

# Elektrikli Araç Şarj Kümelerinin Çok Temsilcili Sistem Yaklaşımıyla Enerji Yönetimi ve Şarj Koordinasyonu

## Energy Management and Charging Coordination of Electric Vehicle Charging Clusters with a Multi-agent System Approach

    
Gülen Akyün<sup>1, 2</sup>, Erdem Gümrükçü<sup>2</sup>, Murat Yılmaz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Fakültesi/Elektrik Mühendisliği Bölümü

İstanbul Teknik Üniversitesi

akyun15@itu.edu.tr, myilmaz@itu.edu.tr

<sup>2</sup>Karmaşık Güç Sistemlerinin Otomasyonu Enstitüsü

RWTH Aachen Üniversitesi

erdem.guemruekcue@eonerc.rwth-aachen.de

### Özet

*Bu çalışmada çok sayıda şarj ünitesi içeren elektrikli araç şarj istasyonları gibi araçtan-her şeye (V2X) özellikli kümelenmiş sistemlerin enerji yönetimi için temsilci tabanlı bir yaklaşım sunulmaktadır. Önerilen yaklaşımla, şarj kümelerinin yerel yük dengeleme yeteneklerini artırmak ve tepe/ortalama güç oranını azaltmak amaçlanmaktadır. Çok temsilcili bu sistemde, her temsilci bir enerji üreticisi veya tüketicisini temsil etmektedir. Araçların park süresine ve mevcut/hedef şarj durumlarına (SOC) göre, bağlı oldukları şarj ünitelerinin rolü tüketici veya üretici olarak güncellenmektedir. Temsilciler, belirli zamanda talep ettikleri veya sağlayabilecekleri gücü hesaplamakta ve birbirleriyle müzakere etmektedirler. Bu kapsamda müzakere protokolü ayrıntılı olarak sunulmuş ve yaklaşımın yerel yük dengeleme performansını göstermek için benzetişimler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yaklaşımın farklı durumlar için performansını değerlendirmek üzere rastgele senaryolar üzerinden değerlendirmeleri de yapılmıştır.*

*Anahtar kelimeler: Elektrikli araç, araçtan her şeye, şarj kümesi, yük dengeleme, çok temsilci sistem*

### Abstract

*This paper presents an agent-based approach for energy management of vehicle-to-everything (V2X) featured clustered systems such as an electric vehicle (EV) charging stations with multiple charging units. The proposed approach, it is aimed to increase the local load balancing capabilities of the charger clusters and to reduce the peak/average power ratio. In the multi-agent system, each agent represents an energy producer or consumer. Depending on the charging duration of the vehicles and current/target state of charge (SOC), the role of the charger units is updated as consumer or producer. Agents calculate the power they demand or can provide at a specified time, and negotiate with each other. In this study, the negotiation protocol is explained in detail and simulations are made to show the local load-balancing performance of the approach. In addition, the approach is simulated for random scenarios to evaluate the performance for different situations.*

*Keywords: Electric vehicles, vehicle-to-everything, charger cluster, load-balancing, multi-agent system*

### 1. Giriş

Geleneksel elektrik güç sistemlerinin yapısı, büyük güç üreticilerinden dağıtım şebekelerine oradan da tüketiciye hiyerarşik bir iletim olarak tanımlansa da günümüzde bu kavram yerel üreticiler ve depolama sistemleri ile değişmektedir. Enerji piyasasında dağıtık enerji kaynaklarının (DER) yaygınlaşması ve bilgi teknolojisindeki gelişmeler ile geleneksel güç sistemi anlayışı yerini yerelleştirilmiş konseptlere bırakmaktadır. Tüketicilerin aynı zamanda yerel üreticiler de olabildiği bu yaklaşım entegre üretim (DG) olarak adlandırılmaktadır. Bu kavram hem enerji tüketicileri hem enerji sistemi operatörleri hem de enerji politikası geliştiricileri için son 25 yılda süregelen en dikkat çeken kavramlardan biri olmuştur [1]. Buna paralel olarak, çeşitli DER'ler ve akıllı şebeke konsepti içeren bir enerji dağıtım şebekesi anlayışına doğru bir yönelim vardır [2]. Diğer taraftan ulaşımında elektrifikasyon, akıllı şebekeye entegre şekilde DER olarak çalışabilecek elektrikli araçlara da (EV) işaret etmektedir. EV'ler, güç esneklikleri sayesinde şebekeye mobil ve dağıtılmış bir enerji depolama sistemi görevi görebilir ve yerel yükler için güç sağlayabilirler [3, 4]. Şekil 1'de araçtan şebekeye (V2G) ve şebekeden araca (G2V) güç akışı sistemi ve temel birimleri gösterilmiştir.

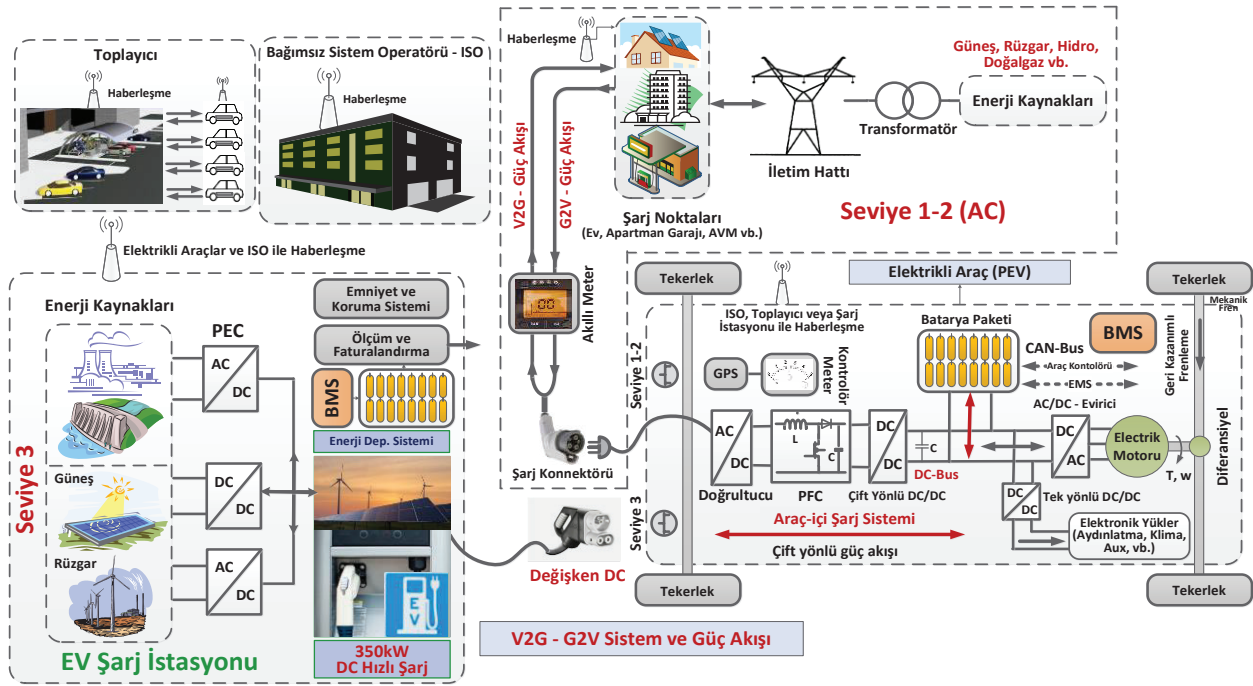
Elektrikli araçlar elektrik dağıtım şebekesi için bir yük olmanın yansıra enerji depolama olanağı da sağlayabilmektedir. Çift yönlü enerji akışına olanak veren batarya şarj sistemleri ve şarj/deşarj zamanlamasının kontrol edildiği akıllı şarj sistemleriyle beraber mevcut enerji üretim ve dağıtım kapasitesi daha güvenilir ve verimli kullanılabilirken, şebekenin güç dağılımını ve dolayısıyla tasarımını etkileyecek etkileşimler ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda VOG (kontrolsüz şarj, prize takıldığı anda şarj), V1G (akıllı şarj), V2G (şarj/deşarj), V2B (şebekeyle etkileşimsiz araçtan binaya), V2H (şebekeyle etkileşimsiz araçtan eve), V2X (araçtan her şeye – yayaya V2P, araca V2V, alt yapıya V2I, buluta V2C) bağlantılı mobilite (CM) olarak tanımlanan yapılar ve özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

V2G teknolojilerinde enerji akışının çift taraflı olması gibi veri akışı da çift yönlüdür. Şebeke ve elektrikli araçlar arasında veri aktarımı karmaşık bir iletişim yapısına neden olur. EV toplu

şarjı için bir şarj istasyonu tasarlamak için kesintisiz iletişim alt yapısı gereklidir. Ayrıca, olası problemleri önlemek için uyulması gereken belirli standartlar oluşturulmuştur. Elektrikli araçlar için V2G teknolojisinin uygulamasında standartlar ISO ve IEC gibi organizasyonlar tarafından dört ana başlıkta belirlenmiştir; fiş, iletişim ağı şeması, şarj topolojisi ve güvenlik standartları [4, 5].

