be supplied from the grid when necessary, are provided by reviewing the initial installation, operation and operation costs of the energy components. The approach in this study was applied according to the data of a village in the Çamlıbel Electricity Distribution Company region. Solution approach and application results are detailed in the study with different scenario analysis.

Keywords: Microgrids, off-grid operation, energy storage, solar energy, optimization, energy storage systems

1. Giriş

Son yıllarda, dünyada daha önce yaşanmamış sosyal ve ekonomik büyüme ve gelişmeler yaşanmaktadır. Bu gelişmeler yaşanırken gezegenimizi korumak ve sürdürülebilirliği artırmak da sürekli düşünülmesi gereken konulardır. Birleşmiş Milletler'in [1] desteklediği on yedi dünya dönüşüm amacından yedinci sürdürülebilir gelişim amacına göre herkes için temiz ve uygun fiyatlı enerji sağlama çabaları yavaş ilerlemektedir. Bu amaca göre yenilenebilir enerji kullanımı ile enerji

Bu makaleye atıf yapmak için

Yılmaz, R.Ş., Baykal, Ş., Terciyanlı, A., Aydın, R.A., Çam, E., "Hibrit Mikro Şebekeler İçin Optimal Enerji Depolama Ve Ges Boyutu Analizi Çalışması" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8 (2); 859-872.

How to cite this article

Yılmaz, R.Ş., Baykal, Ş., Terciyanlı, A., Aydın, R.A., Çam, E., "Optimal Energy Storage and PV Capacity Analysis for Hybrid Micro Grids" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8 (2); 859-872.

ORCID ID: ^a0000-0002-6320-775X; ^b0000-0002-5519-6077; ^c0000-0003-2671-2615; ^d0000-0001-9173-392; ^e0000-0001-6491-9225

verimliliğinin de artması hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda ilerlendiğinde International Energy Agency (IEA)'nin [2] raporladığı dünya çapında hala elektriğe erişimi olmayan 992 milyon insanın sayısı azalacaktır. Ayrıca, enerji tedarikinin sağlandığı alanın %100'üne yaklaşıldığında, geriye kalan izole edilmiş şebekeye bağlı alanlardan uzak topluluklara ulaşmanın daha da zorlaştığı bilinmektedir. Bu konuda, Gomez ve diğ. [3], Brezilya hükümetinin gözetiminde, tüm vatandaşlarına elektrik sağlama konusunda bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaya göre sonuçlar, elektriğe erişimi olmayan insanların şebekeden en uzak mesafede olduklarını ve kendi bölgelerindeki en düşük gelire sahip olduklarını göstermektedir. Benzer konulu bir diğer çalışmayı ise, Asya kalkınma bankası için Rauniyar ve diğ. [4] Buthan'da yapmışlardır. Buna göre, %100 tüm bölgeye enerji ulaştırmanın maliyetinin önceki elektrifikasyon projelerinden daha fazla olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Bu çalışmada, ilk olarak literatürde bulunan mikro şebeke (microgrid) çalışmaları anlatılmaktadır. Daha sonrasında, solar panel (photovoltaic panel), dizel jeneratör (diesel generator) ve batarya (energy storage) gibi bileşenlere sahip mikro şebekeler için kapasite optimizasyon modeli (optimization model) oluşturulmuştur. Model, Sivas ilindeki Küpecik Köyü enerji talebi verisi ile farklı senaryolar üzerinden test edilmiştir. Değerlendirme sonuçları ve öneriler sunulmaktadır.

2. Literatür Özeti

Kırsal veya şebekeden bağımsız alanlarda uygulanabilir ve maliyet odaklı çözümlerden biri hibrit mikro şebeke (hybrid microgrids) sistemleridir. Bu hibrit mikro şebekeler, belirli sınırlar içerisinde içerisindeki enerji kaynakları kullanılarak şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olarak yönetilebilen küçük enerji şebekeleridir. [5] Sadece dizel jeneratörün işletildiği çözüm, şebekeden bağımsız bu alanlarda yıllardır uygulanan bir yöntem olsa da gerek dizelin ulaşım ile artan maliyeti gerek çevre dostu bir yaklaşım olmaması dezavantajlarını artırmaktadır. Bunun yanında tamamen yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji talebinin karşılandığı bir çözüm de üretimin olmadığı veya yetersiz olduğu zamanlarda yüksek kapasiteli depolama sistemlerine ihtiyaç doğurmaktadır. Bu nedenlerle hibrit mikro şebeke teknolojisi, bu bölgeler için güvenilir ve potansiyel olarak temiz elektrik sunmakta ve tamamlayıcı özelliklere sahip farklı yenilenebilir enerji kaynakları, şebeke bağlantısı (grid connection) ve depolama sistemleri (energy storage system) içermektedir [6]. Bileşenler arasındaki uyum yakalandığında, Diaz ve diğ. [7] tarafından belirtildiği gibi, etkin ve çevre dostu sistemler oluşturulabilir. Bu çıkarımda, 28 mikro şebekeyi geleneksel sistemlerin maliyetleri ile hibrit sistemlerin (dizel jeneratör, PV-jeneratör ve hidro-jeneratör) maliyetlerini kıyaslayarak bulunmuşlardır. Bu makaledeki maliyet karşılaştırmasına benzer çalışmalar [5, 8, 9]'da da verilmektedir. Bu çalışmalar, şebekeyi genişletmenin maliyetinin solar veya rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen enerjinin dizel jeneratör ile desteklediği sistemlerinin maliyetinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Nerini ve diğ. [5] hibrit mikro şebekelere seçilecek bileşenlerde dört farklı parametrenin değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bunlar, enerji erişim kalitesi ve seviyesi, nüfus yoğunluğu, yerel enerji kaynaklarının mevcudiyeti ve teknolojilerinin maliyeti ile yerel şebekenin bağlantı özellikleridir. Bu parametrelere bakılarak mikro şebekeye sistem kurulmadan önce optimizasyon ve simülasyon çalışmaları yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Hibrit mikro şebekelerin kurulmasında karşılaşılan birtakım engeller bulunmaktadır. Bunlardan ilki talebin uzun süreli projeksiyonudur. Riva ve diğ. [10] uzun dönemli elektrik talebi tahminleri için uygun modellerin kullanılmasının kırsal bölgedeki elektrifikasyon sistemlerinin kurulmada gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Başta sadece PV paneller ile kurulmuş olan bir mikro şebekeye, gece saatlerinde beklenen enerji tüketiminin artmasıyla jeneratörün eklendiğini Diaz ve diğ. [7] makalesinde belirtmiştir. Aynı çalışmada uzun süreli yenilenebilir enerji üretimi tahmininin elde olmasına göre dizel tüketiminin de değiştiği ifade edilmiştir.

