

Pik güç azaltımı tabanlı talep cevabı stratejisi ve yük faktörü maksimizasyonu amaçlı bir elektrikli araç toplu park bölgesi enerji yönetim stratejisi

A peak power reduction based demand response strategy and load factor maximization oriented electric vehicle parking lot energy management strategy

Ozan ERDİNÇ¹, Akın TAŞCIKARAOĞLU^{2*}

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
oerdinc@yildiz.edu.tr

²Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye.
akintascikaraoglu@mu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 02.11.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 23.04.2018
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.73636
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Ulaşım sistemlerinin elektrifikasyonu üzerine son zamanlarda artan ilgi ile birlikte elektrikli araçlar üzerine gerçekleştirilen çalışmalar büyük ivme kazanmıştır. Ancak elektrikli araçlar dağıtım seviyesinden elektrik güç sistemine bağlandıklarından dolayı artan elektrikli araç şarj gereksinimi nedeniyle sistemde önemli bir güç talebi artışı oluşacaktır. Bireysel olarak elektrikli araçların dağıtım sistemine asgari yükü getirecek şekilde koordine edilmesi oldukça zor olsa da özellikle elektrikli araç toplu park bölgeleri bünyesinde ilgili şarj işleminin yönetimi etkin bir opsiyondur. Bu durum özellikle son zamanlarda akıllı şebekeler kapsamındaki talep cevabı konsepti ile de ilişkilendirilmektedir. Bu bağlamda bu çalışmada, pik güç azaltımı tabanlı bir talep cevabı stratejisinin gereksinimini karşılayacak ve aynı zamanda ilgili şarj gücü değişiminin yük faktörünü azami hale getirecek şekilde bir işletim sağlayacak bir enerji yönetim stratejisi önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araçlar, Enerji yönetim sistemi, Pik güç azaltımı, Talep cevabı, Yük faktörü

Abstract

Together with the increasing attention on the electrification of transportation systems, the studies realized on electric vehicles have gained a great acceleration. However, as the electric vehicles are connected to the electric power system from the distribution level, an important power demand increase will occur in the system due to the electric vehicle charging requirements. Even the coordination of individual electric vehicles so as to bring minimum loading to the distribution system is significantly hard, especially the management of the relevant charging process within the electric vehicle parking lots is an effective option. Specifically, this issue has been linked with the demand response concept in smart grid content. In this regard, in this study an energy management strategy that can ensure the requirements of a peak power reduction oriented demand response strategy and can provide an operation that maximizes the load factor of the relevant charging power variation is proposed.

Keywords: Demand response, Electric vehicles, Energy management system, Load factor, Peak power reduction

1 Giriş

Son yıllarda artan enerji talebi ile birlikte elektrik enerjisi endüstrisinin yapısı, ilgili talebin etkin ve ekonomik bir şekilde karşılanması açısından büyük çaplı bir değişim geçirmeye başlamıştır. Özellikle üretim tarafında yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel kaygılar sebebiyle artan oranda entegrasyonu, talep tarafının yanı sıra üretim tarafında da belirsizlik oluşturmaya başlamıştır. Bu bağlamda özellikle akıllı şebekeler vizyonu kapsamında talep tarafının da güç sistem işletiminde esneklik kaynağı olarak dikkate alınması son zamanlarda önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir [1],[2].

Talep tarafı aksiyomlarının belirli bir zamandır uygulanan olgunlaşmış sayılabilecek hali, "talep tarafı yönetimi (demand side management)" olarak adlandırılmaktadır. Talep tarafı yönetim kavramı için Elektrik Güç Araştırmaları Enstitüsü'nün (Electric Power Research Institute-EPRI) tanımı "Talep tarafı yönetimi; yükte arzulan değişiklikleri sağlayacak şekilde, tüketicinin elektrik kullanımını etkileyecek aksiyomların planlanarak uygulanması ve görüntülenmesidir" şeklindedir [3]. Literatürde bazı kaynakların talep tarafı yönetimi çatısı altında değerlendirdiği "talep cevabı (demand response)" kavramı ise,

akıllı şebeke olgusuna olan ilginin artması ile birlikte değişim göstermiş ve artık tek başına değerlendirilmesi gereken bir husus haline almıştır. Amerikan Enerji Bakanlığı'na göre talep cevabı, "Toptan pazar fiyatının yüksek olduğu anlar ve sistem güvenilirliği risk altında olduğunda; daha düşük elektrik kullanımını sağlamak için tasarlanan elektrik fiyatı değişimlerine ya da teşvik ödemelerine cevap olarak, son kullanıcıların elektrik kullanımındaki normal tüketim alışkanlıklarından farklı değişim" şeklinde tanımlanmaktadır [4]. Kısacası talep cevabı, özellikle pik tüketimi azaltmak ve yük şeklini değiştirmek için sistem operatörünün uyguladığı nispeten kısa dönemli uygulamalara tüketicinin davranışsal tepkisidir. Dünyada farklı sistem operatörleri tarafından etkin olarak uygulanan birçok talep cevabı programı mevcuttur ve ilgili dünya örnekleri Ref. [5]'teki çalışma vasıtasıyla incelenebilir.

Burada talep tarafında yeni elektrikli yüklerin mevcudiyeti hususu da ayrıca irdelenmesi gereken bir konudur. Özellikle ulaşım sektörünün elektrifikasyonu konusu üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda büyük bir ivme kazanmıştır. Bu bağlamda elektrikli araçlar gibi yeni elektrikli yüklerin talep tarafında bulunması durumu da sistem operatörleri tarafından dikkate alınması gereken bir konu haline gelmiştir. Elektrikli

araçlar yük olarak ciddi seviyelerde güç ihtiyacı oluşturmaktadırlar (örneğin BMW i3 normal şarj istasyonu için 7.4 kW [6], Tesla ev tipi şarj istasyonu için 17.2 kW [7], Renault ZOE hızlı şarj istasyonu için 43 kW [8], Tesla yeni nesil SuperCharger hızlı şarj istasyonu için 120 kW [9], vb.). Bahsi geçen yüklerin özellikle güç sisteminde iletim sisteminden daha zayıf bir yapıya sahip olan dağıtım sistemine bağlanmakta/bağlanacak olması ile birlikte bu durum elektrikli araçların beklenen yaygınlaşmasını takiben dağıtım sistemi operatörleri için hem planlama hem de işletim açısından oldukça büyük bir zorluk oluşacaktır.