EV kullanımındaki artış yerel dağıtım şebekesinde güç talebini artırmakta ve gerilim dengesizliği, aşırı yük, güç kayıpları, frekans değişimi, harmonikler gibi olası sorunları da beraberinde getirmektedir [5]. Özellikle EV'lerin toplu şarj yükü, dağıtım şebekesinde aşırı yüklenmeye neden olacaktır. Akıllı şarj sistemleri, aşırı yüklenmenin neden olduğu sorunları azaltabilir, şebeke güvenilirliğinin sağlanmasına yardımcı olabilir ve enerji ekonomisini geliştirebilir [6, 7]. EV'lerin esnekliğini kullanarak düşük enerji talebinin şarj sürelerini değiştirmek gibi basit çözümler bile tepe yükü azaltmak için

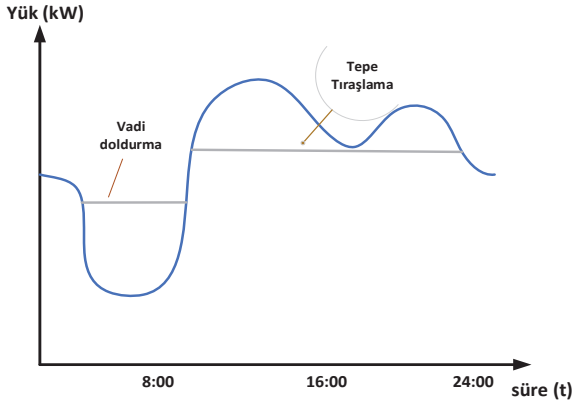
yeterli olabilir. Böylece aynı zamanda yük profilindeki vadiler yani enerji talebinin daha az olduğu zamanları gösteren kısımlar da doldurulabilir ve yük profili iyileştirilebilir [8]. Şekil 2'de bir yük profilinde vadi doldurma ve tepe tıraşlama gösterilmiştir. Bu kapsamda öne çıkan diğer bir konsept ise, şarj istasyonlarında park halinde şarj edilmeden bekleyen EV'lerin enerji depolama gücünden en iyi şekilde yararlanarak şebeke kalitesini iyileştirmek için önerilen V2X konseptidir. Bu konsept çift yönlü şarj ile EV'lerin diğer kaynaklara güç aktarımını mümkün kılar ve EV'ler park sırasında dağıtılmış bir enerji kaynağı olarak davranabilir. V2X uygulamasının araç batarya paketinin yaşlanması, elektrikli ekipmanlar üzerindeki etkileri ve yatırım maliyetleri gibi dezavantajları göz ardı edilemese de bu teknolojinin yük dengeleme, tepe tıraşlama, harmoniklerin düzeltilmesi, vadi doldurma, yenilenebilir enerji sistemlerinin (RES) optimum kullanımı ve desteklenmesi gibi birçok potansiyel faydası umut vericidir [9-12].



Şekil 1: Araçtan şebekeye (V2G) ve şebekeden araca (G2V) güç akış sistemi ve temel birimler

Tablo 1: Elektrikli araç şarj/deşarj sistemleri ve özellikleri

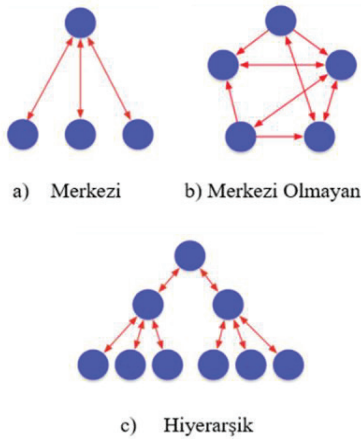
Özellikler	V0G	V1G	V2G	V2B/H	V2X
Kontrol edilebilir yük; dengeleme, kaydırma, yedekleme		X	X	X	X
Çift yönlü güç akışı (yan hizmetler)			X		X
Uzak bir sisteme güç sağlama					X
Yenilenebilir kaynakların optimum kullanımı, yük kaydırması			X	X	X
Akıllı veya zamanlamalı şarj		X	X	X	X
Diğer elektrikli araçlara enerji aktarma					X
Gerçek zamanlı haberleşme		X	X	X	X
Şebeke ile haberleşme		X	X		X
Bina/ev ile haberleşme				X	X



Şekil 2: Vadi Doldurma ve Tepe Tıraşlama

Elektrikli araçlar gibi depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji gibi yeni nesil enerji kaynakları ile şebekedeki birçok unsurun enerji akışını izlemek ve kontrol etmek için bir enerji yönetim sistemine (EMS) ihtiyaç duyulmaktadır. EV şarj kümeleri için EMS hedefleri belirlenirken, ekonomik, çevresel veya teknik faktörlerin yanı sıra kullanıcının menfaatleri de dikkate alınmaktadır. Ekonomik temelli bu hedefler doğrultusunda kontrol yönteminin mimari yapısı belirlenir ve tepe yükün en aza indirilmesi veya yük profilinin düzleştirilmesi gibi amaçlara dayalı algoritmalar geliştirilir. Bu kapsamdaki çeşitli araştırmalar çok etmenli sistemler, markov zincirleri, stokastik algoritma gibi stratejiler kullanmaktadır. Ayrıca Konveks optimizasyon, Dinamik optimizasyon, Oyun teorisi, Genetik algoritma (GA), Parçacık sürüşü optimizasyonu (PSO) gibi bazı araçlar enerji yönetim sistemi problemlerini çözmek için sıkça kullanılır [5].

EMS uygulamaları genel olarak bu kontrol mimarilerine bağlıdır; merkezi ve merkezi olmayan olarak ayrılabilir. Hiyerarşik EMS kavramı bazı çalışmalarda merkezi olmayan EMS yaklaşımı içinde yer alsa da yeni kaynaklarda bu yaklaşıma her iki mimari türünün avantajlarını birleştiren üçüncü bir yaklaşım olarak yer verilmektedir [13, 14]. Şekil 3'te bu mimarilerin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3: Enerji Yönetim Sistemi Mimarileri

Elektrikli araçlar yaygınlaştıkça, EV'lerin öngörülemez davranışları nedeniyle güç talebi yönetimi daha zor hale gelecektir. Bir EV filosundaki şarj süreçlerini temsil edebilecek etkili bir modele ihtiyaç vardır. Mets ve

Verschueren, yalnızca yerel yük sinyali aracılığıyla elde edilen yük bilgilerini gerektiren ve iletişim gerektirmeyen bir enerji yönetimi stratejisiyle küresel yük profilini düzleştirmeyi amaçlamıştır [8]. Sonuçlar global yük profilinde iyileşme vaat etse de kullanım kolaylığı tartışmalıdır. Elektrikli araç şarjı ile ilgili buna benzer birçok çalışma, bir operatörü EV şarjından sorumlu kılmaktadır. Ancak operatörün küresel hedeflerini ön planda tutan bu yaklaşım, V2X hizmetleri sağlayan EV kullanıcılarının memnuniyetini her zaman dikkate almamaktadır. Buna karşılık, son yayınlar her şarj cihazının hesaplama kabiliyetine sahip olduğunu varsayarak karar sürecini müzakere eden temsilci tabanlı bir şema önermektedir [15]. Literatürde, EV filolarının şarj kontrolünde temsilci tabanlı yaklaşım, yük dengeleme, frekans ve gerilim regülasyonu gibi çeşitli hedeflere ulaşmak için kullanılmıştır [16-21]. Temsilci tabanlı çalışmalardan elde edilen sonuçlar, EV kullanıcılarının menfaatleri açısından olumlu sonuçlar göstermektedir. Aljohani ve ark. Güney Florida'dan alınan geçmiş verilere dayalı olarak mikro şebeke işletmelerinde EV'lerin şarjına yönelik dinamik fiyatlandırma için çok temsilcili hiyerarşik bir mimari önermektedir [22]. Sonuçlar, diğer yöntemlere kıyasla şarj maliyetlerinde önemli bir düşüş olduğunu göstermektedir. Valogianni ve ark. hem EV araç sahiplerinin çıkarları hem de şebeke istikrarı hedeflerini bir araya getirerek çok temsilcili EV şarj koordinasyonu önermektedir [23]. Ancak, önerilen yaklaşım V2X'i desteklememektedir.