Tablo 1. Model Parametre ve Değişkenleri

Adı	Açıklama
n	Projenin yıl cinsinden süresi
t	Yılın periyotlara bölümü
TPE_t	t zamanındaki toplam PV enerjisi
PE_t	t zamanında bir PV panelden üretilen enerji
IV	Inverter verimliliği
PA	PV panel adedi
BŞD_t	t zamanındaki bataryanın şarj seviyesi
BŞE_t	t zamanında bataryayı şarj eden enerji
BDE_t	t zamanında bataryayı deşarj eden enerji
BŞV	Bataryanın şarj verimliliği
BDV	Bataryanın deşarj verimliliği
BK	Batarya kapasitesi
DD	Bataryanın deşarj derinliği
MŞG	Maksimum şarj gücü
MDG	Maksimum deşarj gücü
KDM_t	t zamanında kullanılan dizel miktarı
JE_t	t zamanında jeneratörden üretilen enerji
JV	Jeneratör verimliliği
AID	Alt ısı değer
JK	Jeneratör kapasitesi
ET_t	t zamanındaki enerji talebi
EF_t	t zamanındaki enerji fazlası
ŞKT_t	t zamanında şebekeden karşılanan talep
ŞÇY	Şebekeden çekilmesine izin verilen yüzdellik
İYM	İlk yatırım maliyeti
OBM	Operasyon bakım maliyeti
BYM	Batarya yenilenme maliyeti
TDM	Toplam dizel maliyeti
ŞEM	Şebekeden çekilen enerjinin maliyeti
PYM	Bir PV panel yatırım maliyeti
PK	Bir PV panel kapasitesi
BM	Birim batarya yatırım maliyeti
JYM	Birim jeneratör yatırım maliyeti
OBP	PV operasyon bakım maliyeti
OBB	Batarya operasyon bakım maliyeti
OBJ	Jeneratör operasyon bakım maliyeti
PBM	PV yatırımın operasyon maliyeti kısmı (%)
JBM	Jeneratör yatırımın operasyon maliyeti kısmı (%)
BBM	Batarya yatırımın operasyon maliyeti kısmı (%)
BYS	Batarya yenilenme süresi
IO	İndirim oranı
DM	Birim dizel maliyeti
ŞÇM	Şebekeden çekilen enerjinin maliyeti

Bu sistemlerin kurulması sırasında karşılaşılan bir diğer engel ise mikro şebekeler için en uygun boyutlandırma ve mimarisi ile ilgilidir. Mandelli ve diğ. [11] tüm olası kapasite kombinasyonlarını test eden sezgisel numaralandırma optimizasyonunu uygulamışlardır. Bu yaklaşım, yüksek hesaplama gücü istemektedir ve lokal optimumu verme ihtimali yüksektir. Doğrusal programlama

(LP) optimizasyonlarının kullanımı da literatürde oldukça yaygındır [12], çünkü optimizasyon sürecinin global optimumu bulmasına izin verir. En büyük dezavantajı doğrusal olmayan karakteristikleri modelleyememesidir.

3. Optimizasyon Modeli

Kurulan optimizasyon modelindeki (optimization model) mikro şebekedeki sistem bileşenleri solar panel, batarya ve dizel jeneratörden oluşmaktadır. Şebekeye bağlı olup olmama durumuna göre enerji kaybı veya şebekeden enerji tedarik maliyeti de modelde düşünülmektedir. PV (Fotovoltaik) panel sayısı, batarya ve jeneratör kapasitesini veren doğrusal model, ilk kurulum, operasyon ve işletme maliyetini enazlamayı amaçlamaktadır. Mikro şebekedeki solar panel, batarya veya jeneratör gibi enerji bileşenlerinin birim ve bakım maliyetleri (unit and maintenance costs) ile verimlilikleri (efficiency) modele parametre olarak verilmektedir. Bunun yanında bir PV panelin kapasitesi (PV panel capacity), bataryanın deşarj derinliği (battery depth of discharge) ve yenilenme süresi (renewal time), dizelin alt ısı değeri ve enerji bileşenleri ile bu bileşenleri kullanarak tedarik edilemeyen maksimum enerji yüzdesi de modele girdi olarak verilmektedir. Modelde seçilecek batarya ve jeneratörün boyutu (storage and diesel generator capacity) ile kurulacak PV panel sayısı (number of PV panels) ve toplam maliyete etki eden tüm maliyetler değişkendir (cost variables). Modeldeki kısıtlar ve amaç fonksiyonu aşağıdaki bölümlerde detaylandırılmaktadır. Modelde kullanılan parametre ve değişkenlerin açıklamaları Tablo 1’de bulunmaktadır.

3.1. Yenilenebilir Enerji Modeli

PV panellerden elde edilen toplam enerji, modele girdi olarak verilen her bir periyotta bir PV panelinin ürettiği enerjinin PV adedi ve eviricinin (inverter) verimliliği ile çarpılması sonucunda hesaplanır. (Denklem 1) Bölgeye kurulacak olan kapasitesi de parametre olarak verilen bir PV panelinden üretilebilen enerjinin yılın saatleri kırılımındaki değerleri de parametre olarak verilmelidir. Avrupa Birliği’nin bilgi sisteminden (JRC) [13] bu konuda yardım alınmıştır.

$$TPE_t = PE_t * IV * PA \quad (1)$$

3.2. Depolama Sistemi Modeli

Kurulan model yaklaşımındaki bataryanın her zaman periyodundaki şarj durumu takip edilmektedir. Bataryanın projenin başlangıç periyoduna geçerken dolu olduğu varsayılmaktadır. Bataryanın bir periyodundaki şarj durumu, bir önceki periyodundaki şarj durumuna o periyotta şarj edildiyse eklenen şarj enerjisi veya deşarj edildiyse çıkarılan deşarj miktarı ile hesaplanır [14, 15, 16]. Bu hesaplamalar yapılırken şarj ve deşarj sırasındaki batarya verimliliği dikkate alınmıştır. (Denklem 2)

$$B\mathcal{S}D_t = B\mathcal{S}D_{t-1} - \frac{BDE_t}{BDV} + B\mathcal{S}E_t * B\mathcal{S}V \quad (2)$$

Bataryanın şarj durumu, deşarj derinliğinin altına inemezken kapasitesinin üzerine de çıkamaz. (Denklem 3)

$$BK * DD \leq B\mathcal{S}D_t \leq BK \quad (3)$$

Batarya her bir periyotta maksimum şarj gücünden daha fazla miktarda şarj edilemez ve maksimum deşarj gücünden daha fazla enerji çekemez. (Denklem 4, 5)

$$B\mathcal{S}E_t \leq M\mathcal{S}G \quad (4)$$

$$BDE_t \leq MDG \quad (5)$$

3.3. Jeneratör Modeli

Sisteme dahil edilme durumu olan dizel jeneratörün alt ısıl değeri ve verimliliği modele parametre olarak verilmelidir.

