



## Akıllı Şebekelerde Rassal Modelleme ile Enerji Depolama Sistemi Kapasite Hesaplaması

İslam Şafak BAYRAM<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Hamad Bin Khalifa Üniversitesi, Mühendislik ve Bilim Fakültesi, Sürdürülebilir Kalkınma Bölümü, 34110, Doha/Katar

### Öz

Dünyada elektrik sektörü, hızla entegrasyonu artan yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretiminden kaynaklanan karbon ayak izini azaltmaya yönelik yapılan çevresel ve ekonomik baskılar ile karşı karşıya gelmektedir. Enerji depolama sistemleri şebeke altyapı güvenliğini arttıran, şebekeye çalışma esnekliği sağlayan ve çevresel etkileri azaltan çözümler olarak büyük ilgi görmektedir. Bu nedenle, enerji depolama sistemleri kompleks elektrik şebeke operasyonlarında anahtar rol oynamaktadır. Bu makalede, tüketicilerin elektrik talepleri, elektrik şebekesinden çekilen güç ve enerji depolama ünitesinden oluşan bir sistem için Stokastik bir model sunulmaktadır, sistem parametreleri arasındaki etkileşimler incelenmiştir. Enerji depolama sisteminin onlarca meskenden oluşan rezidans, villalardan oluşan site veya kampüs gibi yerlerde bir grup kullanıcı tarafından ortaklaşa kullanıldığı varsayılmaktadır. Geliştirilen Stokastik model, iki boyutlu sürekli zamanlı Markov zinciri tabanlı olup, sistem durumlarının rassal dağılımları nümerik metotlar ile hesaplanmıştır. Dikkate alınması gereken diğer bir husus ise, enerji depolama sisteminin yoğun zamanlarda pik talebi azaltmak için kullanılması ve müşteri talebinin azaldığı dönemlerde ise şebeke gücü tarafından iskontolu elektrik enerjisi ile doldurulmasıdır. Şebeke güvenliğinin sağlanması için müşteri talepleri, sınırlı miktardaki şebeke elektriği ve enerji depolama ünitesi tarafından karşılanmakta ancak bu seviyenin üstündeki taleplere cevap verilememektedir. Bu nedenle kesinti olasılığı doğal olarak sistem performans değerlendirme parametresi olarak karşımıza çıkmaktadır. Enerji depolama sistem kapasitesi, değişen kesinti olasılıkları ve sistem parametreleri altında hesaplanmıştır. Sunulan hesaplamalara göre enerji depolama sistemi optimum kapasitesinin belirlenmesinde tüketici talep istatistiklerinin büyük önem taşıdığı ortaya konulmuştur. Son olarak, geliştirilen ekonomik fayda modeli ile sistem parametreleri ekonomik değişkenlerle ilişkilendirilip, sistem operatörüne finansal dinamikleri göz önüne alan en iyi çalışma aralığını seçmesine olanak sağlamaktadır.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 18/12/2018  
 Düzeltme: 01/02/2019  
 Kabul: 04/02/2019

### Anahtar Kelimeler

Akıllı Şebekeler  
 Enerji Depolama Sistemleri  
 Stokastik Modelleme

### Keywords

Smart Grids  
 Energy Storage Systems  
 Stochastic Modeling

## A Stochastic Energy Storage Capacity Sizing in Smart Grid

### Abstract

Electric power sector around the world is facing challenges with rapidly increasing penetration of variable renewable energy as well as environmental and economic pressure to lower the carbon footprint of electricity production. Energy storage systems receive a lot of attention as they present attractive solutions to improve grid reliability, provide grid flexibility, and lower the environmental impacts. To that end, energy storage systems are expected to be key instruments in complex power system operations. In this paper, we present a quantitative stochastic model to examine the interactions of customer demand, power grid, and an energy storage unit that is shared by a group of users such as multi-dwelling units and campuses. The stochastic model is based on a two-dimensional continuous-time Markov chain and steady-state probability distributions are solved by numerical methods. The goal is to present a general architecture which advances modeling efforts for smart power grid systems. It is noteworthy that the ESS is discharged during peak hours to reduce peak consumption, and it is charged during off-peak hours to store cheap energy. In order to ensure grid reliability, system serving capacity is limited to available resources and a small percentage of customer demand is rejected which serves as the performance metric of the model. Energy storage sizing is performed under various rejection probabilities and system resources. The results reveal that obtaining the right size of energy storage system is highly related to customer's electricity consumption patterns. Finally, an economic profit model which relates financial principals with stochastic system parameters and enables system operator to choose the best operating range for the system.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçtiğimiz son on yılda, dünyanın birçok ülkesinde elektrik şebeke altyapılarında geniş kapsamlı iyileştirme ve geliştirme çalışmalarına başlanmıştır [1]. Bu çalışmaların temel nedenleri ekonomik, çevresel ve politik olup şöyle sıralamak mümkündür. İlk olarak, dünya üzerindeki birçok elektrik şebekesi bir asra yakın süredir çalışmakta olup, birçok şebeke elemanı çalışma ömürlerini tamamlamaktadır. Buna ek olarak özellikle dağıtım şebekeleri halen onlarca yıl önceki çalışma prensiplerini takip etmektedirler. Ayrıca, haberleşme ve güç ölçümü ekipmanlarından da mahrumdurlar. Dolayısıyla, sistem operatörleri şebekenin gerçek zamanlı durumu hakkında bilgi sahibi olamamaktadırlar. Bu nedenle elektrik kesintileri önlenememekte ve ülke ekonomilerini milyarlarca lira zarara uğramaktadır [2]. Diğer bir husus ise, birçok ülkedeki karar alıcı mercilerin hem enerjide dışa bağımlılığı hem de elektrik sektörünün karbon ayak izini azaltmayı hedefleyerek, yenilenebilir enerji kaynaklarını elektrik şebekelerine yükselen hızla entegre etmeye başlamalarıdır [3]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen fotovoltaik ve rüzgâr sistemlerinin çıkış gücü meteorolojik parametrelere bağlı olması sebebi ile bu sistemlerin elektrik üretimindeki ani değişiklikler şebekenin arz-talep dengesini olumsuz yönde etkilemektedir [4] [5]. Yukarıda belirtilen problemlerin çözümünde önemli rol oynayacak akıllı şebeke ekipmanlarından birisi de enerji depolama sistemleridir. Bu makalede, Stokastik modelleme yöntemi ve Markov zincirlerini kullanarak müşteri talep modellemesi ve sistem kapasite hesaplaması için matematiksel bir çerçeve sunulmaktadır.

