



**ULAŞTIRMA SEKTÖRÜ
DÖNÜŞÜMÜ: ELEKTRİKLİ
ARAÇLARIN TÜRKİYE
DAĞITIM ŞEBEKELERİNE
ENTEGRASYONU**

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Hakkında

Avrupa İklim Vakfı (ECF), Agora Energiewende ve İstanbul Politikalar Merkezi (IPC) tarafından Sabancı Üniversitesi'nde kurulan SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, yenilikçi bir enerji dönüşümü platformu aracılığı ile enerji sektörünün karbonsuzlaşmasına katkıda bulunmaktadır. Türkiye enerji sektörünün teknolojik, ekonomik ve politik boyutlarının tartışılması için sürdürülebilir ve geniş çapta tanınan bir platform ihtiyacını karşılamak için çalışmaktadır. SHURA, gerçeklere dayalı analizleri ve bulunabilen en doğru verileri kullanarak enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji vasıtasıyla düşük karbonlu bir enerji sistemine geçiş üzerindeki tartışmaları desteklemektedir. Birçok paydaşın konuya ilişkin bütün bakış açılarını dikkate alarak bu geçişin ekonomik potansiyeli, teknik fizibilitesi ve ilgili politika araçlarına yönelik bir anlayışın oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır.

Yazarlar: Ahmet Acar, Hasan Aksoy (SHURA), Ayda Shaker, Saeed Teimourzadeh, Osman Bülent Tör (Epra Enerji), Julia Hildermeier (RAP)

Teşekkürler

Metodolojinin geliştirilmesi, varsayımların belirlenmesi ve rapora değerli katkılarından dolayı Enerjisa Enerji'ye (Oğuzcan Samsun, Erdem Özgüner, Mutlu İpteç, Furkan Şarkir) teşekkür etmek istiyoruz. Bu raporun taslak sonuçları, Nisan 2024'te EPDK Enerji Dönüşümü Dairesi ile gerçekleşen paydaş istişare toplantısında değerlendirilmiştir, sağlanan tüm geri bildirimler için teşekkür ederiz. Ayrıca, Mayıs 2024'te düzenlenen paydaş danışma toplantısında çalışmanın taslak sonuçlarını değerlendiren enerji ve ulaştırma sektörlerinin değerli paydaşlarına da teşekkür etmek istiyoruz. SHURA Direktörü Alkım Bağ Güllü raporu inceleyerek geri bildirimde bulunmuştur. Sağlanan tüm incelemeler, görüşler ve geri bildirimler için teşekkür ederiz.

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, ECF'in bu rapor için sağladığı cömert finansmana müteşekkirdir. Bu rapor, www.shura.org.tr sitesinden indirilebilir.

Daha ayrıntılı bilgi almak veya geri bildirimde bulunmak için info@shura.org.tr adresinden SHURA ekibiyle temasa geçiniz.

Tasarım

Tasarımhane Tanıtım Ltd. Şti.

Telif Hakkı © 2024 Sabancı Üniversitesi

Sorumluluk Reddi

Bu rapor ve içeriği, çalışma kapsamında göz önünde bulundurulmuş kabuller, senaryolar ve 2023 sonu itibarıyla mevcut olan piyasa koşulları doğrultusunda hazırlanmıştır. Bu kabullerin, senaryolar ve piyasa koşullarının değişime açık olması nedeniyle, rapor kapsamındaki gelecek dönem öngörülerinin, gerçekleşecek sonuçlarla aynı olacağı garanti edilemez. Bu raporun hazırlanmasına katkı yapan kurum ya da kişiler, raporda sunulan öngörülerin gerçekleşmemesi ya da farklı şekilde gerçekleşmesinden dolayı oluşabilecek ticari kazanç ya da kayıplardan sorumlu tutulamazlar.



**ULAŖTIRMA SEKTÖRÜ
DÖNÜŖÜMÜ: ELEKTRİKLİ
ARAÇLARIN TÜRKİYE
DAĞITIM ŖEBEKELERİNE
ENTEGRASYONU**





İÇİNDEKİLER

Ŗekil Listesi	4
Tablo Listesi	7
Kısaltmalar	8
Ana Mesajlar	10
Yönetici Özeti	11
A. GiriŖ	11
B. ÇalıŖmanın Amacı	12
C. Yöntem	13
D. Sonuçlar ve TartıŖma	14
E. Türkiye UlaŖtırma Sektörü DönüŖümünde Öncelikli Alanlar	19
1. GiriŖ	25
2. Küresel Ölçekte Elektrikli Araçların Ŗebeke Entegrasyonu	33
2.1. Avrupa Birliği (AB) ve Amerika BirleŖik Devletleri'nde (ABD'de) elektrikli araç Ŗebeke entegrasyonu için politika çerçevesi	34
2.2. Optimal EA Ŗarjı - kontrollü, akıllı ve çift yönlü (V2G)	36
2.2.1. Akıllı (tek yönlü) Ŗarj	36
2.2.2. Çift yönlü Ŗarj (V2G)	37
3. Türkiye'de Elektrikli Araçların Güncel Durumu	39
3.1 Binek araç pazarı	39
3.2 EA pazarının geliŖimi	40
3.3 Ŗarj altyapılarının geliŖimi	42
4. Yöntem	47
4.1 Türkiye'de EA ve HHA projeksiyonları	48
4.2 Pilot bölgeler ve her bir bölgedeki EA sayısı	52
4.3 EA ve HHA modelleme ve Ŗarj rutinleri	56
4.4 Referans Ŗebeke modeli geliŖtirme	65
4.5 Ŗarj istasyonlarının boyutlandırılması ve yerleŖimi	75
4.6 Duyarlılık analizi	77
4.7 Ŗebeke analizi ve temel performans endeksleri	78

5. Sonuçlar ve Tartışma	81
5.1 Dağıtım şebekeleri üzerindeki etki	81
5.2 Duyarlılık analizi	96
5.2.1 Vaka 1: Tatil zamanlarında aşırı şarj etme durumu	96
5.2.2 Vaka 2: Akıllı şarj	101
5.2.3 Vaka 3: Araçtan şebekeye (Vehicle to grid - V2G)	104
5.2.4 Vaka 4: Otoyolda şarj etme	107
5.3. Bulguların tartışılması	110
5.3.1 Dağıtım şebekesi etkisi ve yatırım gereksinimleri	110
5.3.2 Şebeke etkilerini azaltmak için kontrollü ve akıllı şarj çözümleri	112
5.3.3 E-Mobilite yüklerinin sorunsuz entegrasyonu için dikkat edilmesi gereken hususlar	115
6. Türkiye Ulaştırma Sektörü Dönüşümünde Öncelikli Alanlar	117

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. SHURA Net-Sıfır emisyon yol haritasında binek araçların gelişimi	12
Şekil 2. Yöntemin temel adımları	13
Şekil 3. Pilot bölgelerin OG şebeke modeli - mevcut sistem (2023)	14
Şekil 4. E-mobilite yüklerini besleyen 630 kVA OG/AG trafosunun yüklenmesi - Kontrolsüz şarj profili vs akıllı (kontrollü) şarj	17
Şekil 5. E-mobilite yükünün akköprü bölgesindeki dağıtım sisteminin bir kısmı üzerindeki etkisi: Akıllı (kontrollü) ve kontrolsüz şarj	17
Şekil 6. V2G'nin Akköprü dağıtım şebekesinin bir kısmı üzerindeki etkisi	18
Şekil 7. Otoyolda tipik şarj ve tasvir edilen şebekenin gerilim profili	18
Şekil 8. Türkiye'de toplam nihai enerji tüketimi ve enerjile ilişkili CO ₂ emisyonlarının dağılımı, 2021	26
Şekil 9. Farklı ülkelerdeki EA sayısı (2022)	27
Şekil 10. EA'ların farklı ülkelerdeki coğrafi dağılımı (2022)	27
Şekil 11. Türkiye'de elektrikli araçların coğrafi dağılımı- 2023 yılı	28
Şekil 12. Türkiye'deki şarj soketlerinin coğrafi dağılımı - 2023 yılı	28
Şekil 13. SHURA'nın net sıfır emisyon yol haritasına göre binek araçların gelişimi	29
Şekil 14. Çalışmanın çerçevesi	32
Şekil 15. Akıllı EA şebeke entegrasyonunun unsurları. Kaynak: RAP	37
Şekil 16. Türkiye'de EA'ların son dönemdeki gelişimi	42
Şekil 17. Yöntemin temel adımları	47
Şekil 18. Net0 Senaryosuna dayalı EA projeksiyonu	49

Şekil 19. LDV Net0 Senaryosuna dayalı HHA projeksiyonu	49
Şekil 20. EA filosunun 2035 yılında Net0 Senaryosuna göre dağılımı	50
Şekil 21. BAU Senaryosuna dayalı EA filosu trendi	51
Şekil 22. BAU Senaryosunda EA filosunun 2035 yılındaki dağılımı	51
Şekil 23. Pilot bölgelerin nüfus ve elektrik tüketim payları	52
Şekil 24. Çalışma kapsamındaki pilot bölgeler	53
Şekil 25. Pilot bölgelerdeki tüketicilerin dağılımları, 2023	54
Şekil 26. Her bir pilot bölgedeki EA ve HHA sayısı - 2035 yılı	55
Şekil 27. EA ve HHA yük modelleme yaklaşımı	56
Şekil 28. Hem EA'lar hem de HHA'lar için batarya boyutu, ortalama verimlilik ve menzilde gözlemlenen değişkenlik aralığı	57
Şekil 29. EA ve HHA'ların yıllık enerji tüketimi	58
Şekil 30. Şarj davranışlarının dendrogram gösterimi	59
Şekil 31. Her bir kümenin şarj dağılımı	61
Şekil 32. Akköprü şarj profili TM, evde şarj rutini, hafta içi, 2035 yılı BAU	63
Şekil 33. Akköprü şarj profili TM, evde şarj rutini, hafta içi, 2035 yılı Net0	64
Şekil 34. Akköprü şarj profili TM, kamusal alanda şarj rutini, hafta içi, 2035 yılı Net0	64
Şekil 35. Akköprü şarj profili TM, kamusal alanda şarj rutini, hafta sonu, 2035 yılı Net0	65
Şekil 36. Referans şebeke modeli geliştirme yaklaşımı	66
Şekil 37. Pilot bölgelerin OG şebeke modeli - Mevcut sistem 2023 yılı	67
Şekil 38. OG/AG trafo yükleme seviyesi - Mevcut sistem 2023 yılı	68
Şekil 39. OG hatları yükleme seviyesi - Mevcut sistem 2023 yılı	68
Şekil 40. Pilot bölgelerin gerilim profili - Mevcut sistem 2023 yılı	69
Şekil 41. SHURA Net Sıfır yol haritasına göre yıllık ortalama talep artışı	70
Şekil 42. Elektrifikasyonun tipik bir hafta için ve saatlik çözünürlükte yük profili üzerindeki etkisi	70
Şekil 43. 2035 referans şebeke modelinin oluşturulması için gerekli OG/AG trafo yatırım miktarı	72
Şekil 44. Akköprü bölgesinde birincil ve ikincil şebeke	74
Şekil 45. Akköprü bölgesinde elektrikli araç şarj noktalarının mekânsal dağılımı	76
Şekil 46. Akköprü YG trafo merkezinde görülen yıllık yük	79
Şekil 47. Akköprü bölgesindeki OG/AG trafosunun yüklenme seviyesi	82
Şekil 48. Elektrikli araç alımından sonra trafo yükleme seviyesi: Net0 Senaryosu, evde şarj rutini	83
Şekil 49. Elektrikli araç alımından sonra trafo yükünde artış - Evde şarj rutini	84
Şekil 50. OG/AG trafolarının yüklenmesinin EA etkisi: Evde şarj ve kamusal alanda şarj	84

Şekil 51. Kamusal şarj altyapılarının yıllık ortalama kullanım faktörü	85
Şekil 52. E-mobilitenin yatırım gereksinimi unsurları	86
Şekil 53. Tipik bir AG şebekesinin 1.000 kVA OG/AG transformatöründen görünümü	87
Şekil 54. E-mobilite yük entegrasyonu nedeniyle AG şebekesinin aşırı yüklenmesi	87
Şekil 55. E-mobilite yükü kaynaklı AG şebeke yatırımı (yeşil çizgiler yatırım yapılan AG fiderleridir)	88
Şekil 56. OG ve AG sistemlerinin tipik gösterimi ve aralarındaki etkileşim	90
Şekil 57. E-mobilite kaynaklı OG/AG trafo yatırım gereksinimi	91
Şekil 58. Çeşitli e-mobilite şarj senaryoları ve rutinleri altında OG hatlarının yüklenme profilleri	92
Şekil 59. Güvenilirlik faktörü gereği e-mobilite kaynaklı OG hattı yatırımı	94
Şekil 60. Net0 Senaryosunda EA alımından sonra pilot bölgelerin voltaj profilleri	95
Şekil 61. E-mobilite yüklerinin etkisini sınırlamak için Akköprü bölgesinde yapılan yatırımların maliyeti	96
Şekil 62. Haftanın farklı günlerinde şarj edilen araçların şarj durumu - Normal Hafta	97
Şekil 63. Haftanın farklı günlerinde şarj edilen araçların şarj durumu - Bayram haftası başlangıcı	98
Şekil 64. Şarj yük profili: Normal hafta- Akköprü bölgesi, ev tipi şarj, Net0 Senaryosu	99
Şekil 65. Şarj yük profili: Tatil haftası başlangıcı- Akköprü bölgesi, ev tipi şarj, Net0 Senaryosu	99
Şekil 66. Tatilden bir gün önce aşırı yüklenmenin etkisi - Akköprü bölgesi	100
Şekil 67. OG/AG trafolarındaki yüksek şarjdan kaynaklanan aşırı yüklenme - Akköprü bölgesi	101
Şekil 68. E-mobilite yüklerinden kaynaklanan OG/AG trafo aşırı yüklenmesi - Akköprü bölgesi	102
Şekil 69. E-mobilite yüklerini besleyen 630 kVA OG/AG trafosunun yüklenmesi - Kontrolsüz şarj profili ve akıllı (kontrollü) şarj	103
Şekil 70. E-mobilite yükünün Akköprü Bölgesi'ndeki dağıtım sisteminin bir bölümü üzerindeki etkisi: Akıllı (Kontrollü) şarj ve kontrolsüz şarj	103
Şekil 71. V2G özellikli EA'lara sahip tipik AG şebekesi	104
Şekil 72. Tek yönlü EA'ların şarj edilmesi ve V2G özellikli EA'ların deşarj edilmesine ilişkin teorik bir gösterim	105
Şekil 73. Şekil 63'te gösterilen şebekenin ana AG hattı yükü üzerindeki V2G etkisi	105
Şekil 74. Şekil 63'te gösterilen şebekenin gerilim profili üzerindeki V2G etkisi	106

Şekil 75. V2G'nin Akköprü dağıtım şebekesinin bir bölümü üzerindeki etkisi	106
Şekil 76. Otoyoldaki tipik şarj işlemi	108
Şekil 77. Şekil 68'de gösterilen şebekenin gerilim profili: Otoyoldaki hızlı şarj işlemi	109
Şekil 78. 6 şarj istasyonunu besleyen 25 km'lik bir 'Swallow' hattı için kritik yükleme seviyesi	109
Şekil 79. E-mobilite yüklerinin aşağıdan yukarıya etkisi	112
Şekil 80. OG/AG trafo yatırımında farklı faktörlerin payı	112

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Dağıtım şirketleri ve ilgili pilot YG trafo merkezleri	14
Tablo 2. Farklı kurumların Türkiye için EA öngörülleri	42
Tablo 3. Dağıtım şirketleri ve ilgili pilot YG trafo merkezleri	53
Tablo 4. Pilot bölgelerin EVAM unsurları	55
Tablo 5. EA ve HHA'lar için varsayımların listesi	57
Tablo 6. EA ve HHA'ların yıllık elektrik tüketimi	58
Tablo 7. Ana ücretlendirme kümeleri ve temsili ücretlendirme grupları	59
Tablo 8. Temsili şarj gruplarının derecelendirmeleri ve özellikleri	61
Tablo 9. 2035 referans şebekesinin oluşturulması için gerekli OG hattı yatırım miktarı	73
Tablo 10. 2035 referans şebekesinin oluşturulması için gerekli OG yatırım miktarı	74
Tablo 11. Her bir pilot bölgede kamuya açık şarj noktalarının kurulu kapasitesi	75
Tablo 12. Her bir pilot bölgedeki kamuya açık şarj noktalarının sayısı	76
Tablo 13. Bu çalışmada dikkate alınan duyarlılık analizleri	77
Tablo 14. Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi tarafından tanımlanan AG pano ekipman kılavuzu	90
Tablo 15. EA yükselişinden sonra OG hatlarında gerekli yatırımların özeti	95
Tablo 16. Şekil 71'de gösterilen tipik bir AG şebekesinde EA'ların şarj durumu	104

KISALTMALAR

AA	Anadolu Ajansı
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternatif Akım (Alternative Current)
AFIR	Alternatif Yakıtlar Altyapı Yönetmeliği (Alternative Fuels Infrastructure Regulation)
AG	Alçak Gerilim
BAU	Baz (Business-as-Usual)
BEA	Bataryalı Elektrikli Araç (Battery Electric Vehicle)
CAIDI	Müşteri Ortalama Kesinti Süresi Endeksi (Customer Average Interruption Duration Index)
CAIFI	Müşteri Ortalama Kesinti Sıklığı Endeksi (Customer Average Interruption Frequency Index)
CapEx	Sermaye Harcamaları (Capital Expenditure)
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
CO ₂	Karbondioksit
CPO	Şarj Noktası Operatörleri (Charging Point Operator)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
DLMP	Dağıtım Lokasyonel Marjinal Fiyatlandırma
DSO	Dağıtım Sistemi Operatörü
EA	Elektrikli Araç
EENS	Beklenen Sağlanmayan Enerji (Expected Energy Not Supplied)
EI	Elektrik Endeksi (Electrical Index)
ELDER	Elektrik Dağıtım Hizmetleri Derneği
EPDK	T.C. Enerji Piyasaları Düzenleme Kurumu
ETKB	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EVAM	Elektrikli Araç Tahsis Çarpanı (Electric Vehicle Allocation Multiplier)
GDP	Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (Gross Domestic Product)
GHG	Sera Gazı Emisyonları
HHA	Hafif Hizmet Araçları
IRA	Enflasyonu Azaltma Yasası (Inflation Reduction Act)
km	Kilometre
kVA	Kilo Volt Amper
kW	Kilovat
kWh	Kilovat-saat
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (Liquefied Petroleum Gas)
Mt	Milyon Ton
MVA	Mega Volt Amper
MW	Megavat
Net0	Net Sıfır

NEVI	Ulusal Elektrikli Araç Altyapısı (National Electric Vehicle Infrastructure)
ODMD	Otomobil Distribütörleri ve Mobilite Derneği
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı (Organisation for Economic Co-operation and Development)
OG	Orta Gerilim
ÖTV	Özel Tüketim Vergisi
p.u.	Birim ünite (Per Unit)
PHEA	Plug-in Hibrit Elektrikli Araç
PV	fotovoltaik
RDI	Görelî Gelişme Endeksi (Relative Development Index)
SAIFI	Sistem Ortalama Kesinti Sıklığı Endeksi (System Average Interruption Frequency Index)
SoC	Şarj Durumu (State-of-Charge)
TEHAD	Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği
TL	Türk Lirası
TM	Trafo Merkezi
TOGG	Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu
ToU	çok zamanlı (Time of use)
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TWh	Teravat-saat
V2G	Araçtan Şebekeye (Vehicle to Grid)
YEK-G	Yenilenebilir Enerji Kaynak Garanti Sistemi
YG	Yüksek Gerilim

Ana Mesajlar

- 2035 yılında Türkiye’de 11 milyon elektrikli aracın (EA) (hafif hizmet araçları dahil) dağıtım şebekesine entegre edilmesi, elektrik araçlar hariç beklenen yük artışını karşılamak için gereken yatırım tutarlarına ilave olarak %12’lik (Baz senaryoda; 5 milyon EA ve ilave %3,5 yatırım) bir yatırım gerektirecektir. Bu entegrasyonun sağlanması durumunda, binek araçlardan kaynaklanan emisyonlarda %41’lik bir düşüş sağlanarak, toplam 20 milyon tonluk (Mt) karbondioksit (CO₂) emisyonu salımının önüne geçilecektir.
- Türkiye’de EA ekosisteminin gelişimi için e-mobilite odaklı dağıtım şebekesi yatırım stratejilerinin geliştirilmesi önemli olacaktır. EA’ların dağıtım şebekelerine entegrasyonunda sistem güvenilirliği ve e-mobilite yükleri için dağıtım sistemi operatörlerine (DSO) sermaye tahsis edilmesi arasında bir denge sağlanması, e-mobilite yükleri için özel trafo kapasitesi tahsis edilmesi ve diğer yük türleri için yeni kapasitelerin planlanması geçişin önünü etkili bir şekilde açabilir. Sonuç olarak, güvenilirlik standartlarını korurken EA’ların şebekeye sorunsuz bir şekilde entegrasyonunu sağlamak için enerji sektörü, otomotiv endüstrisi, düzenleyici kurumlar ve araştırma kurumlarından paydaşların dahil olduğu işbirliğine dayalı bir yaklaşım gereklidir.
- Akıllı (ve kontrollü) şarj, EA şarjı için yenilenebilir enerjinin kullanılmasına olanak tanıyarak yenilenebilir enerji kesintilerini (curtailment) önler ve yenilenebilir enerjinin şebekeye daha fazla entegrasyonunu mümkün kılar. Kontrollü ve akıllı şarjı mümkün kılan esneklik mekanizmalarının uygulanması durumunda, EA şarjının dağıtım sistemleri üzerindeki etkisi hafifletilebilmekte, potansiyel olarak şebeke yatırımları ertelenebilmekte ya da azaltılabilmektedir.
- Akıllı şarj stratejilerinin uygulanması, özellikle düşük şebeke yükünün olduğu ya da yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olduğu dönemlerde uygun maliyetli ve şebeke dostu şarjı teşvik etmektedir. Gerçek elektrik üretim ve dağıtım maliyetleriyle uyumlu, zamanla değişen tarifeler/ fiyatlandırmalar, yoğun olmayan saatlerde şarj faaliyetlerini teşvik ederek hem EA sahiplerine hem de genel şebeke istikrarına fayda sağlayabilir. EA kullanıcılarına çok zamanlı (ToU) tarifelerin/fiyatlandırmaların uygulamaya konulması, EA şarjının doğasında var olan esneklikten faydalanılmasını sağlayabilir. Bu tarifelerin, yenilenebilir enerji ve EA’ların giderek daha fazla benimsenerek pazarın daha rekabetçi hale gelmesiyle birlikte doğal olarak ortaya çıkması ve gelişmesi muhtemeldir; bu da enerji tedarikçilerini yenilikçi fiyatlandırma teklifleri geliştirmeye teşvik edecektir.

Yönetici Özeti

A. Giriş

Elektrifikasyon, son kullanıcı sektörlerin karbondan arındırılmasında enerji dönüşümünün önemli bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır. Küresel net sıfır hedefleri göz önüne alındığında, özellikle ulaştırma sektörü için elektrifikasyon, emisyonları azaltmak ve enerji verimliliğini arttırmak için en etkili stratejidir. Bu doğrultuda küresel elektrikli araç (EA) satışları, EA çeşitlerinin geliştirilmesi ve şarj altyapısının genişletilmesini destekleyen politikaların etkisiyle artmaktadır. 2023 yılı sonu itibariyle, küresel araç stokundaki toplam EA sayısı 40 milyonu aşarken, 2030 yılına kadar dünya genelinde yaklaşık 350 milyon EA olacağı öngörülmektedir.

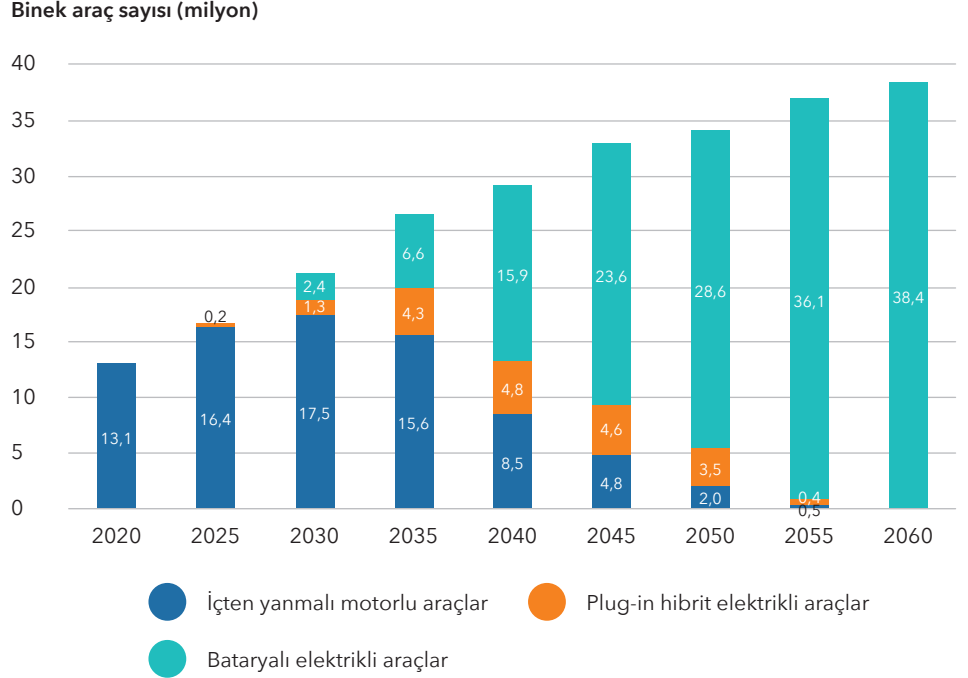
Türkiye Ekim 2021’de Paris Anlaşmasını onaylayarak 2053 yılına kadar net sıfır emisyonlu bir ekonomiye ulaşma taahhüdünü beyan etmiştir. Bu iddialı hedef, özellikle sanayi, binalar ve ulaşım gibi enerji yoğun sektörlerde fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye geçişi gerektirmektedir. 2022 yılı sonu itibariyle Türkiye’de ulaştırma sektörünün nihai enerji tüketiminde elektriğin oranı sadece %0,4’tür. Türkiye ulaştırma sektörü, başta mazot, benzin ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) olmak üzere petrol ürünlerine büyük ölçüde bağımlıdır. Sonuç olarak, sanayi sektörü ve binalardan sonra en fazla enerji tüketen üçüncü sektör olan ulaştırma sektörü, fosil yakıtlara en fazla bağımlı sektördür ve Türkiye’nin karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %22’sinden sorumludur. Bu emisyonların %90’ından fazlası karayolu taşımacılığından kaynaklanmaktadır. Bu durum, ulaştırma sektörünün karbonsuzlaştırılması için elektrikli mobiliteye geçişin önemli etkisini vurgulamaktadır.