Jeneratörden elde edilen enerji her bir periyotta kullanılan dizel miktarının dizelin alt ısıl değeri ve jeneratör verimliliği ile çarpılması sonucunda hesaplanır. (Denklem 6)

$$KDM_t = \frac{JE_t}{JV * AID} \quad (6)$$

Jeneratörden her bir periyotta üretilen enerji jeneratör kapasitesini geçemez. (Denklem 7)

$$JK \geq JE_t \quad (7)$$

3.4. Enerji Modeli

Modeldeki nihai amaç parametre olarak verilen her saatteki enerji talebini karşılamaktır. Her bir periyottaki enerji talebi PV panellerinden, jeneratörden ve bataryadan sağlanmaya çalışılmaktadır. Sağlanamayan enerjinin şebekeye bağlantısı olan bir bölge ise gerekli maliyeti karşılanarak şebekeden karşılanması, tamamen şebekeden bağımsız bir bölge ise kayıp maliyeti ile modele etkisi düşünülmektedir. Fazla enerji ile batarya şarj edilmekte veya enerji fazlası çıktısı verilmektedir. (Denklem 8)

$$ET_t = TPE_t + JE_t - BŞE_t + BDE_t - EF_t + ŞKT_t \quad (8)$$

Şebekeye bağlantı durumuna göre şebekeden karşılanan veya kayıp olan enerji talebinin ne kadar olabileceği de kısıtlanmıştır. (Denklem 9)

$$ŞÇY \geq \frac{\sum_t ŞKT_t}{\sum_t ET_t} \quad (9)$$

3.5. Amaç Fonksiyonu (Objective Function)

Depolama, solar panel ve jeneratör seçimi sağlayan optimizasyon modelinin amaç fonksiyonu ilk kurulum, operasyon ve işletme maliyetlerini kapsayan toplam maliyeti enazlamaktır. (Denklem 10) İlk yatırım maliyeti hesaplanırken PV panellerin, bataryanın ve jeneratörün birim maliyetleri ile kapasiteleri çarpılıp toplanmıştır. (Denklem 11)

$$\min IYM + OBM + BYM + TDM + ŞEM \quad (10)$$

$$IYM = (PYM * PK * PA + BK * BM + JYM * JK) \quad (11)$$

Operasyon ve işletme maliyetleri her bir enerji bileşeni için birim bakım maliyeti ile kapasitelerin çarpılması ile hesaplanmıştır. (Denklem 12, 13, 14)

$$OBP = PYM * PK * PA * PBM \quad (12)$$

$$OBB = BK * BM * BBM \quad (13)$$

$$OBJ = JYM * JK * JBM \quad (14)$$

Sisteme eklenecek bataryanın ömründen dolayı yenilenme maliyeti de modelde düşünülmüştür. (Denklem 15)

$$BYM = \frac{BK * BM}{(1 + IO)^{BYS}} \quad (15)$$

Model çıktısı jeneratör eklenmesini öneriyor ise simülasyon periyodu boyunca ihtiyaç olunan dizelin maliyeti, birim dizel maliyeti ile miktarı çarpılarak hesaplanmış ve toplam maliyete eklenmiştir. (Denklem 16)

$$TDM = \sum_n \frac{\sum_t KDM_t * DM}{(1 + IO)^n} \quad (16)$$

Son olarak, enerji bileşenleri ile karşılanamayan ve belli bir yüzdeye kadar dışarıdan (kayıp veya şebekeden) tedarik edilen enerji talebinin maliyeti ise birim maliyet ile miktarın çarpılıp toplam maliyete eklenmesi ile modelde kullanılmıştır. Eğer mikro şebekede şebeke bağlantısı yok ise sistem bileşenleri ile karşılanamadığı için kayıp talebin maliyeti olarak da düşünülebilir. (Denklem 17)

$$\S EM = \sum_n \frac{\sum_t SKT_t * \S CM}{(1 + IO)^n} \quad (17)$$

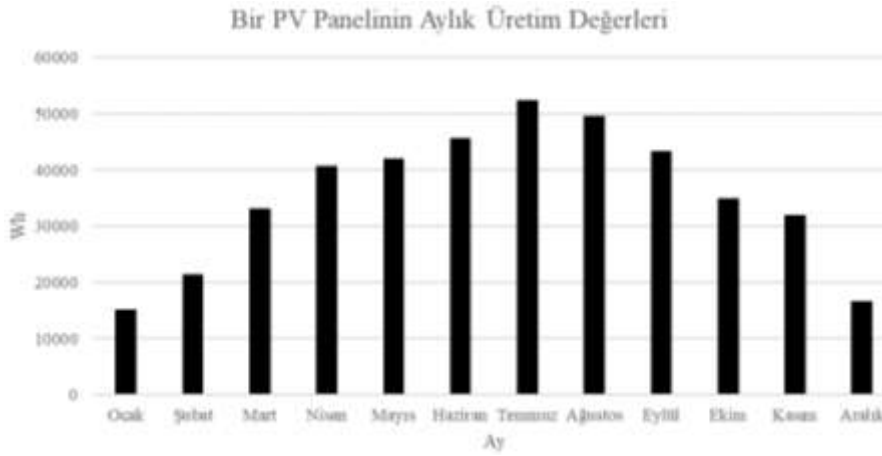
Ayrıntılı olarak tanımlanmış olan kısıtlar ve amaç fonksiyonu ile doğrusal model oluşturulmuş ve vaka çalışması için Python üzerinde Glpk çözücüsü aracılığıyla sonuçlar alınmıştır.

4. Vaka Çalışması (Case Study)

Sivas ilindeki Küpecik Köyü için depolama sistemi seçimi ve şebekeden bağımsız optimizasyon modeli çalışması yapılmadan önce bölgenin bir yıllık tüketim verileri saatlik olarak alınmıştır. (Şekil 1)



Şekil 1. Küpecik Köyü Aylık Toplam Enerji Tüketimi



Şekil 2. Bir PV Panelin Aylık Toplam Üretimi

Ayrıca 265 W'lık PV panel kapasitesi ile bölgede üretilebilecek bir yıllık enerji değerleri Coğrafik Fotovoltaik Bilgi Sistemi [13] yardımı ile hesaplanmıştır. (Şekil 2)

Model enerji bileşenleri parametrelerinin değiştirilmesi ile oluşturan senaryolar aracılığı ile test edilmiştir. Senaryolar aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı anlatılmaktadır.