Yukarıda belirtilen bilgiler ışığında elektrikli araçların talep tarafı için önemli bir rol oynayacağı ve buna bağlı olarak da yakın gelecekte elektrikli araçları konu alan talep cevabı programları geliştirilmesinin oldukça olası olduğu belirtilebilir. Elektrikli araçların özellikle daha uzun zaman bir arada buldukları park bölgeleri (belediye otoparkları, alışveriş merkezi otoparkları, vb.) bu bağlamda ön plana çıkacaktır. Bahsi geçen bu toplu park bölgelerinde sadece talep cevabı stratejisi potansiyeli değil, ayrıca ilgili güç sistem varlıklarının (transformatörler, kablolar, vb.) kapasitesinin etkin kullanımı açısından yük faktörünü artırıcı şekilde akıllı şarj yönetimi stratejilerinin uygulanması da oldukça etkin bir yöntem olarak karşımıza çıkacaktır. Bu hususlar elektrikli araçların yaygınlaşmasının arzu edilen seviyelere gelmesi açısından da büyük öneme sahiptir.

Literatürde farklı talep cevabı stratejileri üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların özelinde park bölgelerinin talep cevabı stratejilerinde kullanımı üzerine farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlardan, Ref. [10]'da gerçekleştirilen çalışmada elektrikli araç toplu park bölgelerinin talep cevabı potansiyelinin enerji piyasası kapsamında değerlendirilmesi hususu üzerine irdelemelere yer verilmiştir. Ref. [11]'de gerçekleştirilen çalışmada hidrojen enerjisi tabanlı bir enerji depolama sisteminin var olduğu bir elektrikli araç toplu park bölgesi için talep cevabı programına katılım açısından bir enerji yönetim sistemi yapısı önerilmiştir. Ref. [12]'de elektrikli araç toplu park bölgelerinin talep cevabı kapsamında enerji piyasalarına dahil olması hem yenilenebilir enerji santrallerinin üretiminin stokastik yapısı, hem iletim hattı arızaları, hem de elektrikli araçların şebeke ile iki yönlü enerji alışveriş potansiyelleri açısından risk yönetimi kapsamı da dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ref. [13]'te elektrikli araç toplu şarj bölgelerinin etkin bir şekilde talep cevabı programlarına katılabilmesi açısından gerçek zamanlı bir enerji yönetim sistemi yapısı önerilmiştir. Ref. [14]'te diğer talep tarafı esneklik kaynakları ve dağıtık üretim birimlerinin yanı sıra elektrikli araç toplu park bölgeleri de sistem operatörü işletimi için talep tarafı esnekliği sağlayacak bir kaynak olarak dikkate alınmıştır. Ref. [15]'te elektrikli araç toplu park bölgelerini de talep tarafı esneklik kaynağı olarak dikkate alacak şekilde enerji piyasasında portföy yönetimi yapısı önerilmiştir. Ref. [16]'da talep cevabı stratejisine iştirak edecek şekilde toplu bir elektrikli araç park bölgesinin enerji yönetim sistemi yapısı için iki aşamalı dinamik programlama tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır. Ref. [17]'de talep cevabı stratejileri kapsamında değişken enerji fiyatlaması yapısının toplu bir elektrikli araç park bölgesindeki elektrikli araç şarj gücü talebini nasıl etkilediği incelenmiş ve buna bağlı olarak da ilgili talebi koordine edecek şekilde dağıtık üretim ve enerji depolama sistemini de içerecek şekilde bir enerji yönetim yapısı önerilmiştir. Bu bağlamda toplu elektrikli araç park bölgeleri için çeşitli amaçlarla enerji yönetimi yapısı öneren

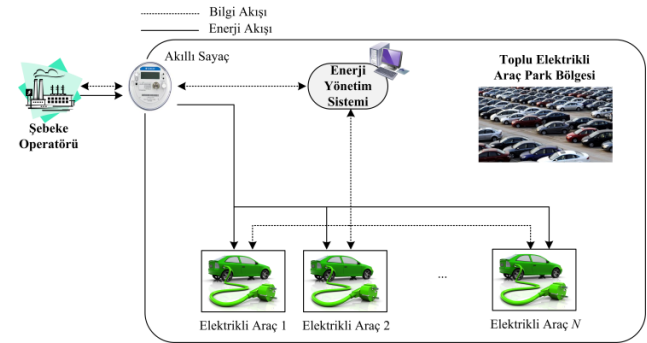
farklı çalışmalar da mevcuttur. Ayrıca talep cevabı kapsamında elektrikli araç park bölgelerini tek başına ya da bir portföy içerisinde farklı şekillerde dikkate alan ve burada belirtilmeyen birçok literatür çalışması örneği de bulunmaktadır.

Bu çalışmada, hem pik güç azaltımı tabanlı bir talep cevabı stratejisini karşılayacak, hem de güç sistem varlıklarının etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayacak şekilde yük faktörünü azami hale getirecek şekilde bir işletim oluşturacak bir elektrikli araç toplu park bölgesi enerji yönetim stratejisi önerilmektedir. Yukarıda verilen çalışmalar ve burada bahsedilemeyen diğer literatür örnekleri kapsamında, bahsi geçen iki hususu da beraberce dikkate alacak şekilde toplu bir elektrikli araç park bölgesi için sunulan bir enerji yönetimi stratejisi mevcut değildir. Önerilen çalışma bu açıdan ilgili literatüre de katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmanın 3. bölümünde önerilen optimizasyon problemine ait matematiksel formülasyona yer verilmektedir. Önerilen yöntemin uygulanmasıyla elde edilen benzetim sonuçları 4. bölümde sunulmaktadır. Son bölümde ise çalışmaya ait temel bulgular ve sonuçlar verilmektedir.