2023 yılı sonu itibariyle Türkiye’de yaklaşık 80.735 adet bataryalı EA ve 5.906 adet plug-in hibrit elektrikli araç (PHEV) bulunmakta olup, bu sayı toplam araç filosunun küçük ama hızla büyüyen bir bölümünü temsil etmektedir. SHURA’nın net sıfır emisyon yol haritasına dayanan projeksiyonlar, Türkiye’nin 2053 yılında net sıfır emisyonlu bir ekonomiye ulaşması ve ulaşım sektöründe gerekli elektrifikasyon seviyesinin karşılanması için 2035 yılına kadar Türkiye’nin hafif hizmet araçları (HHA’lar) da dahil olmak üzere yaklaşık 11 milyon EA’nın yollarda olması gerektiğini göstermektedir. Elektrikli araçlardaki bu büyümenin yıllık 37 teravat-saat (TWh) civarında elektrik ihtiyacı doğuracağı öngörülmektedir.²

¹ SHURA, 2023. Net Zero 2053: A Roadmap for the Turkish Electricity Sector. <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/05/Net-Zero-EN.pdf>

² EA’lar için 20 kWh/100km ve HHA’lar için 104 kWh/100km tüketimi göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. EA’lar ve HHA’lar için ortalama günlük mesafe sırasıyla 40 km ve 100 km olarak varsayılmıştır.

Şekil 1. SHURA Net-Sıfır emisyon yol haritasında binek araçların gelişimi



B. Çalışmanın Amacı

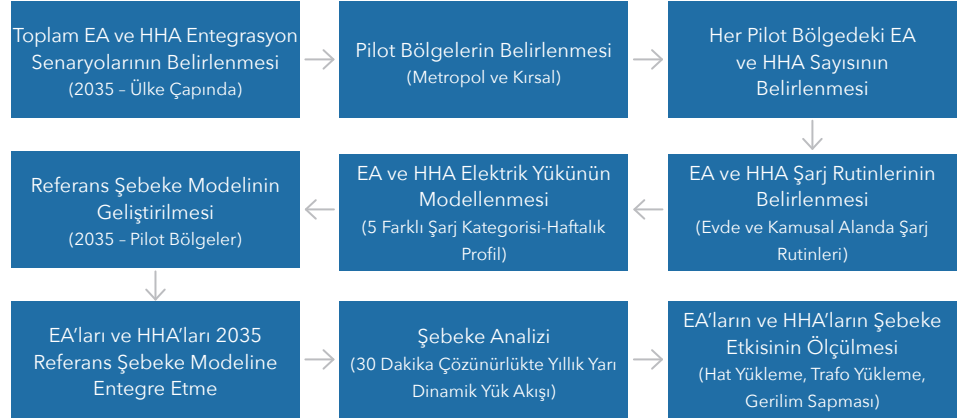
SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi'nin 2019 yılında yayınladığı "Türkiye Ulaştırma Sektörünün Dönüşümü: Elektrikli Araçların Türkiye Dağıtım Şebekesine Etkileri" çalışması, 2,5 milyon EA'ın (2030 yılı araç stoğunun %10'unu temsil etmektedir) asgari ek yatırımla ve dağıtım şebekelerinin işletimi üzerinde sınırlı etkiyle Türkiye dağıtım şebekesine entegre edilebileceğini göstermiştir. Son yıllarda hızlanan EA gelişimi ve bunun Türkiye elektrik şebekesi üzerindeki artan etkileri göz önüne alındığında, güncel durumu analiz etmek, EA ekosistemi için güçlü hedefler belirlemek ve elektrik şebekesinde yenilikçi eylemler önermek amacıyla bu yeni çalışmaya ihtiyaç duyulmuştur.

Çalışmanın amacı, Türkiye'de ulaştırma sektörünün elektrifikasyonunun etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektir. İki büyük elektrik dağıtım şebekesinin analizine dayanan çalışma, e-mobiliteden kaynaklanan ek yatırım gereksinimlerini araştırmakta, EA entegrasyonunu kolaylaştırmak için akıllı şarj mekanizmalarının rolünü analiz etmekte ve e-mobilite yüklerinin Türkiye elektrik şebekesine sorunsuz entegrasyonu için politika önerileri sunmaktadır. Bu bağlamda çalışma, hafif hizmet araçları dahil EA'ların 2035 yılına kadar Türkiye elektrik dağıtım şebekelerine entegrasyonuna ilişkin derinlemesine bir analiz sunmaktadır. Çalışma, artan e-mobilitenin şebeke altyapısı üzerindeki etkilerini ele almakta ve olası zorlukları azaltmak için stratejik çözümler önermektedir.

C. Yöntem

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından yürütülen bu çalışmada iki ana senaryo ele alınmaktadır: **2035 yılına kadar 11 milyon EA filosunu öngören SHURA Net-Sıfır (Net0) Senaryosu** ve **5 milyon EA filosunu öngören Baz (Business as Usual - BAU) Senaryo**. Ayrıca, tatil dönemlerinde elektrikli araçların aşırı şarjının etkisi, çok zamanlı (ToU) tarifelerin ve akıllı şarj mekanizmalarının uygulanması, araçtan şebekeye (Vehicle-to-Grid / V2G) teknolojisinin benimsenmesi ve otoyollarda aşırı şarjın etkileri dahil olmak üzere çeşitli duyarlılık analizleri incelenmiştir. Çalışma ayrıca iki ana şarj etme alışkanlığını dikkate almaktadır: evde şarj ve kamusal alanlarda şarj. Türkiye’de 2024 ve 2035 yılları arasında toplam EA ve HHA sayısının gelişimine yönelik piyasa görünümü, senaryoların projeksiyonu ve şebeke etkisinin analizi için kullanılan yöntem Şekil 2’de gösterilmektedir.

Şekil 2. Yöntemin temel adımları

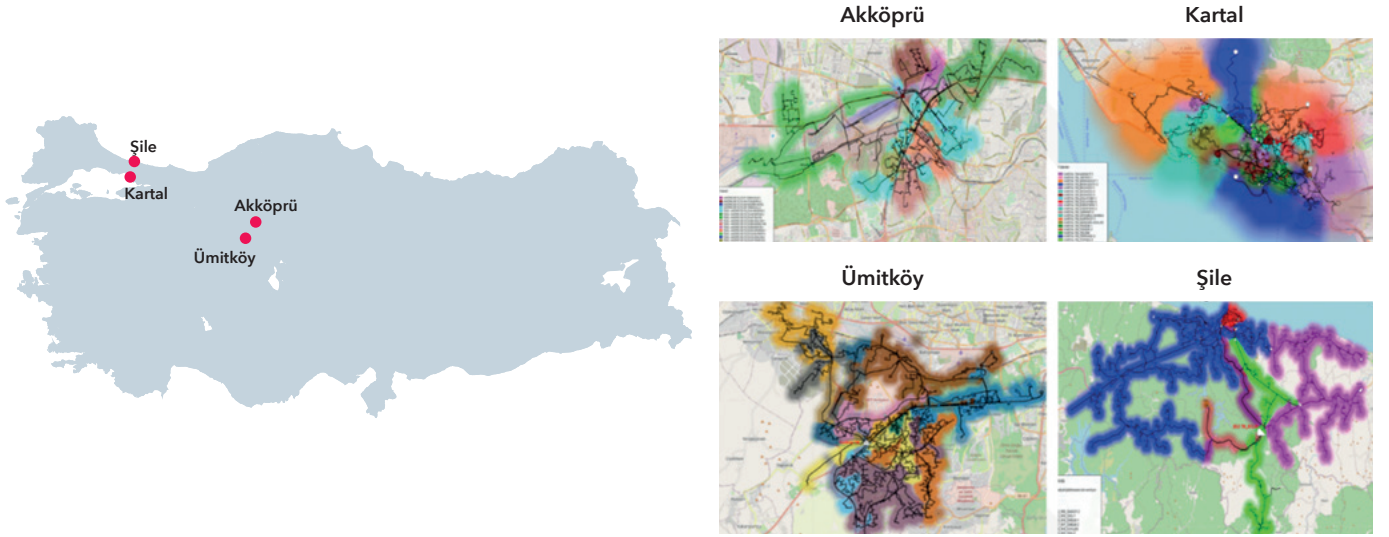


Çalışma, iki farklı Dağıtım Sistemi Operatörü (DSO) olan BAŞKENT ve AYEDAŞ dağıtım bölgelerinden stratejik olarak seçilen dört pilot bölgede yürütülmüştür. Bu pilot bölgeler (Akköprü, Ümitköy, Kartal ve Şile) Türkiye nüfusunun %14'ünü kapsamakta ve ülkenin toplam enerji tüketiminin yaklaşık %13'ünü oluşturmaktadır (Şekil 3).

Tablo 1. Dağıtım şirketleri ve ilgili pilot YG trafo merkezleri

DSO	Pilot YG Trafo Merkezleri	Bölge Türü	Trafo Merkezi Kurulu Kapasitesi (MVA) Yıl 2023
AYEDAŞ	Kartal	Büyükşehir- Gelişmiş	200
	Şile	Kırsal	125
BAŞKENT	Akköprü	Büyükşehir- Gelişmiş	300
	Ümitköy	Büyükşehir - Gelişmekte	300

Şekil 3. Pilot bölgelerin OG şebeke modeli - mevcut sistem (2023)



D. Sonuçlar ve Tartışma

SHURA Net0 Senaryosuna göre, Türkiye'nin 2053 yılında net sıfır emisyonlu bir ekonomiye ulaşması ve ulaşım sektöründe gerekli elektrifikasyon seviyesinin karşılanması için 2035 yılına kadar 11 milyon EA'ın yollarda olması gerektiği hesaplanmıştır.

Bu senaryonun gerçekleşmesi durumunda binek araçlardan kaynaklanan emisyonlarda %41'lik bir düşüş sağlanması ve toplam CO₂ emisyonlarının 20 milyon ton (Mt) azalması öngörülmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgulara dayanarak, 11 milyon EA'ın (HHA'lar dahil) Türkiye'nin dağıtım şebekesine entegre edilmesi, elektrik araçlar hariç beklenen yük artışını karşılamak için gereken yatırımların ötesinde %12 oranında ek bir yatırım gerektirecektir. 2035 yılına kadar 5 milyon EA'nın (HHA'lar dahil) entegrasyonunu öngören BAU Senaryosunda ise, e-mobilité yükünü karşılamak için %3,5 daha fazla yatırım gerekmektedir. E-mobilité

için öngörülen yatırımlarda, optimize edilmiş EA şarjından elde edilecek potansiyel fayda ve tasarrufların hesaba katılmadığı dikkate alınmalıdır.

Bu yatırım ihtiyacının ana itici gücü, alçak gerilim (AG) sisteminin, özellikle orta gerilim/alçak gerilim (OG/AG) trafoları ve OG hatları yatırım planları üzerindeki etkisidir. Başka bir deyişle, e-mobilite yüklerinin dağıtım şebekesine getirdiği baskın yük, dağıtım sistemi güvenilirliği perspektifinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, dağıtım sistemi planlayıcıları, yatırım harcaması (CapEx) karar vericileri ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) gibi politika yapıcılar ile diğer düzenleyici kurumların proaktif önlemler almasını gerektirmektedir. Bu bulgulara dayanarak, Türkiye'nin metropol alanlarında öngörülen 11 milyon EA'lı e-mobilite yükünü karşılamak için yatırım ön koşulları aşağıdaki gibidir:

- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırıma ek olarak %10 daha fazla OG/AG trafo yatırımı;
- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırıma ek olarak %16 daha fazla OG hattı yatırımı;
- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırıma ek olarak %12 daha fazla toplam yatırım maliyeti.

BAU Senaryosuna karşılık gelen 5 milyon EA için yatırım gereksinimleri şu şekildedir:

- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırıma ek olarak %3 daha fazla OG/AG trafo yatırımı;
- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırıma ek olarak %5 daha fazla OG hattı yatırımı;
- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırıma ek olarak %3,5 daha fazla toplam yatırım maliyeti.

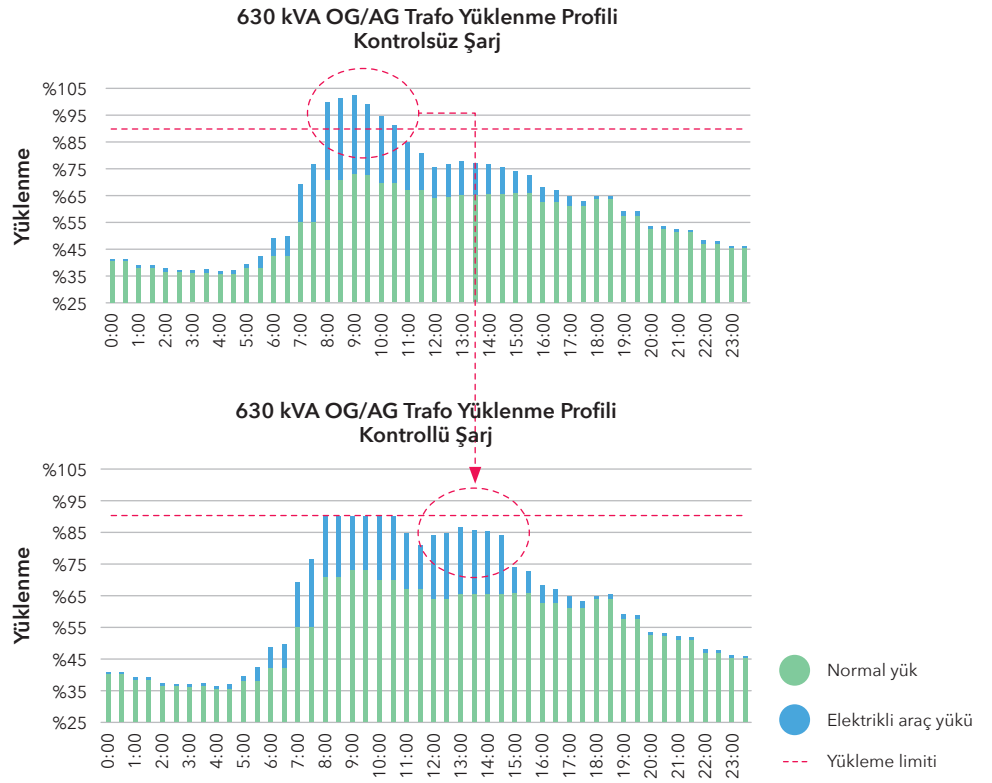
Çalışma, düzenli şarj davranışlarına ve bunların şebeke ve yatırım gereksinimleri üzerindeki ilgili etkilerine ek olarak, resmi bayramlardan önceki dönemler gibi özel günlerde yoğun şarjın etkilerini araştırmaktadır (Duyarlılık Analizi 1). Simülasyon sonuçları, özel günlerde yerleşim bölgelerindeki e-mobilite yüklerine hizmet veren transformatörlerin ortalama yükünün, normal koşullardaki tipik %40'a kıyasla %97'ye yükseldiğini göstermektedir. Benzer şekilde, kamuya açık şarj istasyonlarını besleyen OG/AG trafolarının ortalama yükü, normal koşullarda %36 iken yoğun şarj dönemlerinde %78'e çıkmaktadır. **Bu tür aşırı yüklemelerin sadece yatırım yoluyla ele alınması rasyonel bir çözüm olarak görülmemektedir. Bunun yerine, artan yükü verimli bir şekilde yönetmek için kontrollü ve akıllı şarj mekanizmalarının devreye sokulması şarttır. Bu yaklaşım, orantısız sermaye harcamaları gerektirmeden dağıtım şebekesinin güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini sağlayacaktır.**

Şebeke entegrasyonunu optimize etmek için, bu çalışmada ele alınan akıllı şarj senaryosu (Duyarlılık Analizi 2), EA'ların şarjının yenilenebilir enerji kaynaklı üretimin yüksek olduğu zamanlara kaydırılmasını içermektedir. Yük kaydırma mekanizmaları uygulanarak, e-mobilite yükleri daha az kısıt olan zaman dilimlerine taşınabilmektedir. Duyarlılık Analizi 2'de 385 EA'nın (AC tip 2, 3,7 kW) aynı anda şarj edilmesi, aşırı yüklenmeye yol açarak 11 OG/AG trafosunun %90'ın üzerinde yüklenmesine neden olmaktadır. Şarj yükünün %56'sının (219 EA) ertelenmesiyle, OG/AG trafoları üzerindeki aşırı yükün hafifletilmesi mümkündür.

Ayrıca, düşük yük ve yüksek yenilenebilir enerji üretiminin olduğu saatlerin hedeflenmesi, yenilenebilir enerji kesintilerinin (curtailment) önlenmesine yardımcı olur. EA yükleri, güneş enerjisi için öğle saatleri ve rüzgâr enerjisi için gece saatleri gibi yenilenebilir enerji üretiminin çok olduğu dönemlere kaydırılabilir. Bu strateji, EA şarjı için yenilenebilir enerjinin kullanılmasına olanak tanıyarak yenilenebilir enerji kesintilerini önler ve yenilenebilir enerjinin şebekeye daha fazla entegrasyonunu mümkün kılar.

Hem evde hem de kamusal alanlarda şarj durumlarında, yenilenebilir enerji, enerji depolama gibi esneklik önlemleri ve EA şarjı arasındaki sinerjinin faydaları açıkça görülmektedir. Kontrollü ve akıllı şarjı mümkün kılan esneklik mekanizmaları uygulanırsa, elektrikli araç şarjının dağıtım sistemleri üzerindeki etkisi hafifletilebilmekte, potansiyel olarak şebeke yatırımları ertelenebilmekte ya da azaltılabilmektedir.

Şekil 4. E-mobilite yüklerini besleyen 630 kVA OG/AG trafosunun yüklenmesi - Kontrolsüz şarj profili vs akıllı (kontrollü) şarj

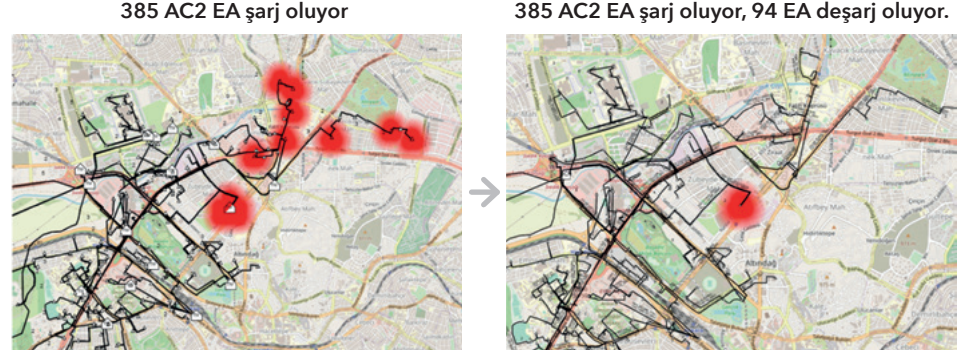


Şekil 5. E-mobilite yükünün akköprü bölgesindeki dağıtım sisteminin bir kısmı üzerindeki etkisi: Akıllı (kontrollü) ve kontrolsüz şarj



Araçtan şebekeye (V2G) mekanizmaları, belirli seviyelerdeki EA şarj talebinin V2G'ye hazır EA'lar tarafından karşılandığı kontrollü şarj/deşarj mekanizmaları olarak da düşünülebilir. Gerçekleştirilen simülasyonda (Duyarlılık Analizi 3), 385 EA'nın (AC tip 2, 3,7 kW) aynı anda şarj edilmesiyle 11 OG/AG trafosunun aşırı yüklenmesi durumu, e-mobilite yükünün yalnızca %25'inin diğer mevcut araçlarla karşılanmasıyla hafifletilebilmiştir. V2G'nin gerçekleştirilmesi için belirli düzeyde altyapı ve piyasa mekanizmaları gerekli olsa da, e-mobilite yüklerinin dağıtım sistemleri üzerindeki etkisini sınırlamak ve gerekli yatırımları ertelemek için etkili bir yaklaşım olduğu görülmektedir.

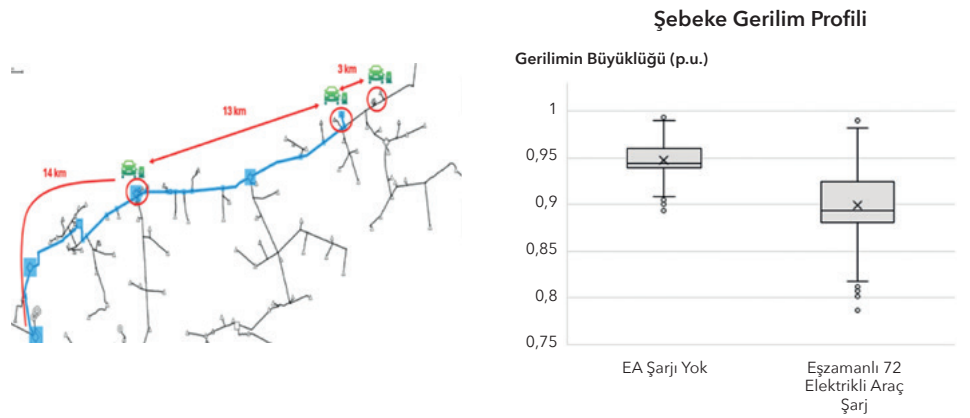
Şekil 6. V2G'nin Akköprü dağıtım şebekesinin bir kısmı üzerindeki etkisi



Akıllı şarj mekanizmalarının mevcut olmadığı durumlarda bir başka seçenek de yerel otomasyon çözümlerinin e-mobilite yükünün yönetilmesine katkıda bulunduğu basit kontrollü şarjdır. Örneğin, otoyollarda şarj durumunda (Duyarlılık Analizi 4), zayıf bir fider üzerindeki ardışık şarj noktalarında şarjı koordine etmek zorlu bir görevdir. Şekil 7'de gösterildiği gibi, yakıt istasyonlarındaki tüm şarj noktaları e-mobilite yükleriyle (100 kW DC) yüklenirse, şebekede voltaj düşüşü kaçınılmaz hale gelir. Bu tür koşullar, elektrikli araçlarla seyahat edildiği ve şarj noktalarının çoğunun dolu olduğu tatil dönemlerinde ortaya çıkabilir.

Gerilimi izin verilen işletme seviyelerinde tutmak için besleme iletkenlerinin güçlendirilmesine yatırım yapmak bir çözüm olabilir. Ancak, bu tür vakalar yılda sadece birkaç gün meydana gelebileceğinden, kontrollü şarj gibi operasyonel önlemler de uygulanabilir çözümlerdir.

Şekil 7. Otoyolda tipik şarj ve tasvir edilen şebekenin gerilim profili



Böyle durumlarda, fiderin yüklenme seviyesine ya da e-mobilite yüklerinden kaynaklanan voltaj büyüklüğü düşüşüne bağlı olarak, eşzamanlı nominal şarj sınırlandırılabilir.

Akıllı şarj mekanizmaları, özellikle maksimum kapasite ihtiyaçlarını karşılamak için gerçekçi görünmeyen şebeke yatırımlarından kaçınarak sistem maliyetlerinden tasarruf etmek için gereklidir. Akıllı şarj çözümlerinin uygulanması, gelişmiş ölçüm ve fiyatlandırma sinyallerine otomatik şarj yanıtlarını içerir. Başlangıçta, çok zamanlı ve/veya dinamik fiyatlandırma mekanizmaları gereklidir; bunlar daha sonra belirli saatlerde EA esnekliğinden yararlanmak için toplayıcılar aracılığıyla esneklik toplama mekanizmalarına dönüşebilir.

Ek bir adım da DSO koordinasyonu ile toplu esneklik ticaretine olanak tanıyan yerel esneklik piyasalarının kurulmasını içermektedir. E-mobilite yüklerini etkin bir şekilde yönetmek için bölgeye özgü fiyatlandırma stratejilerinin geliştirilmesi tavsiye edilmektedir. Bölgesel teknik kısıtların gerçek maliyetini yansıtmak için esneklik piyasalarından ve bölgesel marjinal fiyatlandırmadan yararlanılabilir.

EA şarjı, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji depolama arasında sinerji kurulması, genel şebeke verimliliğini ve esnekliğini artırarak daha sürdürülebilir bir enerji sistemine geçişi destekleyebilir. EA şarj altyapısının planlamasını şebeke kapasitesi ile koordine etmek, optimum gelişim ve maliyet verimliliği sağlamak için çok önemlidir. Stratejik planlama, olası şebeke etkilerini öngörmek ve hafifletmek için gerekli olacaktır.