4.1. Batarya Boşalma Süresi (Discharge Time)

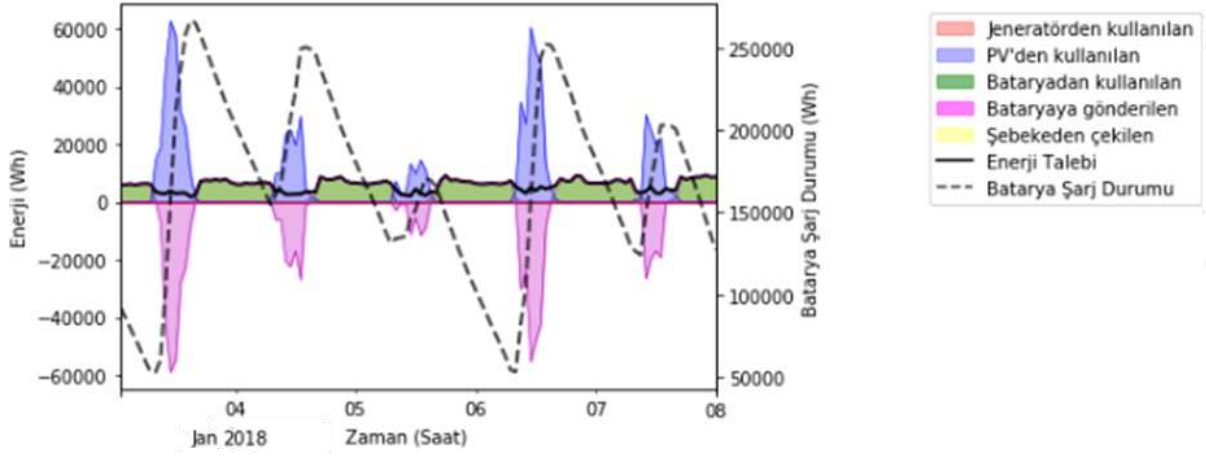
Seçilen bölgede bataryanın minimum boşalma süresinin etkisinin incelenmesi için üç temel senaryo işletilmiştir. Bataryanın dolması ve boşalması döngüsünde batarya şarj ve deşarj akımları C-oranı değeri ile belirlidir (normalize edilmiş değer). Burada C, A-saat veya mA-saat ile belirlenen batarya kapasitesidir.

$$C\text{-oranı} = C / 1 \text{ saat} \quad (18)$$

Aşağıda belirtilen senaryolarda en iyi C oranı bulunması hedefiyle yürütülmüştür. Kullanım süresinde bataryaların güneş enerjisinden şarj edileceği varsayımı ile şarj oranı üzerinde bir kısıt konulmamıştır. Deşarj oranlarının değiştirilmesi ile senaryolarda batarya kullanım verimliliği analizi yapılmıştır. Birinci senaryodan itibaren hangi batarya boşalma zamanının maksimum verimlilik gösterdiği bulunmaya çalışılmıştır. Bu üç senaryoda şebekeden beslenme yüzdesi 0 alınarak enerji talebinin tamamını sistem bileşenleri ile sağlanmıştır. Dizel jeneratörün kullanılmasına bataryanın ideal deşarj oranını tespit etmek için bu senaryolarda izin verilmemiştir.

4.1.1. Senaryo 1

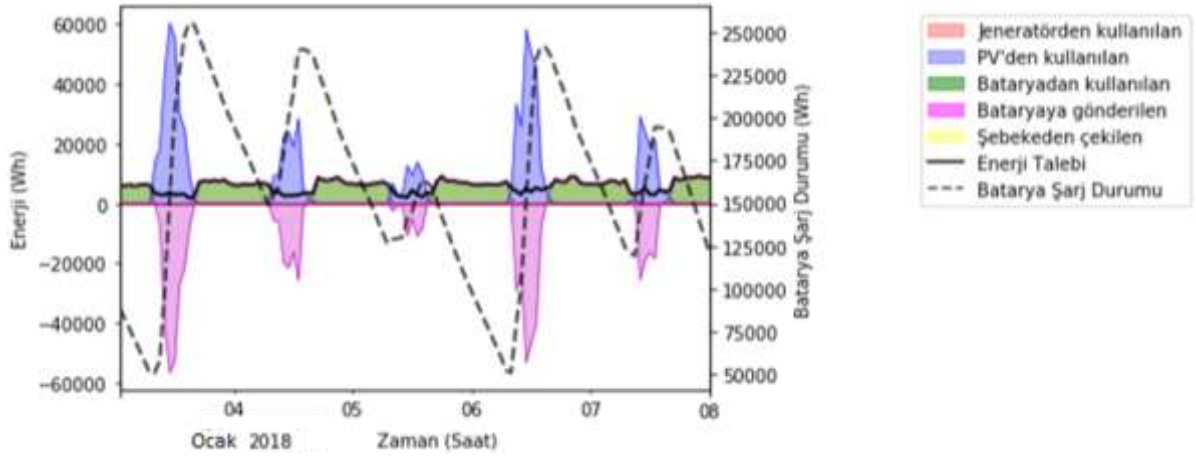
Tüm parametreler sabit tutulurken bataryanın boşalma zamanı 1C (1 saat) olarak atanmış ve boşalma verimliliği ölçülmüştür. Burada batarya şarj zamanı 3 saattir. Bataryanın verimliliği %93,4 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3'te talebin yüksek olması ve solar enerjinin düşük olması nedeniyle model çıktısında belirtilen bataryanın boyutunun seçilmesine neden olan günler gösterilmektedir. Kurulan modelde PV panellerin, sabah saatlerinden itibaren hem tüm köyü beslemeye başladığı hem de bataryayı şarj ettiği gözlemlenmektedir. Optimizasyon modeli sonucuna göre diğer zamanlarda köyün enerji talebinin bataryadan karşılandığı gözlenmiştir.