2 Önerilen enerji yönetim stratejisi probleminin formülasyonu

İlgili enerji yönetim stratejisinin yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere ilgili enerji yönetim yapısı farklı zamanlarda park bölgesine gelen elektrikli araçların şarj yönetimini sistem operatöründen gelen talep cevabı stratejisi gereksinimlerini karşılayacak ve genel güç sistemi işletimi ve planlamasına katkı sağlamak açısından yük faktörünü azami hale getirecek şekilde koordine etmektedir.



Şekil 1: Önerilen yapıya ait temel şema.

Bahsi geçen yapıda enerji yönetim stratejisinin, elektrikli araçlardan park bölgesine vardıkları ve park bölgesinde yer alan ilgili şarj istasyonlarından birine bağlandıkları andaki mevcut şarj durumunu bilgisini otomatik olarak edindiği kabul edilmektedir. Burada aşağıda detayları verilecek olan referans koşul belirlenirken etkin bir kestirim algoritması ile bu bilginin enerji yönetim stratejisine aktarıldığı da çalışmanın kabullerinden biridir. Bu durumun deterministik olarak değil daha etkin bir strateji geliştirilmesi açısından stokastik olarak dikkate alınması da mümkündür ve bu konu yakın gelecekteki hedefler arasındadır. Ayrıca ilerideki bir çalışmada detayları irdelenecek olan ve şu an geliştirme aşamasında bulunan bir kullanıcı arayüzü ile elektrikli araç sahiplerinin araçlarını hangi saatte ve ne kadarlık bir enerji durumu ile park bölgesinden almak istedikleri bilgisi enerji yönetim stratejisi tarafından edinilmektedir. Burada şebeke operatöründen pik yük azaltımı tabanlı talep cevabı stratejisi için gelen bilgiler akıllı sayaç

vasıtası ile enerji yönetim stratejisine aktarılmaktadır. Bütün bu girdileri kısıtlar olarak dikkate alan enerji yönetim stratejisi, şebeke operatörünün talep cevabı isteğini ve elektrikli araç sahiplerinin taleplerini de sağlayacak şekilde elektrikli araçların şarj işlemini daha önce belirtilen ve aşağıda detaylıca irdelenecek olan amaç fonksiyonunu dikkate alarak yönetmektedir.

Burada önerilen enerji yönetim stratejisi bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir. Önerilen problemde amaç, yük faktörünün azami değere getirilmesi, dolayısı ile de güç sistem varlıklarının kapasitelerinin her zaman diliminde mümkün olan en etkin bir şekilde kullanılmasıdır. Bahsi geçen amaç fonksiyonunun klasik ifadesi Eşitlik (1)'de gösterilmektedir:

$$\text{maks. YF} = \frac{P_{\text{şebeke_ort}}}{P_{\text{şebeke_maks}}} \quad (1)$$

Ancak Eşitlik (1) kapsamında verilen ifade doğrusal değildir ve doğrusal matematiksel programların çözüm teknikleri ile çözülememektedir. Bu nedenle ilgili eşitlik aynı amaca hizmet edecek, yani yük faktörünü azami hale getirecek şekilde Eşitlik (2)'de görüldüğü şekilde revize edilmiştir:

$$\text{min. Amaç} = P_{\text{şebeke_maks}} - P_{\text{şebeke_ort}} \quad (2)$$

Eşitlik (1) ve (2)'de geçen "maks. YF" ve "min. Amaç" ifadeleri sırası ile yük faktörünün azami (maksimum) hale getirilmesini ve yük faktörü ifadesinin maksimizasyonuna karşılık gelecek şekilde revize edilen lineer amaç fonksiyonunun asgari (minimum) hale getirilmesini tanımlamaktadır. Bahsi geçen ifade içerisindeki $P_{\text{şebeke_maks}}$ ve $P_{\text{şebeke_ort}}$ değişkenleri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$P_{\text{şebeke_maks}} \geq P_{\text{şebeke},t}, \quad \forall t \quad (3)$$

$$P_{\text{şebeke_ort}} = \frac{\sum_t P_{\text{şebeke},t}}{\text{card}(t)} \quad (4)$$

İlgili ifadelerde amaç $P_{\text{şebeke_maks}}$ ile $P_{\text{şebeke_ort}}$ değişkenleri arasındaki farkı asgari hale getirmek olduğundan dolayı Eşitlik (3)'te $P_{\text{şebeke_maks}}$ değeri çözüm tekniği tarafından doğal olarak asgari hale getirilecek, yani Eşitlik (3) bir eşitsizlik kısıtı dahi olsa $P_{\text{şebeke},t}$ değişkenlerinin azami değerinin üzerinde bir değer almayacaktır. Eşitlik (4)'te belirtilen $\text{card}(t)$ ifadesi ise t kümesinin kardinalitesini (sonlu kümelerde kümenin eleman sayısı) belirtmektedir ve belirli bir zaman periyodu içerisinde talep edilen gücün ortalama değerinin bulunması için ilgili denklemin payda kısmında yer almaktadır.