Global perspektifte, enerji depolama sistemleri şebeke operasyonlarına esneklik sağladığı için kendisine birçok uygulama alanı bulmuştur [6]. Örneğin, mesken tipi elektrik tüketicilerinin elektrik talepleri, hızla yaygınlaşan iklimlendirme sistemleri ve çoğalan elektronik alet kullanımına paralel olarak artmaktadır. Ayrıca, kullanıcıların gün içindeki aktivitelerine bağlı olarak farklı saat dilimlerinde elektrik tüketim seviyeleri arasında oluşan ciddi farklar, serbest elektrik piyasasındaki fiyatlamaları etkilemektedir [7]. Bu nedenle, akıllı elektrik sayacı ve geri bildirim mekanizmalarının kullanımında hızla artış görülmekte ve kullanıcılara dinamik ve zamana bağlı fiyatlama ile direk yük kontrolü gibi uygulamalar sunulmaktadır [8]. Enerji depolama sistemleri, elektrik fiyatlarının ucuz olduğu zamanlarda şarj edilip, elektrik tarifelerinin yükseldiği saat dilimlerinde deşarj edilerek pik elektrik tüketimini azaltmak için kullanılabilir. Ayrıca, meskenlerin çatılarında kurulabilecek fotovoltaik sistemler ile depolanan enerji piyasaya daha yüksek fiyattan satılıp kullanıcılar tarafından ekonomik kazanç elde etmek mümkün hale gelmektedir [9].

Elektrik şebekelerinin icadı ve yaygınlaşması, sağlık, haberleşme ve ulaşım gibi önemli sektörlerin gelişimine olanak sağlamış olması nedeniyle, Ulusal Amerikan Mühendisler Akademisi tarafından geçtiğimiz yüzyılın en önemli mühendislik başarısı olarak kabul edilmiştir [10]. Elektrik şebekelerini diğer arz-talep sistemlerinden ayıran en önemli özelliği, geniş alanlara yayılmış milyonlarca müşteri taleplerini gerçek zamanlı olarak karşılamasıdır.

Elektrik şebekesi yatırımlarının yüksek maliyetli olması nedeni ile sistem planlaması ve operasyonu büyük önem taşımaktadır. Akıllı şebeke sistemlerinin en önemli birleşenlerinden birisi enerji depolama sistemleridir. Bu sistemler yüksek maliyetleri yüzünden geçtiğimiz yıllara kadar çok az oranda kullanım imkânı bulmuştur. Örneğin 2016 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) enerji depolama kapasitesi toplam enerji üretim kapasitesinin sadece 50'de 1'i kadar iken, Avrupa Birliği Ülkelerinde 10'da 1'i ve Japonya'da 8'de 1'dir [11]. Önemli olan diğer bir husus ise, bu depolama kaynaklarının önemli bir miktarı geniş kapasite (1MWh ve üzeri) sistemleridir (ör. sıkıştırılmış hava ile enerji depolama). Diğer bir yandan, düşük boyutlu enerji depolama sistemlerinin kullanımı, özellikle Lityum iyon gibi elektrokimyasal depolama sistemleri, azalan birim maliyetleri, kullanıcılara sunulan teşvikler, yenilenebilir enerji sistemlerine entegrasyonu ve enerji piyasalarına katılabilme imkânı sayesinde, hızlı artış göstermektedir. Örneğin ABD Enerji Bakanlığına göre 2013 ve 2017 yılları arasında enerji depolama sistemlerinin kullanımı %174 oranında artmıştır [11].

Enerji depolama sistemlerin planlaması ve boyutlandırılması son yıllarda birçok akademik çalışmanın konusu olmuştur. Başlıca referans kaynakları ise şu şekilde sıralanabilir: [12] [13] [14] [15]. Bu çalışmalardan [12] nolu referansta, bir grup mesken tipi müşterilerin fotovoltaik sistemlere ve ortak (paylaşılan) enerji depolama sistemlerine sahip oldukları kabul edilerek lineer optimizasyon yöntemi ile sistem maliyetlerini minimize eden enerji depolama sisteminin boyu hesaplanmıştır.

Arghandeh ve arkadaşlarının [13] nolu kaynakta sundukları çalışmada ise bir grup elektrik tüketicisi tarafından ortaklaşa kullanılan enerji depolama sistemi ele alınmıştır. Bu çalışmada, enerji depolama sistemi tüketicilere kesinti anlarında kaynak güç sağlama ve yoğun elektrik tüketimi zamanlarında masrafların azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bunun yanında, enerji depolama sisteminin elektrik piyasalarına gerçek zamanlı katılmasına olanak sağlayacak gerçek zamanlı kontrol mekanizması geliştirilmiştir.

Benzer bir şekilde, [14] nolu çalışmada İngiltere’de 0’dan 100’e kadar değişen sayıdaki meskenlerde oturan elektrik tüketicilerinin ortaklaşa kullanılan enerji depolama sistemi, güneş enerjisi üretimi ve zamana bağlı fiyatlandırma yönteminden oluşan bir senaryoda, enerji depolama sistemlerinin kullanıcılara sağladığı ekonomik faydalar araştırılmıştır. Bu çalışmada ortaklaşa kullanılan enerji depolama sistemleri sayesinde kişi başı kullanım maliyeti bireysel depolama sistemi satın alma senaryosu ile karşılaştırıldığında, %56’ya kadar maliyet indirimi sağlandığı gösterilmiştir.

[15] nolu çalışmada ise, önceki örneklerde olduğu gibi, bir grup tüketici tarafından kullanılan enerji depolama sistemine ek olarak akıllı ve programlanabilen ev aletleri ile fotovoltaik sistemleri ele alınmıştır. Enerji depolama sistemleri, güneş enerjisi üretimi ile elektrik tüketimi arasındaki zaman farkını azaltıp, şebekeden pahalıya alınan elektrik maliyetinin düşmesine neden olmuştur. Birim elektrik tüketim maliyetleri ele alındığında, enerji depolama ünitesinin sistem maliyetini %22 ila %30 arasında düşürdüğü görülmüştür.