Bu çalışmada kümelmiş sistemlerde EV şarjını yönetmek ve bir EV kümesi içinde güç dengelemesi sağlamak için temsilci tabanlı bir enerji yönetim yaklaşımı önerilmiştir. Tepe gücün düşürülmesi dengeli ve verimli bir yük profili sağlayacak ve bu da şebeke kalitesini iyileştirecektir. Bu enerji yönetimi konsepti, SwarmGrid-X algoritmasının değiştirilmiş bir versiyonuna ve tüketici-üretici temsilcileri arasındaki bir müzakere protokolüne dayanmaktadır. Önceki SwarmGrid uygulamalarından farklı olarak, bu çalışmada uygulanan senaryolarda şarj üniteleri çift yönlüdür. Yani hem araçtan-şebekeye deşarj hem de şebekeden-araca şarj yapılabilmektedir. Ayrıca, şarj ünitelerine bağlı EV'lerin talep profilleri önceki senaryolarda aynı iken, bu çalışmada ele alınan senaryolarda EV'lerin şarj talepleri heterojendir ve şarj talep profilleri ve araçların esnekliği çeşitlidir. Bu nedenle, bu çalışmada ilham alınan algoritma bu ihtiyaçlara göre değiştirilmiş ve kümelmiş EV filosunun enerji yönetiminin taleplerine maliyet faktörü göz ardı edilerek uyarlanmıştır. 2. Bölüm'de enerji yönetim sistemleri karşılaştırmalı olarak ele alınmış ve önerilen yaklaşımın çıkış noktasından bahsedilmiştir. 3. Bölümde yaklaşımın detayları ve şarj kümelerine entegrasyonu ele alınmıştır. 4. Bölüm'de yaklaşımın benzetişim sonuçları üzerinde tartışılmış, 5. Bölümde ise sonuçlar açıklanmıştır.

## 2. EV Şarjı için Güç Akışı Kontrolü ve Enerji Yönetim Sistemi

Elektrikli araçların şebekeye entegrasyonu, şebeke bileşenlerinin ve ekipmanlarının aşırı yüklenmesine neden olabilecek bir ek güç talebi yaratır. Artan EV şarj talebi nedeniyle, transformatörler ve besleme kabloları gibi yerel dağıtım elemanları yüksek stres seviyesinden etkilenmektedir. Bu sorunları önlemek ve güç tedarikini sorunsuz bir şekilde sürdürmek için EV şarjını koordine etmek gerekmektedir. Hem dağıtım şebekesinin güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamak

hem de EV şarj talebini en iyi şekilde karşılamak ve kullanıcı memnuniyetini sağlamak, EV şarjı için EMS ile mümkündür. EMS, güç sisteminin arz-talep dengesini korumak için enerji kaynakları arasındaki enerji akışını koordine etmektedir. Bu sayede yüklerin taleplerinin sürekli olarak karşılanması sağlanırken güç sisteminin güvenilirliği, kararlılığı ve verimi artırılır. EV şarjı için enerji yönetimi yaklaşımı belirlenirken, pik yükün azaltılması ve yük profilinin düzleştirilmesi gibi hedeflere bağlı olarak, şarj koordinasyon yöntemleri ve şarj algoritmaları geliştirilmektedir. EV şarj istasyonlarında güç akışını kontrol ederken merkezi ve merkezi olmayan koordinasyon yöntemleri ön plana çıkmaktadır.

Merkezi EMS yaklaşımında, bir merkezi birim veya toplayıcı şebeke kalitesi ve müşteri önceliklerini dikkate alacak şekilde optimum bütünsel çözümü elde etmeyi hedeflemektedir. Bu yaklaşım, tüm parametreleri dikkate alarak toplam işletme maliyetini düşürme açısından merkezi olmayan mimariye göre avantajlıdır. Öte yandan, tüm bilgiler tek bir birimde toplanarak analiz edildiğinden, birim sayısına bağlı olarak hesaplama yükü artar. Merkezi olmayan yaklaşım yönteminde ise herhangi bir merkezi kontrol birimine bağımlılık yoktur. Yerel birimler kendi planlarını oluşturarak diğer yerel birimlerle iletişim kurabilmektedir. Yardımcı bir merkezi birim bu planları bir araya getirebilir ancak karar verme yetkisi olmaz. Bu yaklaşımda, kullanıcı memnuniyeti ve elektrik fiyatı şarj kararını belirleyen en önemli faktörlerdir. Merkezi olmayan EMS, sunduğu operasyon esnekliği nedeniyle genişletilebilir uygulamalar için uygundur. Bununla birlikte, merkezi olmayan koordinasyonda, her EV'in talebi öncelikli olduğundan, genel sistem için optimum çözüm her zaman garanti edilemeyebilir.

Tablo 2: Enerji yönetim yaklaşımları

	Avantajlar	Dezavantajlar
<b>Merkezi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Küresel optimizasyon</li> <li>Düşük işletme maliyeti</li> <li>Kolay implementasyon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Müşteri gizliliğinin olmaması</li> <li>Karmaşık ve pahalı iletişim</li> <li>Yüksek hesaplama yükü</li> <li>Düşük genişletilebilirlik</li> </ul>
<b>Merkezi Olmayan</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Daha yüksek müşteri gizliliği</li> <li>Dağıtılmış hesaplama yükü</li> <li>Yüksek genişletilebilirlik</li> <li>Daha yüksek tüketici kabulü</li> <li>Daha yüksek hata toleransı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Daha yüksek işletme maliyeti</li> <li>Kesin optimizasyonda eksiklik</li> <li>Etkili iletişim sistemi ihtiyacı</li> </ul>
<b>Hiyerarşik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Daha yüksek genişletilebilirlik</li> <li>Daha yüksek güvenilirlik</li> <li>Yüksek doğruluk</li> <li>Güç kalitesiyle başa çıkma İşletme maliyetini yönetme</li> <li>EV filoları için uyarlanabilirlik</li> <li>Katmanlı kontrol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Karmaşık kontrol</li> <li>Zor implementasyon</li> </ul>

Merkezi ve merkezi olmayan mimarinin avantajlarını birleştiren üçüncü bir yapı olan hiyerarşik kontrol mimarisinde yerel kontrol birimleri ve bunlara bilgi sağlayan merkezi bir birim bulunmaktadır. Aslında hiyerarşik kontrol, birçok dolaylı ve doğrudan toplayıcıya bölünerek oluşturulan yapıları nedeniyle tam merkezi veya merkezi olmayan kontrol olarak sınıflandırılmamaktadır. Bu yapıda merkezi bir kontrolör ve ona bilgi sağlayan yerel kontrolörler bulunmaktadır. Sağladığı katmanlı yapı sayesinde merkezi mimarinin aşırı işlem yükünü ortadan kaldırırken, merkezi olmayan yapının global optimizasyon sağlamaması gibi dezavantajlara çözüm olabilir. Bu mimarinin handikabı herhangi bir seviyede hata olması durumunda bilgi aktarımının kesintiye uğrama potansiyelidir. Bu üç mimarinin avantajları ve dezavantajları Tablo 2'de karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

### 2.1. Temsilci Tabanlı Koordinasyon Yaklaşımı

Temsilci tabanlı yaklaşım veya çok temsilcili sistem (MAS), literatürde merkezi olmayan veya hiyerarşik koordinasyon altındaki alternatif bir tekniktir. MAS, iki veya daha fazla temsilcinin küresel ortak bir hedefe ulaşmak için kendi yerel hedeflerine ulaştığı bir sistemdir. Esnekliği ve genişletilebilirliği nedeniyle, bu yaklaşım dağıtım şebekesi uygulamalarında ve DER'lerde giderek daha fazla kullanılmaktadır [16, 17].

Temsilci tabanlı modelleme yaklaşımı, kararlarını yerel olarak veren birçok birimden oluşan bir yapının sistem davranışını, bileşenleri olan akıllı birimlerin birbiriyle ilişkisi üzerinden ifade etmeyi sağlar. Modelleme yapılırken tüm temsilciler aynı şekilde modellenirse de girdi ve çıktı parametreleri ve çevre koşulları farklı olabilir. Sistem modellemesini kolaylaştıran özelliklerden biri temsilcilerin tanımlanıp, modellenenilmesi ve daha sonra kopyalanarak çoğaltılabilmesidir. Ayrıca bu yaklaşımın en büyük avantajlarından biri de benzetişim sırasında bile temsilcilerin durumlarının dinamik olarak değişebilmesi, var olan temsilcilerin kaldırılması veya yeni temsilciler eklenerek sistemin sürekli güncellenebilmesidir. Bu nedenle temsilci tabanlı yaklaşım, uzun vadeli ve değişken senaryolar için çok uygundur. Temsilci tabanlı modelleme, temsilci tabanlı koordinasyon konseptlerinin enerji sistemlerinde bilgisayarlar aracılığıyla uygulamasını kolaylaştırır. Bunun için, modellenen davranışı benzetişim ortamında üretmeye yarayan yazılımların, temsilcilerin otonom kararlarını belirleyen bilgisayarlarda çalıştırılması yeterlidir. Temsilci tabanlı koordinasyon yaklaşımının bir başka avantajı da tek birimdeki bir arızanın sistemin geri kalanını etkilememesidir. Bu, sistemi potansiyel arızalara karşı daha dirençli hale getirmektedir.

Elektrikli araçların şarjı için enerji yönetiminde ise temsilci tabanlı yaklaşım, şarj cihazlarının veya EV'lerin temsilci olarak adlandırıldığı ve karar sürecinin merkezi bir yapıdan bağımsız olarak yürütüldüğü koordinasyonu temsil eder. Bu yaklaşımda öncelik genellikle kullanıcı memnuniyetini sağlamaktır. Temsilcilerin her biri, elektrikli araç şarjını yönetmek için gereken verileri bilir ve diğer temsilcilerle görüşebilir. Temsilci, yerel bilgi ve müzakereler sonucunda bir karar verebilir. Ancak bu durumda her temsilci kendi kararını vereceği için güvenilirlik açısından süreç sürekli tekrarlanmalıdır. Ayrıca sistemin genel durumunun iyiliği için

genellikle çok temsilcili olarak adlandırılan hiyerarşik mimariler kullanılabilir.