Burada şebekeden çekilen toplam elektrikli araç şarj gücü şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$P_{\text{şebeke},t} = \sum_h P_{EA_sarj,h,t}, \quad \forall t \quad (5)$$

Her bir elektrikli araç için şarj gücünün ilgili elektrikli aracın şarj istasyonu kapasitesinden büyük olamayacağı Eşitlik (6) ile ifade edilmektedir:

$$P_{EA_sarj,h,t} \leq P_{kap,h}, \quad \forall h, t \quad (6)$$

Elektrikli araçların enerji durumu (State of Energy - SoE) değışımi ise Eşitlik (7) ile belirtilmektedir:

$$SoE_{EA,h,t} = SoE_{EA,h,t-1} + P_{EA_sarj,h,t} \cdot Ver_h \cdot \Delta T, \quad \forall h, t \in [T_{gelis,h}, T_{gidis,h}] \quad (7)$$

İlgili elektrikli araçların park alanına geldikleri zamanda SoE değerlerinin elektrikli aracın ilgili kat ettiği yolun akabinde kalan değere, yani şarj işlemi için başlangıç değerine eşit olduğu Eşitlik (8) vasıtası ile belirtilmektedir:

$$SoE_{EA,h,t} = SoE_{EA_basl,h}, \quad \forall h, t = T_{gelis,h} \quad (8)$$

Elektrikli araçların SoE değerlerinin son kullanıcı konfor koşullarının da dikkate alınması amacıyla park bölgesinden ayrılma zamanında istenen değere eşit olması Eşitlik (9) kullanılarak sağlanmaktadır:

$$SoE_{EA,h,t} = SoE_{EA_istenen,h}, \quad \forall h, t = T_{gidis,h} \quad (9)$$

Her bir elektrikli aracın SoE değerinin hiçbir koşulda azami değeri geçemeyeceği durumu Eşitlik (10) vasıtası ile tanımlanmaktadır:

$$SoE_{EA,h,t} \leq SoE_{EA_azami,h}, \quad \forall h, t \quad (10)$$

Elektrikli araçların her biri için ilgili araç park bölgesinde değil iken tanımlanan değışkenlerin değer almaması gerekmektedir. Bu durum Eşitlik (11) ile sağlanmaktadır:

$$SoE_{EA,h,t}, P_{EA_sarj,h,t} = 0, \quad \forall h, t \in]T_{gelis,h}, T_{gidis,h}[\quad (11)$$

İlgili talep cevabı stratejisi kapsamında pik yük azaltımı tabanlı talep cevabı uygulaması esnasında referans güç profiline göre elektrikli araç toplam şarj gücünün sistem operatörü tarafından talep edilen seviyede azaltılması Eşitlik (12) kapsamında tanımlanmaktadır:

$$P_{azaltim,t} \leq P_{şebeke_ref,t} - P_{şebeke,t}, \quad \forall t \in [t_1, t_2] \quad (12)$$

Burada eğer referans güç değeri sıfır ise herhangi bir azaltım gerçekleştirilemeyeceğinden dolayı, talep cevabı uygulaması zaman aralığında referans gücün sıfır olduğu anlarda şebekeden de güç çekilmemesi Eşitlik (13)'te verilen kısıt ile tanımlanmaktadır:

$$P_{şebeke,t} = 0, \quad \forall P_{şebeke_ref,t} = 0, t \in [t_1, t_2] \quad (13)$$

İlgili Eşitlikler (2)-(13) kullanılarak bahsi geçen problemin tanımlanması gerçekleştirilmektedir. Belirtilen formülasyon Lineer Programlama yapısına sahiptir ve lineer yapıysından ötürü özellikle gerçek zamanlı bir uygulama platformuna kolayca aktarılabilecek bir yaklaşımdır.

3 Testler

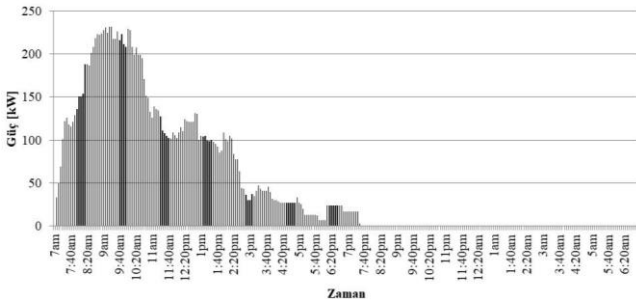
Önerilen optimizasyon probleminin farklı koşullar altında test edilmesi amacıyla ilgili model Generic Algebraic Modeling System (GAMS) yazılımına aktarılmış ve ticari olarak mevcut CPLEX çözücüsü ile problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. GAMS yazılımı, literatürde ve dünyadaki önde gelen kurum ve kuruluşlarda (örneğin Dünya Bankası [18]) yaygın şekilde kullanılan ve özellikle optimizasyon problemi odaklı bir yazılımdır. CPLEX çözücüsü ise IBM tarafından [19] Simpleks optimizasyon çözüm tekniği baz alınarak geliştirilmiştir ve optimizasyon problemlerinin çözümüne yönelik olarak oldukça etkin performans göstermektedir.

Bahsi geçen test işlemlerinde Tablo 1'de görülen farklı elektrikli araçlara ait teknik bilgiler kullanılmıştır. Burada

öncelikle elektrikli araç toplu park bölgesi için referans bir güç eğrisi oluşturma işlemi gerçekleştirilmiştir. Referans güç eğrisi oluşturulurken ilgili günlük zamanların içerisinde Tablo 1'de teknik verileri verilen 10 farklı elektrikli araç modelinin her birinden 10'ar adet olmasıyla meydana getirilen 100 adetlik bir elektrikli araç kümesi kullanılmıştır. Bahsi geçen elektrikli araçların her birinin rastgele olarak bir geliş zamanı ve başlangıç SoE değerine sahip olması durumu kabul edilmiştir. Ayrıca her elektrikli aracın en kötü koşulu oluşturmak açısından geliş zamanında anında ilgili yeterli sayıdaki şarj istasyonu tarafından batarya kapasitesine eşit olan azami SoE değerine gelene kadar bekleme olmadan şarj edildiği dikkate alınmıştır. Buna göre elde edilen referans güç eğrisi Şekil 2'de görülmektedir.

Tablo 1: Farklı elektrikli araçlara ait teknik bilgiler.