Şekil 3. Senaryo 1 – Enerji Dağılım Grafiği

4.1.2. Senaryo 2

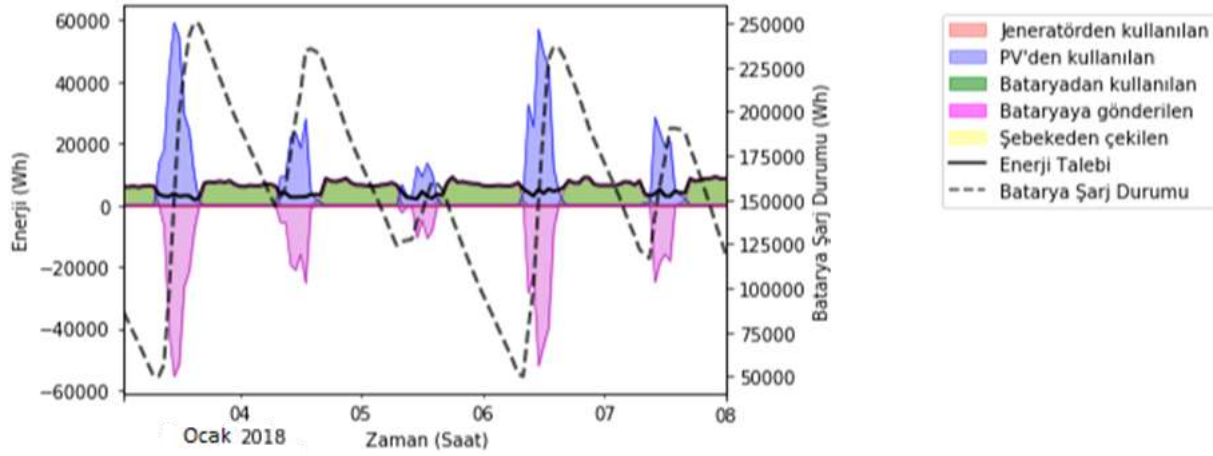
Tüm parametreler sabit tutulurken bataryanın boşalma zamanı 2C (2 saat) olarak atanmış ve boşalma verimliliği ölçülmüştür. Burada batarya şarj zamanı 3 saattir. Bataryanın verimliliği %97,8 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4'te talebin yüksek olması ve solar enerjinin düşük olması nedeniyle model çıktısında belirtilen bataryanın boyutunun seçilmesine neden olan günler gösterilmektedir. Kurulan modelde PV, sabah saatlerinden itibaren hem tüm köyü beslemeye başlamış hem de bataryayı şarj ettiği gözlemlenmiştir. Diğer zamanlarda köyün enerjisi bataryadan karşılanmıştır. Kurulan modelde, birinci senaryodan farklı olarak hem güneş paneli boyutları küçüldüğü hem de bataryanın boyutları küçülerek köyü beslediği ve birinci senaryodan daha verimli üretim olduğu gözlemlenmiştir. (Tablo 2)



Şekil 4. Senaryo 2 – Enerji Dağılım Grafiği

4.1.3. Senaryo 3

Tüm parametreler sabit tutulurken bataryanın boşalma zamanı 3C (3 saat) olarak atanmış ve boşalma verimliliği ölçülmüştür. Burada batarya şarj zamanı 3 saattir. Bataryanın verimliliği %99,9 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5'te talebin yüksek olması ve solar enerjinin düşük olması nedeniyle model çıktısında belirtilen bataryanın boyutunun seçilmesine neden olan günler gösterilmektedir. Model çıktısında PV enerjisinin, sabah saatlerinden itibaren hem tüm köyü beslemeye başladığı hem de bataryayı şarj ettiği gözlemlenmiştir. Diğer vakitlerde köyün enerjisi bataryadan karşılandığı gözlemlenmiştir. Üçüncü senaryoda bataryanın en verimli şekilde boşaldığı gözlemlenmiştir. Üçüncü senaryo ile diğer senaryolardan farklı olarak sistemin batarya boyutları küçüldüğü ve aynı şekilde köyü beslediği gözlemlenmiştir. (Tablo 2)



Şekil 5. Senaryo 3 – Enerji Dağılım Grafiği

Modeldeki üç senaryo karşılaştırıldığında toplam maliyetlere bakılarak (Tablo 3) en verimli bataryanın 3C boşalma zamanı ve 3 saat batarya doldurma zamanı parametreleri ile sonuç vermiş olan üçüncü senaryo olduğu gözlemlenmiş ve bundan sonra sistemin batarya boşalma ve şarj etme zamanı sabit olarak 3 saat seçilmiştir.

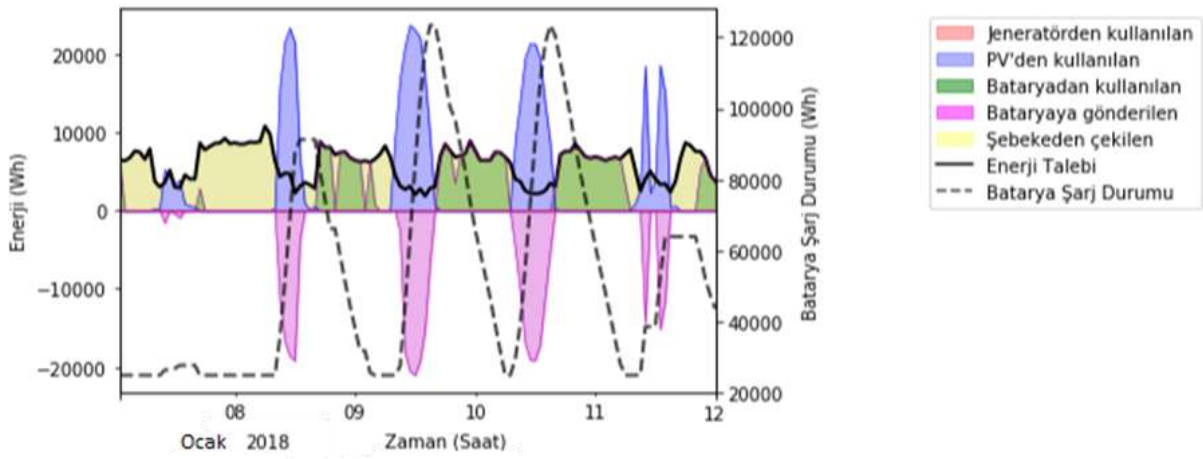
4.2. Şebekeden Beslenme

Vaka çalışması için seçilen bölgede şebekeden bir miktar enerji çekilmesine (ya da kayıp enerjiye) izin verilerek talep edilen enerjinin %10'u ve %30'u şebekeden çekilmek üzere iki senaryo kurgulanmıştır. Sistemde oluşturulan bu senaryoların amacı, talebin bir kısmının şebekeden karşılanmasının güneş paneli ile batarya boyutuna ve sistem maliyetine etkisini incelemektir. Dizel jeneratörün kullanılmasına bu senaryolarda izin verilmemiştir.

4.2.1. Senaryo 4

Dördüncü senaryo, toplam talebin %10'una kadar olan sistemden karşılanamayacak kısmının şebekeden karşılanmasına veya kayıp enerji olarak kalmasına izin verilerek oluşturulmuştur. Sistemde PV panel sayısının ve batarya boyutunun diğer şebekeden bağımsız senaryolara göre ciddi oranda azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni şebekeden çekilen birim enerjinin maliyetinin, bataryadan çekilen birim enerjinin maliyetinden düşük olmasına dayanmaktadır. Bununla sistemin kurulum maliyetini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Dördüncü senaryoya örnek olarak gösterilen Şekil 6'da enerji dağılım grafiği bulunmaktadır. Sabah saatlerinde talebin panellerden karşılandığı ve bataryanın bir miktarının dolduğu gözlemlenmiştir. Model çıktısına göre akşam saatlerinde batarya boşaldıktan sonra sistemdeki enerji açığı şebeke bağlantısı ile giderilmeye çalışılmıştır.