Dağıtık enerji kaynaklarının enerji yönetimi için umut vaat eden bir yöntem olarak görülen MAS, beraberinde birçok karmaşıklığı da getirmektedir. Temsilci sayısındaki artışla birlikte iletişim karmaşıklığının artması kaçınılmaz olacaktır. Buna bir çözüm olarak, Dähling ve diğerleri tamamen dağıtılmış ve hiyerarşik bir kontrole dayalı SwarmGrid-X konseptini önermektedir [24]. Temel olarak, Swarmgrid-X, Kolen ve diğerleri tarafından önerilen Swarmgrid [25] konseptinin genişletilmiş bir versiyonudur ve MAS tabanlıdır. Hem tüketici hem de üretici olarak hareket edebilen temsilciler, yerel hedeflerine ulaşmak için çalışma aralıklarını hesaplayarak esnekliklerini ortaya koymakta, birbirleriyle müzakere etmektedirler. Üniteler, içinde buldukları sürü adı verilen topluluk içindeki güç tüketimini aynı üretimle nötralize etmeye çalışırlar. Çalışmalar, yerel dengeleme üzerine yapılan benzetişimler, DER'lere uygun ve etkin bir enerji yönetimi sağlayabileceğini ve algoritmanın DER'lerin dağıtım şebekesine katılımına olumlu katkı sağlayacağını göstermektedir.

### 3. Temsilci Tabanlı Yaklaşımın Şarj Kümelerine Entegrasyonu

Çalışma kapsamında önerilen enerji yönetim yaklaşımı ve yazılım algoritması, kümelmiş EV şarj cihazlarına entegre edilmiştir. Yaklaşım, bir şarj ünitesinde bulunan her bir şarj ünitesinin, merkezi bir ünite olmaksızın birbiriyle anlaşması ve böylece şarj ünitesi içerisinde güç nötralizasyonu hedefine ulaşması amaçlanmış ve bu kapsamda önerilen yaklaşımın ayrıntıları ele alınmıştır. Bu yaklaşım tamamen merkezi olmayan yapısı ile temsilcilerin yerel hedefleri doğrultusunda sürü kontrolü sağlamaktadır. Temsilci davranışı, yerel bilgilere ve diğer temsilcilerle müzakerelerin sonucuna dayalı olarak temsilci tarafından belirlenmekte ve eyleme geçilmektedir. Temsilciler her zaman her temsilci ile iletişim kurmak zorunda değildir ve iletişim ortakları zaman içinde değişebilmektedir. Bununla birlikte, her temsilcinin belirli bir zaman diliminde belirli bir iletişim ortakları listesi vardır. Sürü davranışı, temsilciler arasındaki iletişim ve temsilcilerin bireysel kontrol davranışlarının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yaklaşımda, sistem operatörü müdahalesini en aza indirmesine ve yerel davranışa yüksek öncelik verilmesine rağmen, gerektiğinde sistem operatöründen gelen sinyallere öncelik verecek şekilde temsilci davranış kuralları tasarlanabilmektedir. Dağıtım şebekesi kontrolünün dağıtıldığı, yerel arızalara ve haberleşme sorunlarına karşı dayanıklılığının artırıldığı bu yaklaşımda, tek bir birim arızası durumunda sistem çalışır durumda olacaktır.

Bir şarj istasyonundaki her EV'in bağlı olduğu her bir şarj ünitesi (CU), hesaplama kabiliyetine sahip bir temsilcidir ve üretici veya tüketici olarak atanabilir. Temsilciler tarafından temsil edilen CU'lerin toleransları, EV'lerin şarj taleplerinin aciliyetine göre hesaplanır ve temsilciler, üretici veya tüketici olarak atanır. Daha sonra merkezi bir birimden bağımsız olarak diğer temsilcilerle iletişim kurarak sağlayabilecekleri veya talep ettikleri güçleri birbirlerine sunarlar. İki temsilci arasındaki görüşmeler sonucunda güç akışı başlar ve küme içinde güç nötralizasyonu sağlanmaya çalışılır.

Temsilciler arasındaki iletişimi yönetmek için Akıllı Fiziksel Temsilciler Kuruluşu (Intelligent Physical Agents Foundation-FIPA) standartlarında çeşitli görüşme protokolleri sunulmaktadır [26]. Bununla birlikte, çalışma kapsamında, gerçek dünyadaki uygulamada gerekli olabilecek kısıtlamalar dikkate alınmamıştır. Aynı şekilde gerekli iletişim altyapısına ilişkin veri alışverişinin de uygun ve güvenli bir şekilde yapıldığı varsayılmaktadır. Çalışma, yalnızca temsilci tabanlı yaklaşımı EV şarj kümelerine entegre etmenin fizibilitesini araştırmaktadır. Bu nedenle, odak noktası daha çok temsilciler arasındaki kontrol davranışı ve müzakere süreçleridir.

Birçok MAS tabanlı uygulamada, temsilcilerin yerel kontrol davranışı genel bir durum değişkeni olarak ayarlanır ve sistem davranışı tüm bu davranışların sonucudur. Ancak bu, anlaşma algoritmasında olası hatalar olması durumunda sistem davranışını tamamen yanıtlanabilir. Bu makalede ele alınan yaklaşımda ise kontrol davranışı tamamen yerel bilgilere ve sürü içindeki müzakerelere dayalıdır, hiçbir global değişken dikkate alınmaz. Bu şekilde DER'lere kontrol kararı yetkisi verilmektedir. Önerilen yaklaşımdaki sistem, mevcut elektrik şebekesiyle uyumlu esnek temsilci sürülerinin oluşturulmasına izin vermektedir.

#### 3.1. Bir Temsilcinin Rolünün Belirlenmesi

Elektrikli araçların bağlı olduğu şarj ünitelerini temsil eden temsilcilerin rolü her bir zaman adımında güncellenmektedir. Her temsilci için iki rol seçeneği mümkündür:

- EV batarya paketinin şarj talebini karşılamak için üretici arayan bir tüketici,
- EV batarya paketini deşarj ederek başka bir EV batarya paketini şarj edebilen bir üretici.

Bir temsilcinin üretici veya tüketici olarak atanması şarjın belirli süre kesilmesine karşı toleransına bağlıdır. Daha yüksek toleransa sahip bir temsilci, daha esnek bir enerji kaynağı olduğundan üretici görevi görür. Bu tolerans değeri ve rol, temsilci tarafından temsil edilen EV'in mevcut ve hedef batarya SOC'sine ve park süresine göre belirlenir.

Denklem 1'de  $m(t)$  olarak belirtilen parametre, temsilcinin  $t$  anındaki toleransıdır. Bu değer EV'in şarj talebine ve şarj cihazının gücüne ve talebin karşılanma hızına göre hesaplanır.  $m(t)$  ile gösterilen anlık tolerans, her zaman adımında güncellenen dinamik bir değerdir.

$$m(t) = 1 - \frac{\frac{soc(t_h) - soc(t)}{P_s} E}{t_h - t} \quad (1)$$

$SOC(t_h)$  ve  $SOC(t)$  parametreleri sırasıyla EV'in hedef ve mevcut şarj durumunu gösterir.  $E$ , EV bataryasının kWh cinsinden enerji kapasitesini ve  $P_s$ , şarj cihazının gücünü temsil eder.  $t_h$  parametresi ise EV'in tahmini kalkış zamanını göstermektedir.

Ayrıca, temsilcinin rolünü belirlemek üzere, 0 ile 1 arasında bir eşik değeri  $m_s$  belirlenir. Temsilcinin toleransının  $m_s$  değerinden büyük olması, EV'in hesaplanan zaman adımı için şarj gecikmesini tolere edebileceğini ve o süre içinde bataryasını boşaltabileceğini gösterir. Bu durumda temsilci V2X işlemini gerçekleştirebilen bir üretici rolü üstlenir. Öte yandan,  $m_s$

eşiğinden düşük bir toleransa sahip bir temsilci tüketici temsilcisi olarak atanır. Denklem 2'de temsilci rolünün belirli bir eşiğe göre atanması gösterilmektedir.