Model	Batarya Kapasitesi [kWh]	Şarj İstasyonu Gücü [kW]
Wolkswagen E-Golf	24	7.2
BMW i3	22	6.6
Mercedes B-Class	28	10
Tesla Model-S	85	17.2
Fiat 500E	24	6.6
Ford Focus Electric	23	6.6
Kia Soul EV	27	6.6
Mitsubishi i-MiEV	16	3.3
Chevy Volt	17	3.3
Nissan LEAF	24	6.6



Şekil 2: Elektrikli araç toplu park bölgesi için referans güç değişimi.

Sonuçlar 9 farklı senaryo ışığında irdelenmiştir. Bahsi geçen senaryolar şu şekildedir:

- **Senaryo 1:** 8:00-10:00 sa. arası sistem operatörü tarafından talep cevabı stratejisi kapsamında 50 kW'lık pik güç azaltımı talep edildiği ve araçların minimum tam şarj zamanı ile 6:55 arasında rastgele ayrılış zamanına sahip olduğu durum,
- **Senaryo 2:** 8:00-10:00 sa. arası sistem operatörü tarafından talep cevabı stratejisi kapsamında 100 kW'lık pik güç azaltımı talep edildiği ve araçların minimum tam şarj zamanı ile 6:55 arasında rastgele ayrılış zamanına sahip olduğu durum,
- **Senaryo 3:** 8:00-10:00 sa. arası sistem operatörü tarafından talep cevabı stratejisi kapsamında 150 kW'lık pik güç azaltımı talep edildiği ve araçların minimum tam şarj zamanı ile 6:55 arasında rastgele ayrılış zamanına sahip olduğu durum,
- **Senaryo 4:** 8:00-10:00 sa. arası sistem operatörü tarafından talep cevabı stratejisi kapsamında 50 kW'lık pik güç azaltımı talep edildiği ve araçların minimum tam şarj zamanı ile 00:00 arasında rastgele ayrılış zamanına sahip olduğu durum,

- **Senaryo 5:** 8:00-10:00 sa. arası sistem operatörü tarafından talep cevabı stratejisi kapsamında 100 kW'lık pik güç azaltımı talep edildiği ve araçların minimum tam şarj zamanı ile 00:00 arasında rastgele ayrılış zamanına sahip olduğu durum,
- **Senaryo 6:** 8:00-10:00 sa. arası sistem operatörü tarafından talep cevabı stratejisi kapsamında 150 kW'lık pik güç azaltımı talep edildiği ve araçların minimum tam şarj zamanı ile 00:00 arasında rastgele ayrılış zamanına sahip olduğu durum,
- **Senaryo 7:** 8:00-10:00 sa. arası sistem operatörü tarafından talep cevabı stratejisi kapsamında 50 kW'lık pik güç azaltımı talep edildiği ve araçların minimum tam şarj zamanı ile 21:00 arasında rastgele ayrılış zamanına sahip olduğu durum,
- **Senaryo 8:** 8:00-10:00 sa. arası sistem operatörü tarafından talep cevabı stratejisi kapsamında 100 kW'lık pik güç azaltımı talep edildiği ve araçların minimum tam şarj zamanı ile 21:00 arasında rastgele ayrılış zamanına sahip olduğu durum,
- **Senaryo 9:** 8:00-10:00 sa. arası sistem operatörü tarafından talep cevabı stratejisi kapsamında 150 kW'lık pik güç azaltımı talep edildiği ve araçların minimum tam şarj zamanı ile 21:00 arasında rastgele ayrılış zamanına sahip olduğu durum.

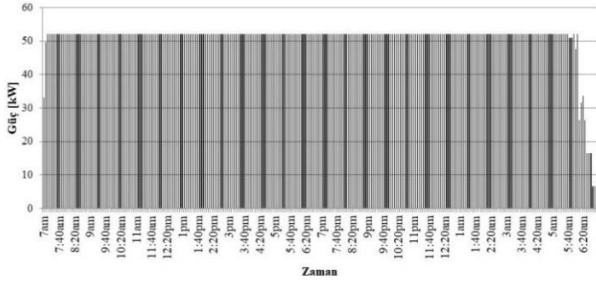
Burada Senaryo 1 hem elektrikli araç sahiplerinin tercihi, hem de sistem operatörünün talepleri dikkate alındığında en az kısıtlı senaryo konumundadır. Benzer şekilde belirtilen açılardan en kısıtlı durum Senaryo 9'da ele alınmaktadır.

Yukarıda senaryo açıklamalarında bahsi geçen minimum tam şarj zamanı ilgili elektrikli aracın batarya kapasitesi ile elektrikli araç toplu park bölgesine varış SoE değeri arasındaki farkın, ilgili aracın şarj istasyonu kapasite değeri ve şarj istasyonu verimliliği dikkate alınarak kaç zaman periyodunda karşılanabileceği ve buna bağlı olarak ilgili aracın geliş zamanını da dikkate alarak bu periyot sayısının ilgili aracın en az hangi zamanda batarya kapasitesine eşit bir SoE değeri ile elektrikli araç toplu park bölgesinden ayrılabilmesinin hesabı ile belirlenmektedir. Burada ayrıca bütün elektrikli araç sahiplerinin ilgili ayrılış zamanında azami SoE değerine sahip olmak istedikleri kabul edilmiştir.

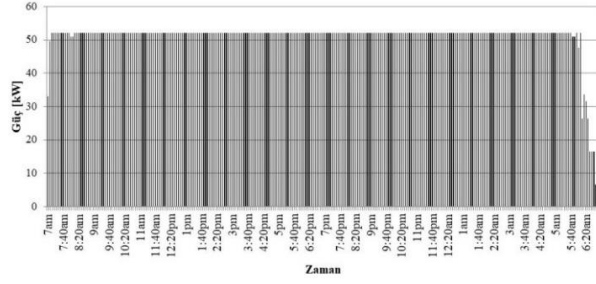
İlgili senaryolar kapsamında elde edilen sonuçlar Şekil 3-11 ve Tablo 2'de özetlenmektedir.

Tablo 2: Farklı senaryolar için elde edilen yük faktörü değerleri.