Stokastik modelleme, kuyruk teorisi ve Markov zincirleri akıllı şebeke sistemlerinde son yıllarda kullanılmaya başlanan önemli matematiksel yaklaşımlardır [16, 17]. Örneğin [14] nolu çalışmada ayrıklı zamanlı Markov zincirleri kullanılarak enerji depolama sistemi modeli çıkartılarak güneş paneli tarlalarında kapasite kullanımı hesaplanmıştır. Bu makalede sunulan modele yakın olarak [17] nolu çalışmada, Markov zincirleri vasıtasıyla kesinti olasılığı performans metriği olarak kullanılmış ve mikro şebeke sistemlerinde bulunan enerji depolama sisteminin kapasite hesabı yapılmıştır. [18] nolu referansta ise, Markov zincirleri ve kuyruk teorisi kullanılarak elektrikli araçların yük talepleri modellenmiş ve hızlı şarj istasyonlarında bekleme sürelerini düşürmek için araçlar için hedef şarj etme limiti belirlenmiştir.

## 2. RASSAL MODELLEME (STOCHASTIC MODELLING)

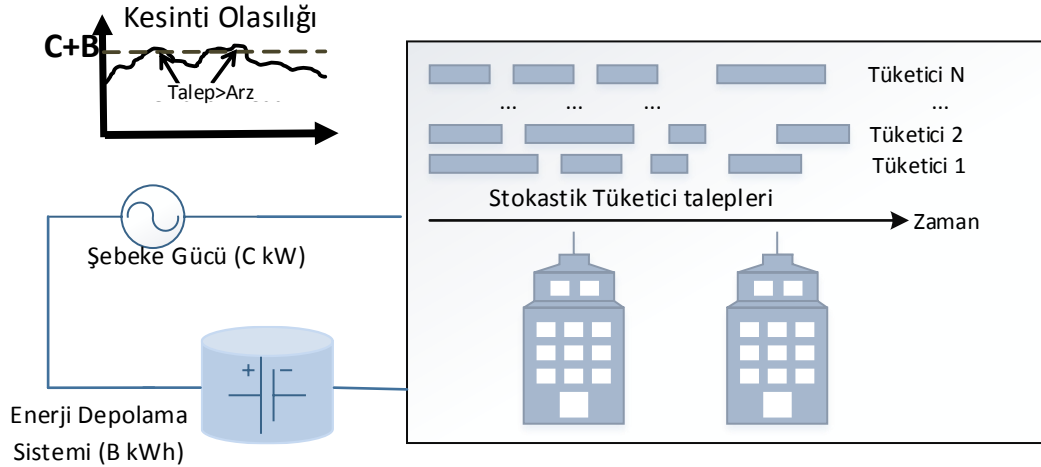
### A. SİSTEM TANIMI (SYSTEM DESCRIPTION)

Bu çalışmada gittikçe artarak ilgi gören akıllı şebeke uygulamalardan birisi olan ve bir grup tarafından paylaşılan enerji depolama sistemleri ele alınmaktadır. Bu tür uygulamalarda, büyük rezidanslar ve üniversite kampüsleri gibi bir arada bulunan elektrik tüketicilerinin talepleri, enerji depolama sistemleri ve elektrik şebekesinden gelen güç ile karşılanmaktadır. Bu yol ile özellikle kilovat başına olan talep masrafları azaltılmakta, elektrik şebekeleri dalgalanan müşteri taleplerinden korunmakta ve sistem arz güvenliği sağlanmaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının bağlanması ve çok zamanlı elektrik tarifesi olması durumunda, kullanıcılar tarafından tasarrufu yapabilmektedir.

Enerji depolama sistemlerinin boyut hesaplanmasında literatürde iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan birincisinde, enerji depolama sisteminin spesifik bir proje (ör. Güneş veya rüzgar tarlası, mikro şebeke) için olduğu varsayılmakta, ve birçok sistem parametresinin (yüksek çözünürlüklü elektrik tüketim, güneş enerjisi, elektrik fiyatları vs.) en az 12 aylık dönem için, ölçüm yoluyla elde edilmesi gerekmektedir. Daha sonra, optimizasyon yöntemleri ile düşük maliyet, yüksek getiri esasına bağlı olarak kapasite hesaplaması yapılmaktadır. İkinci gruptaki yaklaşımlar ise, Markov zinciri tabanlı rassal modelleme yöntemleridir. Bu yöntemler proje-spesifik ölçümlerin olmadığı zamanlarda, değişen sistem parametrelerine (ör. istatistiksel müşteri talepleri, şebekeden çekilen güç vb.) göre enerji depolama sistem boyutunun hesaplanmasına izin vermektedir. Bu tür yöntemler yüksek maliyetli akıllı şebeke projelerinin planlanması aşamasında, sistem operatörlerine önemli bilgiler vermektedir. Akıllı şebekeler disiplinler arası çalışma alanlı olmasından dolayı sunulan yaklaşım, endüstri mühendisliği, elektrik mühendisliği ve ekonomi alanlarını kapsayan bir yaklaşımdır.

Bu makalede sunulan sistemin operasyon prensipleri şöyle sıralanmıştır. İlk olarak enerji depolama sisteminin N sayıda tüketiciler tarafından kullanılması ve bu kullanıcıların toplam yüklerinin tipik mesken

seviyesinden çok daha fazla olmasından dolayı, bu tür kullanıcıların ticarethane veya sanayii grubuna girdikleri varsayılmaktadır. Dünyanın birçok yerinde elektrik sağlayıcısı şirketler tarafından bu tip müşterilerin az değişen tüketimlerinden dolayı iskontolu tarifeler uygulanmaktadır. Bu yüzden sistemin şebekeden sabit güç çektiği varsayılmaktadır. İkinci olarak, enerji depolama sistemi pik zamanlarda müşteri taleplerini karşılamak için kullanılmakta, diğer zamanlarda ise şebekeden çekilen güç ile şarj olmaktadır.



**Şekil 1** Sistem modelinin şematik görünümü

Son olarak, tüm sistem kaynaklarının kullanımda olması durumunda, müşteri talebi arzdan fazla olacağından yeni talepler karşılanamamaktadır. Bu durumda, müşteri taleplerinin başlama ve bitiş zamanlarının olasılıksal olduğu göz önünde bulundurulduğunda kesinti olasılığı doğal olarak sistemin performansı ölçme birimi olarak karşımıza çıkmaktadır. Tarif edilen sistemin şematik görünümü Şekil 1 de gösterilmiştir.