E. Türkiye Ulaştırma Sektörü Dönüşümünde Öncelikli Alanlar

Bu çalışmanın bulgularından yola çıkarak, enerji politika yapımcıları, piyasa düzenleyicileri, dağıtım şebekesi şirketleri, otomotiv endüstrisi, şarj teknolojisi geliştiricileri ve yatırımcıları, şehir planlamacıları ve akademi çevrelerinde, EA ve şarj altyapısı konularındaki tartışmalara katkı sağlamak için beş öncelikli alan belirlenmiştir.

1. Elektrikli araç ve şarj hizmetleri piyasasının paralel olarak hızlandırılması:

- **Satın alma teşvikleri:** Fiyat veya vergi indirimleri gibi satın alma teşviklerinin uygulanması EA satışlarını önemli ölçüde canlandırabilir. Bu teşvikler, içten yanmalı motorlu araçların aşamalı olarak kullanımdan kaldırılmasını amaçlayan tedbirlerle stratejik olarak birleştirilmelidir.

- **Kamu liderliği:** Kamu kurumları elektrikli araç pazarını teşvik etmede proaktif bir rol üstlenmelidir. Bu; iddialı hedefler belirlemeyi, düzenleyici destek sağlamayı ve elektrikli araç teknolojilerini ilerletmek için araştırma ve geliştirme faaliyetlerine yatırım yapmayı gerektirecektir.
- **Kamu ve filo araçlarının elektrifikasyonu:** Sübvansiyonlar veya teşvikler filo operatörlerini EA'lara geçmeye teşvik edebilir.
- **Şarj altyapısı:** Kamu kurumları, şehir merkezleri, otoyollar ve park tesisleri gibi stratejik yerlerde şarj istasyonlarının konuşlandırılmasına yatırım yapabilmelidir. Kamu-özel sektör ortaklıkları da işletmeleri kendi tesislerinde şarj altyapısı kurmaya teşvik edebilir.
- **Aşamalı yaklaşım:** Pazar gelişiminin ilk aşamalarında kritik öneme sahip olsa da, sürdürülebilir ve rekabetçi bir pazar oluşturmak için EA teşvikleri aşamalı olarak kaldırılmalıdır. Bu, yumuşak bir geçişe olanak tanır ve EA pazarının uzun vadede sürdürülebilirliğini sağlar.

2. E-mobilite odaklı dağıtım şebekesi yatırım stratejilerinin geliştirilmesi:

- **İşbirlikçi yaklaşım:** 2035 yılına kadar dağıtım şebekelerinin 11 milyon EA'ı barındırması için dağıtım şebekelerinde, yılda ortalama %5 artacağı varsayılan EA dışı yük artışı için planlanan harcamaların ötesinde en az %12'lik bir yatırım artışı gereklidir. Temel zorluk, AG şebekesinin genel güvenilirliği etkileyen kısıtlamalarında yatmaktadır. Bu, özellikle OG ve AG trafolarını ve hatlarını kademeli bir şekilde etkileyen AG sistemlerinde ek yatırımlar gerektirmektedir. ETKB ve EPDK gibi politika belirleyici ve düzenleyici kurumlar, bu zorlukların üstesinden gelmek için DSO'lara e-mobilite ile ilgili özel CapEx tahsis etmelidir. Alternatif olarak, düşük maliyetli ve geçici bir çözüm olarak, EA'ların dağıtım şebekesine entegrasyonunu kolaylaştırmak için Müşteri Ortalama Kesinti Süresi Endeksi (CAIDI) ve Müşteri Ortalama Kesinti Sıklığı Endeksi (CAIFI) limitleri gibi güvenilirlik kriterlerini gevşetebilirler. Güvenilirliği korumak ve e-mobilite için sermaye ayırmak arasında bir denge sağlamak çok önemlidir. Bu optimizasyon ETKB, EPDK ve DSO'lar (ya da onların derneği olan ELDER) tarafından koordine edilebilir. Ayrıca, e-mobilite yükleri için özel trafo kapasitesi tahsis edilmesi ve diğer yük türleri için yeni trafoların planlanması, geçişin önünü etkili bir şekilde açabilir. Sonuç olarak, güvenilirlik standartlarını korurken EA'ların şebekeye sorunsuz bir şekilde entegrasyonunu sağlamak için enerji sektörü, otomotiv endüstrisi, düzenleyici kurumlar ve araştırma kurumlarından paydaşların dahil olduğu işbirliğine dayalı bir yaklaşım gereklidir.

3. Zamana ve bölgeye bağlı şarj önlemlerinin geliştirilmesi:

- **Zamana göre değişen şarj fiyatlandırması stratejilerinin geliştirilmesi:** Akıllı şarj stratejilerinin uygulanması, özellikle düşük şebeke yükünün olduğu ya da yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olduğu dönemlerde uygun maliyetli ve şebeke dostu şarjı teşvik etmektedir. Gerçek elektrik üretim ve dağıtım maliyetleriyle uyumlu, zamanla değişen tarifeler/ fiyatlandırmalar, yoğun olmayan saatlerde şarj faaliyetlerini teşvik ederek hem EA sahiplerine hem de genel şebeke istikrarına fayda sağlayabilir. EA kullanıcılarına özel çok zamanlı (ToU) tarifelerin/fiyatlandırmaların uygulamaya konulması, EA şarjının doğasında var olan esneklikten faydalanılmasını sağlayabilir. Bu tarifelerin, yenilenebilir enerji ve EA'ların giderek daha fazla benimsenerek pazarın daha rekabetçi hale gelmesiyle birlikte doğal olarak ortaya çıkması ve gelişmesi muhtemeldir; bu da enerji tedarikçilerini yenilikçi fiyatlandırma teklifleri geliştirmeye teşvik edecektir.
- **Çok zamanlı şebeke fiyatlandırmasının uygulanması:** Elektrik şebekelerinin hacimsel zamana göre fiyatlandırılması, mevcut şebeke kapasitesinin EA'lar gibi dağıtık enerji kaynakları tarafından verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için temel bir koşuldur. Elektrik şebekelerini kullanmanın maliyetinin yıllık puant talep kapasitesine (talep ücretleri olarak adlandırılır) dayandığı diğer şebeke tarife tasarımlarıyla karşılaştırıldığında, ağırlıklı olarak hacimsel bir tasarım, EA'lar gibi esnek elektrikli son kullanımlar için daha uygun olacaktır.
- **Bölgeye özgü şarj fiyatlandırması stratejilerinin geliştirilmesi:** E-mobilitenin benimsenmesi, dağıtım şebekesinde hat/transformatör aşırı yüklenmesi ve voltaj düşüşleri gibi zorluklara yol açabilir, ancak bu sorunlar bölgelere göre değişmektedir. Aşırı yüklenme belirli bölgelerde daha belirgin olma eğilimindedir ve e-mobilite yüklerinin uzlaştırma mekanizmaları ve bölgesel fiyatlandırma stratejileri yoluyla daha az sıkışık fiderlere yönlendirilmesiyle hafifletilebilir. Bu durum, talep tarafı katılımı, V2G ve taraflar arası ticaret gibi esneklik seçeneklerinin toplanabilmesi için dağıtım sistemleri içinde esneklik piyasalarının kurulmasını gerektirir. Nihayetinde şebeke esnekliğinin ve güvenilirliğinin artması sağlanacaktır.

4. Dağıtım şebekeleri üzerindeki e-mobilite yük etkisini sınırlandırmak için akıllı şarj mekanizmalarının planlanması, geliştirilmesi ve uygulanması

- **EA şarj altyapısının şebekeye entegre planlanması:** Şarj altyapısı planlaması, mevcut veya planlanan şebeke kapasitesi haritaları ile eşleştirilen beklenen şarj talebinin ayrıntılı haritasını içermelidir. Bu yaklaşım, şarj altyapısının şebekeye uygun ve maliyet açısından optimum şekilde konuşlandırılmasını sağlar. DSO'lar, planlama sürecinde bilinçli karar almayı kolaylaştırmak için barındırma kapasitesi haritaları gibi şebeke kapasitesi hakkında bilgi sağlamalıdır.
- **Şebeke dostu EA gelişimini desteklemek için akıllı teknolojilerin yaygınlaştırılması:** Küresel fiyatlandırma denemeleri, akıllı şarj mekanizmalarının EA'ların elektrik sistemine entegrasyonunu optimize ettiğini göstermiştir. Bu teknolojiler, gelişmiş ölçüm sistemlerini ve fiyatlandırma sinyallerine yanıt veren otomatik şarjı içermektedir. Hem mevcut hem de gelecekteki şarj altyapısı, hızlı bir şekilde hayatımıza girmese bile akıllı işlevselliği içermelidir. Bu, özellikle birçok elektrikli aracın uzun süreler boyunca şarj edildiği işyerleri ve kamusal alandaki şarj istasyonları için önemlidir. Politika yapımcılar tarafından akıllı işlevselliğin zorunlu kılınması, yoğun saatlerde kullanım üzerinde kontrol sağlayarak optimize edilmiş şarj potansiyelini en üst düzeye çıkarabilir.
- **EA şarjı ile yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji depolama arasında sinerji oluşturulması:** Enerji ve ulaşım planlamasına yönelik kapsamlı bir yaklaşım, EA'ların şebekeye uygun maliyetli bir şekilde entegre edilmesi ve faydalarından istifade edilmesi için elzemdir. Orta ve uzun vadede, yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etmek ve EA'lar gibi esnek yükleri etkin bir şekilde yönetmek için verimli piyasa mekanizmaları gibi detaylı fiyatlandırma yapıları gereklidir. Örneğin, fiyat ayarlamaları yoluyla en yoğun güneş enerjisi üretimi olduğu dönemlerde şarjı teşvik etmek, şebeke kullanımını optimize edebilir ve yüksek güneş enerjisi üretiminin neden olduğu voltaj dalgalanmaları gibi teknik kısıtları hafifletebilir. Bu durum, EA sahiplerine fayda sağlamanın yanında, şebeke istikrarını artırır. Ayrıca, zamanla değişen şebeke fiyatlandırmasının uygulanması ve mevcut altyapının verimliliğinin en üst düzeye çıkarılması, maliyetli şebeke yatırımlarının ertelenmesi için önemli olacaktır.

- **Eşzamanlı ve aşırı şarjın etkisini yönetmek için yerel otomasyon planlarının geliştirilmesi:** Akıllı şarj mekanizmalarına ilave olarak, yerel otomasyon özelliklerinin mevcut olması ve gelecekteki şarj altyapısına entegre edilmesi kritik olacaktır. Bu otomasyon özellikleri, dağıtım sistemlerinin güvenilir çalışmasını önemli ölçüde etkileyen eşzamanlı şarj olaylarının kontrol edilmesini ve sınırlandırılmasını sağlar.

5. Elektrikli araç şarjı için yeni iş modellerinin değerlendirilmesi, geliştirilmesi ve uygulanması: EA şarj altyapısındaki küresel ilerlemeye rağmen, sürdürülebilir bir iş modeli oluşturmak birçok şirket için önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Kamu destek programları, EA şarj piyasasının ticarileşmesini kolaylaştırmak için önemlidir. Türkiye’de EA şarj altyapısı politikaları, EA sayılarına bağlı ve kademeli olarak azaltılan sübvansiyonlarla ticari operasyonlara geçişe odaklanmalıdır. Kurulum maliyeti sübvansiyonlarının işletme maliyetlerinden ayrılması, uygulanabilirliği teşvik etmektedir. Şarj noktası kullanım verilerinin izlenmesi ve paylaşılması, bilinçli karar alma süreci için çok önemlidir. Kamu-özel sektör ortak finansman modelleri düşük kapasiteli lokasyonlara öncelik verebilir ve dağıtım şebekesi şirketleri kamu ihaleleri yoluyla bölgesel altyapı gelişimi sağlayabilir. Batarya destekli şarj cihazları, enerji depolama olanağı sunarak talebe göre yük kaydırma ve puant saatlerde enerjinin kullanılmasına olanak sağlayarak, sistem esnekliği sağlar. Tüm bu stratejiler EA şarj altyapısının verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır.



1. Giriş

Türkiye, 2021 yılının Ekim ayında Paris Anlaşması'nı onaylamış ve akabinde 2053 yılına kadar net sıfır (Net0) sera gazı emisyonlu bir ekonomiye ulaşma taahhüdünü beyan etmiştir. Bu iddialı hedef, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye dayalı bir yapıya geçişin yanı sıra sanayi, binalar ve ulaşım gibi enerji yoğun sektörlerin karbonsuzlaştırılmasını gerektirir. Ayrıca bu hedef, sanayi için enerji açısından verimli, düşük karbonlu ve yüksek katma değerli üretim yöntemlerine geçişi gerektirmektedir. Arz güvenliğinin sağlanması, enerjiye ekonomik erişim ve emisyonların azaltılması Türkiye'nin enerji dönüşümünde önemli unsurlar olmakla birlikte, bu hususları ele almak üzere çok sayıda politika ve strateji hızla geliştirilmektedir. Elektrifikasyon kapsamındaki en önemli stratejiler arasında, elektriğin bu sektörler tarafından doğrudan (örneğin, elektrikli araçların (EA'ların) ya da binalarda ısı pompalarının kullanılması yoluyla) veya dolaylı olarak (örneğin, elektroliz yoluyla elde edilen sentetik yakıtlar ya da yeşil hidrojen yoluyla) kullanımının desteklenmesi yer almaktadır. Dolayısıyla elektrik sistemi, Türkiye'nin net sıfır emisyon hedeflerine ulaşma ve ekonomisini karbonsuzlaştırma yönündeki çabalarının bel kemiği niteliğindedir.

Ülkenin yenilenebilir enerjiye olan bağıllığı, 11. Kalkınma Planı'nda belirtilen 2023 hedefinin aşarak yenilenebilir enerjinin elektrik üretimine %40 oranının üzerinde katkı sağlamasıyla kanıtlanmıştır.³ Mevcut durumda Türkiye'nin toplam elektrik arzının yaklaşık %42,3'ünün yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması ve hidroelektrik enerjinin bu alanda önemli bir paya sahip olması dikkat çekicidir. Bu bağlamda, ulaştırma sektörü ile giderek daha fazla yenilenebilir enerjiyle çalışan bir elektrik şebekesi arasındaki uyum, Türkiye'de sürdürülebilir ve karbondan arındırılmış bir ulaştırma sektörüne doğru dönüştürücü bir geçiş zemin hazırlayacaktır.

Ulaştırma sektörü, Türkiye'nin toplam nihai enerji talebinin %26'sını oluşturarak ülkenin enerji görünümünde kritik bir rol oynamaktadır⁴ (bknz. Şekil 8). Binalar ve sanayiden sonra üçüncü en büyük tüketici olarak konumlanmaktadır. Ulaştırma sektörü, Türkiye'nin karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %22'sine neden olmakta ve bu emisyonların %90'ından fazlası karayolu taşımacılığında kaynaklanmaktadır⁵. Bu dikkate değer karbon ayak izi, öncelikle sektörün enerji karışımının %99'undan fazlasını teşkil eden petrol ürünlerine olan yoğun bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, elektrik sadece %0,4'lük bir paya sahiptir ve yenilenebilir enerji kaynakları

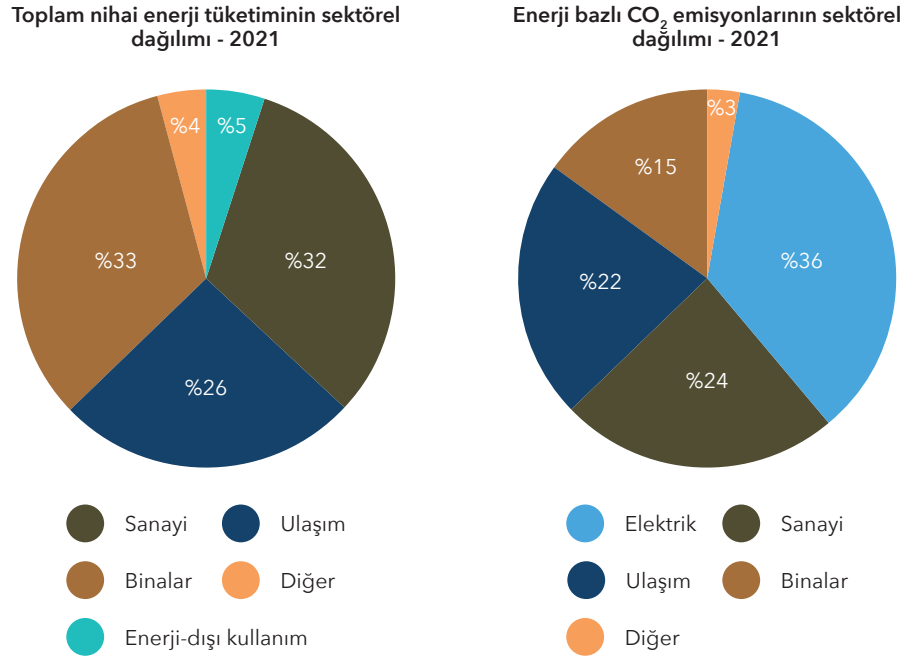
³ T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023. ON İKİNCİ KALKINMA PLANI (2024-2028). https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-Ikinci-Kalkinma-Planı_2024-2028_11122023.pdf

⁴ TMMOB Makina Mühendisleri Odası, n.d. ULAŞTIRMA SEKTÖRÜNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/c9882bbac1c7093_ek.pdf

⁵ SHURA, 2018. Türkiye ulaştırma sektörünün dönüşümü: Elektrikli araçların Türkiye dağıtım şebekesine etkileri. <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2019/12/SHURA-2019-12-Turkiye-Ulastirma-Sektorunun-Donusumu-Elektrikli-Araclarin-Turkiye-Dagitim-Sebekesine-Etkileri.pdf>

ulaştırma sektörünün toplam enerji karışımının yalnızca %0,5'ini⁶ temsil etmektedir.

Şekil 8. Türkiye’de toplam nihai enerji tüketimi ve enerjile ilişkili CO₂ emisyonlarının dağılımı, 2021



Kaynak: IEA

Ulaşım sektöründe karbonsuzlaşma gereksinimi ele almak için, enerji verimliliğinin artırılması, elektrifikasyon ve sıfır karbonlu alternatif yakıtlara geçiş dahil olmak üzere bir dizi strateji üzerinde çalışılmaktadır. EA'lar, daha temiz kentsel ortamlara katkısından, elektrik yükü yönetiminin kolaylaştırmasına ve daha fazla genel verimlilik sağlamasına kadar çeşitli faydaları nedeniyle küresel olarak yaygın bir şekilde benimsenmektedir.

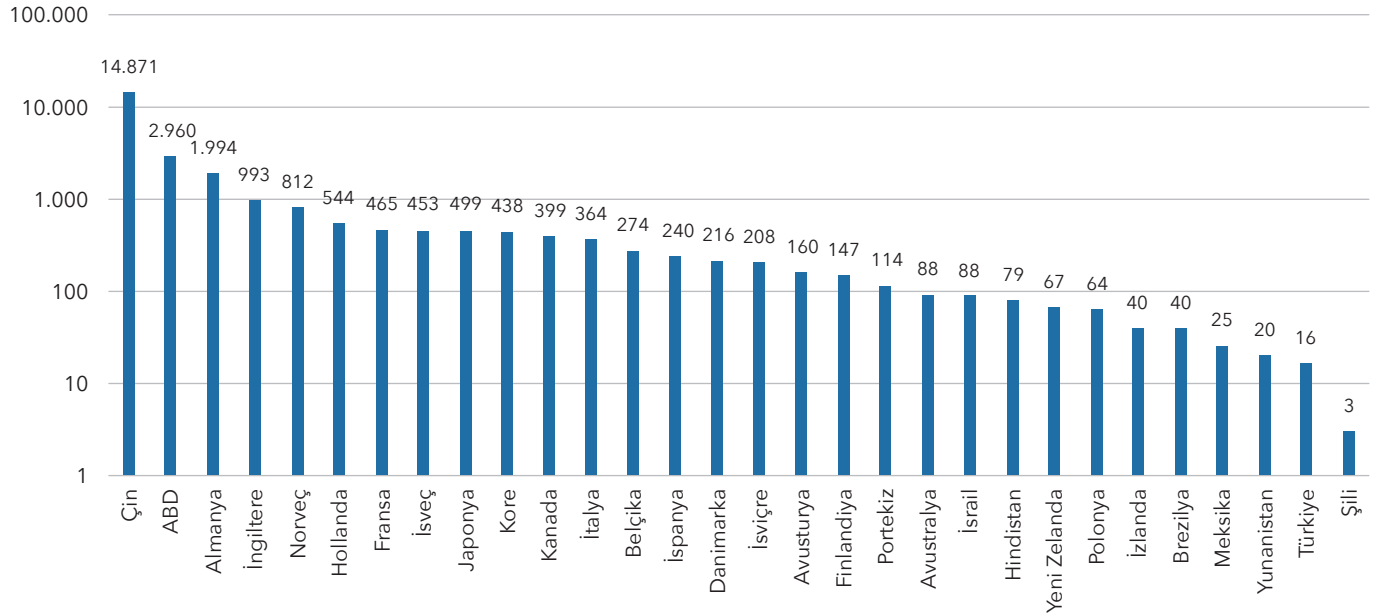
Küresel EA filosu 2022 yılı sonu itibariyle 26 milyon adedi aşmıştır.⁷ Farklı ülkelerdeki EA sayısı ve ilgili coğrafi dağılımı Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmektedir.

⁶ Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024. Ulusal Enerji Denge Tabloları. <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>

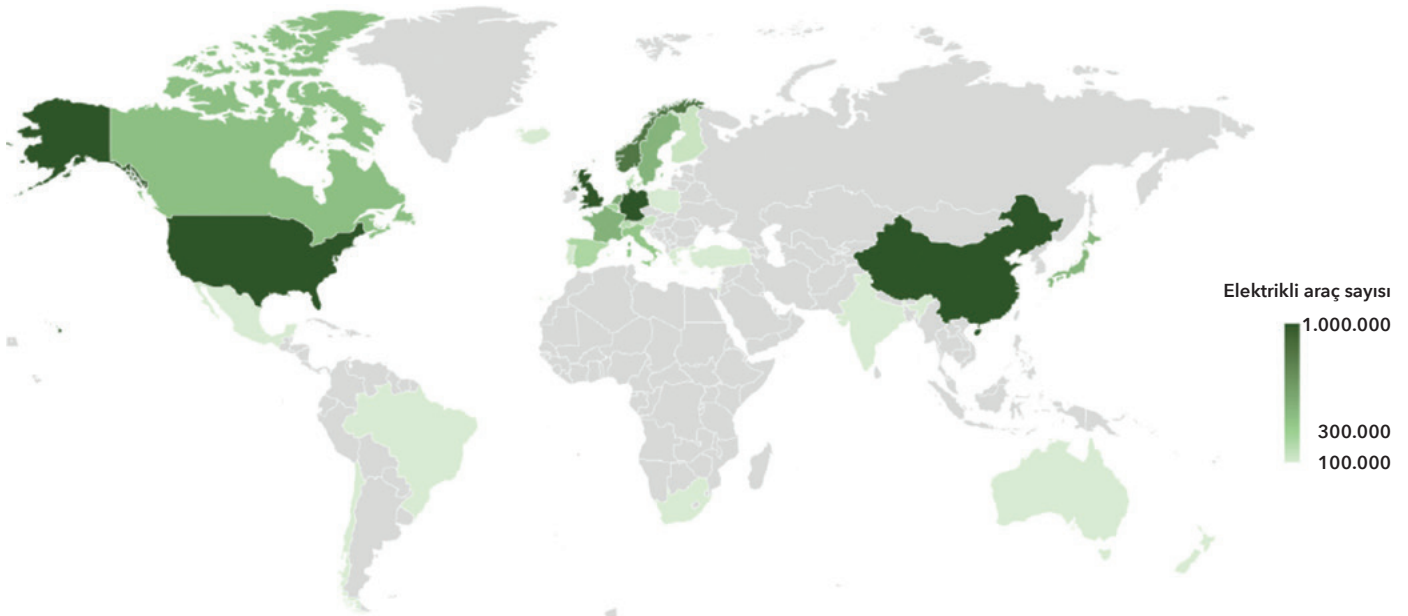
⁷ IEA, 2024. Global EV Data Explorer. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>

Şekil 9. Farklı ülkelerdeki EA sayısı (2022)

Elektrikli araç sayısı [Bin]

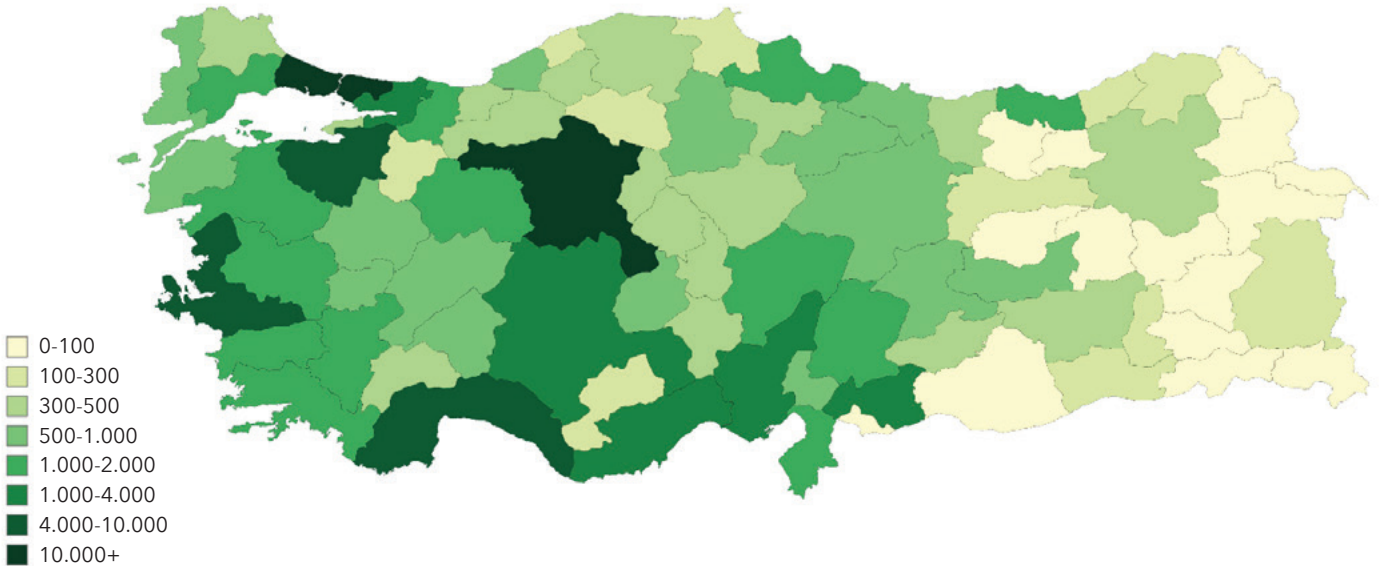


Şekil 10. EA'ların farklı ülkelerdeki coğrafi dağılımı (2022)