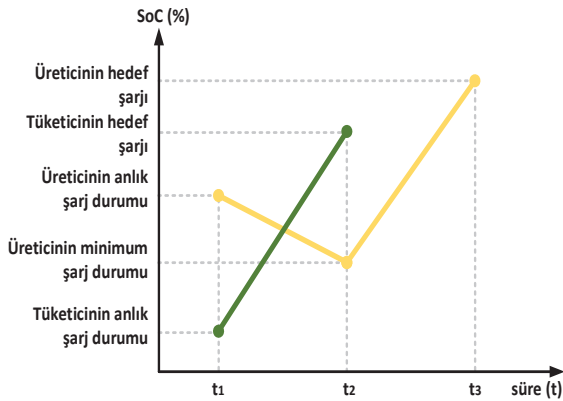
$$rol = \begin{cases} \text{tüketici, } m(t) < m_\delta \\ \text{üretici, } m(t) \geq m_\delta \end{cases} \quad (2)$$

### 3.2. Bir Temsilcinin İşlem Aralığı

Aynı sürüdeki üretici ve tüketici arasındaki müzakere süreci başlamadan önce, her iki temsilci de aktif çalışma aralıklarını belirler. Bunun için tüketici temsilcisi  $t_1$ 'den  $t_2$  süresine kadar (sözleşme süresi olarak) talep ettiği gücü, üretici temsilci ise bu süre zarfında sağlayabileceği gücü hesaplar. Tüketici temsilcinin,  $t_1$ - $t_2$  zaman aralığında talep ettiği güç  $P_t$  Denklem 3'teki gibi hesaplanır. Burada  $SOC_t(t_2)$  ve  $SOC_t(t_1)$  sırasıyla tüketici temsilcinin hedef ve mevcut SOC'sini,  $E_t$  ise enerji kapasitesini temsil eder. EV bataryasının şarj gücü  $P_s$  şarj cihazının gücü kadar olabilir.

$$P_t = \min \left\{ P_s, \frac{(SOC_t(t_2) - SOC_t(t_1)) * E_t}{t_2 - t_1} \right\} \quad (3)$$

Üretici temsilci ise önce  $t_2$  anında (kontratın sonunda) sahip olabileceği minimum SOC'yi, buna göre de  $t_1$ - $t_2$  arasında verebileceği gücü hesaplamalıdır. Bunu açıklayabilmek için Şekil 4'te, iki EV'yi temsil eden biri üretici diğeri tüketici olarak atanan iki temsilcinin SOC değişimi basit bir örnek olarak gösterilmiştir. Sarı çizgi,  $t_1$  zamanında üretici olarak atanan temsilciyi ve yeşil çizgi,  $t_1$  zamanında tüketici olarak atanan temsilciyi temsil etmektedir.  $t_1$ - $t_2$  zaman aralığında üretici temsilci bataryayı deşarj ederek tüketici temsilciyi şarj eder. Daha sonra kendi bataryasını (şebekeden veya başka bir araçtan)  $t_2$ - $t_3$  aralığında şarj eder. Bu durumda üretici temsilcinin  $t_3$  hareket anına kadar hedef SOC'ye ulaşabilmesi için  $t_2$  anında sahip olması gereken minimum SOC'yi hesaplaması gerekir.



Şekil 4: Temsilcilerin SOC değişimleri

Denklem 4'te gösterildiği gibi, tüketici temsilcinin  $t_2$  zamanındaki sahip olması gereken minimum SOC'si, tahmini kalkış zamanındaki hedef  $SOC_u(t_h)$ , şarj gücü  $P_s$  ve EV batarya paketinin kapasitesi  $E_u$  ile hesaplanır. Daha sonra üreticinin  $t_1$ - $t_2$  zaman diliminde sağlayabileceği güç, Denklem 5'te ki gibi mevcut SOC  $SOC_u(t_1)$ , ve minimum SOC  $SOC_u(t_2)$ , ve batarya kapasitesi  $E_u$  'ye göre hesaplanır. Üreticinin sağlayabileceği güç, şarj cihazının maksimum gücü kadar olabilir. Bu değerler her zaman aralığı için sürekli olarak hesaplanır.

$$SOC_u(t_2) = SOC_u(t_h) - \frac{P_s \cdot (t_h - t_2)}{E_u} \quad (4)$$

$$P_u = \min \left\{ P_s, \frac{(SOC_u(t_1) - SOC_u(t_2)) * E_u}{t_2 - t_1} \right\} \quad (5)$$

Bu hesaplamalar yapılırken kullanıcıların V2X işlemine katılma istekliliği hesaplamalara dahil edilmemiş, önerilen enerji yönetim yaklaşımının uygulanabilirliği için sadece teknik hesaplamalar yapılmıştır.

### 3.3. Müzakere Protokolü

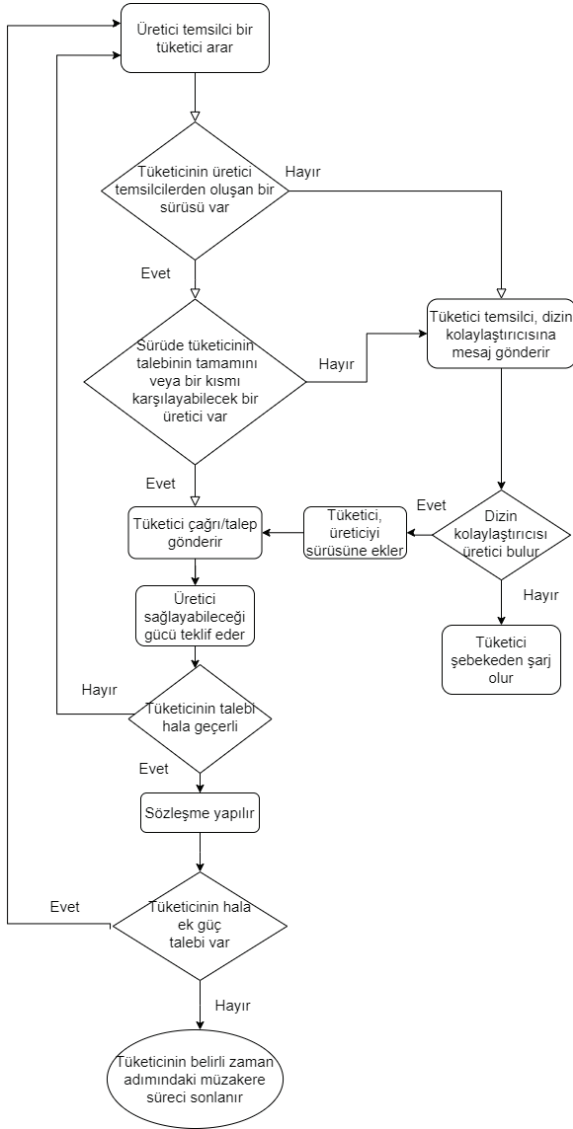
Müzakereler her bir temsilcinin çalışma aralığına göre yapıldığından elektrikli araçların bireysel SOC hedefleriyle çelişmeyen sonuçlar üretilir. Müzakere sonucunda yerel güç dengelemesi de sağlandığı için küresel hedeflere de ulaşılmaktadır. Bu müzakereler her zaman iki temsilci arasında olmasına rağmen, bir temsilci aynı zaman adımı için birden fazla temsilci ile görüşebilmektedir. Müzakereyi her zaman bir tüketici başlatır. Tüketici temsilcisi, sürüsünde güç talebinin bir kısmını veya tamamını karşılayacak bir üretici arar. Güç talebine bağlı olarak, bir temsilcinin sürüsü büyüyebilir veya küçülebilir.

#### 3.3.1. Dizin kolaylaştırıcısı

Dizin Kolaylaştırıcısı (DK), tüm kümelerdeki temsilcilerin dinamik olarak değişen bilgilerini bilen bir hizmet listesi veya sunucudur. Temsilcilerin türleri ve konumları, DK'de saklanan bilgilerdir. Üretici arayan tüketici temsilcilerine talep edildiğinde bilgi verebilmektedir, ancak herhangi bir karar verme yetkisi bulunmamaktadır. Ayrıca DK, kümedeki temsilcilerin diğer parametreleri hakkında bilgi sahibi değildir. Talebini karşılamak için daha fazla üreticiye ihtiyaç duyan veya sürüsünde üretici olmayan bir tüketici, DK'ya bir mesaj gönderir. DK belirtilen mesafede üretici temsilcileri bulur ve bilgilerini talep eden tüketici ile paylaşır. Bu durumda, her iki temsilci de birbirinin sürüsüne eklenir.

#### 3.3.2. Temsilciler arasındaki sözleşmeler

Tüketici temsilci sürüsünde bulunan üretici temsilciye teklif çağrısı gönderir. Üretici belirtilen süre boyunca istenilen gücü sağlayabilecek ise bu çağrıya teklif ile karşılık verir; tüketici teklifi kabul eder ve sözleşme yapılır. Böylece müzakere tamamlanır ve güç akışı başlar. Aksi halde üretici tüketiciye ret mesajı gönderir ve tüketici yeniden arama sürecini başlatır. Tüketici temsilci talebinin sadece bir kısmını üreticiden karşılıyorsa sözleşme yapılır, ancak tüketici kalan talebi karşılamak için başka bir üretici daha arar. Bir temsilci aynı anda birden fazla temsilci ile sözleşme yapabilir. Bu müzakereler, her adımda güç talebine göre yeni parametrelerle sürekli olarak güncellenir. Tüketici talebinin tamamını veya bir kısmını üretici temsilcilerden karşılayamaması durumunda, kalan güç talebini şebekeden karşılar. Şekil 5'te temsilcilerin müzakere süreci akış diyagramıyla ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5: Önerilen yöntemde temsilcilerin müzakere süreci akış diyagramı

#### 4. Performans Değerlendirmesi

Bu bölümde önerilen ve geliştirilen enerji yönetim yaklaşımının performans değerlendirilmesi yapılarak sonuçlar üzerinde tartışılmaktadır. Hem önerilen yaklaşımla yapılan benzetişimler farklı tolerans eşikleri için karşılaştırılarak tolerans eşığının algoritmanın performansına etkisi incelenmekte hem de önerilen yaklaşımın kontrolsüz EV şarjına kıyasla performansı değerlendirilmektedir. Bu testlerle, yaklaşımın tepe/ortalama güç oranına etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmaktadır. Önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek için Python programlama dili kullanılmıştır. Nesne yönelimli programlama (OOP-Object Oriented Programming) yaklaşımı ile çeşitli özneliklere ve yöntemlere sahip sınıflar oluşturulmuştur. Böylece farklı senaryo durumlarına kolaylıkla adapte olabilen bir yazılım algoritması geliştirilmiştir.