## B. SİSTEM PARAMETRELERİ (SYSTEM PARAMETERS)

Bu makalede sunulan olasılıklı modelin parametreleri şöyle tanımlanabilir: Sistem şebekeden  $C$  kW güç çekmekte olup ve enerji depolama sisteminin büyüklüğü  $B$  kWh'tır. Müşteri elektrik taleplerinin sisteme ulaşması olasılıklı olup, Poisson sürecini  $\alpha$  parametresiyle modellenmektedir. Bu varsayımın birçok makalede yaygınca yer almasının nedeni müşteri taleplerinin birbirlerinden bağımsız şekilde modellenmesine imkân sağlamasıdır [19] [20]. Benzer şekilde sisteme ulaşan her talebin aktif olma sürecinin olasılıklı bir dağılım olan Üstel dağılıma uyduğu varsayılmaktadır. Bu dağılımın parametresi ise  $\beta$  ile ifade edilmektedir. Son olarak enerji depolama sisteminde bir müşteri talebine denk gelen miktarın şarj edilmesi de Üstel olasılıklı olup  $\gamma$  parametresi ile ifade edilmektedir [21] [22].

İkili bir değişken olan  $z_t^i$ ,  $i$  nolu tüketicinin herhangi bir  $t$  zamanındaki durumunu gösterir ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$z_t^i = \begin{cases} 1, & \text{tüketici } i \text{ aktif} \\ 0, & \text{tüketici } i \text{ aktif değil} \end{cases} \quad (1)$$

Bu durumda,  $i$  endeksi ile gösterilen herhangi bir tüketicinin herhangi bir  $t$  zamanında aktif veya aktif olmama olasılığı aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$\mathbb{P}(z_t^i = 1) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}, \quad (2)$$

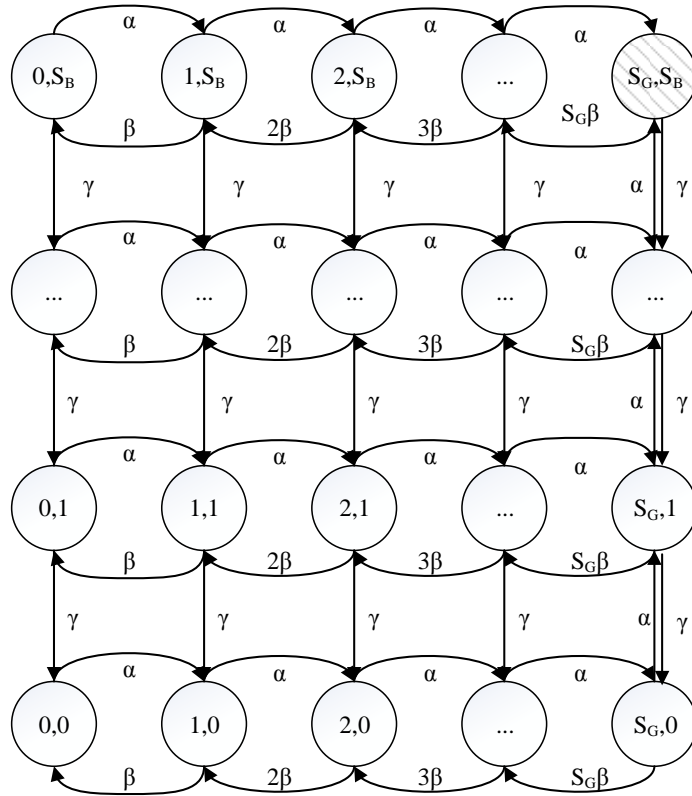
ve,

$$\mathbb{P}(z_t^i = 0) = \frac{\beta}{\alpha + \beta}. \quad (3)$$

Tüketici  $i$ 'nin herhangi bir  $t$  zamanındaki toplam yükünü  $L_t^i$  ve enerji depolama sisteminin herhangi bir  $t$  zamanındaki şarj seviyesini de  $S_c(t)$  değişkenleri ile tanımlanmıştır. Bu durumda, enerji depolama sisteminin şarj seviyesinin zamana göre değişimi  $t$  parametresine göre türev alınarak bulunur ve  $\frac{dS_c}{dt}$  ile ifade edilir. Bu halde, şarj seviyesi aşağıda belirtilmiş olan üç farklı durum ile karşılaşır:

- Eğer enerji depolama sistemi tamamen şarj edilmiş durumda ve tüketici talebi şebekeden çekilen güçten daha az durumda ise, enerji depolama sisteminin şarj seviyesi değişmemektedir ( $\frac{dS_c}{dt} = 0$ ).
- Eğer enerji depolama sistemi tamamen boş seviyede ve tüketici talebi de şebekeden çekilen güçten daha fazla ise, enerji depolama sisteminin şarj seviyesi değişmemektedir ( $\frac{dS_c}{dt} = 0$ ).
- Enerji depolama sisteminin şarj seviyesi %0 ile %100 arasında herhangi bir seviyede ise, şarj seviyesinin değişimi  $\frac{dS_c}{dt} = \eta(C - \sum_i L_t^i)$  hızında negatif veya pozitif olarak gerçekleşmektedir.

Yukarıdaki denklemdeki  $\eta$  katsayısı enerji depolama sisteminin şarj dolmuş-boşalmı verimini göstermekte olup, genelde 0.8 ile 0.95 arasında bir değerde bulunmaktadır. Bu katsayının bir çarpan görevi görmesi ve matematiksel denklemlerde yazım kolaylığı sağlamak için ileriki adımlardaki gösterimlerden çıkarılmıştır. Hesaplamaların sonunda elde edilen değer  $\eta$  katsayısı ile normalize edilip gerçek sonuca ulaşmak mümkün olacaktır.



Şekil 2: İki boyutlu sürekli Markov zincir modeli

Tekrar hatırlatmak gerekir ise, bu makalede sunulan sistemde tüketici elektrik taleplerinin sınırlı olan enerji depolama ve elektrik şebekesi kaynaklarından karşılanmalıdır. Göz önünde bulundurulması gereken bir husus ise, müşteri talebinin sistem kaynaklarını aşması halinde, yeni talepler karşılanamamakta ve kesinti meydana gelmektedir. Bu sebeple bu makalenin temel amacı çok küçük miktardaki müşteri taleplerini reddederek enerji depolama sisteminin boyunu hesaplamaktır. Matematiksel olarak bu problem aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && B \\ & \text{s. t.} && \mathbb{P}(S_c(t) > B) \leq \delta \end{aligned} \quad (4)$$

Yukarıdaki problemi efektif olarak çözebilme için şu metod sunulmuştur. Sistemdeki her bir tüketicinin talebini  $D$  ile gösterilmiş ve sistem kaynakları bu parameter ile diskrit hale getirilmiştir

$$S_G = \left\lfloor \frac{C}{D} \right\rfloor \text{ ve } S_B = \left\lfloor \frac{B}{D} \right\rfloor. \quad (5)$$