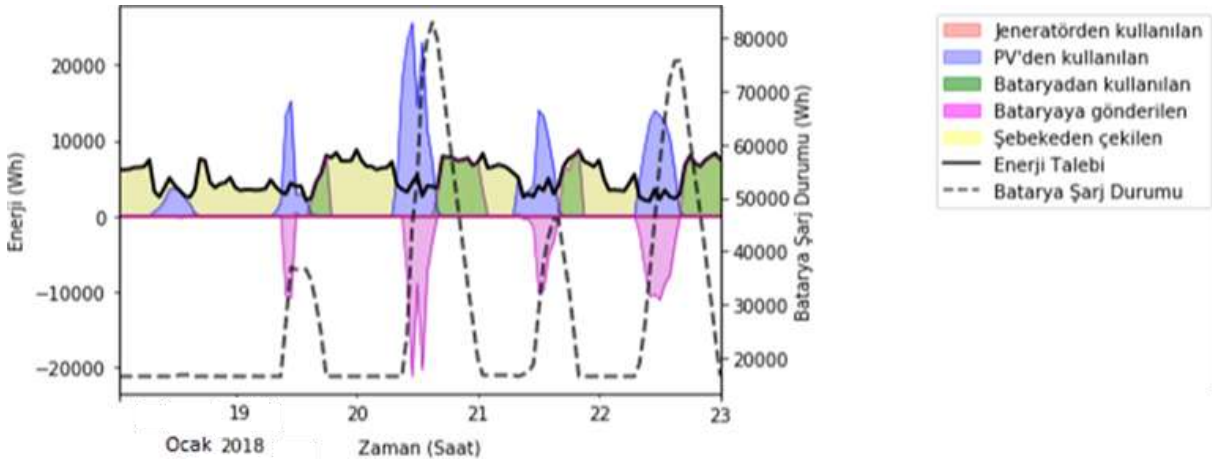
Şekil 6. Senaryo 4 – Enerji Dağılım Grafiği

4.2.2. Senaryo 5

Beşinci senaryo, talebin %30'una kadar sistemden karşılanamayacak olan kısmının şebekeden karşılanmasına veya kayıp enerji olarak kalmasına izin verilerek oluşturulmuştur.

Beşinci senaryodaki beş güne ait enerji dağılım grafiği Şekil 7'de bulunmaktadır. Sabah saatlerinde talebin panellerden karşılandığı ve bataryanın bir miktarının dolduğu gözlemlenmiştir. Model çıktısına göre akşam saatlerinde batarya boşaldıktan sonra sistemdeki enerji açığı şebeke bağlantısı ile giderilmeye çalışılmıştır.

Beşinci senaryoda, dördüncü senaryoya göre köyün şebekeye olan bağımlılığının arttığı ve sistemin batarya boyutunun azalması nedeniyle sistem kurulum maliyetinin düştüğü söylenebilir.



Şekil 7. Senaryo 5 – Enerji Dağılım Grafiği

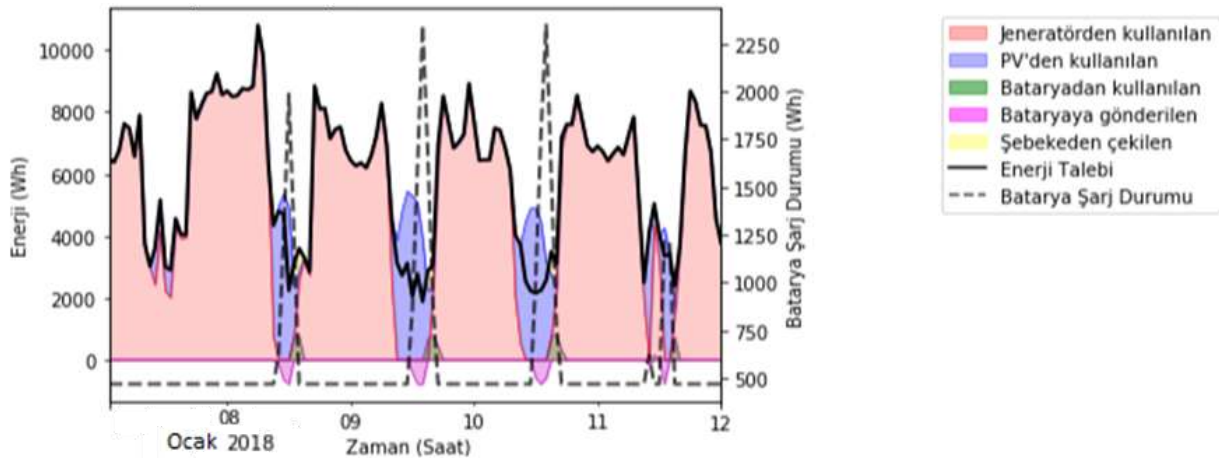
Yapılan senaryolarda, seçilen bölgedeki enerji talebinin %0, %10 ve %30'luk bir kısmı şebekeden karşılanmasına izin verecek şekilde enerji akışı izlenmiştir. Senaryo 3, 4 ve 5 karşılaştırıldığında şebekeden çekilen enerji miktarına verilen izin artması ile modelde güneş paneli ve batarya boyutları küçülmüş ve sonucunda kurulum maliyetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Talebin %30'u hattan çekildiğinde ortalama güneş paneli boyutları yarı yarıya düştüğü böylelikle, maliyetin etkin bir biçimde azaldığı ancak sistemin şebekeye daha bağımlı hale geldiği görülmektedir. Şebeke elektriğinin ucuz olmasından daha fazla panel veya batarya yatırımı yapmaktansa şebeke kullanımının tercih edilmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda bu durum şebeke bağlantısı olmayan yerler için talebin karşılanamadığı zamanlarda elektrik kesintisine neden olmaktadır.

4.3. Jeneratör Etkisi

Vaka çalışması için seçilen bölgeye enerji talebini karşılayacak enerji kaynakları olarak PV ve bataryanın yanı sıra, jeneratör de entegre edildiği senaryoları işletilmiştir. Aynı zamanda talep edilen enerjinin %0, %10 ve %30'luk kısmı sırasıyla şebekeden çekilmesi kurgulanmıştır. Oluşturulan üç senaryonun amacı, şebekeden çekilen enerji yüzdeleri ile jeneratörün sisteme sağladığı enerjinin, toplam maliyete etkisini incelemektir.