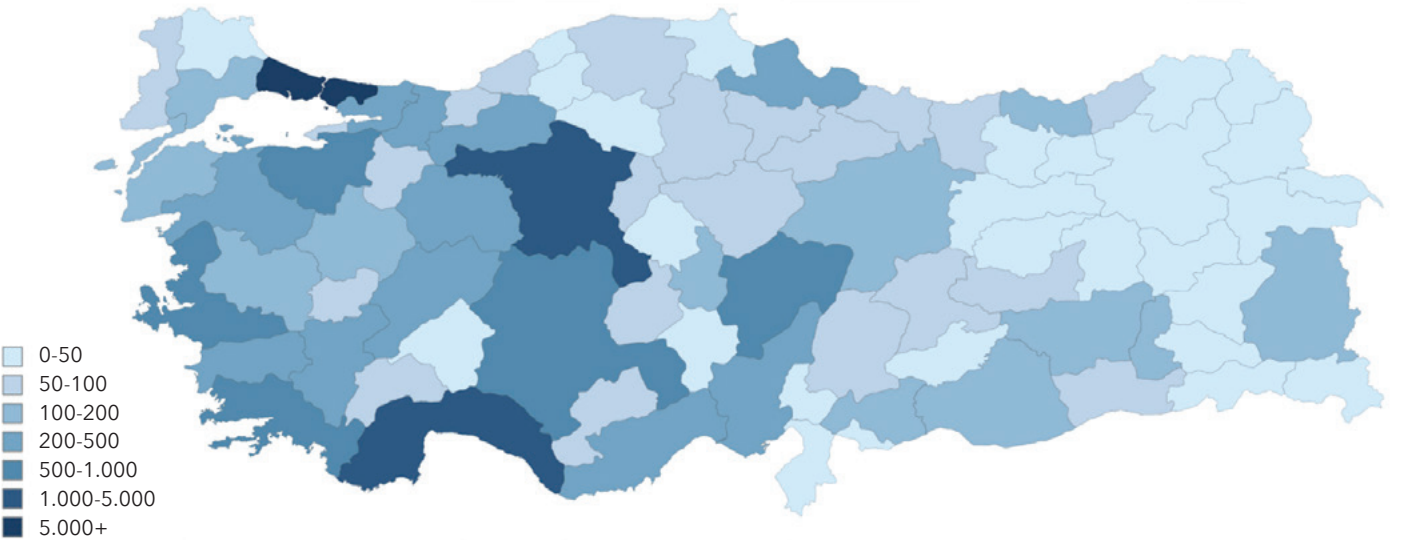


Türkiye bağlamında, 2023 yılı itibariyle 80.735 tam bataryalı EA ve yaklaşık 5.906 plug-in hibrit elektrikli araç (PHEA) bulunmaktadır ve bu toplam araç stokunun yüzde 0,5'ine denk gelmektedir⁸. Türkiye genelinde EA'ların ve şarj soketlerinin coğrafi dağılımı sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmektedir. SHURA'nın net sıfır emisyon yol haritasına⁹ dayalı olarak binek araçların gelişiminde EA'ların payının düşük bir rakamla başlamakla birlikte olsa hızlı bir büyüme kaydetmesi öngörülmektedir (Şekil 13).

Şekil 11. Türkiye'de elektrikli araçların coğrafi dağılımı- 2023 yılı



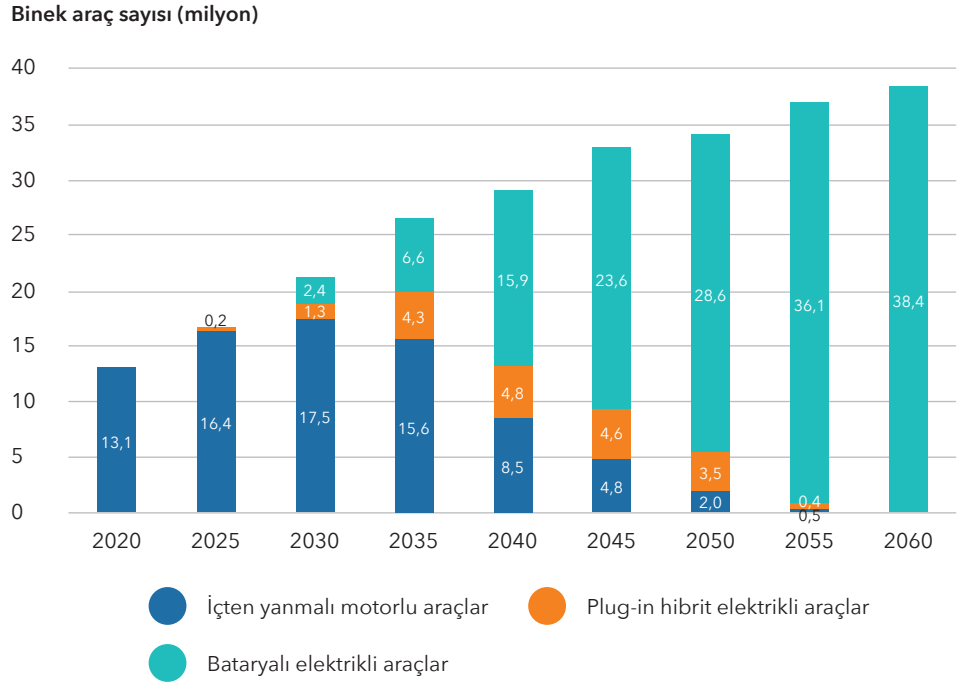
Şekil 12. Türkiye'deki şarj soketlerinin coğrafi dağılımı - 2023 yılı



⁸ European Commission, n.d. European Alternative Fuels Observatory. <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/>

⁹ SHURA, 2023. Net Zero 2053: A Roadmap for the Turkish Electricity Sector. <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/05/Net-Zero-EN.pdf>

Şekil 13. SHURA'nın net sıfır emisyon yol haritasına göre binek araçların gelişimi



Çalışma kapsamında, bataryalı ve plug in hibrit araçların hepsi EA olarak adlandırılmakta olup, şarj edilmeyen hibrit araçlar değerlendirme dışı bırakılmıştır. Türkiye’de 2023 yılında 80.735’den 2035 yılında yaklaşık 11 milyona ulaşacağı öngörülen EA stokunun, yıllık tahmini 37 terawatt-saat (TWh) elektrik ihtiyacı doğuracağı öngörülmektedir.¹⁰ Fakat elektrifikasyon sadece binek araçlarla sınırlı olmayacaktır; otobüsler, minibüsler ve iki/üç tekerlekli araçlar da dahil olmak üzere farklı karayolu toplu taşıma araçları elektrifikasyon için önemli fırsatlar sunmaktadır. Ayrıca, karayolu yük taşımacılığı ve şehir taşımacılığının elektrifikasyon potansiyeli de elektrikli ulaşımın çok yönlü rolünü vurgulamaktadır. Ancak elektrikli mobilitenin özellikle düşük karbonlu dönüşüme ve iyileştirilmiş hava kalitesine katkıda bulunması, elektrik sektörünün eş zamanlı olarak karbondan arındırılmasına bağlıdır.

EA’lar ve geleneksel içten yanmalı motorlu araçlar yolcu ve yük taşıma ortak hedefini paylaşırsalar da enerji kullanımı açısından önemli ölçüde farklılık göstermektedirler. Geleneksel araçlar, yenilenemeyen ham petrol türevi petrol ürünlerinin kullanıldığı bir yakıt deposuna ve yaklaşık 12 voltluk bir aküye sahiptir. Tek yönlü çalışma prensipleri, alternatör ve yakıt enjektörü tarafından kontrol edilen yakıt yanması ve motor tahrik üretimini içerir. Buna karşılık, elektrikli araçta bir elektrik motoru, batarya paketi, şarj ekipmanı ve bir AC-DC invertör bulunur. Elektrikliğin mevcut olduğu her yerde şarj edilebilen EA’nın

¹⁰ EA’lar için 20 kWh/100km ve HHA’lar için 104 kWh/100km tüketimi göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. EA’lar ve HHA’lar için ortalama günlük mesafe sırasıyla 40 km ve 100 km olarak varsayılmıştır.

batarya paketi, dinamik bir enerji depolama sistemi sunmakta ve şarjı şebeke ya da kullanıcı ihtiyaçlarına göre en uygun hale getirmek için kullanılabilen bir esneklik sağlamaktadır (akıllı şarj). Araçtan şebekeye (Vehicle-to-grid - V2G) çözümlerinin piyasada yaygınlaşmasıyla, depolanan elektrik şebekeye yönlendirilebilir ve dağıtık bir enerji kaynağı olarak hizmet edebilir.

Her ne kadar geleneksel araçlar dakikalar içinde yakıt ikmali yapabilse de EA'ların şarj süreleri şarj teknolojisine ve batarya boyutuna bağlı olarak dakikalar ile saatler arasında değişmektedir. İş modelleri, elektrik fiyatlandırma seviyeleri ve sürüş alışkanlıkları gibi faktörler bir EA'nın gün içinde ne zaman şarj edileceğini etkilemektedir. Ortalama olarak, günlük yolculuklar yaklaşık 35 kilometreyi (km) kapsar¹¹. Akşam saatlerinde eve döndükten sonra aracını şarj eden bir EA sahibi, gece boyunca 300 km mesafe kat etmek için gerekli enerjiyi doldurabilir ve bu da ortalama günlük yolculuk mesafelerini karşılamak için 1-2 saatlik daha esnek bir şarj süresine olanak tanır¹². Böylesi bir esneklik, şarj saatlerinin optimize edilmesine olanak tanır ve akşam elektrik yük profilleri üzerinde olası etkileri azaltır, çünkü yoğun saatlerde eşzamanlı şarjlar yönetilemez yüklere yol açabilir. EA'ların işyerlerinde veya kamuya açık yerlerde (hızlı) şarj edilmesi günlük yükü kaydırabilir, ancak bu elektrik arzının fazla olduğu dönemlere denk gelmeyebilir. Bu senaryo, şebeke yönetimi için bir zorluk teşkil etmekte ve potansiyel yük profili alevlenmelerinin üstesinden gelmek için stratejik planlama gerektirmektedir.

EA'ların şarj edilmesi aynı zamanda gerçek zamanlı elektrik üretimine dayalı enerjinin verimli tüketimi için bir takım fırsatlar içerir ve güneşli yaz günleri ya da gece boyunca yüksek rüzgâr enerjisi üretimi dönemleri gibi yenilenebilir enerjinin bol olduğu dönemlerde sürdürülebilir kaynak kullanımı için bir fırsat sunar. Örneğin, çatılardaki güneş fotovoltaik (PV) panellerinden elde edilen enerjinin depolanarak gece şarjı için kullanılması, sistem esnekliği için alternatif sağlar. EA'ların yalnızca ulaşım araçları olarak değerlendirilmesinden ziyade, aynı zamanda esneklik kaynakları olarak değerlendirilmesi, ulaşım ve enerji sektörlerinin eşleşmesi açısından fayda sağlar. Bu sinerjilerin doğru anlaşılıp planlanması, dağıtım şebekelerinde etkin yük yönetimi açısından son derece önemlidir. Geleneksel olarak puant talep dönemlerine göre tasarlanan dağıtım şebekeleri, EA büyümesini öngörmeli ve EA'ların şebekeye etkisiyle başa çıkmak için uygun tedbirleri tasarlamalıdır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) gibi politika yapımcılar ve düzenleyici otoriteler tarafından hayata geçirilen stratejiler, gelişen EA ekosisteminde güncellenmiş politikalara ve çerçevelere duyulan ihtiyacın vurgulandığı şarj hizmeti ortamının biçimlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır¹³.

¹¹ TÜİK, 2023. Taşıt-kilometre İstatistikleri, 2021.

<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tasit-kilometre-istatistikleri-2021-49527>

¹² HedefFilo, n.d. ELEKTRİKLİ ARAÇ LİSTESİ. <https://ev.hedef filo.com/ev-nedir/elektrikli-arac-listesi>

¹³ EPDK şarj hizmet düzenlemesi, April 2, 2022

SHURA'nın "Türkiye Ulaştırma Sektörünün Dönüşümü: Elektrikli Araçların Türkiye Dağıtım Şebekesine Etkileri" çalışması, 2,5 milyon EA'nın (2030 yılında araç stokunun %10'unu temsil etmektedir) neredeyse hiç ek yatırım yapılmadan ve sınırlı bir etkiyle Türkiye'nin dağıtım şebekesine entegre edilebileceğini ortaya koymuştur. Son yıllarda hızlanan EA gelişimi ve bunun Türkiye elektrik şebekesi üzerindeki artan etkileri göz önüne alındığında, güncel durumu analiz etmek, EA ekosistemi için güçlü hedefler belirlemek ve elektrik şebekesi için yenilikçi eylemler önermek için bu yeni çalışmaya ihtiyaç duyulmuştur.

Çalışmanın amacı, ulaşım sektörünün elektrifikasyonun Türkiye'deki iki büyük elektrik dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemek, e-mobilite kaynaklı ek yatırım gereksinimlerini araştırmak, EA entegrasyonunu kolaylaştırmak için karşı önlemleri (akıllı şarj mekanizmaları gibi) vurgulamak ve e-mobilite yüklerinin Türkiye elektrik sistemine sorunsuz biçimde dahil edilmesi için uygun politika önerileri sunmaktır. Pilot bölgeler, toplam nüfusun yaklaşık %14'ünü ve toplam elektrik talebinin de buna karşılık gelen bir payını oluşturmaktadır. Toplam 21 şebeke arasından, araştırma bu iki önemli dağıtım şebekesine odaklanmaktadır. Şekil 14'te gösterildiği gibi araştırma çerçevesi 2035 yılını hedeflemekte ve iki temel senaryoyu değerlendirmektedir: Net-Sıfır Senaryosu (Net0) ve Baz (Business-as-Usual - BAU) Senaryo. Net0 Senaryosu, SHURA'nın net sıfır emisyon yol haritasına dayanan projeksiyonlar¹⁴ doğrultusunda 2035 yılına kadar yaklaşık 11 milyon EA ve Hafif Hizmet Aracının (HHA)¹⁵ araç stokunda yer alacağını öngörmektedir. Buna karşılık BAU Senaryosunda, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın 2030 yılına kadar 1,6 milyon EA beklentisindeki eğilimin 2035'e yansıtılmasıyla 5 milyon EA ve HHA'nın yollarda olacağı öngörülmektedir.¹⁶

Çalışma kapsamında, BAŞKENT ve AYEDAŞ Dağıtım Sistemi Operatörlerinden (DSO) seçilen ve ülke genelinde hem metropol hem de kırsal alanları temsil eden dört pilot bölgeye (Kartal, Akköprü, Ümitköy ve Şile) odaklanılmaktadır. Araştırmadaki simülasyonlar, DC hızlı şarj teknolojisinin etkilerini yakalamak için 30 dakikalık zaman dilimlerini kullanmak suretiyle hem hafta içi hem de hafta sonu profillerini kapsayan haftalık zaman aralıklarında gerçekleştirilmiştir. İki farklı şarj rutini dikkate alınmıştır: ağırlıklı olarak konut şarj noktalarında gerçekleşen evde şarj ve kamuya açık şarj noktalarında daha yüksek bir şarj payı içeren kamusal alanlarda şarj. BAU ve Net0 ana senaryolarının yanı sıra, EA'ların ve HHA'ların değişen koşullar altındaki etkisini değerlendirmek için dört ek duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu araştırmaların

¹⁴ SHURA, 2023. Net Zero 2053: A Roadmap for the Turkish Electricity Sector. <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/05/Net-Zero-EN.pdf>

¹⁵ Burada "binek otomobiller ve hafif hizmet araçları" terimi 3,5 tondan daha az ağırlığa sahip araçları ifade etmektedir. <https://www.hedefilo.com/blog/ticari-hafif-ticari-ve-binek-arac-nedir-farklari-nedir>

¹⁶ Bu raporda teslimat ve uzun yol kamyon ve otobüsler gibi elektrikli ağır hizmet tipi araçlar dikkate alınmamıştır.

merkezinde, EA'ların ve HHA'ların şebeke etkisinin kapsamlı bilgisayar simülasyonları aracılığıyla değerlendirilmesi yer almaktadır. Çalışma, ulaştırma sektörünün elektrifikasyonunda şebeke etkisini azaltmak için gerekli yatırım gereksinimlerini belirlemek için detaylandırılmıştır. Bu bütüncül yaklaşım, 2035 yılına kadar Türkiye'de ulaşım sektörünün elektrifikasyonunun ortaya koyacağı çok yönlü zorlukların ve fırsatların kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır. EA entegrasyonunu kolaylaştırmak için uygun karşı önlemler (akıllı şarj mekanizmalar gibi) ve e-mobilite yüklerinin Türkiye elektrik sistemine sorunsuz entegrasyonu için politika önerileri de geliştirilmiştir.

Şekil 14. Çalışmanın çerçevesi

Hedef Yıl <ul style="list-style-type: none"> • 2035 	Senaryo <ul style="list-style-type: none"> • Baz Senaryo (BAU) • Net Sıfır Senaryosu (Net0) 	Pilot Bölgeler <ul style="list-style-type: none"> • Metropol • Kırsal
Analiz Zaman Çerçevesi <ul style="list-style-type: none"> • Haftalık zaman çerçevesi • 30 dakikalık zaman çerçevesi 	Şarj Etme Alışkanlıkları <ul style="list-style-type: none"> • Ev-tipi şarj rutini • Kamu-tipi şarj rutini 	
Duyarlılık <ul style="list-style-type: none"> • Tatil zamanlarında aşırı şarj • Akıllı şarj mekanizmaları • V2G etkisi • Otoyolda şarj etme 	Temel Performans Endeksleri <ul style="list-style-type: none"> • OG ve AG Hatlarının Aşırı Yüklenmesi • Gerilim Düşüşü/Yükselmesi • OG/AG Trafo Yüklenmesi ve Kapasite Faktörü • Yatırım Gereksinimleri 	

Rapor şu şekilde tasarlanmıştır: Bölüm 2'de son dönemdeki küresel gelişmeler ve ulaştırma sektörünün elektrifikasyonuna yönelik hızlandırıcı politikalar ele alınmaktadır. Daha sonra, Bölüm 3'te Türkiye'nin ulaştırma sektörünün güncel durumu ile EA piyasası ve politikaları değerlendirilmektedir. Bölüm 4'te çalışmanın metodolojisi, Bölüm 5'te ise sonuçlar ve tartışmalar yer almaktadır. Rapor, DSO'ları, elektrik sistemi planlayıcıları, EA üreticileri ve şarj altyapısı planlayıcıları gibi tüm EA ekosistemi paydaşları için Türkiye'nin ulaştırma sektörü dönüşümüne ilişkin öncelikli alanların sunulduğu Bölüm 6 ile sonlanmaktadır.

2. Küresel Ölçekte Elektrikli Araçların Şebeke Entegrasyonu

Elektrikli araçlar (EA) için küresel pazar hızla olgunlaşmaktadır. 2022 yılında EA'lar Çin'deki yeni araç tescillerinin neredeyse dörtte birini, Avrupa'daki araç tescillerinin %19'unu ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (ABD) araç tescillerinin %7'sini oluşturmuştur¹⁷. Bu rakamlar, söz konusu bölgelerde 2020 yılındaki EA kayıtlarından iki ila üç kat daha yüksektir. Karayolu taşımacılığı araçlarının egzoz emisyonlarını hedefleyen ulusal ve yerel politikalar bu büyümeye daha da katkıda bulunmuş ve hafif hizmet araçları için Avrupa karbondioksit (CO₂) standartları¹⁸ ve ABD'deki hafif hizmet aracı sera gazı emisyon düzenlemeleri¹⁹ gibi son on yılda küresel olarak artan bir EA filosuyla sonuçlanmıştır.

Devamlı büyümekte olan EA filosunun elektrik şebekesine entegrasyonuna ilişkin çeşitli zorluklar ve fırsatlar ortaya çıkmaktadır. Şayet EA'lardan gelen ek talep yönetilemezse, EA'lar büyük olasılıkla mevcut yoğun dönemlerde şarj edileceğinden ve böylece yoğun elektrik taleplerini daha da şiddetlendireceğinden, bu durum enerji ve dağıtım ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli maliyet artışlarına yol açacaktır. Bu geçiş süreci dikkatli bir şekilde yönetilmezse, elektrik talebindeki artış tüketiciler, enerji sistemi ve çevre için daha yüksek maliyetlere yol açacak ve daha temiz bir karayolu taşımacılığına doğru geçişi yavaşlatabilecektir^{20,21}. Akıllı ya da kontrollü EA şarjı, bu güçlüklerin çoğunun üstesinden gelinmesine yardımcı olabilir ve optimum sistem esnekliği sağlanmasında EA'ların şarjı kullanılabilir. Akıllı şarj, fosil yakıtlı elektrik tüketimini azaltmak ve yeterli yenilenebilir enerji mevcut olduğunda EA'ları şarj ederek şebekeye daha fazla değişken üretimli yenilenebilir enerji kaynağı entegre etmek için önemli bir araçtır. Bu şekilde akıllı şarj, karbon emisyonu azaltımlarını azami düzeye çıkarabilir ve elektrik şebekesinin maliyetli ve gereksiz yatırımlara olan ihtiyacı azaltabilir²².

¹⁷ Monteforte, M., Bernard, Y., Bieker, G., 2023. EUROPEAN VEHICLE MARKET STATISTICS 2022/23. <https://theicct.org/publication/european-vehicle-market-statistics-2022-23/>

¹⁸ European Commission, n.d. CO₂ emission performance standards for cars and vans. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en#:~:text=From%202035%20onwards%2C%20the%20EU,of%20its%20registered%20new%20vehicles.

¹⁹ EPA, 2023. Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Regulations and Standards. <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/light-duty-vehicle-greenhouse-gas-regulations-and>

²⁰ Das, H.S., Rahman, M.M., Li, S., Tan, C.W., 2020. Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. doi: 10.1016/j.rser.2019.109618

²¹ Ashfaq, M., Butt, O., Selvaraj, J., Rahim, N., 2021. Assessment of electric vehicle charging infrastructure and its impact on the electric grid: A review. doi: 10.1080/15435075.2021.1875471.

²² Hildermeier, J., Rosenow, J., Hogan, M., Wiese, C., Jahn, A., Kolokathis, C., 2019. Smart EV Charging: A Global Review of Promising Practices. doi: 10.3390/wevj10040080.

Her ne kadar EA filolarının akıllı şarj işlemleri kullanıcı faydaları açısından incelenmiş olsa da²³ EA'ların elektrik sistemi²⁴ ve büyük EA pazarlarına sahip enerji şebekeleri için esneklik kaynağı olarak sunabileceği değerin daha iyi anlaşılması önem arz eder^{25, 26}.

Bu bölümde, Türkiye'deki gelişmeler için kilit öneme sahip küresel EA pazarlarında akıllı EA şebeke entegrasyonuna yönelik politikalar incelenmektedir (2.1.) Akıllı ve çift yönlü EA şarjının tanımı, faydaları ve bu faydaların ortaya çıkarılması için tarife tasarımı ve şebeke planlaması gibi temel yapı taşları üzerinde tartışılmaktadır (2.2.).

2.1. Avrupa Birliği (AB) ve Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD'de) elektrikli araç şebeke entegrasyonu için politika çerçevesi

Küresel EA pazarlarındaki politika çerçeveleri EA'ların yaygınlaşmasını hedeflerken, karayolu taşımacılığının elektrifikasyon maliyetlerini en aza indirmek ve faydalarını en üst düzeye çıkarmak için EA'ların enerji piyasalarına optimum şebeke entegrasyonunu sağlama ihtiyacı konusunda artan bir farkındalık bulunmaktadır.

AB'de 13 Nisan 2024 tarihinde yürürlüğe giren 'Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR)' düzenlemesi, 2025 yılından itibaren kamusal şarj ağının oluşturulmasını gerekli kılmaktadır²⁷. Hem hafif hem de ağır hizmet tipi EA'lar için kurulu kapasite ve yoğunluk açısından hedefler belirlenmiştir. Tüketimin ölçülerek iletişiminin sağlanabilmesi gibi tüm yeni şarj altyapısının akıllı olması, optimize şarj için önemli bir koşuldur. Buna ek olarak, yakın zamanda kabul edilen enerji piyasası reformlarının da talep tarafı esneklik düzenleme ortamını iyileştirmesi muhtemeldir. Bu çerçeveye şunlar dahildir:

- EA'lar gibi toplanmış (aggregated) esneklik kaynaklarının esneklik piyasalarına dahil olması için daha düşük bir eşik belirlenmesi
- Şebeke operatörlerinin şebeke bilgilerini paylaşımları için şeffaflık gerekliliği, toplayıcılar için piyasaya erişiminin kolaylaştırılması

²³ Hildermeier, J., Burger, J., Jahn, A., Rosenow, J., 2022. A Review of Tariffs and Services for Smart Charging of Electric Vehicles in Europe. doi: 10.3390/en16010088.