Senaryodaki şarj sistemi şarj kümelerinden oluşmaktadır. Belirli zaman aralıklarında şarj istasyonuna gelen her EV, mevcut bir şarj ünitesine rastgele bağlanır. Bağlanan EV'lerin

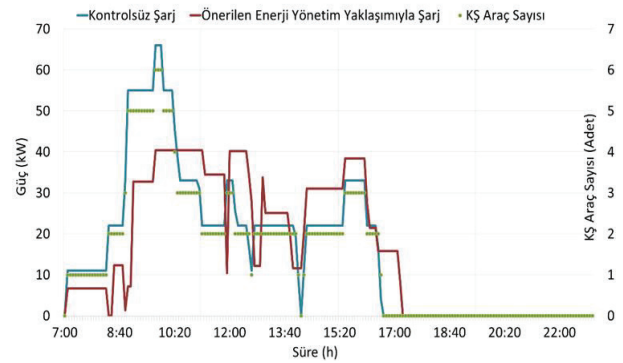
hedef ve mevcut şarj durumu, park süresi gibi değerler senaryoda rastgele atanmaktadır. Bunun amacı ise algoritmanın dinamik olarak değişen şarj talepleri karşısında performansını test etmektir. Önceki bölümde açıklandığı gibi, temsilciler şarj ünitelerini temsil eder. Her zaman adımında, dizin kolaylaştırıcısındaki temsilcilerin bilgileri yeni gelen EV'leri içerecek ve mevcut temsilcilerin toleransını yeniden hesaplayacak şekilde güncellenir. Şarj ünitesine bağlı EV'nin anlık ve hedef SOC'si, batarya kapasitesi ve şarja takılı kalma (veya park) süresi gibi bilgilere göre anlık toleransı hesaplanır. Belirlenen tolerans eşığına göre temsilciler, üretici veya tüketici rolünü üstlenirler. Tüketici temsilci, Dizin Kolaylaştırıcısından üretici bilgilerini ister ve ihtiyacına göre sürüsüne ekler ve müzakereye başlar.

#### 4.1. Tepe Güç Azaltma

Önerilen yaklaşımla, şarj kümeleri içindeki yerel yük dengeleme yeteneklerinin artırılması ve şarj kümelerinin tepe/ortalama güç oranının düşürülmesi amaçlanmaktadır. Performans testlerinde, algoritma bir senaryoda uygulanmıştır:

- Her biri 11 kW'lık 12 şarj cihazı içeren 10 şarj kümesi,
- Yaklaşık 1 ile 6 saat arasında değişen elektrikli araç park etme süresi,
- Bağlanma anında SOC değeri %20 ile %80 arasında değişen 55 kWh batarya kapasiteli EV'ler,
- Her 5 dakikada bir yenilenen sözleşmeler.

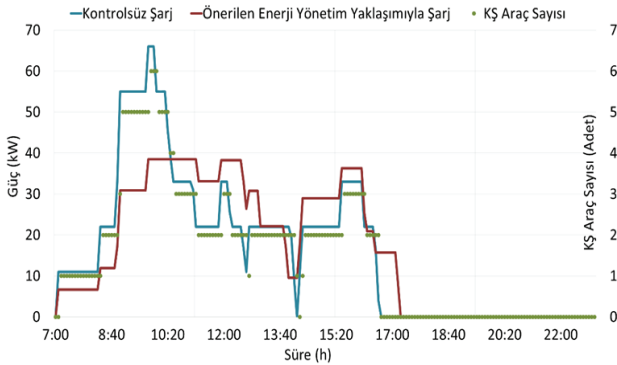
Farklı  $m_\delta$  değerleri için seçilen rastgele bir kümedeki (bu senaryo için küme 10'daki) güç profili Şekil 5 ve 6'da gösterilmiştir. Önerilen yaklaşım uygulanarak gerçekleştirilen benzetişimlere ek olarak, kontrolsüz şarj durumu da aynı senaryoda incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 5,  $m_\delta = 0.50$  eşik değeri ile uygulanan temsilci tabanlı kontrol yaklaşımına karşı kontrolsüz çalışma durumundaki bir şarj kümesinin güç profilini göstermektedir. Diğer taraftan Şekil 6,  $m_\delta = 0.75$  eşik değeriyle kontrolsüz durumu kıyaslanmaktadır.



Şekil 6: Kontrolsüz şarj ve  $m_\delta = 0.50$  ile önerilen yaklaşım

Şekil 5'de  $m(t)$  değeri 0.5'ten büyük olan temsilciler üretici olarak atanırken, Şekil 6'da  $m(t)$  değeri 0.75'ten büyük olan temsilciler üreticidir. İlk durumda, kümedeki tepe güç talebi %39 azalırken, ikinci durumda yaklaşık %41 azalma gözlemlenmiştir. Burada, daha yüksek  $m_\delta$  belirlemesi durumunda yani daha az temsilcinin üretici olarak atanmasına rağmen, daha iyi bir sonuç görülmektedir. Yani, daha az V2X olması durumu daha iyi bir güç profili ile sonuçlanmıştır. Bunun nedeni ilerleyen kısımlarda daha detaylı anlatılmakla birlikte ilk

durumda (Şekil 5) tüketimin çok fazla ertelenmesi ardından tekrar piklere neden olmuştur.



Şekil 7: Kontrolsüz şarj ve  $m_{\delta} = 0.75$  ile önerilen yaklaşım

Algoritmanın performansı, senaryo periyodu boyunca bağlı olan araçların taleplerine ve şarj sürelerine de bağlıdır. Bu nedenle, güç profilindeki iyileşme tüm kümelerde aynı değildir. Bir önceki bölümde detaylı olarak açıklandığı gibi, toleransı gösteren  $m(t)$  değeri, temsilcinin rolünü belirler. Toleransı, belirlenen  $m_{\delta}$  değerinin üzerinde olan temsilciler üretici olarak atanır. Farklı  $m_{\delta}$  eşik değerleri için aynı benzetişim yapıldığında, Tablo 2'de verilen tepe ve ortalama değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar 10 kümenin tamamı yani tüm sistem için hesaplanmış ve  $m_{\delta}$ 'nın 1 olduğu yani üreticinin olmadığı durumda karşılaştırılmıştır.

Tablo 3: Tepe/Ortalama Yük Karşılaştırması

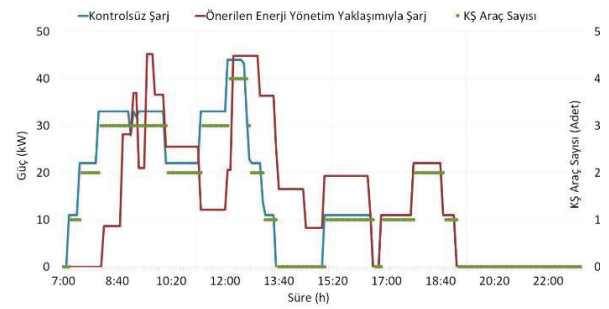
	$m_{\delta}=1.00$	$m_{\delta}=0.75$	$m_{\delta}=0.50$	$m_{\delta}=0.25$
Tepe Yük (kW)	351.5	335.2	357.1	379.3
Ortalama Yük (kW)	150.5	150.5	150.5	150.5
Tepe/Ortalama	2.33	2.22	2.37	2.52

Tablo 3'de görülebileceği gibi, algoritmanın  $m_{\delta}$  tolerans değerine bağlı olduğu açıktır. Daha yüksek bir  $m_{\delta}$  değeri için, temsilcileri üretici olarak atamak daha zordur. Bu durumda,  $m_{\delta}=1$  değeri, hiçbir temsilcinin üretici olmadığı ve V2X işleminin olmadığı kontrolsüz durumla aynıdır. Aksine,  $m_{\delta}$  tolerans eşliğinin daha küçük olması durumunda, daha fazla temsilci üretici olarak atanır, yani V2X'e daha fazla EV katıldığı için yerel güç dengelemesi sağlanır. Bu durumda kümedeki pik yüklerin daha da azalması beklenecektir. Ancak, tablodan da görülebileceği gibi, daha düşük bir  $m_{\delta}$  değeri seçmek her zaman daha düşük bir tepe gücü ile sonuçlanmaz. Örneğin  $m_{\delta} = 0.75$  için ölçülen tepe güç 335 kW iken, simülasyonlarda  $m_{\delta} = 0.5$  eşik değerinde daha yüksek tepe güçler ölçülmüştür ve bu tepe güçlerin kontrolsüz durumdaki güç değerinden bile yüksek olduğu görülmektedir. Bu yüksek tepe değerlerinin nedeni, Şekil 7'te gösterildiği gibi farklı bir kümenin (7. küme) güç profilinden bir örnek verilerek açıklanmaktadır.