4.3.1. Senaryo 6

Altıncı senaryoda, jeneratör devreye sokularak enerjinin büyük bir kısmı jeneratörden sağlanmış, güneş paneli ve özellikle batarya boyutu büyük oranda azaltıldığı ve talep, jeneratörlerle beraber tamamen karşılandığı gözlemlenmiştir. (Şekil 8)

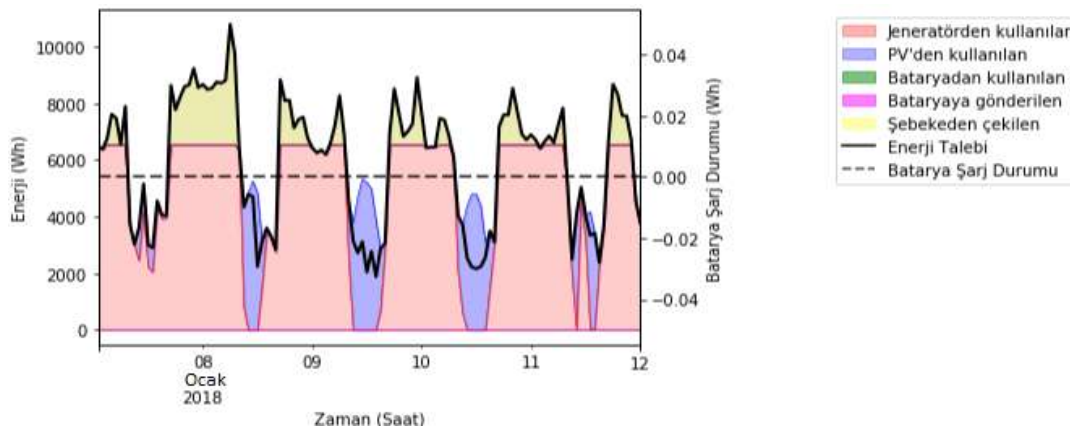


Şekil 8. Senaryo 6 – Enerji Dağılım Grafiği

Bu sonucun sebebi jeneratörden elde edilen birim enerjinin maliyetinin, bataryadan çekilen ve güneş panellerinden üretilen birim enerjinin maliyetinden düşük olması olarak açıklanabilmektedir.

4.3.2. Senaryo 7

Yedinci senaryo, talebin %10'una kadar olan kısmının şebekeden karşılanmasına veya kayba izin verilerek oluşturulmuş ve güneş panellerinin boyutlarının azaldığı ve bataryanın sistemde bulunmadığı gözlemlenmiştir. (Şekil 9) Hem jeneratörden kullanılan hem de şebekeden çekilen enerjinin birim maliyeti batarya ve güneş paneline oranla daha az olduğu için diğer senaryolara kıyasla sistem kurulum maliyetinde büyük oranda azalma olduğu gözlemlenmiştir. (Tablo 3)

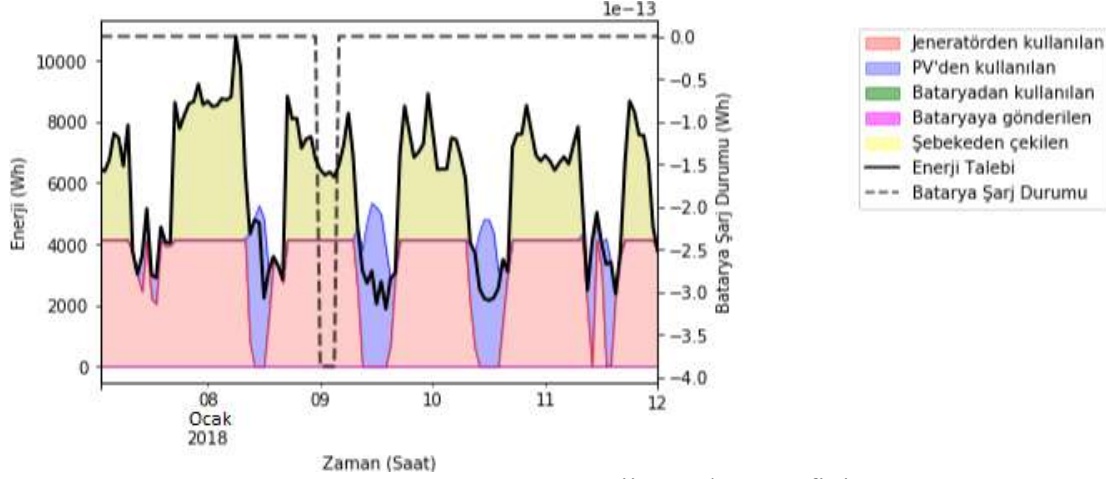


Şekil 9. Senaryo 7 – Enerji Dağılım Grafiği

4.3.3. Senaryo 8

Sekizinci senaryo, talebin %30'una kadar olan kısmının şebekeden karşılanmasına izin verilerek oluşturulmuş ve güneş panellerinin boyutlarının azaldığı ve bataryanın sistemde bulunmadığı gözlemlenmiştir. (Şekil 10)

Hem jeneratörden kullanılan hem de şebekeden çekilen enerjinin birim maliyeti batarya ve güneş paneline oranla daha az olduğu ve şebekeden enerji çekilme oranı %30'a çıkarıldığı için diğer senaryolara kıyaslandığında en düşük sistem kurulum maliyeti bu senaryoda olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 10. Senaryo 8 – Enerji Dağılım Grafiği

Sistemin geneline bakıldığında toplam maliyet-depolama sistemi ilişkisi enerji bileşenlerinin birim maliyetine göre büyük değişiklik göstermektedir. Köyün enerji ihtiyacını karşılamak için PV sisteme entegre edildiğinde maliyetin arttığı gözlemlenmiştir. Bu maliyeti düşürmek amacıyla sisteme jeneratör eklenmesine izin verilmiş ve maliyetin azaldığı gözlemlenmiştir. Sistem talebin şebekeden karşılanmayacağı şekilde (off-grid) çalıştırılacaksa, köyün enerjisiz kalmaması için PV panel sayısının ve batarya boyutunun artmasıyla maliyetin diğer senaryolara kıyasla aşırı artırması jeneratörün sisteme entegre edilmesi gerekliliği sonucu çıkarmıştır. İdeal çözüme ulaşmak için farklı senaryolar denenmiş, minimum maliyetli çözüm bulunmaya çalışılmıştır. Modelin tüm senaryolar için uygulanması sonucunda çıktılardan elde edilen Tablo 2'de enerji bileşenlerinin boyutları ile Tablo 3'te senaryoların toplam maliyetleri bulunmaktadır.