Bu durumda yukarıda tanımlanmış olan sistem iki boyutlu sürekli zamanlı Markov zinciri ile modellenmektedir. Şekil 1 de görüldüğü üzere, sistem durumları iki parametre ile gösterilmektedir. Bunlardan birincisi kullanımda olan şebeke gücü birim adettir ve bu sayı 0 ile  $S_G$  arasında değişmektedir. İkinci parametre ise, kullanımda olan enerji depolama birim adettir. Benzer şekilde bu parametrede 0 ile  $S_B$  arasında değer almaktadır. Sunulan modele bakıldığında ergodik olduğu kolaylıkla anlaşılmaktadır. Sistem durumları arasındaki geçiş oranları ise yukarıda belirtilmiş sistem tanımı ile hesaplanmıştır. Örnek vermek gerekirse sistem (1,1) durumunda iken üç vakıya olabilir: (1) sisteme yeni bir tüketici  $\alpha$  geçiş hızı ile katılabilir, (2) bir tüketicinin talebi şebeke gücü  $\beta$  geçiş hızı ile sonlanabilir, (3) bir tüketicinin talebi şebeke gücü  $\gamma$  geçiş hızı ile sonlanabilir. Dikkat edilmesi gereken bir husus ise, sistem ( $S_G, S_B$ ) durumunda iken bütün kaynaklar kullanım altında olduğundan yeni tüketici talepleri karşılanamayacak ve kesinti ya da engellenme olayı gerçekleşecektir. Şekil 1'de de sunulduğu üzere Markov zincirindeki toplam durum sayısı

$$T = (S_G + 1) \times (S_B + 1), \quad (6)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Markov zincirinde bulunan 1'den  $T$ 'ye kadar olan kalıcı durumların olasılık dağılımlarının  $\boldsymbol{\pi} = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_T)$  vektörü ile gösterilmesi durumunda  $\boldsymbol{\pi}$  vektörünün aşağıdaki denklemler ile hesaplanması mümkündür:

$$\boldsymbol{\pi} \mathbf{Q} = \mathbf{0}, \quad (7)$$

ve

$$\sum_{i=1}^T \pi_i = 1. \quad (8)$$

(7) no'lu denklemde kullanılan  $\mathbf{Q}$  matrisi  $T \times T$  boyutlarında olup sonsuz küçük üreteç matrisi olarak adlandırılır. Bu matrisin alakalı elemanları sistem durumlarının geçiş hızlarını belirtir. Bu matrisi hazırlamak için Şekil 1 de görünen Markov zincirindeki durumlar 1'den  $T$  ye kadar soldan sağa olacak şekilde numaralandırılır. Örneğin (0,0) durumu için 1, (0,1) durumu için ise  $S_B+1$  numarası atanır. O halde  $\mathbf{Q}$  matrisinde kolun endeksi için  $i$  ve satır endeksi içinde  $j$  kullanılırsa, matrisin elemanları aşağıdaki eşitlikleri sağlayacaktır:

$$q_{ij} \geq 0, \quad i \neq j, \quad (9)$$

ve

$$q_{ii} = - \sum_{i \neq j} q_{ij}, \quad " i \quad (10)$$

İlk eşitliğe göre asal köşegen olmayan elemanlar sıfır geçiş hızı değerlerini alırken, ikinci denkleme göre ise asal köşegen elemanlar o satırdaki toplam geçiş oranının negatifi olarak yazılır. Sistem durumlarının

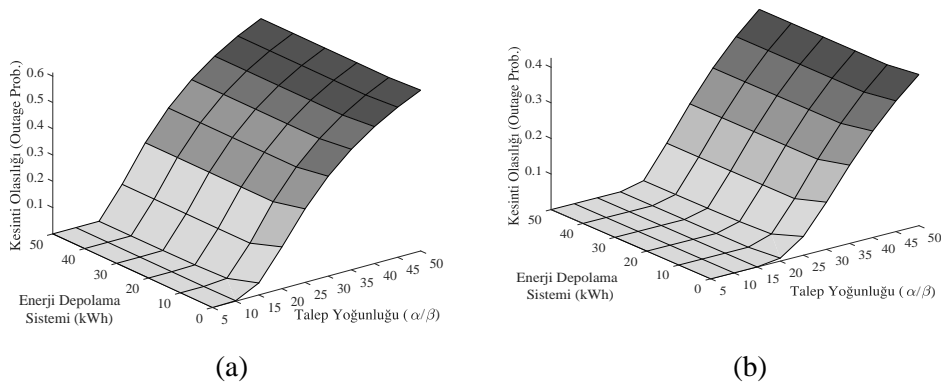
olasılık dağılımlarını hesaplayan (7) no'lu eşitlik  $T$  adet ve (8) no'lu eşitlik ise 1 adet denklemden oluşmaktadır. Sistem durumu olasılık vektörü  $\pi$ 'ın  $T$  adet bilinmeyi içerdiği göz önüne alındığında, sistem iki yöntem ile çözülebilir. Bunlardan ilki, bilinmeyenlerin başlangıç değerleri için bir tahminde bulunup iteratif olarak çözülmeye çalışmaktır. Bu yöntemde ilk tahmin önemli olup sonuca ulaşma garantisi edilmemektedir. İkinci yöntem ise, [23] referansında da detaylı olarak sunulduğu üzere Gauss elimine yöntemi ile yapmak mümkündür. Bu yöntem, sonuca ulaşma garantisi vermesinden dolayı, bu çalışmadaki hesaplamalarda tercih edilmiştir.

### 3. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ VE EKONOMİK MODEL (PERFORMANCE EVALUATION AND ECONOMIC MODEL)

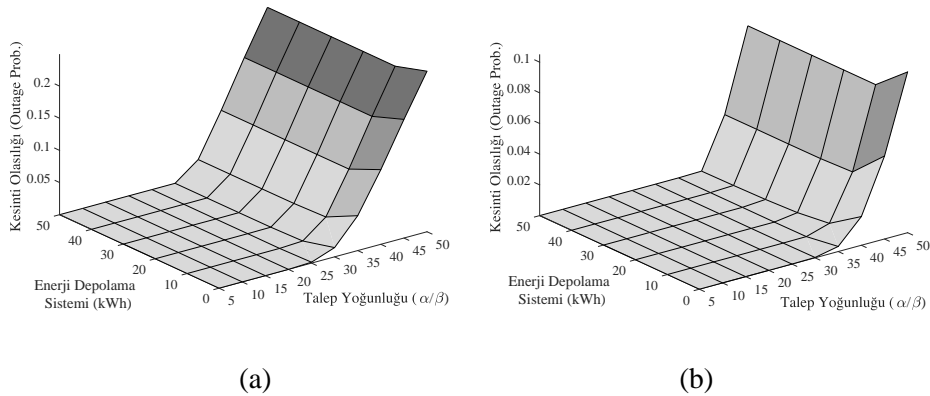
#### A. SİSTEM PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ (SYSTEM PERFORMANCE EVALUATION)