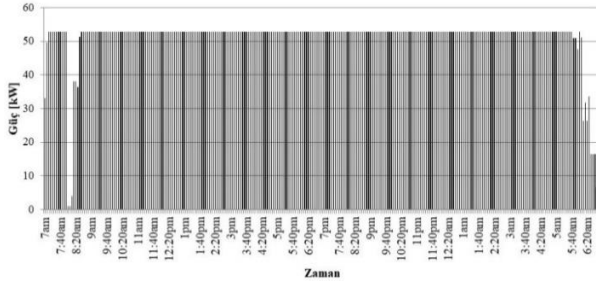
Senaryo	Yük faktörü
Referans durum	0.2181
Senaryo-1	0.9754
Senaryo-2	0.9753
Senaryo-3	0.9618
Senaryo-4	0.6734
Senaryo-5	0.6701
Senaryo-6	0.6506
Senaryo-7	0.5635
Senaryo-8	0.5584
Senaryo-9	0.5278



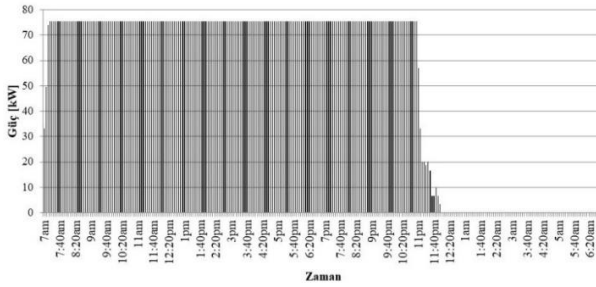
Şekil 3: Elektrikli araç toplu park bölgesi için Senaryo 1’de elde edilen güç değışimi.



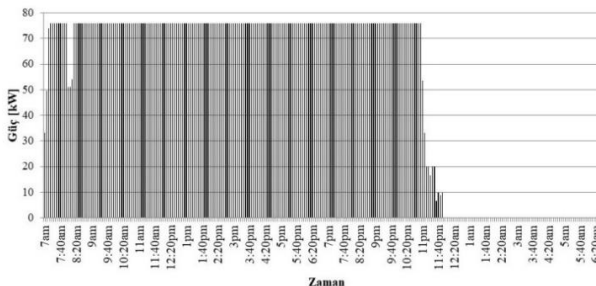
Şekil 4: Elektrikli araç toplu park bölgesi için Senaryo 2’de elde edilen güç değışimi.



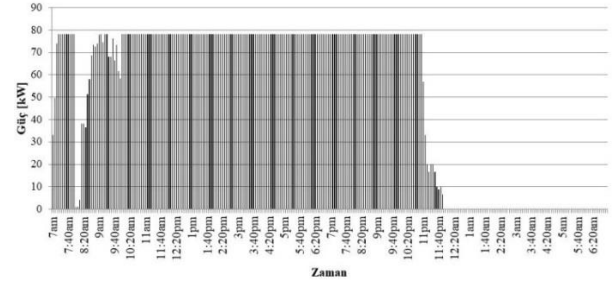
Şekil 5: Elektrikli araç toplu park bölgesi için Senaryo 3’te elde edilen güç değışimi.



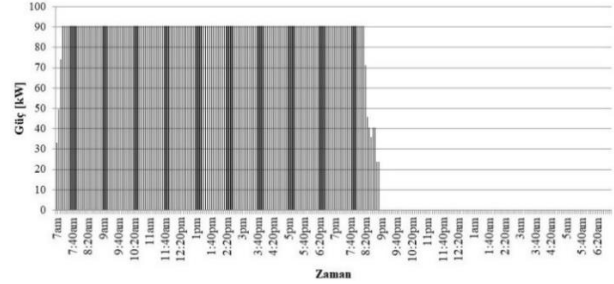
Şekil 6: Elektrikli araç toplu park bölgesi için Senaryo 4’te elde edilen güç değışimi.



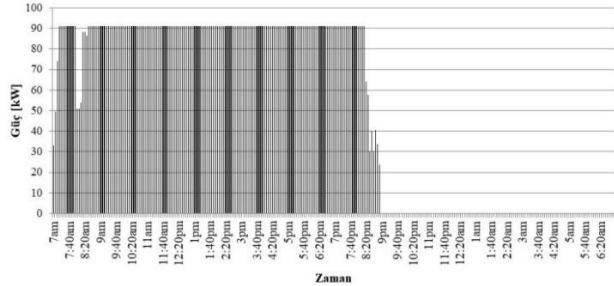
Şekil 7: Elektrikli araç toplu park bölgesi için Senaryo 5’te elde edilen güç değışimi.



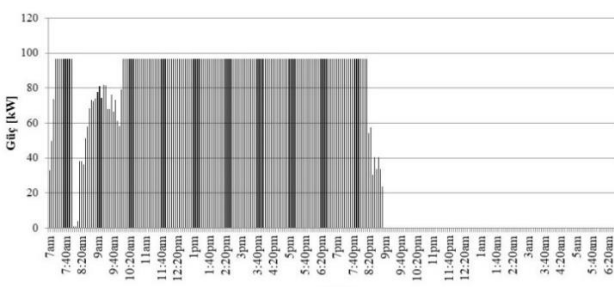
Şekil 8: Elektrikli araç toplu park bölgesi için Senaryo 6’da elde edilen güç değışimi.



Şekil 9: Elektrikli araç toplu park bölgesi için Senaryo 7’de elde edilen güç değışimi.



Şekil 10: Elektrikli araç toplu park bölgesi için Senaryo 8’de elde edilen güç değışimi.



Şekil 11: Elektrikli araç toplu park bölgesi için Senaryo 9’da elde edilen güç değışimi.