Tablo 2. Senaryo Sonuçları- Boyutlandırma

	Panel Boyutu (W)	Batarya Boyutu (Wh)	Jeneratör Boyutu (W)
Senaryo 1	298552.2	266155.9	0.0
Senaryo 2	287425.2	255266.2	0.0
Senaryo 3	282445.2	250402.9	0.0
Senaryo 4	51478.9	123422.6	0.0
Senaryo 5	32669.1	82814.3	0.0
Senaryo 6	11807.4	2346.4	13297.9
Senaryo 7	11592.0	0.0	6544.6
Senaryo 8	11600.6	0.0	4138.3

Tablo 3. Senaryo Sonuçları- Maliyet

	Toplam Maliyet (\$)
Senaryo 1	590605.9
Senaryo 2	567594.8
Senaryo 3	557306.9
Senaryo 4	185794.5
Senaryo 5	132232.9
Senaryo 6	149835.3
Senaryo 7	133547.9
Senaryo 8	106170.4

5. Sonuç ve Öneriler

Bu makalede, şebekeden bağımsız veya kırsal mikro şebekeler için depolama sistemi, jeneratör ve PV panel boyutlandırma ve seçimi yapan toplam maliyet odaklı bir optimizasyon modeli sunulmuştur. Problem, doğrusal programlama ile modellenmiştir. İzole edilmiş şebekeden bağımsız kırsal mikro şebekenin uzun dönemli projeksiyonunu yapmak, belirsiz parametreler ve stokastik enerji talebi nedeniyle zorlu bir işittir.

Optimizasyon modeli Sivas ilindeki Küpecik Köyü'nün enerji tüketimi verileri ile vaka çalışması yapılarak test edilmiş ve farklı senaryolar üzerinden modelde kullanılan parametreler belirlenmiştir. Oluşturulan farklı senaryolarda şebekeden bağımsız çalışması istenen sisteme dizel jeneratörün eklenerek maliyetin büyük oranda düşürüldüğü görülmektedir. Eğer şebeke bağlantısı olan bir bölge ise depolama sisteminin boyutlarını makul ölçülerde tutmak için akşam saatlerinde şebekeden enerji çekilmesine izin verilmelidir.

Mevcuttaki model uzun süreli projeksiyonda verilen enerji talebi ile sürekli çalışarak, talebin stokastik yapısını çözüme dahil etmemektedir. İleriki çalışmalarda talepteki belirsizliğin modele eklenmesi amaçlanmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından Türkiye için planlaması ve kurulumu kolay olan solar enerjiye modelde yer verilmiştir. İleriki çalışmalarda rüzgâr gibi diğer kaynakların da modele eklenmesi istenmektedir.

Teşekkür

Projede gerekli modelin geliştirilebilmesi için vermiş oldukları katkılar adına Çamlıbel Elektrik Dağıtım A.Ş.'ye teşekkür ederiz. Bu proje Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından desteklenmiştir. Bu çalışmanın ortaya çıkmasındaki katkılardan ötürü Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'na teşekkür ederiz.

Yazarların Katkıları

RA modeli tasarladı ve kısıtları ortaya koydu. RY modelin kodlamasını gerçekleştirdi. RA ve RY makaleyi yazdı. AT teknik varsayımları ve elektriksel uygunluğu kontrol etti. SB projenin genel yürütücüsüdür. EÇ bilimsel danışmanlık gerçekleştirmiştir.

Her yazar makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. UN, Sustainable development goals, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>, 2015.
- [2]. International Energy Agency, World Energy Outlook 2018, White Paper, IEA, 2018.
- [3]. Gomez, M. F., Silveira, S., Rural electrification of the brazilian amazon achievements and lessons, Energy Policy, 2010, 38: 1-10.
- [4]. Rauniyar, G., Morales, A., and Melo, V., Asian development banks assistance for rural electrification in bhutan: Does electrification improve the quality of rural life, An Evaluation Study. ADB. Independent Evaluation Department, <https://www.adb.org/documents/asian-development-banks-assistance-rural-electrification-bhutan-does-electrification>, 2010.
- [5]. Nerini, F. F., Broad, O., Mentis, D., Welsch, M., Bazilian, M., and Howells, M., A cost comparison of technology approaches for improving access to electricity services, Energy, 2016, 95: 255–265.
- [6]. Altes B. Q., Orosz, M., Quoilin, S., and Lemort, V., Rule-based control and optimization of a hybrid solar microgrid for rural electrification and heat supply in sub-saharan africa., Proceedings of the 30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2017, 1 (1): 1263–1273.
- [7]. Diaz, P., Arias, C., Pea, R., and Sandoval, D., Far from the grid: A rural electrification field study, Renewable Energy, 2010, 35 (12): 2829–2834.
- [8]. Kaabeche, A., Ibtouen, R., Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system, Solar Energy, 2014, 103: 171–182.
- [9]. Akikur, R. K., Saidur, R., Ping, H.W., and Ullah, K. R., Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for on-grid rural electrification: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 738–752.
- [10]. Riva, F., Ahlborg, H., Hartvigsson, E., Pachauri, S., and Colombo, E., Electricity access and rural development: Review of complex socio-economic dynamics and casual diagrams for more appropriate energy modelling, Energy for sustainable development, 2018, 43: 203–223.
- [11]. Mandelli, S., Brivio, C., Colombo, E., and Merlo, M., A sizing methodology based on levelized cost of supplied and lost energy for on-grid rural electrification systems, Renewable Energy, 2016, 89: 475–488.
- [12]. Riva, F., Tognollo, A., Gardumi, F., and Colombo, E., Long-term energy planning and demand forecast in remote areas of developing countries: Classification of case studies and insights from a modelling perspective, Energy Strategy Reviews, 2018, 20: 71–89.
- [13]. Photovoltaic Geographical Information System, http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP, 2020.
- [14]. Dağıtım Şebekelerinde Güneş Panelleri ve Enerji Depolama Sistemi Uygulaması, Bahçeci, S., Daldaban, F., El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2017, 4 (3): 308–313.
- [15]. Gün Öncesi Piyasasında Sanal Güç Santralının Yenilenebilir Üretim Belirsizliklerini ve Risk Değerlendirmesini Göz Önünde Bulundurarak Optimum İşletilmesi, Akkaş, Ö. P., Çam, E., El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (2): 448–460.
- [16]. Güneş Enerjisi Santrallerinde Sehpa Seçiminin Performansa Etkisinin Analiz Edilmesi ve Sıcaklık Etkisi, İşler, Y. S., Muhsin, M. S., El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2019, 6 (1): 97–107.