Bu bölümde dizayn edilen sistemin performansı sistem parametrelerine göre hesaplanmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi sistem yürütücüsünün ana amacı düşük bir kesinti ya da engelleme olasılığına karşın gerekli şebeke gücü ve enerji depolama sisteminin boyunu belirlemektir. Sistem parametrelerinden tüketici talep hızı  $\alpha$  dış değişken olup sistem yöneticisi tarafından seçilememektedir. Bu parametre genelde yoğun zamanlarda artarken yoğun olmayan zamanlarda, örneğin gece yarısından sonra, düşüş göstermektedir. Tüketici talebinin ortalama aktif olma zamanı ise  $\beta$  ile gösterilir. Bu iki parametrenin oranı,  $\frac{\alpha}{\beta}$  ise talep yoğunluğu (*load intensity*) olarak adlandırılır. Tüketici talebinin şebeke veya enerji depolama sisteminden karşılanması aktif olma istatistiğini değiştirmeyeceğinden  $\gamma$  ile  $\beta$  katsayıları eşit kabul edilmiş ve simülasyon boyunca 2 olarak kabul edilmiştir, yani ortalama aktif olma süresi birim zamanın yarısı kadardır. Bu katsayıların başka değerler almaları da mümkündür. Ayrıca birim müşteri talebi 1 kW olarak kabul edilmiştir

Performans değerlendirmelerini geniş bir skalada yapabilmek için, talep yoğunluğunu 0'dan 50'ye, enerji depolama sistemi kapasitesini 0'dan 50 kWh'e ve şebekeden çekilen gücü 20, 30, 40 ve 50 kW olarak değiştirerek çeşitli durumlar ele alınmıştır. Sistem performans hesaplamaları Şekiller 3 ve 4'te sunulmuştur. Sonuçlara bakıldığında ilk göze çarpan durumlardan biri şebekeden çekilen güç arttıkça sistemin daha iyi performans vermesi ve daha fazla oranda müşteri taleplerinin karşılanmasıdır. Diğer bir husus ise, enerji depolama sistemi müşteri taleplerini karşılamada etkin olsa da yüksek trafik rejimlerinde şebeke kullanım halinde olacağı için enerji sistemi şarj edilemeyecek olup kullanılmayacaktır. Bu yüzden sistem operatörünün yapması gereken şebekeden daha çok güç çekmek ya da müşteri taleplerini zamana yaymaktır.

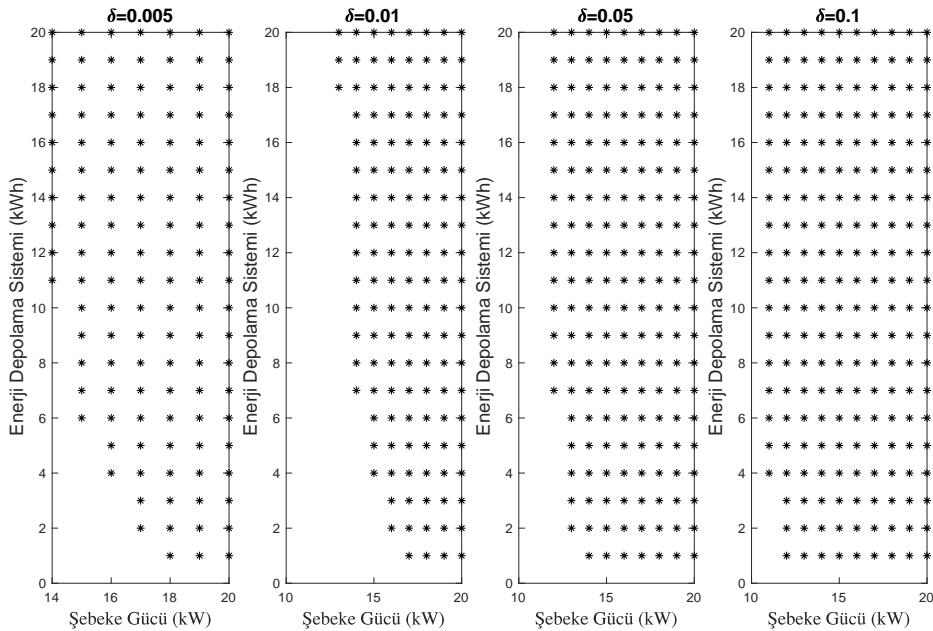


Şekil 3. Sistem performans değerlendirmesi: (a)  $C=20$  kW; (b)  $C=30$  kW



Şekil 4. Sistem performans değerlendirme: (a)  $C=40$  kW; (b)  $C=50$  kW

Buraya kadar sunulan sistem performans değerlendirmesine ek olarak (4) no'lu denklemde belirtilen problemi, yani hedef kesinti olasılığını aşmamak için gerekli olan sistem kaynakları hesaplanacaktır. Bu hesaplamayı yapabilmek için talep yoğunluğunu 10 olarak seçildi ve şebeke gücü ile depolama sistemi boyunu 0'dan 20'ye artırılarak dört farklı kesinti olasılığı ( $\delta = 0.005, 0.01, 0.05, 0.1$ ) için hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 5 de görüldüğü üzere, daha sıkı sistem performansı için, örneğin müşteri taleplerinin %99,5'ini ( $\delta = 0.005$ ) karşılayabilmek için şebeke gücü en az  $C=14$  kW ve depolama sisteminin boyu en az  $B=11$  kWh olmalıdır. Eğer enerji depolama sisteminin maliyeti yüksek ise veya şebekeden çekilecek güçte üst limit yok ise,  $C=14$  kW ve  $B=2$  kWh sistem kapasitesi de performans hedefini yakalamaya uygun olacaktır. Öte yandan, sistem operatörü müşteri taleplerinin sadece %90'nını karşılamayı hedefliyor ise, sistem kaynaklarını  $C=11$  kW ve  $B=4$  kWh olarak seçmesi yeterli olacaktır.



Şekil 5. Minimum kesinti olasılığını ( $\delta$ ) sağlayan değişik sistem kombinasyonları.