Şekil 3-11 karşılaştırmalı olarak incelendiğinde öncelikle önerilen yaklaşımın referans en kötü duruma kıyasla her senaryoda kısıtlara göre yük faktörünü azami hale getirecek şekilde güç eğrisi profilini düzelttiği görülmektedir. Burada özellikle araçların gün içerisinde elektrikli araç toplu park bölgesinde bulunma saatlerinin kısıtlanması ve talep cevabı stratejisi kapsamında sistem operatörü tarafından talep edilen güç azaltımı değerinin artması ile birlikte Senaryo 1’den Senaryo 9’a doğru nümerik olarak daha kısıtlı bir optimizasyon problemi olduğundan dolayı ilgili nispeten düzeltilmiş güç profilinin tepe değerinin arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum elektrikli araçların başlangıç SoE değerlerine göre

azami SoE değerine kadar şarj edilmesi için gerekli olan sabit enerji miktarının senaryolar ilerledikçe hem zaman hem de talep cevabı stratejisi uygulanan periyotlarda güç açısından daha kısıtlı bir durumda karşılanması gerektiği hususunun beraberinde getirdiği doğal bir sonuçtur. Dolayısıyla elektrikli araç sahiplerinin ilgili toplu park bölgesinden ayrılma zamanlarının daha esnek olması sistem işletimi açısından daha etkin bir opsiyon oluşturmakta, enerji yönetim sistemi daha geniş bir çözüm alanında ilgili şarj koordinasyonuna karar verebilmektedir.

Bahsi geçen referans durum ve farklı senaryolar ışığında elde edilen yük faktörü değerleri Tablo 2'de gösterilmektedir. Açıkça görüldüğü üzere her bir senaryoda elde edilen yük faktörü değeri, referans durum olarak kabul edilen elektrikli araçların koordine edilmeden doğrudan şarj edilmesi ile oluşan en kötü duruma göre oldukça yüksektir. Bu durum, oluşturulan enerji yönetim stratejisinin sağladığı şarj koordinasyonu sürecinin doğal bir olumlu etkisidir. Senaryo 1'den Senaryo 9'a doğru gidildikçe yük faktörü değerlerinde azalma meydana gelmesi, daha öncede bahsedildiği üzere zaman ve güç açısından kısıtlamaların artmasının bir sonucudur. Bu bağlamda, elektrikli araç sahiplerinin toplu park bölgesinden ayrılma zamanlarının ve sistem operatörünün talep cevabı stratejisi kapsamındaki gereksinimlerinin sistem işletimi açısından kritik etkenler olduğu özellikle belirtilebilir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, toplu bir elektrikli araç park bölgesi için hem talep cevabı stratejileri kapsamında sistem operatörünün gereksinimlerini karşılayan, hem de yük faktörünü azami hale getirecek şekilde bir işlerim sağlayan bir enerji yönetimi stratejisi önerilmiştir. Burada talep cevabı stratejisi konseptinin dikkate alınması ile birlikte toplu elektrikli araç park bölgelerinin geleceğin akıllı şebeke konsepti içerisindeki dağıtım sistemi operatörü için oynayacağı rol irdelenmiştir. Yük faktörünün azami hale getirilmesi ise hem sistem operatörü, hem de toplu elektrikli araç park bölgesi işletimcisi için güç sistem varlıklarının kapasitelerinin daha etkin kullanılması, buna bağlı olarak yeni yatırım gereksinimlerinin azaltılması veya ertelenmesi bağlamında birçok katkısı mevcuttur. Önerilen yapı yük faktörünün azami hale getirilmesini de farklı kısıtlara sahip koşullar altında başarı ile gerçekleştirmiştir.

İlgili çalışmanın yakın gelecekte geliştirilmeye açık birçok yönü bulunmaktadır. Öncelikle elektrikli araçların toplu park bölgesine varış zamanları ve başlangıç SoE değerleri stokastik bir yapıda dikkate alınıp bu önemli faktörlerdeki belirsizliklerin etkisi irdelenebilir. İlgili elektrikli araç sahibinin toplu park bölgesine geldiğinde mevcut SoE değerini ve araç modeline bağlı olarak batarya kapasitesini dikkate alıp araç sahibine ayrılırken istediği şarj seviyesine göre aracını alabileceği asgari zamanı gösteren ya da ayrılma zamanına göre aracının sahip olabileceği azami SoE değerini belirten kullanıcı dostu bir arayüz modülü geliştirilebilir. Burada girilen veriler ışığında farklı ayrılış zamanı SoE değerleri veya ayrılma zamanı senaryolarına göre irdelemeler derinleştirilebilir. Bunların yanı sıra ilgili senaryolar bazı profillerin örnek bir dağıtım sistemi modeli üzerine entegre edilmesi ile birlikte bir güç akış programı üzerinde elektrikli araç toplu şarj bölgelerinin dağıtım sistemi işletimi üzerine etkileri incelenebilir. Bahsi geçen bütün bu konular, yazarların yakın zamanlı çalışma planlaması içerisinde yer almaktadır.

Özellikle hızlı ve yavaş olarak genel şekilde adlandırılabilen farklı elektrikli araç şarj yaklaşımlarının elektrik güç sistemine etkisi ve benzer çalışmalara etkisi gibi çeşitli açılardan değerlendirilmesi oldukça önemli bir husustur. Özellikle Tesla firmasının yüksek batarya kapasiteli elektrikli araçlarının hızlı şarjı için piyasaya sürmüş olduğu SuperCharger [20] sistemi 120 kW'lık güce sahiptir ve bu tür şarj istasyonlarının şebeke içerisinde yaygınlaşması oldukça önemli güç sistem işletimi problemlerini beraberinde getirecektir. Bu konu ile ilgili yakın zamanlı ve sadece bu hususu ele alan bir gelecek çalışmasının da sunulması hedeflenmektedir.

Türkiye'deki durumun yakın, orta ve uzun vadedeki kestirimleri üzerinden girdiler ışığında gerçekleştirilecek, ülkemiz özelindeki durumun irdelenmesini içeren bir çalışma da gelecek çalışma hedefleri arasındadır.

5 Adlar dizini

5.1 Kümeler

h	Elektrikli araç kümesi
t	Zaman kümesi [sa.]