²⁴ IEA, 2023. Grid Integration of Electric Vehicles - A manual for policy makers. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/21fe1dcb-c7ca-4e32-91d4-928715c9d14b/GridIntegrationofElectricVehicles.pdf>

²⁵ Anwar, M., Muratori, M., 2022. Assessing the value of electric vehicle managed charging: a review of methodologies and results. doi: 10.1039/D1EE02206G.

²⁶ Xue, L., Jian, L., Ying, X., Xiaoshi, L., 2020. Quantifying the Grid Impacts from Large Adoption of Electric Vehicles in China. <https://www.wri.org/research/quantifying-grid-impacts-large-adoption-electric-vehicles-china>

²⁷ European Union, 2023. REGULATIONS.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1804>

- Dağıtım sistemi operatörlerinin (DSO'ların) EA'lar gibi esneklik kaynaklarını kullanarak daha yalın operasyonlara yönelik sermaye harcamaları (CapEx) önyargısını ortadan kaldırmaya teşvik edilmesi
- Şebeke (yatırım) planlaması için EA şarjı da dahil olmak üzere detaylı talep tahminlerine ilişkin gereklilikler
- Ulusal enerji düzenleme kurumlarının zamana göre değişen tarifeler uygulamaya teşvik edilmesi.

Bununla birlikte, ulusal mevzuatta talep tarafı esnekliğini geliştirmek için tasarlanan ve 2019'da tamamlanan önceki hükümler tam olarak uygulanmamaktadır ve Almanya gibi bazı Avrupa ülkelerinde akıllı sayaçların yaygınlaştırılması yavaş seyretmiştir.²⁸

Yakın zamanda yeniden düzenlenen Avrupa bina yönetmeliği, konut ve konut dışı binaların park yerlerinin EA'lar için şarj altyapısı ve ön kablolu ile donatılmasını kolaylaştırmakta ve konut ile işyerinde şarjın yaygınlaşması adına önemli bir fırsat sunmaktadır.²⁹

ABD'de EA satışları 2022'de %70 oranında artış göstermiştir³⁰. Amerikalılar 2023 yılında yaklaşık 1,4 milyon EA satın almışlardır. Bu durum 2022'de %5,9 olan ABD araç piyasasındaki EA payını %9'a çıkarmıştır.³¹ EA'ların yaygınlaşması çeşitli federal programlar tarafından teşvik edilmektedir: 'The Inflation Reduction Act (IRA)' düzenlemesi, hafif hizmet tipi EA'lar, kullanılmış EA'lar, ticari EA'lar ve EA şarj altyapısı için vergi kredileri ile EA'ların yaygınlaştırılmasına destek olmaktadır.³² ABD Ulaştırma Bakanlığı'nın NEVI Programı, veri toplama, erişim ve güvenilirliği kolaylaştırmak için eyaletlere şarj istasyonları ve birbirine bağlı bir şebeke altyapısı kurmaları için 7 milyar doların üzerinde fon sağlamaktadır.³³ Federal ve eyalet çevre politikaları da EA'ların benimsenmesini teşvik etmektedir. Araştırmalar, EA'ların daha fazla benimsenmesiyle, eyaletlerin elektrik sisteminde EA'ların esnekliğini

²⁸ smartEn, 2022. The implementation of the Electricity Market Design to drive demand-side flexibility. SmartEn Monitoring Report. <https://smarten.eu/report-the-implementation-of-the-electricity-market-design-2022-smarten-monitoringreport/>

²⁹ European Commission, n.d. Energy Performance of Buildings Directive. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en

³⁰ IEA, 2023. Global EV Outlook 2023. Paris. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.

³¹ EV VOLUMES, 2024. Global EV Sales for 2023. <https://ev-volumes.com/news/ev/global-ev-sales-for-2023/>

³² The White House, 2024. FACT SHEET: Biden-Harris Administration Announces New Actions to Cut Electric Vehicle Costs for Americans and Continue Building Out a Convenient, Reliable, Made-in-America EV Charging Network. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2024/01/19/fact-sheet-biden-harris-administration-announces-new-actions-to-cut-electric-vehicle-costs-for-americans-and-continue-building-out-a-convenient-reliable-made-in-america-ev-charging-network/>

³³ U.S. Department of Energy, 2021. National Electric Vehicle Infrastructure (NEVI) Formula Program. <https://afdc.energy.gov/laws/12744#:~:text=The%20U.S.%20Department%20of%20Transportation%E2%80%99s,collection%2C%20access%2C%20and%20reliability.>

kullanarak fayda sağlayabileceğini göstermektedir.³⁴ Enerji politikası açısından, araç esnekliğinden faydalanmak için zamana göre değişen tarifeler gibi müşteri odaklı uygulamaların geliştirilmesi çok önemlidir.

2.2. Optimal EA şarjı - kontrollü, akıllı ve çift yönlü (V2G)

EA şebeke entegrasyonunun sistem maliyetleri, EA'ların şebekelere en iyi şekilde entegre edilmesiyle azaltılabilir. Bunun için EA şarjının mevcut şebeke kapasitelerini en iyi şekilde kullanacak şekilde kaydırılması ve EA'ların elektrik şebekeleri için kaynak olarak kullanılması için talep tarafı katılımının etkinleştirilmesi gerekir. Şarjın optimize edilmesindeki bazı seçenekler aşağıda tartışılmaktadır. Bunlar, akıllı tek yönlü şarjdan çift yönlü şarja (V2G) kadar uzanmakta olup, duyarlılık analizinde de incelenmiştir (Bölüm 5.2.2. ve 5.2.3.). Diğer akıllı şarj seçeneklerinin mevcut olmaması durumunda otomasyon yardımıyla gerçekleştirilen kontrollü şarj da değerlendirilmiştir.

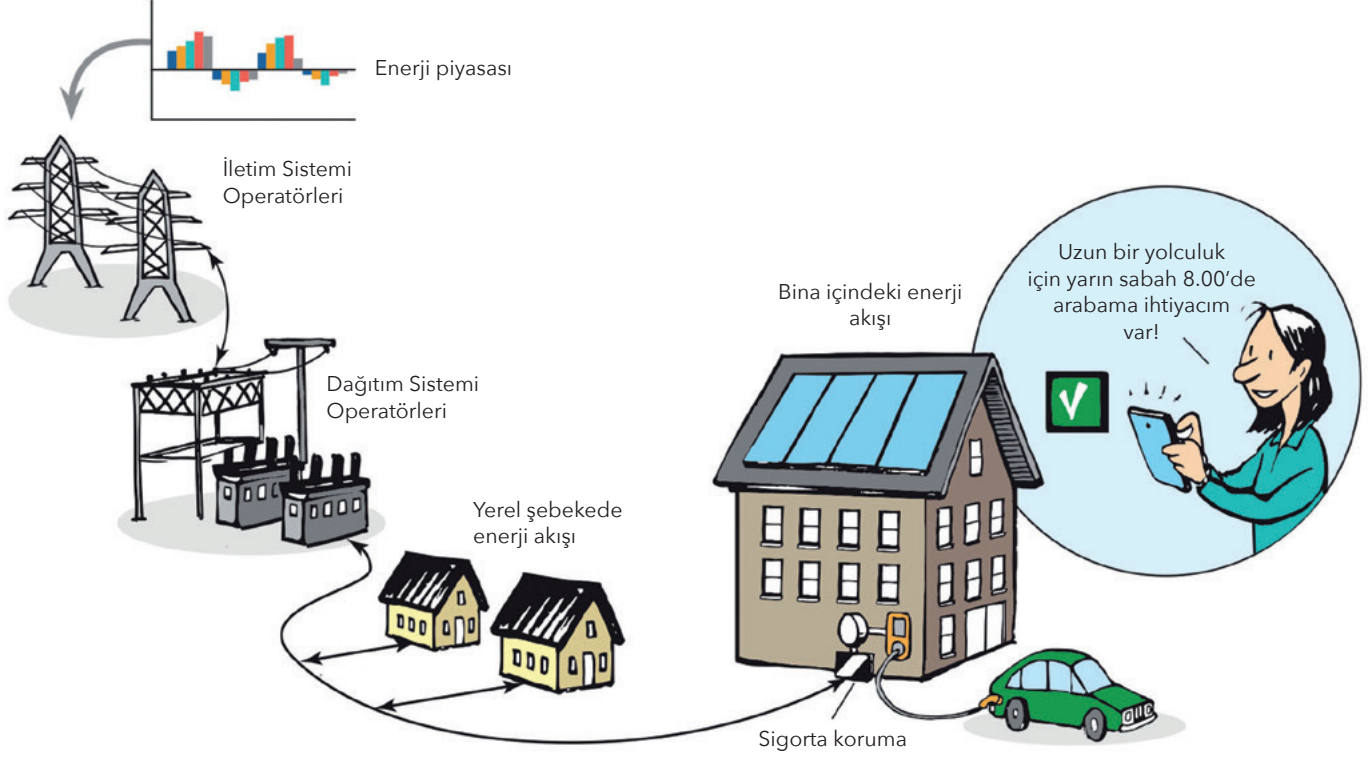
2.2.1. Akıllı (tek yönlü) şarj

EA'ların şarjı, maliyetleri düşürmek, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu sağlamak ve elektrik şebekesi üzerindeki etkiyi en aza indirmek için optimize edildiğinde, buna akıllı şarj denir.³⁵ Akıllı şarj, şarjın şebeke koşullarına göre yapılmasıyla sistem esnekliğinin sağlanmasıdır. Günün belirli saatlerinde daha düşük elektrik fiyatları sunan zamanla değişen tarifeler kullanarak ya da bonus ödemeler yoluyla esnekliği ödüllendirerek tüketicilere kayda değer maliyet tasarrufu sağlanabilir. Teknoloji ve otomasyon akıllı şarjı kullanıcı dostu hale getirir. Akıllı şarj; mevcut kaynakları, örneğin enerji üretim santrallerini, şebeke altyapısını ve elektrikli araç bataryalarını daha verimli hale getiren bir araçtır. EA'lar bataryalarında depolanan elektriğin şarj edilme şeklini optimize etme potansiyeline sahiptir. Şarjı yönlendirmek için şebekeden (veya akıllı binadan) gelen sinyaller belirli bir şebeke durumunu ve zaman aralığını kapsayabilir. Bir dağıtım veya iletim sistemindeki geçici kısıtı önlemek, öngörülen yenilenebilir enerji kaynaklarındaki üretim artışıyla aynı zamana denk gelerek yenilenebilir enerji kesintilerini engellemek veya kapasite sınırlarının zorlandığı bir trafo merkezi üzerindeki baskıyı hafifletmek buna örnek verilebilir.

³⁴ ABD'nin Colorado eyaletinde yapılan bir vaka çalışması, akıllı EA şebeke entegrasyonunun toplam sistem değerinin yaklaşık %3,5'ine denk gelen 300 ila 900 milyon \$ arasında tasarruf sağlayabileceğini göstermektedir. Bu, eyaletteki tüm haneleri L2 şarj cihazlarıyla kaplamak için yeterlidir ve verimli EA şarjının faydalarının geçiş maliyetlerini karşılayabileceğini ortaya koymaktadır. Kaynak: Devam etmekte olan RAP araştırması, yayınlanmamıştır.

³⁵ Burger, J., Hildermeier, J., Jahn, A., Rosenow, J., 2022. The time is now: smart charging of electric vehicles. <https://www.raponline.org/knowledge-center/time-is-now-smart-charging-electric-vehicles/>, p. 6.

Şekil 15. Akıllı EA şebeke entegrasyonunun unsurları. Kaynak: RAP



2.2.2 Çift yönlü şarj (V2G)

Akıllı şarjın başka bir versiyonu olan çift yönlü şarj (V2G) ile ilave değer üretilebilir. Çift yönlü şarj, elektriğin bir bataryada depolanması ya da deşarj edilmesine olanak vererek elektrikli araçların bir binaya veya şebeke için güç kaynağı olarak hareket etmesini sağlar (araçtan şebekeye veya V2G olarak adlandırılır). Var olan bu bataryaların daha iyi kullanılması elektrikli araçlar için yeni bir işlev yaratmakta, kaynak verimliliğine katkıda bulunmakta ve ek elektrik sistemi yatırımlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır.³⁶ İhtiyatlı tahminler, elektrikli araç bataryalarının büyümesi ve V2G teknolojisinin yaygınlaşmasıyla, AB elektrik sistemindeki kısa vadeli depolama ihtiyaçlarının karşılanabileceğini göstermektedir.³⁷

³⁶ Burger, J., 2023. Enabling two-way communication: Principles for bidirectional charging of electric vehicles <https://www.raonline.org/knowledge-center/enabling-two-way-communication-principles-for-bidirectional-charging-of-electric-vehicles/>.

³⁷ Xu, C., Behrens, P., Gasper, P., Smith, K., Hu, M., Tukker, A. & Steubing, B., 2023. Electric vehicle batteries alone could satisfy short-term grid storage demand by as early as 2030. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35393-0>

Hem akıllı tek yönlü hem de çift yönlü şarjın optimize edilebilmesi için şebeke koşullarını yansıtan sinyaller gerekmektedir. Bunlar şebekeden gelen fiyat sinyalleri veya elektrik piyasalarından gelen fiyat sinyalleri olabilir. Bunlar mevcut değilse, şarjı optimize etmek için DSO'lar tarafından yük kontrolü veya yük kaydırması uygulanabilir. Bunu akıllı (kullanıcı merkezli, fiyat temelli) şarjdan ayırmak için "kontrollü şarj" terimini kullanıyoruz.

Akıllı şebeke entegrasyonunu geliştirmek ve faydalarından yararlanmak için iki kritik bileşen planlama ve fiyatlandırma. DSO'ların, ihtiyaç duyulan şarj kapasitesini önceden tahmin etmek ve dağıtım şebekelerinin EA'nın yaygınlaşması için bir darboğaz haline gelmesini önlemek için yatırım stratejilerine EA şarj talebinin detaylı tahminlerini dahil etmeleri kilit öneme sahiptir. Ayrıca, dağıtım şebekelerindeki şeffaflığın artması, toplayıcılara elektrikli araç şarjını optimize etme seçeneği sunmaktadır. EA'ların şebekeye optimum entegrasyonunu sağlayan bir diğer unsur ise, EA kullanıcılarının şarjı optimize etmek için güçlü bir sinyal almalarını sağlamak üzere hem elektrik hem de şebekelerin maliyetini yansıtan bir şekilde ücretlendirilmesidir. Akıllı EA şarjına ilişkin bir politika çerçevesi için bu unsurlar Bölüm 6'da (öncelikli alanlar) daha ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

3. Türkiye’de Elektrikli Araçların Güncel Durumu

3.1 Binek araç pazarı

2021 yılı sonu itibariyle, karayolu taşıtları toplam yolcu taşımacılığının %92,7 gibi önemli bir kısmını oluştururken, kalan %7’lik kısım Türkiye’de kayda değer bir büyüme gösteren havayolu taşımacılığı tarafından sağlanmaktadır. Yük taşımacılığında da paralel bir eğilim gözlenmekte olup, karayolu taşıtları %90’lık çarpıcı bir payla başı çekerken, bunu %6 ile havacılık ve %4 ile deniz taşımacılığı takip etmektedir³⁸. Enerji yoğunluğu açısından, karayolu taşımacılığı 2021 yılında toplamın %94,3’ünü oluşturarak en fazla enerji gerektiren tür olarak ortaya çıkmaktadır³⁹. Ulaşım sektöründe artan enerji talebi, kişi başına düşen gelir seviyesinin yükselmesi, artan nüfus ve Türkiye’nin küresel ölçekte 13. Avrupa’da ise 4. büyük otomotiv üreticisi olarak üstlendiği önemli rol ile desteklenmektedir.

2023 yılı, 952.667’si otomobil olmak üzere toplam 1.468.393 karayolu taşıtının üretildiği ve 2022 yılına kıyasla %9’luk dikkate değer bir büyümeyi yansıtan önemli oranda üretim artışına sahne olmuştur. Çarpıcı bir şekilde, bu araçların %70’inin ihraç edilmesi Türkiye’nin küresel otomotiv pazarındaki konumunu ortaya koymaktadır⁴⁰. Ocak 2024 itibariyle, kayıtlı binek araç sayısı yaklaşık 15,3 milyona ulaşmış olup, Türkiye yollarında toplam 28 milyon karayolu taşıtı bulunmaktadır. Bu kapsamlı sayının içinde 4,5 milyon küçük kamyon, 5,1 milyon motosiklet ve 2,2 milyon traktör de binek araçların arkasında yer almaktadır⁴¹. Şu anda 1.000 kişi başına 179 olan binek araç sahip olma oranı, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) gibi Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) ülkelerine kıyasla nispeten düşük bir seviyededir. Bununla birlikte, mülkiyet oranları hızla artmaktadır. 2023 yılında Türkiye’de satılan her 10 araçtan 7’sini binek otomobiller oluşturmuş ve bu da 945.768 yeni tescil ile sonuçlanmıştır.

Yakıt kompozisyonuna bakıldığında, Ocak 2024 sonu itibariyle benzinli araçlar %28,9’luk bir paya sahipken, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ve dizel araçlar sırasıyla %33,3 ve %35,5 ile çoğunluğu oluşturmaktadır⁴². Bilhassa, elektrikli ve

³⁸ T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023. Ulaştırma Türlerine Göre Taşınan Yolcu ve Yük Miktarı. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turlerinegore-tasinan-yolcu-ve-yuk-miktari-i-85789>, 2021

³⁹ SHURA, 2023. Net Zero 2053: A Roadmap for the Turkish Electricity Sector. <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/05/Net-Zero-EN.pdf>

⁴⁰ OSD, 2024. ÖZET DEĞERLENDİRME - 2023/2022. <https://www.osd.org.tr/saved-files/PDF/2024/01/15/2023-12-OSD%20C3%96zet%20Rapor.pdf>

⁴¹ TÜİK, 2024. Motorlu Kara Taşıtları, Ocak 2024. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2024-53453>

⁴² TÜİK, 2024. Motorlu Kara Taşıtları, Ocak 2024. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2024-53453>

hibrit araçların toplam stok içindeki payı %2 civarındadır⁴³. Yakıt tercihlerindeki bu değişim, LPG ve dizelin benzine göre maliyet avantajları ve dizel araçların litre yakıt başına daha uzun sürüş mesafesi elde etmesiyle tetiklenmektedir. Ancak, dizel ve benzin arasındaki fiyat farkının daralması (şu anda litre başına fiyat farkı %4'ten azdır), dizelin Türkiye'deki gelecek beklentilerine ilişkin belirsizlikleri artırmaktadır.

3.2 EA pazarının gelişimi

Elektrikli araçlar (EA'lar) elektrik sistemine çeşitli faydalar sunmaktadır. İçten yanmalı motora sahip geleneksel bir araçla karşılaştırıldığında bir EA 2-3 kat daha verimlidir. Bir EA elektrik talebinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanması koşuluyla, yenilenebilir enerjinin elektrik sistemindeki payının artırılmasına da katkıda bulunabilir ve dolayısıyla daha düşük emisyonlarla temiz bir kentsel çevreye katkıda bulunabilir. Bir EA aynı zamanda mobil bir batarya depolama sistemi gibidir. Örneğin rüzgâr ve güneş enerjisi gibi değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunda şebekeye talep tarafı katılımı sağlayarak esneklik gibi şebeke hizmetleri sunabilir.

Türkiye'de EA satışlarına yönelik ilk teşvik 2011 yılında Özel Tüketim Vergisi (ÖTV) adı verilen vergide yapılan bir indirimle uygulamaya konmuştur. EA'ların güç kapasitesine bağlı olarak ÖTV %3 ile %15 arasında belirlenmiştir. Son yayınlanan teşviklere göre, bataryalı arabalar için ÖTV matrahları değiştirilmiştir. Ancak EA'ların ÖTV oranlarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bu düzenlemeye göre motor gücü 160 kilovatt (kW) geçmeyen elektrikli otomobiller için matrah sınırı 700.000 Türk Lirası'ndan (TL'den) 1.250.000 TL'ye çıkarılmıştır. Motor gücü 160 kW'ı aşan elektrikli otomobiller için matrah sınırı 750.000 TL'den 1.350.000 TL'ye yükseltilmiştir. Elektrikli aracın motor gücü 160 kW'ı geçmiyorsa ve matrah değeri 1.250.000 TL'yi aşmıyorsa, tüketicilerin yüzde 10 ÖTV ödemesi beklenmektedir. Aynı motor gücüne sahip ancak baz değeri 1.250.000 TL'yi aşan elektrikli otomobiller için ise %40 ÖTV ödenmesi gerekecektir⁴⁴.

EA satışları 2021 yılı boyunca artmaya devam etmiştir (AA, 2021; TEHAD, 2021). Son dönemde satışlardaki sürekli artışa rağmen, EA'ların otomotiv pazarındaki payı hala %1'in altındadır. Özellikle 2022 yılı sonundan itibaren TOGG (Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu) araçlarının pazara girmesinin de önemli etkisiyle satışlarda daha hızlı bir artış sağlanması hedeflenmektedir. Türkiye'de EA alımları açısından, başta Avrupa olmak üzere birçok bölgede uygulanan teşvik mekanizmaları bulunmamaktadır. Ancak

⁴³ TÜİK, 2024. Motorlu Kara Taşıtları, Ocak 2024.

<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2024-53453>

⁴⁴ HedefFilo, n.d. Elektrikli Araç ÖTV İndirimi ve ÖTV İndirimli Araçlar.

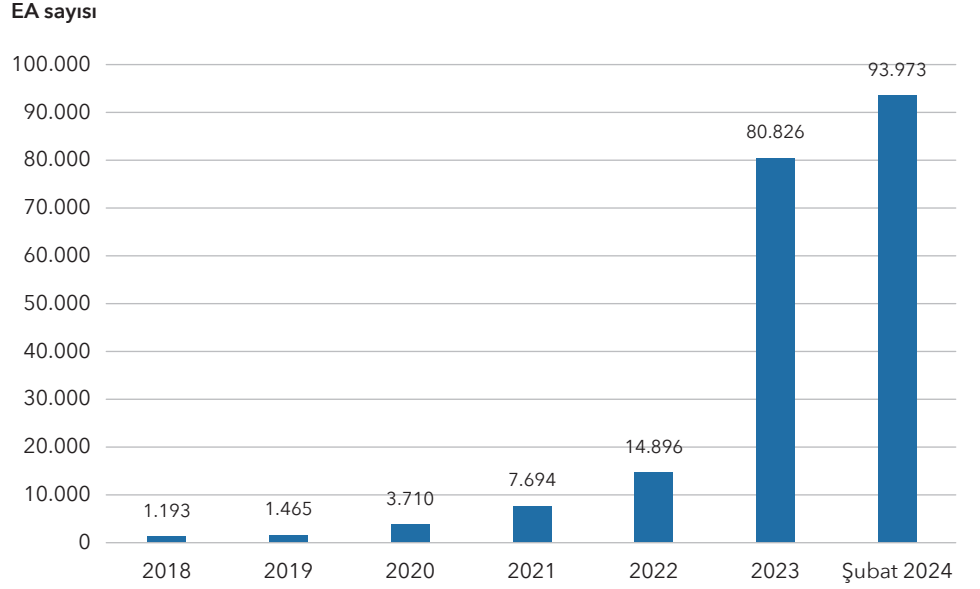
<https://ev.hedef filo.com/ev-gundem/blog/elektrikli-arac-otv-indirimi-ve-otv-indirimli-araclar>

vergi düzenlemeleri, fosil yakıtlı muadillerine kıyasla EA'lara vergi avantajı sağlamaktadır. 2011'den beri yürürlükte olan vergi oranları, Şubat 2021'de yapılan yeni bir düzenleme ile artırılmıştır (motor gücü 85 kW'ı aşmayan araçlar için %3'ten %10'a, motor gücü 85-120 kW arasında olan araçlar için %7'den %25'e ve motor gücü 120 kW'ı aşan araçlar için ise %15'ten %60'a). Lüks ve ithal araç satışlarından kaynaklanan bu düzenleme, son dönemlerde EA pazarındaki büyümeyi yönlendiren satış tahminlerinde aşağı yönlü revizyonlara yol açmıştır. Bu değişikliğin etkilerine rağmen, 2021 yılında 2.000'in üzerinde EA satışı gerçekleştirilerek toplam 6.000 aracın üzerine çıkarılmıştır.

Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (ODMD⁴⁵) tarafından Kasım 2023'te açıklanan verilere göre, Türkiye 2023 yılının Ocak-Kasım döneminde otomobil ve hafif ticari araç satışlarında kayda değer bir artış yaşamıştır. Bu dönemde, bir önceki yılın aynı zaman dilimine kıyasla %60,8 oranında dikkate değer bir artış yaşanmış ve satışlar toplam 1.073.982 adede ulaşmıştır. Yalnızca Kasım ayında otomobil ve hafif ticari araç satışlarında bir önceki yılın aynı dönemine kıyasla %39,8'lik belirgin bir artış yaşanmış ve satış rakamları 115.040 adede ulaşmıştır. Özellikle, yılın ilk on bir ayında elektrikli otomobiller Türkiye'deki toplam otomobil satışlarının %7,1'ini oluştururken, hibrit otomobiller %10,6'lık bir paya sahip olmuştur. Bu durum, Türk tüketiciler arasında çevre dostu araç seçeneklerine olan ilginin ve adaptasyonun arttığını göstermektedir. Bu etkileyici değerler, özel teşvikler ve EA üreticilerinin Türkiye pazarına katkıları da dahil olmak üzere çeşitli faktörlere dayandırılabilir. Teşvikler, altyapı geliştirme ve teknolojik ilerlemeler yoluyla EA'nın benimsenmesini aktif olarak teşvik eden üreticiler, son yıllardaki bu önemli büyümeyi tetiklemişlerdir. Türkiye'deki elektrikli araçların gelişimi, 2020'den 2023'ün sonuna kadar EA sayısında istikrarlı ve önemli bir artış olduğunu gösteren Şekil 16'da görsel olarak gösterilmektedir. Her ne kadar Türkiye'de EA'ların ilerideki büyümesine ilişkin farklı projeksiyonlar olsa da, Tablo 2'de referans olması açısından mevcut projeksiyonlara genel bir bakış sunulmaktadır. Bu projeksiyonlar, Türkiye'deki EA pazarının sürekli büyüyeceğini öngören umut verici bir gidişata işaret etmektedir.