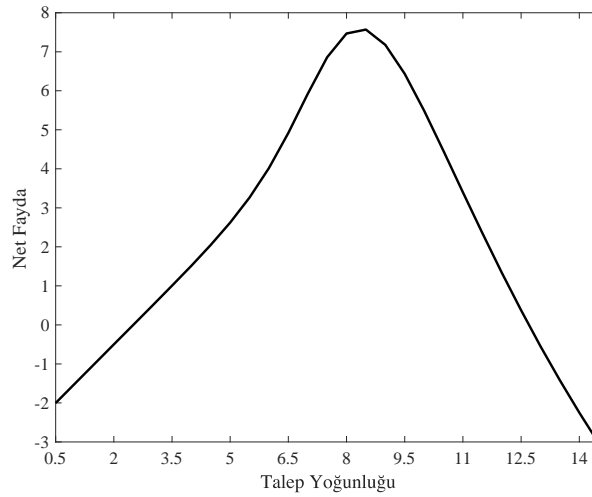


## B. SİSTEM EKONOMİK FAYDA MODELİ (SYSTEM PROFIT MODEL)

Bu bölümde, önceki bölümde sunulan performans değerlendirmelerine ek olarak sistem ekonomik fayda modeli sunulmaktadır. Bu modelin amacı ekonomik parametreleri Stokastik model ile ilişkilendirip sistem operatörüne, kesinti olasılığının ötesinde, kapasite planlaması yapılmasını sağlamaktır. Ekonomik modelin parametreleri şöyle sıralanabilmektedir. Sistemden elektrik talep eden her müşteri eğer şebekeden güç çekmiş ise  $F_g$  kadar ücret öderken, ilgili sistem durumları  $\rho^g = \{(i, j): 1 \leq i \leq S_G, 0 \leq j \leq S_B\}$  kümesi ile gösterilir. Buna paralel olarak, enerji depolama sisteminden güç talep eden tüketiciler  $F_b$  kadar ücret öderken, ilgili sistem durumları  $\rho^b = \{(i, j): 0 \leq i \leq S_G, 1 \leq j \leq S_B\}$  kümesi ile ifade edilir. Kesinti olasılığını ise sistemin  $(S_G, S_B)$  durumunda olma olasılığı ile eşit olduğu için, engellenme durum kümesi  $\rho^e = \{(i, j): i = S_G, j = S_B\}$  ile gösterilir. Sistem fiyatlama politikasının önemli bir enstrümanı ise müşteri talebinin karşılanamaması durumunda  $F_p$  kadar ödenen cezadır. Bu mekanizma ile sistem operatörünün uygun sistem kapasitesini seçmesi için ekonomik motivasyon sağlanmaktadır. Bu durumda sistem ekonomik modeli aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Fayda = \sum_{s \in \rho^g} F_g n(s) \pi(s) + \sum_{s \in \rho^b} F_b n(s) \pi(s) - M_0 - BM_a - \sum_{s \in \rho^e} F_p n(s) \pi(s) \quad (11)$$

Yukarıdaki denklemde  $M_0$  enerji depolama sisteminin sabit satın alma maliyeti,  $M_a$  depolama sisteminin boyutu ile ilgili maliyet parametresidir ve lineer bir ilişki varsayılmıştır.  $n(s)$  ise  $\pi(s)$  durumunda bulunan aktif kullanıcı sayısıdır. Bu durumda  $n(s)$  ile  $\pi(s)$  çarpılması beklenen değeri (expected value) vermektedir



Şekil 6. Ekonomik modelin  $C=10$  kW  $B=10$  kW için hesaplanması.

Sunulan ekonomik model  $C = 10$  kW,  $B = 10$  kWh ve değişen yoğunluk talebi parametreleri ile hesaplanmıştır. Bu örnekte tüketici talebinin depolama sisteminden veya şebekeden karşılanmasının farklı olmayacağı varsayıp  $F_p = F_g = 1$  olarak kabul edilmiştir. Tüketici talebinin engellenmesi ise iş modeli ve müşteri memnuniyeti açısından iyi karşılanmayan bir durum olduğu için engellenme cezası  $F_e = 1.2$  olarak seçilmiştir. Buna ek olarak  $M_a=0.001$  ve  $M_0 = 2.5$  olarak kabul edilmiştir. Şekil 6'da sistemin net fayda hesaplamaları yapılmıştır. Sunulan modelde, talep yoğunluğu kontrol edilemeyen dışsal bir değişken olup, sistem operatörü talep yoğunluğuna göre uygun enerji depolama boyu ve şebekeden seçilen gücü belirlemektedir. Buna göre talebin düşük olduğu sistemlerde, örneğin talep yoğunluğunun 0.5 ila 2.5 aralığında olduğu yerlerde, seçilen enerji depolama sistemi maliyetinin yüksek olması nedeniyle sistem operatörüne negatif fayda sağlamaktadır. Bu tip durumlarda daha küçük depolama sistemi seçilmesi ekonomik açıdan tavsiye edilen bir durumdur. Diğer bir yandan, yüksek talep rejiminde, örneğin talep yoğunluğunun 12.5 ve üzerinde olduğu zamanlar, kesinti olasılığının yükselmesi ve müşterilere ödenen cezanın artmasından dolayı kar edilememektedir. Bu nedenle sistem operatörünün kapasiteyi arttırması gerekmektedir. Öte yandan trafik rejiminin 8-8.5 olduğu aralıkta karın maksimize edildiği görülmektedir ve kapasite seçiminin bu trafik rejimi için doğru olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, parametre seçim kriterlerinde bazı kısıtlamaların olması da mümkündür. Örneğin sistem dağıtım şebekesi elemanlarının çalışma limitlerinin aşılması durumunda, şebekeden çekilecek güçte kısıtlama olacağından daha büyük boyutta enerji depolama sistemi gereksinimi duyulabilir. Buna benzer olarak, satın alınabilecek depolama

sistemi için bütçe kısıtlaması olması durumunda şebekeden daha çok güç çekmek gerekmektedir. Bu ekonomik model ile sistem operatörünün finansal parametreleri de göz önüne alarak uygun kapasite planlaması yapması planlanmıştır