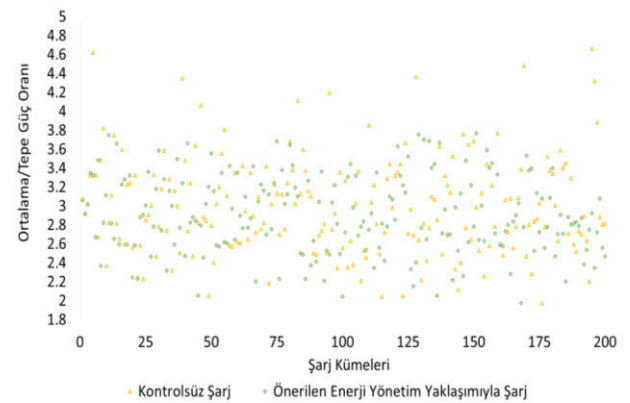
Küçük bir  $m_{\delta}$  değeri seçmek,  $t$  zamanında daha fazla temsilcinin üretici olmasına neden olur ve bunlar diğer EV'leri  $T$  zamanında şarj eder. Ardından,  $t+T$ 'de kendilerini tüketici olarak şarj

etmeleri gerekir. Bu durumda şarjı  $t+T$  zamanına ertelenen EV sayısı çok daha fazla olacak ve  $t+T$  zamanında çok yüksek pik talepleri görülecektir. Bunun en dramatik örneği 7. kümenin güç profilinde görülmektedir.  $m_{\delta} = 0.25$  tolerans değeri ile gerçekleştirilen benzetişimde, benzetişimin başında ertelenen şarj talebinin daha sonra nasıl bir pik talep ile sonuçlandığı açıkça görülmektedir.

EV'lerin varış süreleri, mevcut ve hedef SOC'leri ve park etme süreleri gibi senaryodaki birçok öngörülemez değişkenin etkisi de çok önemlidir. Yüksek pik taleplerden kaçınmak için, kümelerin ve sistemin geçmiş güç talep profillerine dayalı olarak bir tahmin yapılabilir ve bir kontrol algoritması geliştirilebilir. Bu şekilde, bu rastgeleliğin neden olabileceği olası sorunların önüne geçilebilir. Tahminlerden yola çıkılarak her  $t$  anına farklı  $m_{\delta}$  değeri atanırsa, güç talebinin eş zamanlı olması durumunda daha fazla üretici atanabilir ve doğru zamanda V2X modu ile çok daha iyi dengeleme yapılabilir. Temsilci tabanlı yaklaşımın farklı senaryolardaki performansını değerlendirmek için, 20 farklı senaryoda 10 farklı şarj cihazı kümesinin tepe-ortalama oranı dağılımı Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8:  $m_{\delta} = 0.25$  ile önerilen yaklaşım ve şarjın ertelenmesi (7. Küme)



Şekil 9: 20 farklı senaryoda 10 farklı şarj ünitesinin tepe/ortalama oranı dağılımı

Yeşil noktalar kontrolsüz durumdaki, turuncu noktalar ise enerji yönetimi yaklaşımı uygulandığındaki sonuçları göstermektedir. EV'lerin varış ve kalkış saatleri, hedef ve mevcut SOC gibi senaryodaki belirsizlikler, enerji yönetimi yaklaşımı uygulandığında sonucun her zaman daha iyi çıkmasıyla sonuçlanmayabilir. Ancak senaryoların çoğunda temsilci tabanlı enerji yönetimi performansının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Kontrolsüz durumda



benzetişimlerde tepe-ortalama oranı 4.65'e kadar yükselirken, önerilen yaklaşımla en fazla 3.76 olduğu görülmektedir.

Diğer taraftan, önceki kısımdaki değerlendirmelerden farklı olarak tolerans eşiği  $m_s$  ve diğer değişkenler dikkate alınmadan algoritmanın hesaplama performansı test edildiğinde ve çözüme yakınsama için gereken süre kümedeki temsilci sayısı artırılarak hesaplandığında senaryodaki temsilci sayısı 125'ten az ise çözümün 60 saniyede yakınsayabileceği görülmektedir. Bu pratik bir uygulama için önemlidir. Bu nedenle ölçeklenebilirlik eşiği olarak 60 saniyelik bir süre seçilebilir. Temsilci sayısındaki artış daha fazla müzakere ile sonuçlandığı için hesaplama süresi de buna paralel olarak artmaktadır. Ancak küme sayısındaki artış bu yayındaki uygulama kapsamında herhangi bir değişikliğe neden olmamaktadır. Bunun nedeni müzakerelerin sadece küme içinde gerçekleşmesidir. Bu nedenle kümelerin paralel yürüttüğü bu işlemler ek bir hesaplama yüküne neden olmaz.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, temsilci tabanlı bir enerji yönetimi algoritması, kümelenecek EV şarj sistemleri için uyarlanmış ve geliştirilen yazılım algoritması ile uygulanmıştır. Önerilen yaklaşımda, şarj cihazlarına bağlı EV'lerin şarj taleplerinin aciliyetine ve algoritmadaki tolerans eşiğine bağlı olarak, şarj ünitelerini temsil eden temsilcilere üretici veya tüketici rolü atanmaktadır. Tüketici rolündeki temsilciler, DK adlı bir sunucu aracılığıyla üreticilerin bilgilerini alır, sürülerine ekler ve müzakere eder. Müzakere bir sözleşmeyle sonuçlanırsa, güç akışı belirtilen sözleşme süresi üreticiden tüketiciye sağlanır. Müzakere sürecinde maliyet faktörü katılımcılar tarafından gözlemlenmez. Çalışma kapsamındaki performans değerlendirmesi, bu yaklaşım her biri 12 şarj üniteli 10 şarj kümesinden oluşan bir sisteme uygulanarak yapılmıştır. Kontrolsüz çalışmanın ve önerilen yaklaşımın güç profilleri karşılaştırılmıştır. Uygun tolerans eşiği yani  $m_s$  seçimiyle, temsilcilerin üretici veya tüketici olarak V2X'e katılarak, önerilen temsilci tabanlı yaklaşımın bir kümenin tepe-ortalama oranını %41'e kadar azalttığı gösterilmiştir. Bu yaklaşımla yapılan benzetişimler sonucunda, EV'lerin yalnızca tüketici olmaktan çıkıp V2X ile yerel elektrik üreticisi haline gelmesinin şarj kümelerinin güç profili üzerinde olumlu bir etkisi gözlemlenmiştir. Öte yandan farklı tolerans değerlerinin algoritmanın performansı üzerindeki etkisi de ele alınmıştır.

Temsilci olarak adlandırılan birimlerin sınırlı yerel bilgi ile yeterli kontrol kararları alabildiği gözlemlenmiştir. Temsilciler, merkezi bir kontrol ünitesine ihtiyaç duymadan ve sistem ya da küme bilgisi olmadan bireysel hedefleri doğrultusunda küme içerisindeki güç talebini karşılayabilirler. Temsilciler, literatürdeki diğer yaklaşımlara kıyasla çok az iletişim yükü ile birbirleriyle müzakere ederek güç alışverişinde bulunabilirler. Bu durum, herhangi bir merkezi kontrol olmaksızın temsilci tabanlı bir yaklaşımın uygulanabilirliğini göstermektedir.

Diğer taraftan, şarj ünitelerine bağlı EV'lerin profili diğer birçok uygulamada aynı iken, bu çalışmada EV'lerin şarj talepleri değişkendir ve EV'lerin V2X için toleransı da değişkendir. Benzetişim süresi boyunca bir şarj ünitesine bağlı EV'lerin sayısı, EV'lerin varış ve hedef SOC'leri tamamen rastgeledir. Bu, herhangi bir senaryoda, farklı EV'lerin bağlı olduğu bir şarj ünitesinin rolünün, her zaman adımında güncellendiği anlamına gelir. Bu enerji yönetim algoritması ile

önceki çalışmalardan farklı olarak çift yönlü şarj işlemi ele alınmaktadır. Böylece V2X fonksiyonlarının en etkin şekilde kullanılması ve EV'lerin boşta kaldıkları sürelerde verimli bir şekilde kullanılması amaçlanmaktadır. V2X işlevi sayesinde, kümelerdeki tepe güç talebi ve şarj ünitelerinin aşırı yükü azaltılmıştır.