⁴⁵ Enerji Günlüğü, 2023. Türkiye otomobil satışlarında elektrikliilerin payı arttı. <https://www.enerjigunlugu.net/turkiye-otomobil-satislarinda-elektrikliilerin-payi-artti-56779h.htm>

Şekil 16. Türkiye’de EA’ların son dönemdeki gelişimi



Tablo 2. Farklı kurumların Türkiye için EA öngörülleri

	T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı	EPDK	SHURA Net-Sıfır Çalışması
2025	270.000	361.893	237.626
2030	1.600.000	1.679.600	3.758.252
2035	-	4.214.273	10.941.664

3.3 Şarj altyapılarının gelişimi

EA’ların şarj altyapısı, çevre dostu bir ulaşım sisteminin temelini oluşturarak enerji verimliliğinin artırılmasında ve karbon ayak izinin azaltılmasında kilit bir rol oynamaktadır. Türkiye’nin coğrafi konumu ve enerji altyapısı, EA’ların yaygın kullanımını desteklemek için eşsiz bir fırsat sunmaktadır. Bu doğrultuda, hem kamu teşvik politikaları hem de özel sektör katılımıyla güçlendirilen Türkiye’nin EA şarj altyapısını geliştirme potansiyeli, ülkeyi gelecekte sürdürülebilir ulaşımın liderleri arasında konumlandırmak için önemli bir temel oluşturmaktadır.

EA’ların şarj edilmesi için gerekli altyapının oluşturulmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Hem kentsel hem de kırsal alanlarda şarj istasyonlarının kurulmasını ve yaygınlaştırılmasını teşvik etmek için mekanizmalar geliştirilmekte ve EA kullanıcılarının günlük kullanımlarında şarj ihtiyaçlarını karşılamak için yeterli altyapının sağlanması amaçlanmaktadır. Ayrıca,

elektrikli araçların şarj edilmesi için daha çevre dostu ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını desteklemek amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilmektedir. Ayrıca, enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için çeşitli çabalar sarf edilmektedir. Bu bağlamda, politika belirleyiciler ve T.C. Enerji Piyasaları Düzenleme Kurumu (EPDK) gibi düzenleyici kurumlar, elektrikli araçların yaygın kullanımını ve benimsenmesini teşvik etmeyi ve ülkenin şarj altyapısını iyileştirmeyi amaçlayan çeşitli düzenlemeler ve politikalar geliştirmektedir.

Bu çalışmalar doğrultusunda, tüm ülkeyi kapsayan kapsamlı bir şarj altyapısının kurulması için EPDK tarafından Şarj Hizmeti Yönetmeliği ve ikincil düzenlemeler yapılmıştır. Bu düzenlemeler, elektrikli araç kullanıcılarına kaliteli, sürekli ve kesintisiz şarj hizmeti sunulmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Yönetmelik, şarj istasyonları işletmecisi lisansları, lisanslama süreci, şarj altyapısının oluşturulması ve geliştirilmesi, lisans sahiplerinin hak ve yükümlülükleri, şarj istasyonlarının kurulumu ve işletilmesi, ücretlendirilmesi, izlenmesi, elektrikli araç kullanıcılarının hak ve yükümlülükleri, denetimler ve yaptırımlara ilişkin hükümleri içermektedir.

Söz konusu düzenlemeler kapsamında şirketler, aldıkları şarj şebekesi işletmecisi lisansı kapsamında şarj şebekelerini işletebilmektedir. Lisans sahipleri kendi şarj istasyonlarını işletebilecekleri gibi, düzenledikleri sertifikalar ile üçüncü tarafların da şarj istasyonu işletmesine izin verebilmektedir. Lisans sahiplerinin, lisansı aldıktan sonraki altı ay içinde en az beş farklı ilçede en az elli şarj ünitesinden oluşan bir şarj şebekesi kurmaları gerekmektedir. Şarj istasyonlarını işletmek isteyen bireyler veya şirketler, lisanslı şirketlerden sertifika alarak bunu yapabilirler. Hızlı şarj istasyonlarının sayısının artırılması ve elektrikli araç kullanıcılarının şarj hizmeti fiyatlarına ve bilgilerine kolay erişiminin sağlanması için de önemli düzenlemeler hayata geçirilmiştir. Bunlara ek olarak EPDK, elektrikli araç kullanıcıları tarafından şarj istasyonu işletmecilerine karşı yapılan şikayetleri izleyerek şikayetlerin tatmin edici bir şekilde çözülmesini sağlamaktadır.

Türkiye’de şarj hizmetlerinin fiyatlandırılması, araca aktarılan birim enerji maliyeti üzerinden yapılmakta ve şarj hizmetleri için herhangi bir ek ücret talep edilmemektedir. Buna karşılık, diğer birçok ülkede şarj hizmetleri dakika bazında fiyatlandırılmakta, dakika ve birim enerji maliyetlerinin yanı sıra ilk şarj ücretleri gibi ek ücretler de çeşitli oranlarda birleştirilmektedir. Türkiye’de ek ücret alınmaksızın birim enerji maliyetine dayalı fiyatlandırma uygulaması, şirketler tarafından şarj hizmeti fiyatlarının karşılaştırılmasını kolaylaştırmış ve elektrikli araç pazarının gelişimine katkıda bulunmuştur.

Politika belirleyiciler ve EPDK gibi düzenleyici kurumlar tarafından getirilen bir diğer önemli düzenleme ise tüm EA'ların şarj istasyonlarından şarj hizmeti alabilmesi (tam birlikte çalışabilirlik) gerekliliğidir. Bazı ülkelerde ise bazı şarj istasyonu operatörlerinin yalnızca kendi abonelerine hizmet verdiği, bazı EA üreticilerinin ise yalnızca kendi araçları için şarj istasyonları kurduğu görülmektedir. Türkiye'de şarj istasyonlarının marka veya modelden bağımsız olarak elektrikli araçlara şarj hizmeti vermesi, şarj istasyonlarının optimum kullanımını ve yatırımlarda ulusal kaynakların verimli kullanımını teşvik etmektedir.

İkincil düzenlemelerin yayınlanmasının ardından 18 Nisan 2022 tarihinden itibaren lisans başvuruları kabul edilmeye başlanmıştır. Bu alana yatırımcılar tarafından büyük ilgi gösterilmektedir. Bu çerçevede, yasal altyapı oluşturulmadan önce piyasada yalnızca beş şirket şarj hizmeti faaliyetinde bulunurken, bugün 172 lisanslı şirket bulunmaktadır. Önümüzdeki dönemde de T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) ve EPDK gibi politika belirleyici ve düzenleyici otoriteler, lisans koşullarını sağlayan şirketlere şarj istasyonu işletmecisi lisansı vermeye devam edecektir.

EA'ların yaygın olarak benimsenmesi hususunda belirleyici faktörlerden biri de kamuya açık şarj istasyonlarının durumudur. Türkiye'de şarj altyapısının il ve ilçelerde yaygınlaştırılması, EA'ların hızla yaygınlaşması için büyük önem taşımaktadır. Türkiye'de 2023 yılı başında 14.896 elektrikli araç bulunurken, bugün (Nisan 2024) itibarıyla bu sayı 93.973'e ulaşmıştır. Şarj istasyonu işletmecileri tarafından yapılan yatırımlar sonucunda, 2023 yılı başında Türkiye genelinde 3.081 (2.706 AC (Yavaş) ve 375 DC (Hızlı)) olan şarj noktası (soket) sayısı, 1 Nisan 2024 tarihi itibarıyla 17.233'e (11.412 AC (Yavaş) ve 5.821 DC (Hızlı)) yükselmiştir. Elektrikli araç sayısı hızla artarken, şarj noktalarının da eş zamanlı olarak artması, e-mobilite ekosisteminin ilerlemesi için olumlu bir gelişme olup, sürücülerin şarj edecek bir yer bulma olasılığını artırmaktadır. Türkiye'de soket başına 5,4 EA düşmektedir. Avrupa ortalaması ise soket başına 13,75 EA'tır.

EA'ların yaygın olarak benimsenmesi, çevre kirliliğine katkıda bulunan fosil yakıtlarla çalışan araçların payını azaltarak karbon emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. EA ekosisteminin sağlıklı ve sürdürülebilir gelişimi için çaba gösterilmekte, kamunun sürekli desteği ve işbirliği ile çevre dostu ve yenilikçi bir ulaşım sistemi oluşturma yolunda önemli adımlar atılmaktadır. EA'ların yaygınlaşmasının bu hedeflere katkısının, elektrikli araçların kullandığı elektriğin temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesiyle artması beklenmektedir. Dolayısıyla şarj hizmeti piyasası ile yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik arasında güçlü bir bağ kurulmasının Türkiye'nin iklim hedeflerine önemli katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bu kapsamda, EA'lara sağlanan elektriğin

tamamının yenilenebilir enerji kaynaklarından üretildiği “yeŖil Ŗarj istasyonu” kavramı yönetmeliklere eklenmiŖ ve bu Ŗarj istasyonları EPDK’nın internet sitesinde ve Ŗarj@TR mobil uygulamasında da yerini almıŖtır.

EA'lara sağlanan elektriğin tamamının yenilenebilir enerji kaynaklarından geldiğini belgeleyen yeŖil Ŗarj istasyonlarına ek olarak, halihazırda herhangi bir Ŗarj istasyonunun elektrik ihtiyacını karŖılamak için yenilenebilir enerji üretim tesisleri ile entegre elektrik depolama tesisleri kurmak mümkündür. Bu bağlamda, elektrik depolama ve yenilenebilir enerji üretim tesislerine sahip entegre Ŗarj istasyonları ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sertifikalı (YEK-G) yeŖil Ŗarj istasyonları, elektrikli araçlar için sürdürülebilir ve çevre dostu Ŗarj hizmetleri sağlayabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan elektrik ile Ŗarj hizmeti piyasası arasında güçlü bir bağ kurulmasının, Türkiye’nin iklim hedeflerine ulaŖma çabalarına önemli katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bu alandaki en önemli giriŖimlerden biri, elektrikli araç kullanıcılarının kamuya açık Ŗarj noktalarını soket ve istasyon bazında görüntüleyebilecekleri, güncel ve güvenli bilgilere ulaŖabilecekleri bir mobil destek uygulaması olan Ŗarj@TR’dir. Bu aplikasyon ile EA kullanıcıları istedikleri lokasyona kolay ve konforlu bir şekilde seyahat edebilmektedir. Böylece EA’ların çevresel avantajlarının yanı sıra, geliŖmiŖ teknolojik özellikleri de göz önünde bulundurularak araçların özelliklerine uygun Ŗarj hizmeti fiyatlarının gerçek zamanlı olarak takip edilebilmesi amaçlanmaktadır.

Bunun yanı sıra, Ŗarj hizmetlerinin verildiği Ŗarj istasyonlarına iliŖkin bilgilerin yer aldığı bir internet sitesi de kamunun eriŖimine açılmıŖtır. İnternet sitesinde Ŗarj istasyonlarının konumu, soket bilgileri, istasyon adresleri ve Ŗebeke işletmecileri gibi bilgiler yer almaktadır. Sonuç olarak, tüm elektrikli araç kullanıcıları Ŗarj istasyonlarına iliŖkin bilgilere EPDK’nın internet sitesi üzerinden ulaŖabilmektedir. Ayrıca Ŗarj hizmeti piyasasının sağlıklı geliŖimini sağlamak amacıyla sürekli izleme yapılmakta, ülke genelinde kurulan Ŗarj istasyonlarının nitelikleri, istasyonlarda uygulanan fiyatlar, diğer ülkelerdeki geliŖmeler, alandaki iyi uygulamalar, rekabeti bozan unsurlar ve piyasa geliŖimini etkileyen faktörler incelenmektedir.



4. Yöntem

Bu bölümde, Türkiye’de 2024 ve 2035 yılları arasında toplam elektrikli araç ve hafif hizmet aracı sayısının gelişimine yönelik piyasa görünümü, senaryoların projeksiyonu ve şebeke etkisinin analizi için kullanılan yöntem gösterilmektedir (Şekil 17).

Şekil 17. Yöntemin temel adımları



Çalışma için, hem kırsal hem de metropol alanları kapsayan belirli pilot bölgeler belirlenmiştir. Bu stratejik seçim, hafif hizmet araçları (HHA) dahil elektrikli araçların (EA'ların) dağıtım şebekeleri üzerindeki etkisinin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. Seçilen pilot bölgeler için, Türkiye’deki toplam sayılara göre EA’ların ve HHA’ların oranı, tasarlanan çeşitli senaryolar altında hesaplanmıştır. Takip eden adımlar şunları kapsamaktadır:

- 1. EA’ların ve HHA’ların şarj etme alışkanlıklarının belirlenmesi:** Elektrikli araçların farklı ortamlardaki şarj davranışlarını anlamak amacıyla hem evde hem de kamusal alanda şarj etme alışkanlıklarının analiz edilmesi.
- 2. Eşdeğer elektrik yükünün ve ilişkili profillerin hesaplanması:** EA’ların ve HHA’ların elektrik şebekesine entegre edilmesi için eşdeğer elektrik yükünün hesaplanması ve ilgili profillerin geliştirilmesi.
- 3. Referans modelin geliştirilmesi:** Seçilen pilot bölgeler için özel olarak tasarlanan ve “Referans Model” olarak adlandırılan 2035 yılı için temel bir dağıtım şebekesi modelinin oluşturulması.
- 4. EA’ların ve HHA’ların referans modele entegre edilmesi:** Dağıtım şebekesindeki varlıklarını ve etkileşimlerini simüle etmek için EA ve HHA’ların referans modele dahil edilmesi.

5. **Şebeke analizinin yapılması:** Çeşitli parametreler üzerindeki potansiyel etkiyi değerlendirmek için entegre edilmiş EA'ları ve HHA'ları dikkate alarak dağıtım şebekesinin kapsamlı bir analizinin yapılması.
6. **Şebeke etkisinin ölçülmesi:** Hat ve trafo yüklemesini, voltaj sapmasını inceleyerek ve hem orta gerilim hem de alçak gerilim şebekesi açısından potansiyel e-mobilite odaklı yatırım gereksinimlerini belirleyerek EA'ların ve HHA'ların şebeke etkisinin değerlendirilmesi.

Bu adımların her birinin ayrıntılı açıklamaları, yöntemin ve Türkiye'de elektrikli araçların şebekeye entegrasyonuna yönelik çıkarımlar sonraki bölümlerde detaylandırılmaktadır.

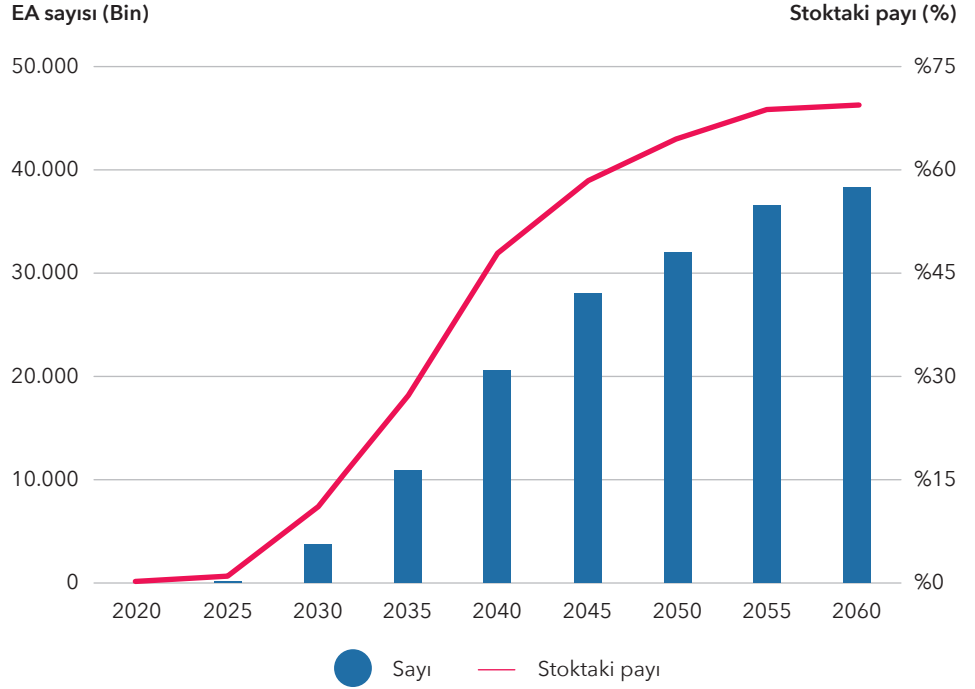
4.1 Türkiye'de EA ve HHA projeksiyonları

İlk aşama, Türkiye'deki EA'lar ve HHA'lar için senaryoların ana hatlarının belirlenmesini içermektedir. Bu çalışmada iki ana entegrasyon senaryosu ele alınmaktadır: Net-Sıfır (Net0) ve Baz (Business-as-Usual - BAU) senaryo.

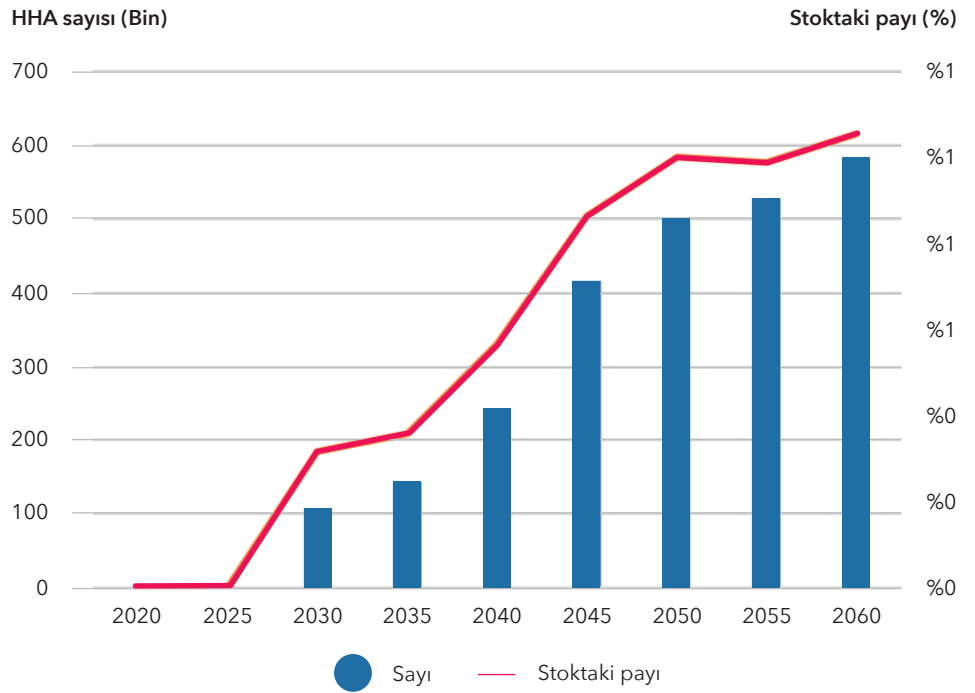
Net0 Senaryosu, SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından yayınlanan 'Net Sıfır 2053: Türkiye Elektrik Sektörü için Yol Haritası' çalışması net-sıfır yol haritası ile uyumludur⁴⁶. Türkiye, 2019 yılında 13.498 km/kışı olan Avrupa Birliği (AB) ortalamasına kıyasla 2020 yılında ortalama 7.890 km/kışı ile nispeten düşük yolcu hareketliliği seviyeleri sergilemektedir. İleriye dönük olarak, Net-Sıfır yol haritası, kışı başına düşen gelirin artmasıyla yolcu taşımacılığının iki katına çıkacağını ve 2053 yılına kadar binek araçların toplam yolcu-km içindeki payının %45'e ulaşacağını öngörmektedir. Binek araç-km'de öngörülen %121'lik artışa rağmen, düşük karbonlu kamu ve paylaşımlı seçeneklerin artan mevcudiyeti nedeniyle bu payın AB ortalamalarının altında kalması beklenmektedir. Şekil 18 ve Şekil 19, bu senaryoya dayalı olarak EA ve HHA'lar için projeksiyonları göstermektedir. 2035 yılına odaklanan çalışmada, toplam elektrikli araç sayısı Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEA'ler), Plug-in Hibrit EV'ler (PHEA'ler) ve hafif hizmet araçları dağılımı Şekil 20'de gösterilmektedir.

⁴⁶ SHURA, 2023. Net Zero 2053: A Roadmap for the Turkish Electricity Sector. <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/05/Net-Zero-EN.pdf>

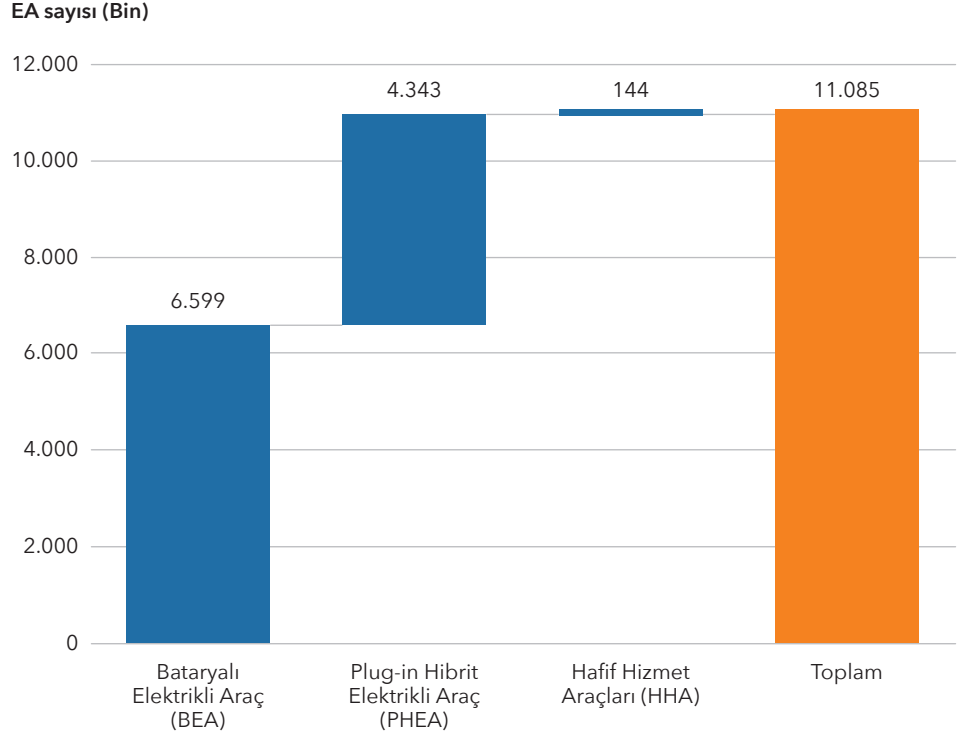
Şekil 18. Net0 Senaryosuna dayalı EA projeksiyonu



Şekil 19. LDV Net0 Senaryosuna dayalı HHA projeksiyonu

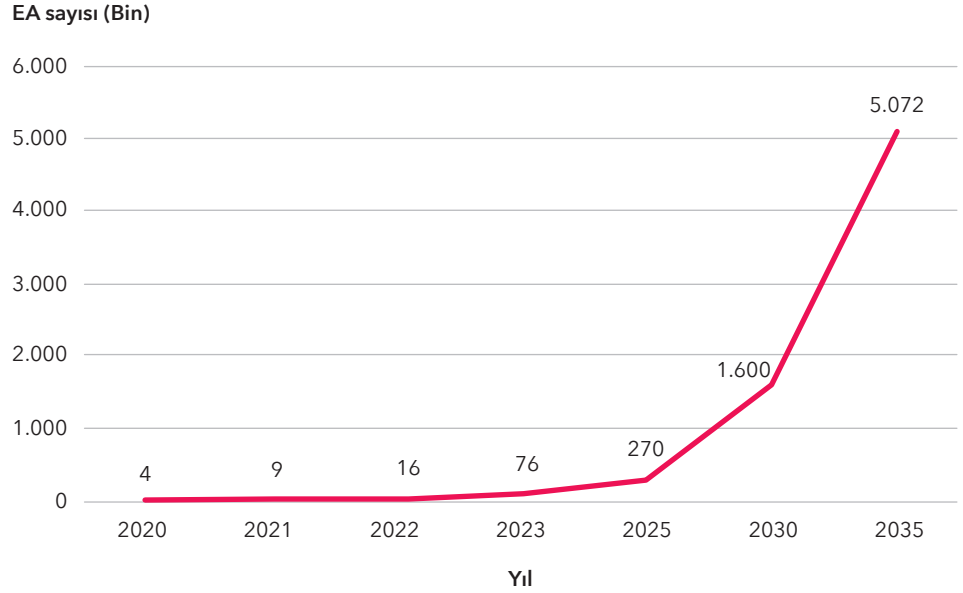


Şekil 20. EA filosunun 2035 yılında Net0 Senaryosuna göre dağılımı

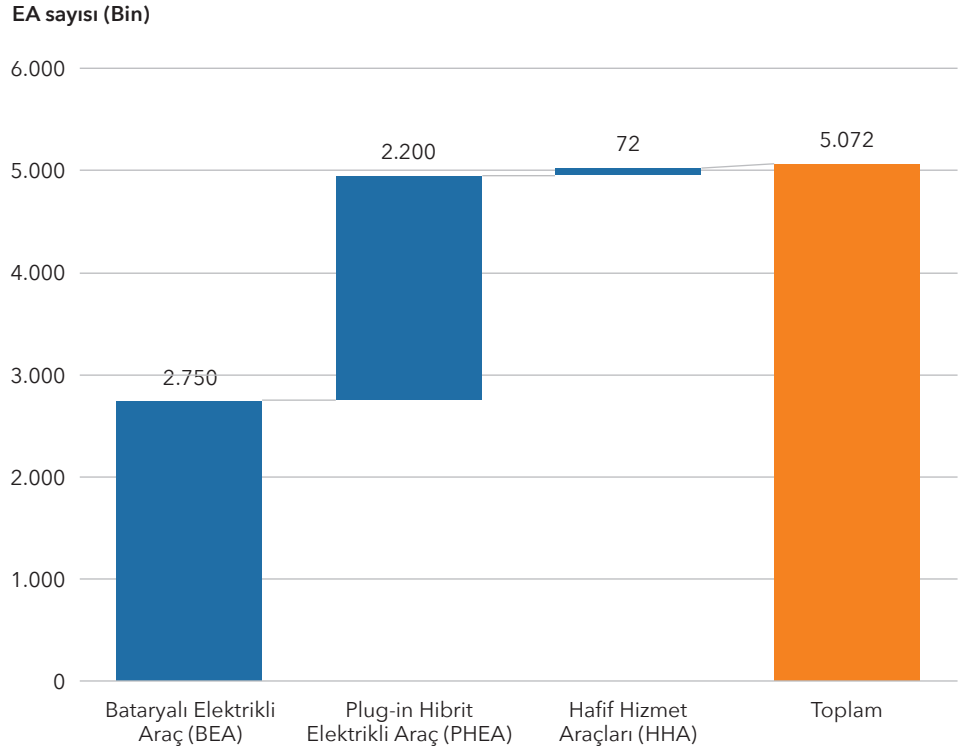


Buna karşılık, BAU Senaryosu, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın projeksiyonlarını içermektedir. Özellikle motor gücüne göre değişen ve %10'dan başlayan özel tüketim vergisi de dahil olmak üzere önemli vergi avantajlarıyla EA kullanımını teşvik etmektedir. İçten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında, özel tüketim vergisi oranlarının üst sınırlarında dört kat avantaj bulunmaktadır. Ayrıca, yıllık motorlu taşıtlar vergisinde %75 indirim uygulanarak EA satışlarında kayda değer bir artışa katkıda bulunmaktadır. Türkiye'de yeni tescil edilen elektrikli araç sayısı 2019'da 247 iken 2021'de 3.587'ye yükselmiş ve 2023 sonunda 80.043'e ulaşmıştır. Bu artış, yerli üretim araçların devreye girmesiyle devam etmesi beklenen elektrikli araçlara geçişin zamanında başladığına işaret etmektedir. Bakanlık projeksiyonlarına göre, elektrikli araçların 2030 yılına kadar 1,6 milyona ulaşması beklenmekte olup, bu rakam daha önceki SHURA çalışmasında yer alan ılımlı büyüme senaryosuyla uyumludur (Bkz. Şekil 21). Bu eğilimi 2035 hedef yılına dair tahminlerle genişletmek, EA ve HHA sayılarının beklenen gelişimini ortaya koymaktadır (Bkz. Şekil 22).