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Son yıllarda enerji depolama sistemlerine olan ilgi, düşen maliyetler ve elektrik şebekelerinde duyulan sistem esnekliği gereksinimi yüzünden hızla artmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin mesken tipi kullanıcılar tarafından bireysel olarak satın alınması için maliyetlerin daha da düşmesine ve kamu teşviki gibi ekonomik desteklemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden, enerji depolama sistemlerinin bir grup kullanıcı tarafından müşterek kullanımı ekonomik olarak daha uygun olmaktadır. Bu makalede, bir grup tüketici tarafından ortaklaşa kullanılan enerji depolama sisteminin rassal modelleme yöntemi ile kapasite hesaplaması yöntemi sunulmuştur. Sistem modeline göre yoğun zamanlardaki müşteri talepleri şebeke ile enerji depolama ünitesinden çekilen güç ile karşılanmıştır. Tüketici talepleri literatüre uygun olarak Poisson süreci kullanılarak, sistem durumları ise iki boyutlu sürekli zamanlı Markov zinciri kullanılarak modellenmiştir. Bu yaklaşıma göre, müşteri talebi toplam arzı aşarsa, yeni gelen talepler engelleneceğinden, kesinti olasılığı, şebeke gücü, müşteri talep istatistikleri ve enerji depolama boyutuna göre hesaplanmıştır. Böylelikle sistem operatörü hedef kesinti olasılığına karşın uygun kapasite planlaması yapılmasına olanak sağlanmıştır. Sunulan çeşitli hesaplamalı örnekler ile sistem parametrelerinin birbirleri ile ilişkileri ortaya konulmuştur. Buna ek olarak, ekonomik parametreler göz önüne alınarak sunulan ekonomik fayda modeli ile talep yoğunluğuna göre kapasite belirleme kriterleri belirlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Anonim değerlendirmede bulunan hakem ve editörlere yorumlarından dolayı teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Farhangi, H. The path of the smart grid. IEEE Power and Energy Magazine, 8, 1, (18-28), (2010), ([10.1109/MPE.2009.934876](https://doi.org/10.1109/MPE.2009.934876))
- [2] Amin, M. The Case for Smart Grid. PUBLIC UTILITIES FORTNIGHTLY, 5, (25-32) (2015).
- [3] Bayindir, R., Colak, I., Fulli, G. ve Demirtas, K. Smart grid technologies and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66, (499-516), (2016), (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.002>)
- [4] Bayindir R., Demisbas S., Irmak, E., Cetinkaya, U., Ova, A., ve Yesil, M. Effects of renewable energy sources on the power system. IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, (388-393), (2016), ([10.1109/EPEPEMC.2016.7752029](https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2016.7752029)).
- [5] Cappers, P., Goldman, C., ve Kathan, D. Demand response in US electricity markets: Empirical evidence. Energy, 35:4, (1526-1535), (2010), (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.029>)
- [6] Doğan, H. ve Yılkıran, N. Türkiye'nin Enerji Verimliliği Potansiyeli Ve Projeksiyonu. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 3:1, (375-384), (2014).
- [7] Kabalcı, Y. ve Kabalcı, E. Akıllı Şebekeler için Kablosuz Enerji İzleme Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 5:2, (2017).
- [8] Bayram, I.S., ve Ustun, T. A survey on behind the meter energy management systems in smart grid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72, (1208-1232), (2017), (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.034>)
- [9] Bayram, I.S., ve Tajer, A. (2017) Plug-in electric vehicle grid integration, London: Artech House, 100,150.
- [10] Arnold, G. W. Challenges and opportunities in smart grid: A position article. Proceedings of the IEEE, 99:6, (922-927), (2011).

- [11] U.S. GRID ENERGY STORAGE FACTSHEET, Center for Sustainable Systems, University of Michigan, 2018. [Online]. Available: <http://css.umich.edu/factsheets/us-grid-energy-storage-factsheet>.
- [12] Kim, I. ve Kim, D. Optimal capacity of shared energy storage and photovoltaic system for cooperative residential customers. *IEEE Information and Communications*, (293-297), (2017), ([10.1109/INFOCOM.2017.8001682](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2017.8001682))
- [13] Arghandeh, R., Woyak, J., Onen, A., Jung, J., ve Broadwater, R. Economic optimal operation of Community Energy Storage systems in competitive energy markets. *Applied Energy*, 135, (71-80), (2014), (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.066>)
- [14] Parra, D., Norman, S., Walker, G., ve Gilliot, M. Optimum community energy storage system for demand load shifting. *Applied Energy*, 174, (130-143), (2016), (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.082>)
- [15] Stelt, S., AlSkaif, T., ve Van Sark, W. Techno-economic analysis of household and community energy storage for residential prosumers with smart appliances. *Applied Energy*, 209, (266-276), (2018), (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.096>)
- [16] Song, J., Krishnamurthy, V., Kwasinski, A., and Sharma R. Development of a Markov-chain-based energy storage model for power supply availability assessment of photovoltaic generation plants. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4, 2, (491-500), (2013), ([10.1109/TSTE.2012.2207135](https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2207135))
- [17] Dong, J., Gao, F., Guan, X., Zhai Q., ve Wu, J. Storage-Reserve Sizing With Qualified Reliability for Connected High Renewable Penetration Micro-Grid. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7:2, (732-743), (2016), ([10.1109/TSTE.2015.2498599](https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2498599))
- [18] Kong, C., Bayram, I. S., ve Devetsikiotis, M. Revenue Optimization Frameworks for Multi-Class PEV Charging Stations. *IEEE Access*, 3, (2140-2150), (2015), ([10.1109/ACCESS.2015.2498105](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2498105))
- [19] Vardakas, J. S., Nizar Z., and Verikoukis, C. V. Scheduling policies for two-state smart-home appliances in dynamic electricity pricing environments. *Energy*, 69, (455-469), (2014), (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.037>)
- [20] Richardson, I., Thomson, M., Infield, D., ve Clifford, C. Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model, *Energy and Buildings*, 42:10, (878-1887), (2010), (<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.023>)
- [21] Ardakanian, O., Keshav, S., ve Rosenberg, C. Markovian models for home electricity consumption. *ACM SIGCOMM workshop on Green networking*, (31-36), (2011), ([10.1145/2018536.2018544](https://doi.org/10.1145/2018536.2018544))
- [22] Ahn, K., Dadlani, A., Kim, K. and Saad, W., Revenue maximization of multi-class charging stations with opportunistic charger sharing. *IEEE International Conference on Communications*, (2018), ([10.1109/ICC.2018.8422910](https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422910))
- [23] Stewart, W. (1994) *Introduction to the numerical solution of Markov chains*, Princeton University Press, ([10.1109/TPWRS.2016.2553678](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2553678))
- [24] Qiu, T., Bolun X., Yishen W., Yury D., Kirschen, D. Stochastic multistage coplanning of transmission expansion and energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32, 1, (643-651), (2017), ([10.1109/TPWRS.2016.2553678](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2553678))
- [25] Khan, F.A., Pal, N. ve Saeed, S.H. Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, (937-947), (2018), (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.107>)