Gelecekteki çalışmalar için, küme içindeki bu güç dengelemesinin kümeler arasında da yapılabilmesi için her bir kümenin toplam davranışını temsil eden temsilcilerin atanması önerilebilir. Bu sayede küme içerisinde talebin karşılanmaması durumunda doğrudan şebekeden talep etmek yerine başka bir kümeden güç talebinde bulunabilecektir. Ancak, böyle bir uygulamada, kümeler arasındaki anlaşmanın hesaplama yükü de dikkate alınmalıdır. Yapılabilecek diğer bir iyileştirme, tolerans eşiği değerini her  $t$  zaman adımı için dinamik hale getirerek, kümelerin talebine ve kümedeki EV'lerin değişkenliğine bağlı olarak uyum sağlayabilecek şekilde geliştirmektir. Böylece tepe yükler en aza indirilebilir ve yük profili düzleştirilebilir.

## 6. Kaynaklar

- [1] Lopes, J.P., Hatziargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P. and Jenkins, N. (2007). Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities, *Electric power systems research*, 77(9), 1189–1203.
- [2] Kong, Q., Fowler, M., Entchev, E., Ribberink, H. and McCallum, R. (2018). The role of charging infrastructure in electric vehicle implementation within smart grids, *Energies*, 11(12), 3362.
- [3] Taljegard, M., Göransson, L., Odenberger, M. and Johnsson, F. (2019). Electric vehicles as flexibility management strategy for the electricity system—A comparison between different regions of Europe, *Energies*, 12(13), 2597.
- [4] S. Saxena, H. E. Z. Farag, L. S. Hilaire and A. Brookson, "A Techno-Social Approach to Unlocking Vehicle to Everything (V2X) Integration: A Real-World Demonstration," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 17085–17095, 2023,
- [5] Hussain, M.T., Sulaiman, N.B., Hussain, M.S. and Jabir, M. (2021). Optimal Management strategies to solve issues of grid having Electric Vehicles (EV): A review, *Journal of Energy Storage*, 33, 102114.
- [6] R.J., Matos, M.A., Soares, F.J. and Lopes, J.A.P. (2011). Optimized bidding of a EV aggregation agent in the electricity market, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 443–452.
- [7] Abdullah, H.M., Gastli, A. and Ben-Brahim, L. (2021). Reinforcement learning based EV charging management systems—a review, *IEEE Access*, 9, 41506–41531.
- [8] Mets, K., Verschueren, T., Haerick, W., Develder, C. and De Turck, F. (2010). Optimizing smart energy control strategies for plug-in hybrid electric vehicle charging, 2010 IEEE/IFIP network operations and management symposium workshops, IEEE, pp.293–299.
- [9] Yılmaz, M. and Krein, P.T. (2012). Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and

- utility interfaces, *IEEE Transactions on power electronics*, 28(12), 5673–5689.
- [10] Pearre, N.S. and Ribberink, H. (2019). Review of research on V2X technologies, strategies, and operations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 61–70.
- [11] Ravi, S.S. and Aziz, M. (2022). Utilization of electric vehicles for vehicle-to-grid services: progress and perspectives, *Energies*, 15(2), 589.
- [12] Hou, L., Dong, J., Herrera, O. E., & Mérida, W. (2023). Energy management for solar-hydrogen microgrids with vehicle-to-grid and power-to-gas transactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(5), 2013-2029.
- [13] Rathor, S.K. and Saxena, D. (2020). Energy management system for smart grid: An overview and key issues, *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4067–4109.
- [14] Cheng, Z., Duan, J. and Chow, M.Y. (2018). To centralize or to distribute: That is the question: A comparison of advanced microgrid management systems, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 12(1), 6–24.
- [15] Yin, H., Alsabbagh, A. and Ma, C. (2021). A decentralized power dispatch strategy in an electric vehicle charging station, *IET Electrical Systems in Transportation*, 11(1), 25–35.
- [16] Ringler, P., Keles, D. and Fichtner, W. (2016). Agent-based modelling and simulation of smart electricity grids and markets—a literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 205–215.
- [17] Unda, I.G., Papadopoulos, P., Skarvelis-Kazakos, S., Cipcigan, L.M., Jenkins, N. and Zabala, E. (2014). Management of electric vehicle battery charging in distribution networks with multi-agent systems, *Electric Power Systems Research*, 110, 172–179.
- [18] Mureddu, M., Scala, A., Chessa, A., Caldarelli, G., Musio, M. and Damiano, A. (2014). An agent based approach for the development of EV fleet Charging Strategies in Smart Cities, 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), IEEE, pp.1–8.
- [19] Saner, C.B., Trivedi, A. and Srinivasan, D. (2022). A Cooperative Hierarchical Multi-Agent System for EV Charging Scheduling in Presence of Multiple Charging Stations, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(3), 2218–2233.
- [20] Garau, M. and Torsæter, B.N. (2021). Agent-Based Analysis of Spatial Flexibility in EV Charging Demand at Public Fast Charging Stations, 2021 IEEE Madrid PowerTech, IEEE, pp.1–6.
- [21] Mocci, S., Natale, N., Ruggeri, S. and Pilo, F. (2014). Multi-agent control system for increasing hosting capacity in active distribution networks with EV, 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), pp.1409–1416.
- [22] Aljohani, T., Ebrahim, A. and Mohammed, O. (2020). Dynamic real-time pricing structure for electric vehicle charging considering stochastic microgrids energy management system, 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), pp.1–8.
- [23] Valogianni, K., Ketter, W. and Collins, J. (2015). A multiagent approach to variable-rate electric vehicle charging coordination, *Proceedings of the 2015 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pp.1131–1139.
- [24] Dähling, S., Kolen, S. and Monti, A. (2018). Swarm-based automation of electrical power distribution and transmission system support, *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, 3(4), 212–223.
- [25] Kolen, S., Isermann, T., Dähling, S. and Monti, A. (2017). Swarm behavior for distribution grid control, 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), pp.1–6.
- [26] Intelligent Physical Agents Foundation- FIPA, <http://www.fipa.org/>, (Erişim zamanı; Nisan, 18, 2023).

## Özgeçmişler



Gülen Akyün, Elektrik Mühendisliği alanındaki lisans derecesini 2020 yılında, yüksek lisans derecesini 2023 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamladı. Lisans bitirme projesinde Elektrikli Otobüsler için batarya sistemi tasarımı üzerine çalışırken, Yüksek lisans tezini Elektrikli araçların şebeke entegrasyonu ile ilgili yazdı. Ekim 2022'den bu yana Almanya'nın Aachen kentinde Elektrikli araç odaklı Li-ion batarya testleri yapan bir şirkette Li-ion hücre testi takımında proje mühendisi olarak görev yapmaktadır.



Erdem Gümrükçü, Lisans derecesini 2015 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Elektrik Mühendisliği alanında aldı ve yüksek lisans derecesini 2018 yılında Almanya'nın Aachen şehrinde bulunan RWTH Aachen Üniversitesi'nden elektrik güç mühendisliği alanında tamamladı. Şu anda, aynı üniversitede, büyük ölçekli elektrikli araç şarjı için enerji esnekliği yönetimi ve optimizasyonu konusundaki doktora çalışmalarını sürdürmektedir. 2018'den bu yana E.ON Enerji Araştırma Merkezi bünyesindeki Karmaşık Şebekelerin Otomasyonu Enstitüsü'nde görev yapmaktadır.



Murat Yılmaz, İstanbul Teknik Üniversitesi - İTÜ, Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde 1995 yılında Lisans, 1999 yılında Yüksek Lisans ve 2006 yılında Doktorasını tamamlamıştır. 1996-1999 yılları arasında Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı - TTGV ve TÜBİTAK projelerinde araştırmacı olarak projelerde çalıştıktan sonra 1999 yılında İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC) Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde 2007-2008 yılları arasında UIUC doktora sonrası araştırmacı bursu, 2011-2012 yılları arasında ise TÜBİTAK doktora sonrası araştırmacı bursu ile misafir araştırmacı olarak bulunmuş ve elektrikli araç teknolojileri ve itiş sistem gereksinimlerine yönelik uluslararası projelerde görev almıştır.

2014 yılında İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Öğretim Üyesi olarak göreve başlamış olup aynı bölümde görevine devam etmektedir. Aynı zamanda 2022 yılında TÜBİTAK BİGG kapsamında kurucu ortak olarak bulunduğu EVİNNO A.Ş. firması kapsamında Ar-Ge çalışmalarına da devam etmektedir. Araştırma alanları arasında güç elektroniği devrelerinin tasarımı, modellemesi, kontrolü ve uygulamaları; elektrik makinalarının uygulamaya yönelik tasarımı, modellemesi, kontrolü ve optimizasyonu; elektrikli ve karma araç teknolojileri, modellemesi, itiş sistemi tasarımı, enerji yönetim sistemi (EMS) ve şebeke ile etkileşimleri (V2G/G2V); enerji depolama sistemleri, batarya teknolojileri, modellemesi, SoX kestirim algoritmaları ve yönetimi (EMS), batarya şarj sistemleri ve altyapı gereksinimleri bulunmaktadır.