Şekil 21. BAU Senaryosuna dayalı EA filosu trendi



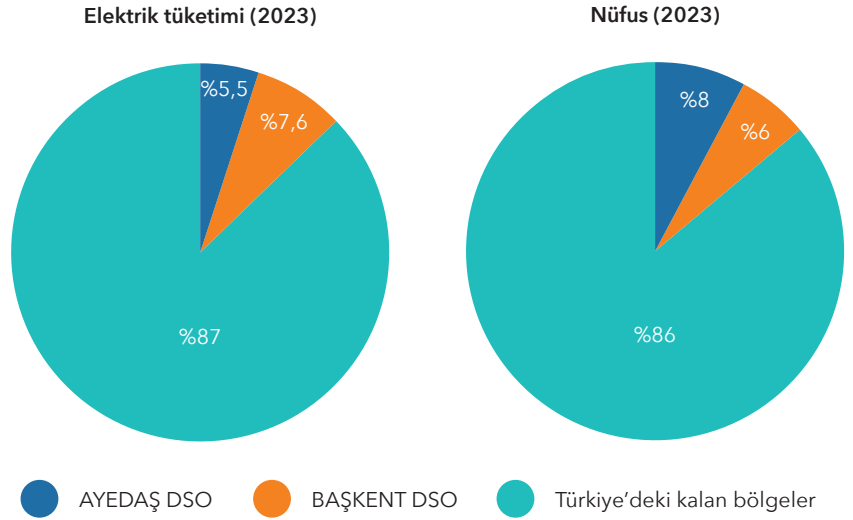
Şekil 22. BAU Senaryosunda EA filosunun 2035 yılındaki dağılımı



4.2 Pilot bölgeler ve her bir bölgedeki EA sayısı

EA ve HHA'ların dağıtım şebekeleri üzerindeki etkilerinin analizi, Türkiye'de seçilmiş pilot dağıtım bölgelerinde gerçek verilere dayandırılarak gerçekleştirilmiştir. Bu pilot bölgeler stratejik olarak iki farklı Dağıtım Sistemi Operatöründen (DSO) seçilmiştir: BAŞKENT ve AYEDAŞ. BAŞKENT ve AYEDAŞ müşterilerinin Türkiye'deki tüm elektrik müşterilerine oranı Şekil 23'te sunulmaktadır. Aynı zamanda, Şekil 23'te bu pilot bölgelerdeki nüfus dağılımı da gösterilmektedir. Dikkat çekici bir şekilde, bu pilot bölgeler Türkiye nüfusunun %14'ünü kapsamakta ve ülkenin toplam enerji tüketiminin yaklaşık %13'üne katkıda bulunmaktadır.

Şekil 23. Pilot bölgelerin nüfus ve elektrik tüketim payları



Tablo 3'te ayrıntıları verildiği üzere pilot bölgelerden dört spesifik Yüksek Gerilim (YG) trafo merkezi seçilmiştir. Seçilen YG trafo merkezleri hem metropol hem de kırsal alanları kapsamaktadır. Seçilen pilot bölgeler Kartal ve Akköprü'de olduğu gibi hem nispeten gelişmiş alanlardan hem de Ümitköy bölgesi gibi gelişme aşamasındaki bölgelerden ve kırsal bir bölge olan Şile bölgesinden oluşmaktadır. Pilot bölgeler Şekil 24'te gösterilmektedir.

Şekil 24. Çalışma kapsamındaki pilot bölgeler

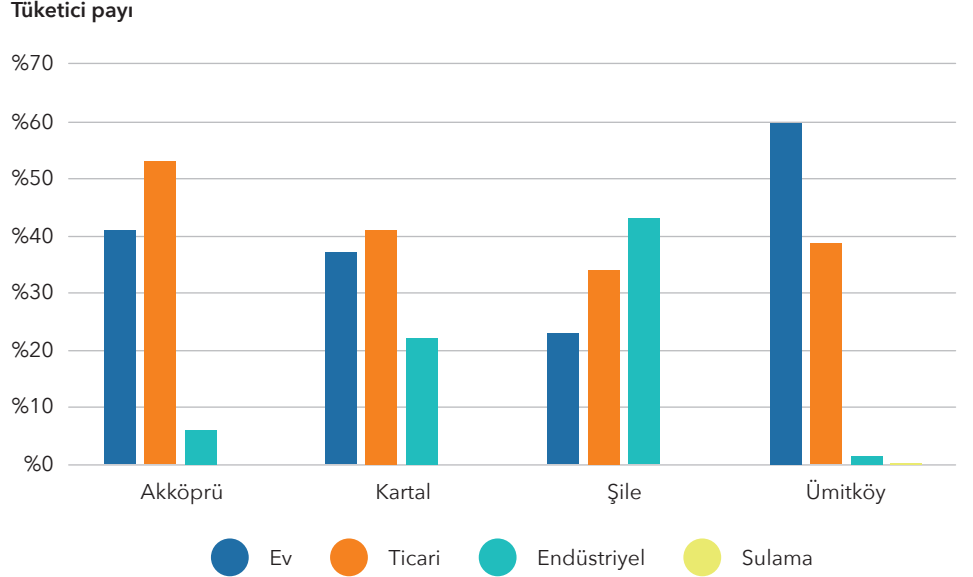


Şekil 25'te, pilot bölgelerdeki tüketici dağılımları çeşitli tüketici grupları bağlamında oranlanmıştır. Bu dağılım, konut ve ticari tüketiciler de dahil olmak üzere çeşitli yükleri kapsamaktadır. Yüklerin çeşitliliği ve pilot bölgelerin nüfus ve elektrik tüketimi açısından önemli ölçüde temsiliyeti göz önüne alındığında, seçilen bölgelerin Türkiye genelinde EA etkisindeki çeşitliliğin güçlü bir temsilini oluşturduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.

Tablo 3. Dağıtım şirketleri ve ilgili pilot YG trafo merkezleri

DSO	Pilot YG Trafo Merkezleri	Bölge Tipi	Trafo Merkezi Kurulu Kapasitesi (MVA) 2023 Yılı
AYEDAŞ	Kartal	Büyükşehir - Gelişmiş	200
	Şile	Kırsal	125
BAŞKENT	Akköprü	Büyükşehir - Gelişmiş	300
	Ümitköy	Büyükşehir - Gelişmekte	300

Şekil 25. Pilot bölgelerdeki tüketicilerin dağılımları, 2023



Pilot bölgelerin belirlenmesinin ardından bir sonraki adım, Net0 ve BAU senaryoları kapsamında belirlenen ülke genelindeki toplam elektrikli araçların bu pilot bölgelere ayrıştırılmasını içermektedir. Pilot bölgelerdeki EA kayıtlarına ilişkin reel rakamlar mevcut olmadığından, her bir bölgedeki EA sayısı aşağıda tartışılan birkaç endeks aracılığıyla tahmin edilmektedir:

- **Elektrik endeksi (EI):** Bu endeks, pilot trafo merkezindeki Yüksek Gerilim/Orta Gerilim (YG/OG) trafo kurulu kapasitesinin Türkiye genelindeki toplam kurulu kapasiteye oranını yansıtmaktadır. Buradaki varsayım, pilot YG trafo merkezlerindeki Mega Volt Amper (MVA) cinsinden ölçülen toplam kapasitenin payının, söz konusu bölgedeki EA ve HHA'ların oranı için gösterge niteliğinde bir faktör olarak hizmet edebileceğidir.
- **GDP endeksi (GDP):** Pilot bölgelerin yer aldığı şehirlerin kişi başına düşen Gayri Safi Yurtiçi Hasılası bir çarpan olarak hesaba katılmaktadır. Bu faktör, 2021 yılı kişi başına düşen GDP rakamları kullanılarak pilot bölgelerdeki toplam EA ve şarj noktası sayısının tahmin edilmesinde rol oynamaktadır⁴⁷.
- **Göreceli kalkınma endeksi (RDI):** Bir başka çarpım faktörü olan Göreceli Kalkınma Endeksi dikkate alınmıştır. Bu endeks, pilot bölgelere özgü çeşitli sosyo-ekonomik faktörleri kapsamakta ve bölgesel kalkınmaya ilişkin kapsamlı bir bakış açısı sağlamaktadır.

⁴⁷ TÜİK, il bazında gayrisafi yurt içi hasıla, iktisadi faaliyet kollarına göre, cari fiyatlarla, NACE Rev.2, 2004-2021.

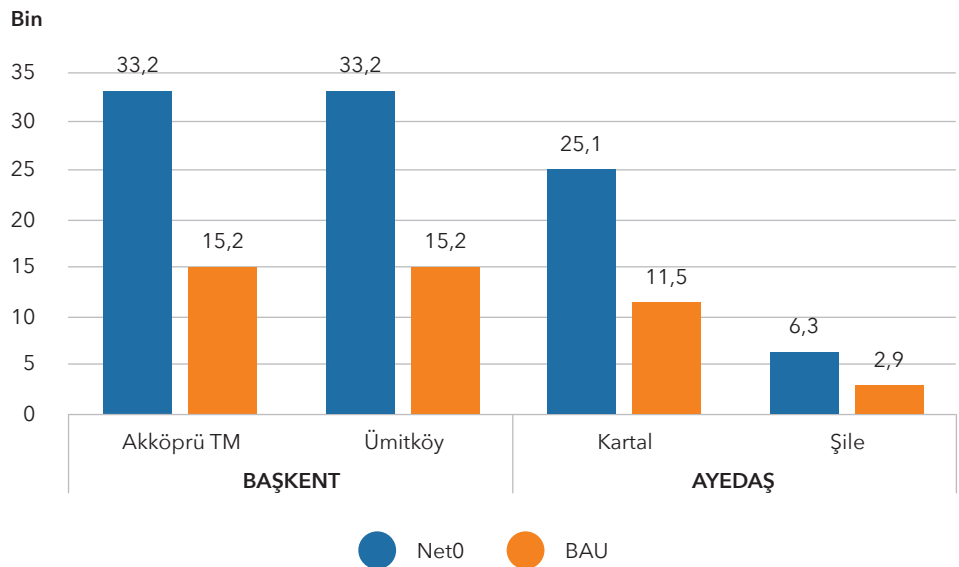
- **EV tahsis çarpanı (EVAM):** Bu çarpan, yukarıda bahsedilen endekslerin (EI, GDP ve RDI) çarpılmasıyla elde edilir. EVAM, elektrikli araçların tahsisini belirlemede elektrik altyapısı, ekonomik göstergeler ve bölgesel kalkınmanın etkileşimini yansıtan birleştirilmiş bir faktör olarak hizmet eder.

Pilot bölgeler için hesaplanan EVAM değerleri, bu kapsamlı yaklaşımla belirlenen toplam EA ve HHA sayısı ile birlikte Tablo 4'te titizlikle sunulurken, Şekil 26'da bu değerler gösterilmektedir. Bu çoklu endeks yaklaşımı, Türkiye'de belirlenen pilot bölgelerdeki EA'ların dağılımı ve etkisinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Akköprü ve Ümitköy'deki EA ve HHA sayıları neredeyse aynı olmasına rağmen, bu bölgelerin dağıtım sistemi konfigürasyonunun oldukça farklı olması, aynı sayıda EA ve HHA'nın farklı dağıtım konfigürasyonlarındaki etkisini araştırmayı ilginç kılmaktadır.

Tablo 4. Pilot bölgelerin EVAM unsurları

Toplam EA ve HHA Ülke Çapında - 2035 (Binler)		Trafo Merkezi Adı	Bölge	İl	Elektrik Endeksi (EI)	GDP Endeksi (GDP)	Göreceli Kalkınma Endeksi (RDI)	EV Tahsis Çarpanı (EVAM)	Toplam EA ve HHA Pilot Bölgeler - 2035 (Binler)	
Net0	BAU								Net0	BAU
11.085	5.072	Akköprü	BAŞKENT	Ankara	0,00192	1,357	1,14767	0,0030	33,2	15,2
		Ümitköy		Ankara	0,00192	1,357	1,14767	0,0030	33,2	15,2
		Kartal	AYEDAŞ	İstanbul	0,00128	1,633	1,08283	0,0023	25,1	11,5
		Şile		İstanbul	0,00080	1,633	0,43313	0,0006	6,3	2,9

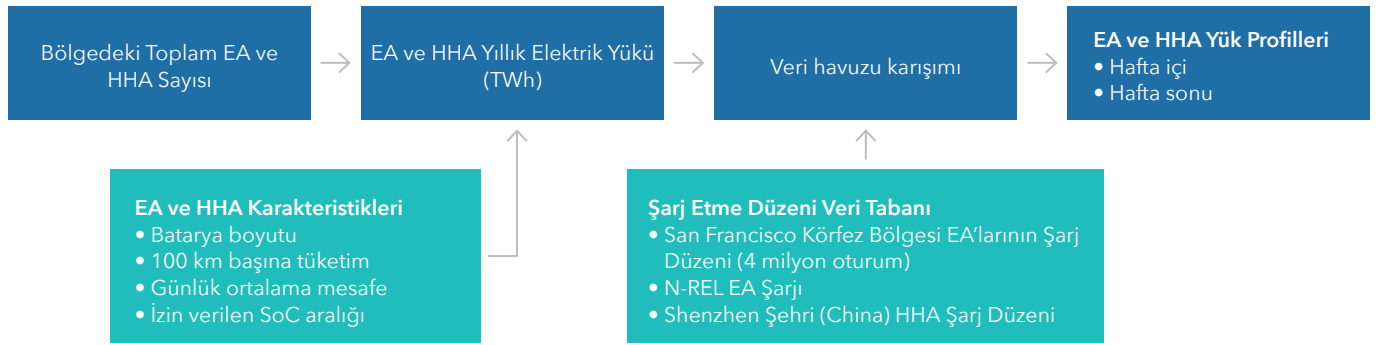
Şekil 26. Her bir pilot bölgedeki EA ve HHA sayısı - 2035 yılı



4.3 EA ve HHA modelleme ve şarj rutinleri

EA ve HHA için yük modelleme yaklaşımı Şekil 27’de gösterilmektedir. Bir pilot bölgedeki EA ve HHA’ların belirlenen sayısı ile başlayan ilk adım, bu araçlarla ilişkili elektrik tüketiminin tahmin edilmesini içerir. Daha sonra, ev, işyeri ve kamusal şarj alışkanlıkları dahil olmak üzere şarj alışkanlıkları belirlenir ve ilişkili bir şarj modeli oluşturulur. Elektrik tüketimi verilerinin her bir pilot bölge için tahmini şarj profiline uygulanması, şarj modelinin hesaplanmasını sağlar. Bu hesaplama, hem hafta içi hem de hafta sonu profillerini kapsayacak şekilde haftalık zaman dilimlerini kapsamakta ve DC hızlı şarj teknolojisinin dinamiklerini yakalamak için 30 dakikalık zaman adımlarını kullanmaktadır. Bu modelleme yaklaşımı, EA’ların ve HHA’ların belirlenen pilot bölgelerde nasıl enerji tükettiklerinin ve şarj modellerini nasıl takip ettiklerinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak, hassas şebeke etki değerlendirmeleri için incelikli bir tasvir sağlar.

Şekil 27. EA ve HHA yük modelleme yaklaşımı



EA’lar ve HHA’lar için enerji tüketiminin hesaplanması, izin verilen şarj menzili, ortalama batarya boyutu ve bu araçların genel verimliliği ile ilgili bir dizi dikkatle düşünülmüş varsayımı içermektedir. Bu hesaplama rehberlik eden belirli varsayımlar Tablo 5’te ayrıntılı olarak özetlenmiştir. Özellikle, EA batarya boyutu, ortalama verimlilik ve izin verilen menzile ilgili tespitler 257 farklı modelin kapsamlı bir analizinden elde edilmiştir⁴⁸. HHA’lar için piyasada bulunan ve hizmette olan 18 farklı HHA dikkate alınmıştır⁴⁹. Şekil 28’de, hem EA’lar hem de HHA’lar için batarya boyutu, ortalama verimlilik ve izin verilen menzilde gözlemlenen varyasyon aralığını görsel olarak temsil etmektedir. Bu varyasyondan elde edilen ilgili ortalama değerler daha sonra bu çalışmada temel parametreler olarak kullanılmıştır. Bu kapsamlı yaklaşım, EA ve HHA özelliklerine ilişkin yapılan varsayımların piyasada mevcut olan çeşitli modelleri temsil etmesini sağlayarak izleyen enerji tüketimi hesaplamaları için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Türkiye’deki ortalama günlük mesafe Türkiye İstatistik Kurumu’ndan edinilmiştir⁵⁰.

⁴⁸ Electric Vehicle Database, n.d. Current and Upcoming Electric Vehicles. <https://ev-database.org/>

⁴⁹ MotorWatt, n.d. Electric Buses & Vans. <https://ev.motorwatt.com/ev-database/database-electric-buses>

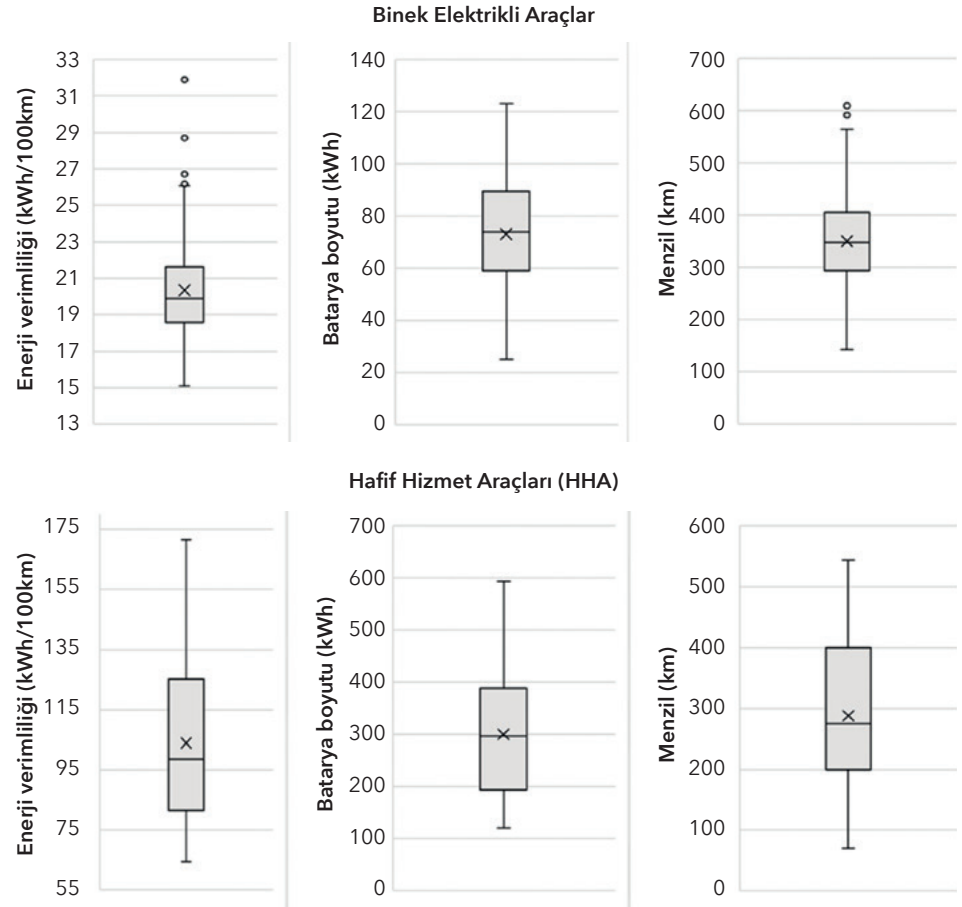
⁵⁰ TÜİK, 2023. Taşıt-kilometre İstatistikleri, 2021.

<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tasit-kilometre-Istatistikleri-2021-49527>

Tablo 5. EA ve HHA'lar için varsayımların listesi

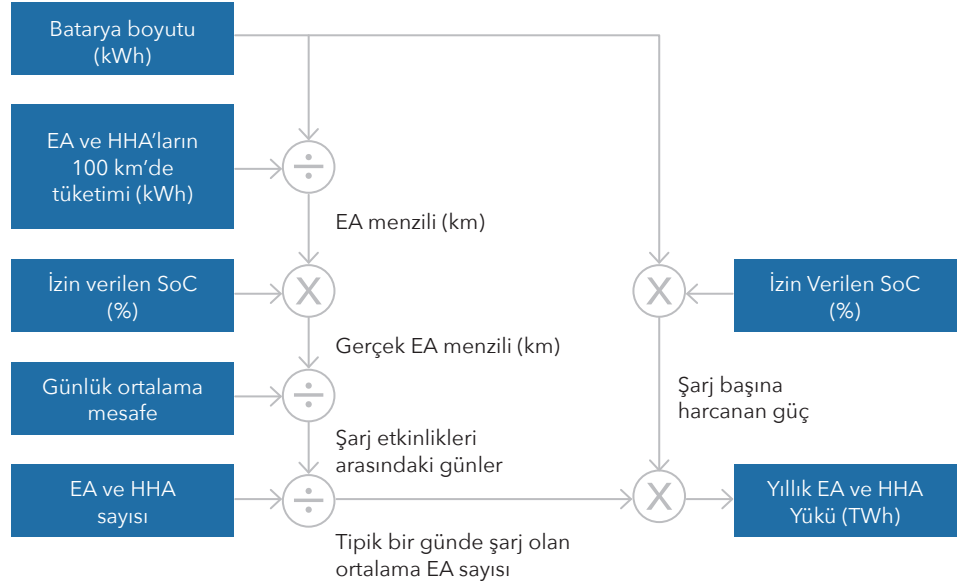
Kategori	Parametre	Değer
Batarya	Minimum SOC	0.2
	Maksimum SOC	0.9
EA'lar	Ortalama batarya kapasitesi (kWh)	70
	Ortalama tüketim (kWh/100 km)	20
	Ortalama menzil (km)	350
	Türkiye'de günlük ortalama mesafe (km)	40
HHA'lar	Ortalama batarya kapasitesi (kWh)	300
	Ortalama tüketim (kWh/100 km)	104
	Ortalama menzil (km)	288
	Türkiye'de günlük ortalama mesafe (km)	100

Şekil 28. Hem EA'lar hem de HHA'lar için batarya boyutu, ortalama verimlilik ve menzilde gözlemlenen değişkenlik aralığı



Tablo 5'te detaylandırılan varsayımlarla, şarj başına ortalama enerjiyi hesaplamak için Şekil 29'de sunulan yaklaşım kullanılmış ve sonuç olarak yıllık EA ve HHA elektrik yükü hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 6'da raporlanmıştır.