5.2 Parametreler

$P_{azaltım,t}$	Sistem operatörü tarafından talep cevabı stratejisi kapsamında t periyodunda talep edilen güç azaltım miktarı [kW]
$P_{kap,h}$	h elektrikli aracının şarj istasyonu kapasitesi [kW]
$P_{şebeke_ref,t}$	referans güç eğrisinde t periyodunda şebekeden talep edilen toplam şarj gücü [kW], h elektrikli aracının batarya kapasitesine eşit olacak şekilde azami enerji durumu (State of Energy-SoE) [kWh]
$SoE_{EA_azami,h}$	h elektrikli aracının park bölgesine vardığındaki şarj işlemi için başlangıç enerji durumu (State of Energy-SoE) [kWh]
$SoE_{EA_başl,h}$	h elektrikli aracı park bölgesinden ayrılırken son kullanıcı tarafından talep edilen enerji durumu (State of Energy-SoE) [kWh]
$SoE_{EA_istenen,h}$	h elektrikli aracının park bölgesine geliş zamanı
$T_{geliş,h}$	h elektrikli aracının park bölgesinden ayrılma zamanı
$T_{gidiş,h}$	pik güç azaltımı tabanlı talep cevabı stratejisinin başlangıç zamanı
t_1	pik güç azaltımı tabanlı talep cevabı stratejisinin bitiş zamanı
t_2	h elektrikli aracının şarj istasyonu verimliliği
Ver_h	Zaman çözünürlüğü [sa.]
ΔT	

5.3 Değişkenler

$P_{EA_şarj,h,t}$	h elektrikli aracının t periyodundaki şarj gücü [kW]
$P_{şebeke_maks}$	ilgili günlük şarj gücü değişiminde şebekeden talep edilen azami şarj gücü [kW]
$P_{şebeke_ort}$	ilgili günlük şarj gücü değişiminde şebekeden talep edilen ortalama şarj gücü [kW]
$P_{şebeke,t}$	t periyodunda şebekeden talep edilen toplam şarj gücü [kW]
$SoE_{EA,h,t}$	h elektrikli aracının t periyodundaki enerji durumu (State of Energy - SoE) [kWh]

6 Teşekkür

Bu çalışma, 116E115 ve 117E527 No'lu projeler kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından kısmen desteklenmektedir.

7 Kaynaklar

- [1] Erdiñç O, Taşcıkaraoğlu A, Paterakis NG, Eren Y, Catalão JP. "End-user comfort oriented day-ahead planning for responsive residential HVAC demand aggregation considering weather forecasts". *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(1), 362-372, 2017.
- [2] Paterakis NG, Taşcıkaraoğlu A, Erdinc O, Bakirtzis AG, Catalao JP. "Assessment of demand-response-driven load pattern elasticity using a combined approach for smart households". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(4), 1529-1539, 2016.
- [3] Gellings CW. *The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response*. Lilburn, Georgia, USA, Fairmont Press, 2009.
- [4] U.S. Department of Energy. "Smart Grid System Report". <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2009%20Smart%20Grid%20System%20Report.pdf> (12.10.2016).
- [5] Paterakis NG, Erdiñç O, Catalão JP. "An overview of Demand Response: Key-elements and international experience". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 871-891, 2017.
- [6] Recargo, Inc. "BMW i3 Specifications". <http://www.pluginrcars.com/bmw-i3.html> (12.10.2016).
- [7] Tesla, Inc. "Tesla Home Charging Station Specifications". <https://www.tesla.com/support/home-charging-installation#technical-specs> (12.10.2016).
- [8] Renault S.A. "Renault ZOE Specifications". <https://www.renault.ie/vehicles/new-vehicles/zoe/battery-and-charging.html> (12.10.2016).
- [9] Tesla, Inc. "Tesla SuperCharger Specifications". <https://www.tesla.com/supercharger> (12.10.2016).
- [10] Shafie-khah M, Heydarian-Forushani H, Osorio GJ, Gil FAS, Aghaei J, Barani M, Catalao JPS. "Optimal behavior of electric vehicle parking lots as demand response aggregation agents". *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(6), 2654-2665, 2016.
- [11] Jannati J, Nazarpour D. "Optimal energy management of the smart parking lot under demand response program in the presence of the electrolyser and fuel cell as hydrogen storage system". *Energy Conversion and Management*, 138, 659-669, 2017.
- [12] Nezamoddini N, Wang Y. "Risk management and participation planning of electric vehicles in smart grids for demand response". *Energy*, 116, 836-850, 2016.
- [13] Akhavan-Rezai E, Shaaban MF, El-Saadany EF, Karray F. "New EMS to incorporate smart parking lots into demand response". *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 9(2), 1376-1386, 2018.
- [14] Heydarian-Forushani E, Golshan MEH, Shafie-khah M, Siano P. "Optimal operation of emerging flexible resources considering sub-hourly ramp product". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(2), 916-929, 2018.
- [15] Mohan V, Singh JG, Ongsakul W. "Sortino ratio based portfolio optimization considering EVs and renewable energy in microgrid power market". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(1), 219-230, 2017.
- [16] Zhang L, Li Y. "Optimal management for parking-lot electric vehicle charging by two-stage approximate dynamic programming". *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(4), 1722-1730, 2017.
- [17] Awad ASA, Awad MFS, El-Fouly THM, El-Saadany EF, Salama MMA. "Optimal resource allocation and charging prices for benefit maximization in smart PEV-parking lots". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(3), 906-915, 2017.
- [18] Dünya Bankası. "Implementing a computable general equilibrium model on GAMS : the Cameroon model". <http://documents.worldbank.org/curated/en/867181468236660050/Implementing-a-computable-general-equilibrium-model-on-GAMS-the-Cameroon-model> (12.10.2016).
- [19] IBM Analytics. "CPLEX Optimizer". <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer> (12.10.2016).
- [20] Tesla, Inc. "SuperCharger". <https://www.tesla.com/supercharger> (12.10.2016).