Şekil 29. EA ve HHA'ların yıllık enerji tüketimi



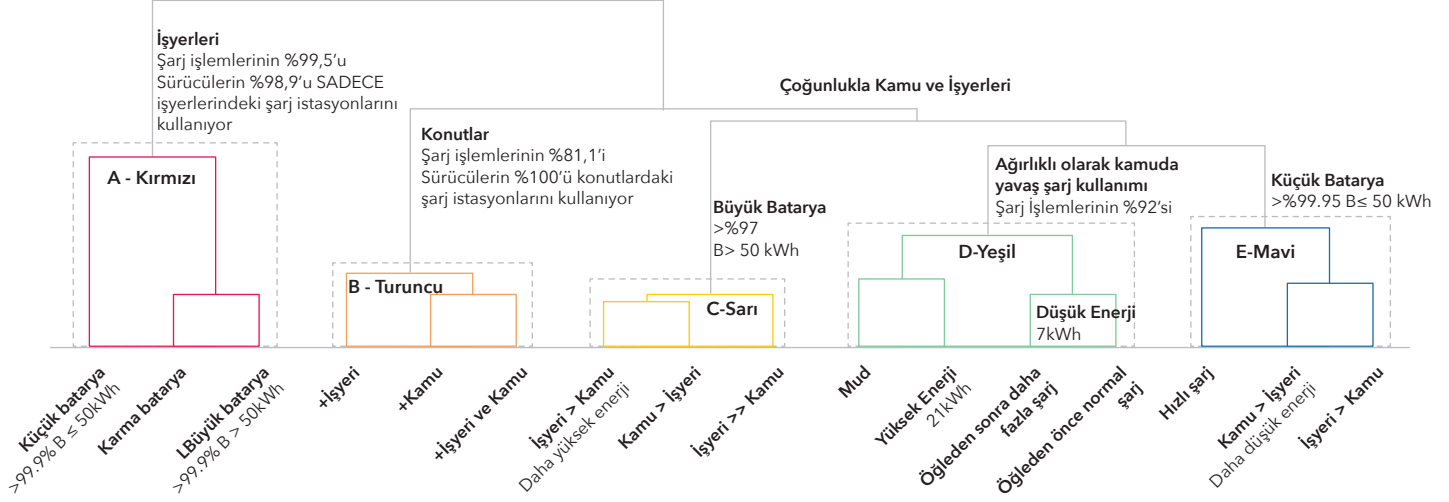
Tablo 6. EA ve HHA'ların yıllık elektrik tüketimi

Kategori	Parametre	Değer
EA	Şarj işlemi başına ortalama güç (kW)	49
	Ardışık şarj işlemleri arasındaki günler	6
	Yıllık Yük (TWh)	31.9
HHA	Şarj işlemi başına ortalama güç (kW)	210
	Ardışık şarj işlemleri arasındaki günler	2
	Yıllık Yük (TWh)	5.4

Yıllık tüketilen enerji hesaplandıktan sonra, farklı şarj alışkanlıklarıyla ilişkili uygun şarj modelleri ortaya çıkmaktadır. Elektrikli araçlar için kullanılan ana veri seti, 2019 yılında Kaliforniya'da San Francisco Körfez Bölgesi'nde gerçekleşen 3,9 milyon oturumla 38 bin sürücünün şarj alışkanlıklarıdır⁵¹. Sürücünün şarj davranışı 16 farklı kümede toplanmış ve ilgili dağılım Şekil 30'da gösterilmiş ve Tablo 7'de raporlanmıştır.

⁵¹ Powell, S., Cezar, G. V., Rajagopal, R., 2022. Scalable probabilistic estimates of electric vehicle charging given observed driver behavior. doi: 118382.

Şekil 30. Şarj davranışlarının dendrogram gösterimi



Verideki Etkenler

6251 2776 4818 758 460 632 801 848 5885 71 1753 981 2148 839 2632 6612

Tablo 7. Ana ücretlendirme kümeleri ve temsili ücretlendirme grupları

Kümelere	Açıklama	Detay	Temsili Ücretlendirme Grubu
Küme 1		Küçük Batarya (<50kW)	İşyeri AC Tip 2
Küme 2	Neredeyse yalnızca işyeri şarjının kullanılması	Karma Batarya	İşyeri AC Tip 2
Küme 3		Büyük Batarya (>50kW)	İşyeri AC Tip 2
Küme 4		İşyeri şarjı ile	Ev AC Tip 1
Küme 5	Ağırlıklı olarak konut şarjı kullanımı	Kamusal şarj ile	Ev AC Tip 1
Küme 6		İş + kamu şarjı ile	Ev AC Tip 1
Küme 7		Kamusal şarjdan daha yüksek işyeri şarjı	İşyeri AC Tip 2
Küme 8	Kamusal şarjı kullanan büyük batarya	İşyeri şarjından daha yüksek kamu şarjı	Kamu AC Tip2
Küme 9		Kamusal şarjdan çok daha yüksek işyeri şarjı	İşyeri AC Tip 2
Küme 10		Çok birimli konut	Ev AC Tip 2
Küme 11	Ağırlıklı olarak kamusal yavaş şarj kullanımı	Yüksek enerji	Kamu AC Tip2
Küme 12		Öğleden sonra daha fazla şarj.	Kamu AC Tip2
Küme 13		Öğleden önce daha fazla şarj.	Kamu AC Tip2
Küme 14		Hızlı şarj	Kamu AC Tip3
Küme 15	Kamusal şarjı kullanan küçük batarya	Yüksek kamu şarjı	Kamu AC Tip2
Küme 16		Yüksek işyeri şarjı	İşyeri AC Tip 2

Tablo 7’de özetlenen 16 farklı şarj alışkanlığından oluşan ilk set, şarj davranışlarının daha iyi yönetilebilirliği ve profilinin çıkarılması için Tablo 8’de 5 ana temsili şarj grubuna indirgenmiştir. Bu azaltma, şarj alışkanlıklarının daha pratik bir şekilde analiz edilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu kümelerin her biri için şarj dağılımı Şekil 31’de görsel olarak sunulmuştur. Bu temsili şarj gruplarının derecelendirmeleri ve özelliklerine ilişkin ayrıntılar Tablo 8’de verilmiştir⁵². Tablo 8’de kullanılan derecelendirmelerin EA’ların ortalama derecelendirmeleri olarak kabul edildiğini unutmayınız. Özellikle, DC hızlı şarj teknolojisi ile ilgili olarak, derecelendirmelerde hızlı bir artış eğilimi olsa da, 100 kW, incelenen EA filusunda küçük batarya kapasitelerine sahip EA’lar da bulunduğundan ortalama derecelendirmeyi temsil etmektedir.

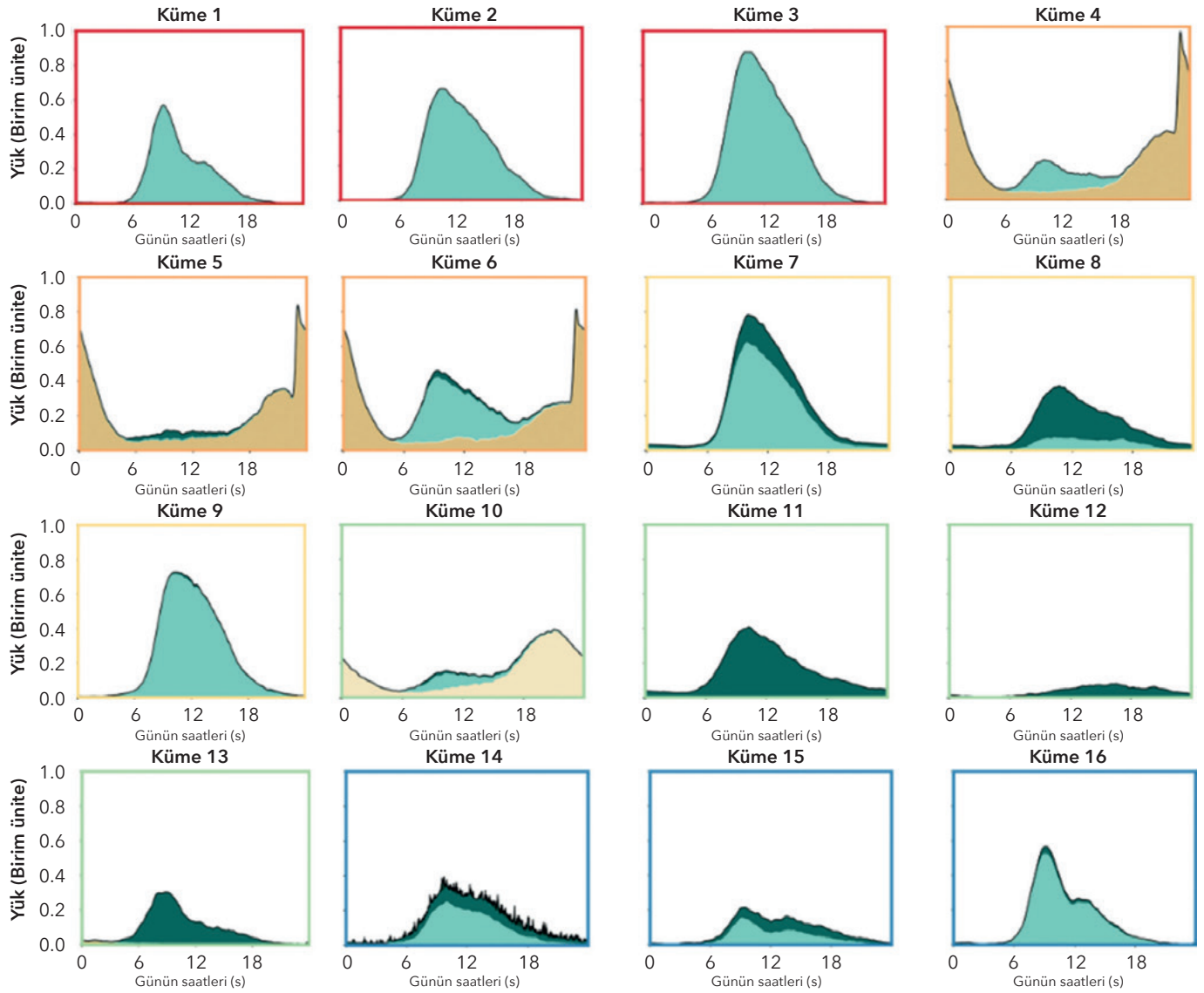
Veri setini daha da zenginleştirmek için ABD Enerji Bakanlığı’nın Elektrikli Araç Altyapı Projeksiyon Aracı dahil edilmiştir⁵³. Ayrıca, HHA’lar için 17.000 LDV’den oluşan önemli bir veri havuzu dikkate alınmıştır⁵⁴. Bu veri seti, toplu taşıma için ilk ve en büyük tamamen elektrikli otobüs ağına sahip olmasıyla tanınan Çin’in Shenzhen şehrinden alınmıştır. Bu ek veri kaynaklarının dahil edilmesi, çalışmada hem EA’lar hem de HHA’lar için şarj alışkanlıklarının ve modellerinin daha sağlam bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunarak bulguların genel güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini artırmaktadır.

⁵² SHURA, 2019. Transport sector transformation: Integrating electric vehicles into Turkey’s distribution grids. <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2019/12/SHURA-2019-12-Transport-Sector-Transformation.Integrating-Electric-Vehicles-Into-Turkeys-Distribution-Grids.pdf>

⁵³ U.S. Department of Energy, n.d. Electric Vehicle Infrastructure Toolbox. <https://afdc.energy.gov/evi-pro-lite>

⁵⁴ Wang, G., Xie, X., Zhang, F., Liu, Y., Zhang, D., 2019. bCharge: Data-Driven Real-Time Charging Scheduling for Large-Scale Electric Bus Fleets. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8603191>

Şekil 31. Her bir kümenin şarj dağılımı



Tablo 8. Temsili şarj gruplarının derecelendirmeleri ve özellikleri

Şarj Teknolojisi	Güç (kW)	Şarj Hızı
AC1 - ev (AC1 H)	2.3	Yavaş
AC2 - ev (AC2 H)	3.7	Orta
AC2 - iş (AC2 W)	22	Orta
AC2 - kamu (AC2 P)	22	Orta
DC3 - kamu (DC3 P)	100	Hızlı

Çalışma kapsamında iki farklı şarj rutini incelenmektedir: evde şarj ve kamusal alanda şarj. Evde şarj rutininde, EA'lar ağırlıklı olarak ev şarj noktalarında şarj edilirken, kamusal alanda şarj rutini kamuya açık şarj noktalarındaki şarjı içermektedir. Türkiye, yüksek bir kentleşme oranı sergilemekte ve nüfusunun önemli bir kısmı apartmanlarda ikamet etmektedir. Bu tür yaşam düzenlemelerinin yaygınlığına rağmen, 2035 yılına kadar tüm EA sahiplerinin dörtte birinden fazlasının bir ev tipi şarj istasyonuna sahip olacağı tahmin edilmektedir. İşyerlerinde, 2025 yılına kadar her 2 EA için, 2030 yılına kadar her 10 EA için ve 2035 yılına kadar her 15 EA için bir şarj cihazı olacağı varsayılmaktadır. Bu varsayımlar, önümüzdeki yıllarda elektrikli araçların giderek daha fazla benimsenmesiyle şarj altyapısında beklenen büyümeyi yansıtmaktadır.

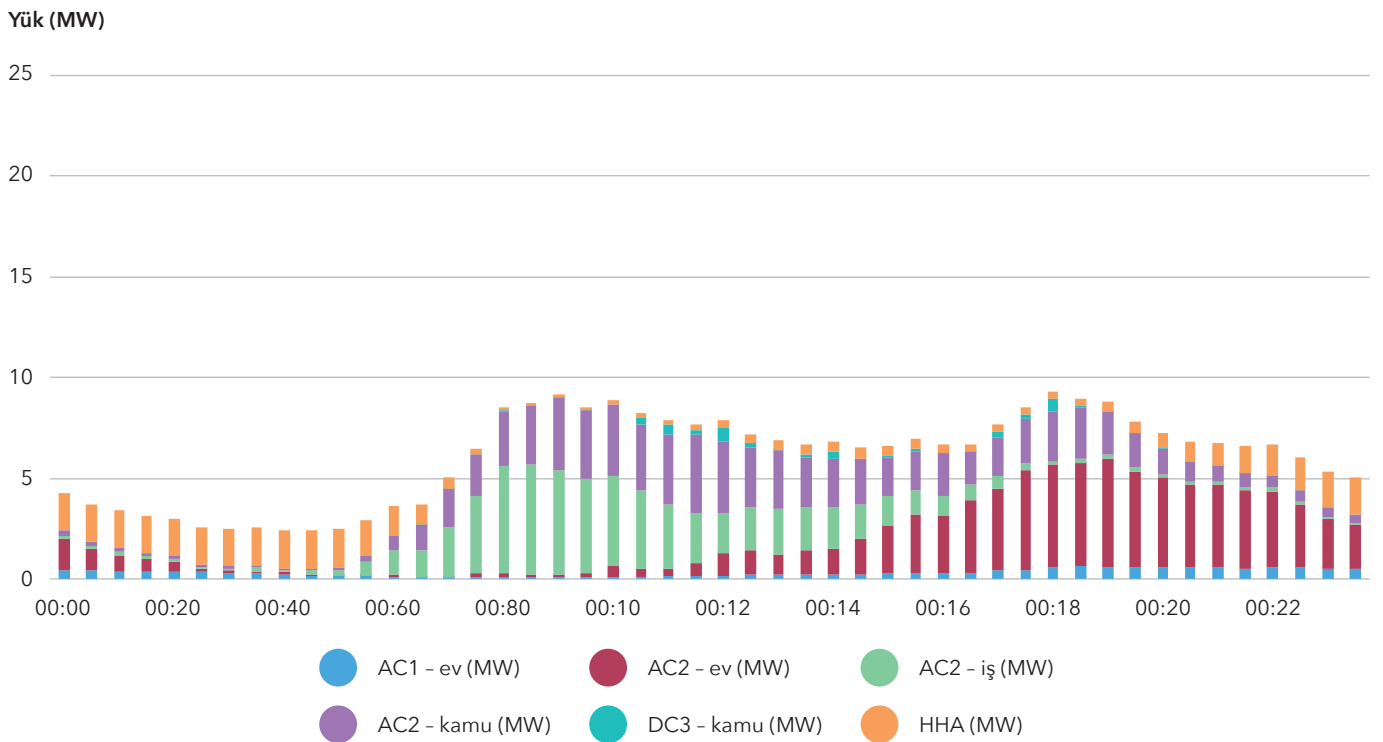
Şekil 27'de özetlenen metodoloji aracılığıyla elde edilen şarj profilleri öncelikle evde şarj rutini temsil etmektedir. Kamusal alanda şarj rutini modellemek için AC2 (22 kW) ev tipi şarjdan elde edilen enerjinin %40'ının ve AC2 (22 kW) halka açık şarjdan elde edilen enerjinin %40'ının, DC3 (100 kW) halka açık şarj istasyonlarından sağlanacağı varsayılmıştır. Bu varsayım, farklı şarj altyapısı türleri arasında enerji tüketiminin gerçekçi bir dağılımını yansıtmaktadır ve gelişen şarj teknolojileri ortamıyla uyumludur.

Daha önce özetlenen yöntem ve varsayımlar kullanılarak, her bir pilot bölgedeki hem EA'lar hem de HHA'lar için şarj profilleri titizlikle hesaplanmıştır. Bu, iki entegrasyon senaryosunun (BAU ve Net0) iki gün tipi (hafta içi ve hafta sonu) ve iki şarj rutini (evde ve kamusal alanda) boyunca dikkate alınmasını içerir. Sonuç olarak, her bir pilot bölge için, farklı şarj davranışlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayan toplam 8 farklı şarj profili oluşturulmuştur. Açıklayıcı bir örnek olarak, Akköprü bölgesi için belirli bir şarj modeli Şekil 27 ile Şekil 32'de sunulmuştur. Bu profiller, hem hafta içi hem de hafta sonu şarj dinamiklerini yakalayan haftalık zaman dilimlerini kapsar ve DC hızlı şarj teknolojisinin nüanslarını tam olarak yansıtmak için 30 dakikalık zaman adımları kullanır.

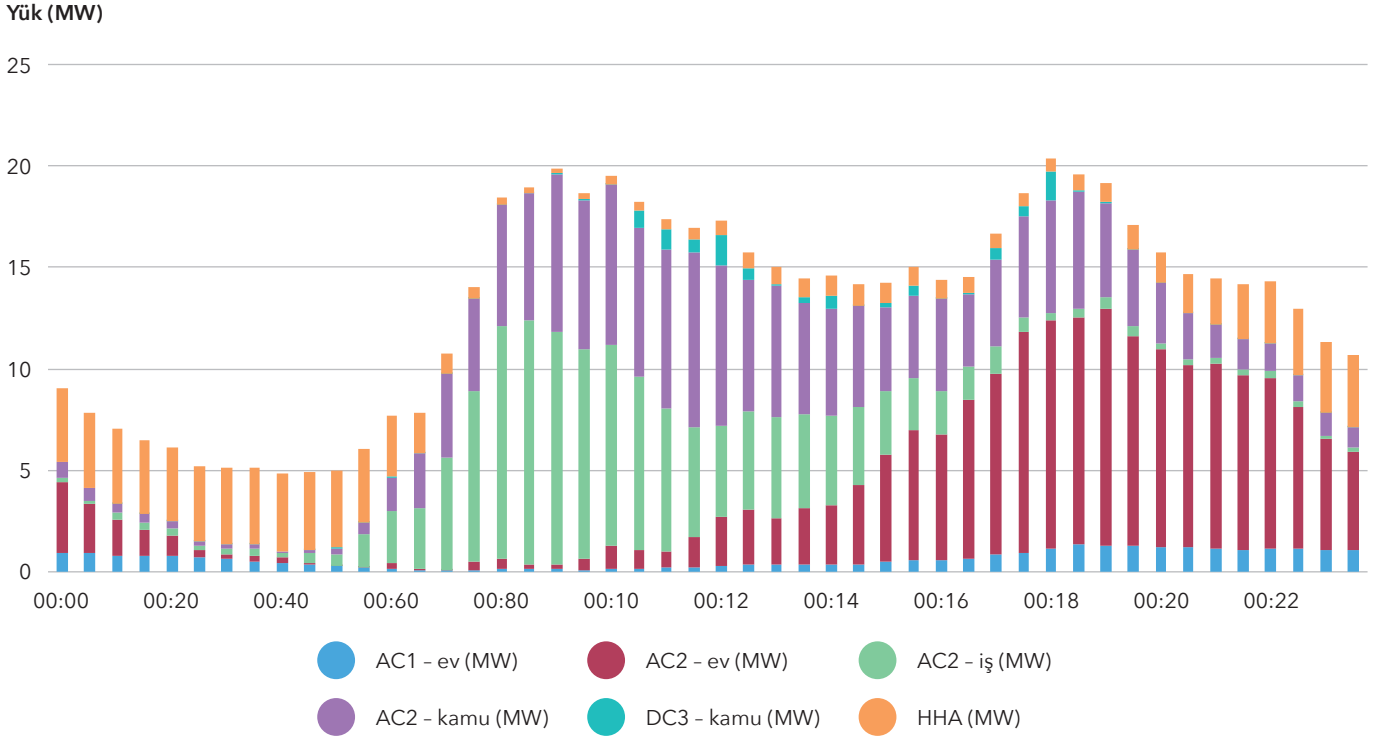
Şekil 32'de, BAU Senaryosu altında tipik bir hafta içi günü için evde şarj rutini gösterilmektedir. Net0 koşulları altında aynı senaryo ile karşılaştırıldığında (Şekil 32 ve Şekil 33 karşılaştırıldığında), EA'ların ve HHA'ların puant yükünde yaklaşık 10 megavat'tan (MW) 20 MW'a yükselen gözle görülür bir artış görülmektedir. Puant yükteki bu artış, Net0 Senaryosunda BAU Senaryosuna kıyasla artan EA ve HHA sayısının doğrudan bir sonucudur. Şekil 33 ve Şekil 34'te, DC hızlı şarj etkinliklerinin sayısının arttığı evde ve kamusal alanda şarj

rutinleri arasındaki karşılaştırma gösterilmektedir. Sonuç olarak, şarj profilinin tepe noktası 20 MW'tan yaklaşık 25 MW'a yükselmektedir. Bu gözlem, evde şarj temelli bir rutinden kamusal alanda şarj rutinine geçerken modellerde meydana gelen değişikliği belirgin bir şekilde vurgulamaktadır. Son olarak, Şekil 35'de hafta sonundaki şarj rutini gösterilmekte ve hafta içi rutinine kıyasla şarj profilinde önemli değişiklikler olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 34).

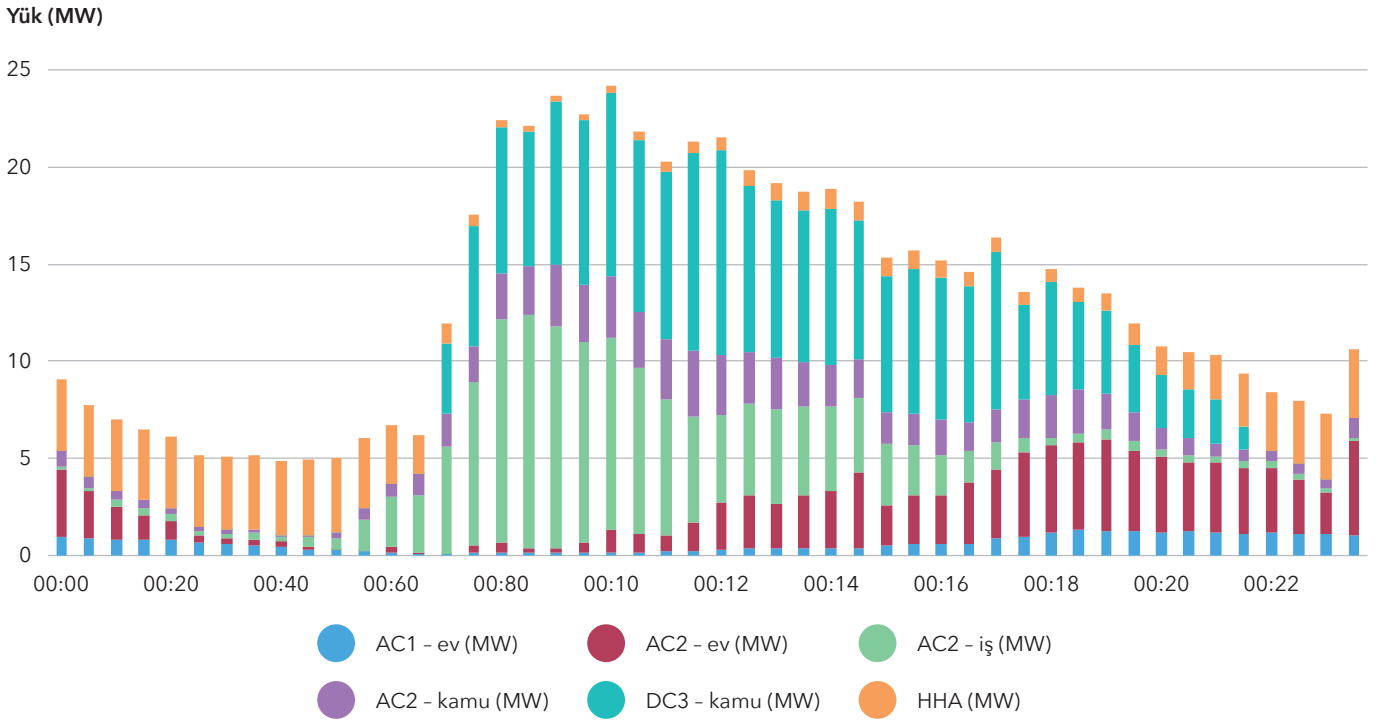
Şekil 32. Akköprü şarj profili TM, evde şarj rutini, hafta içi, 2035 yılı BAU



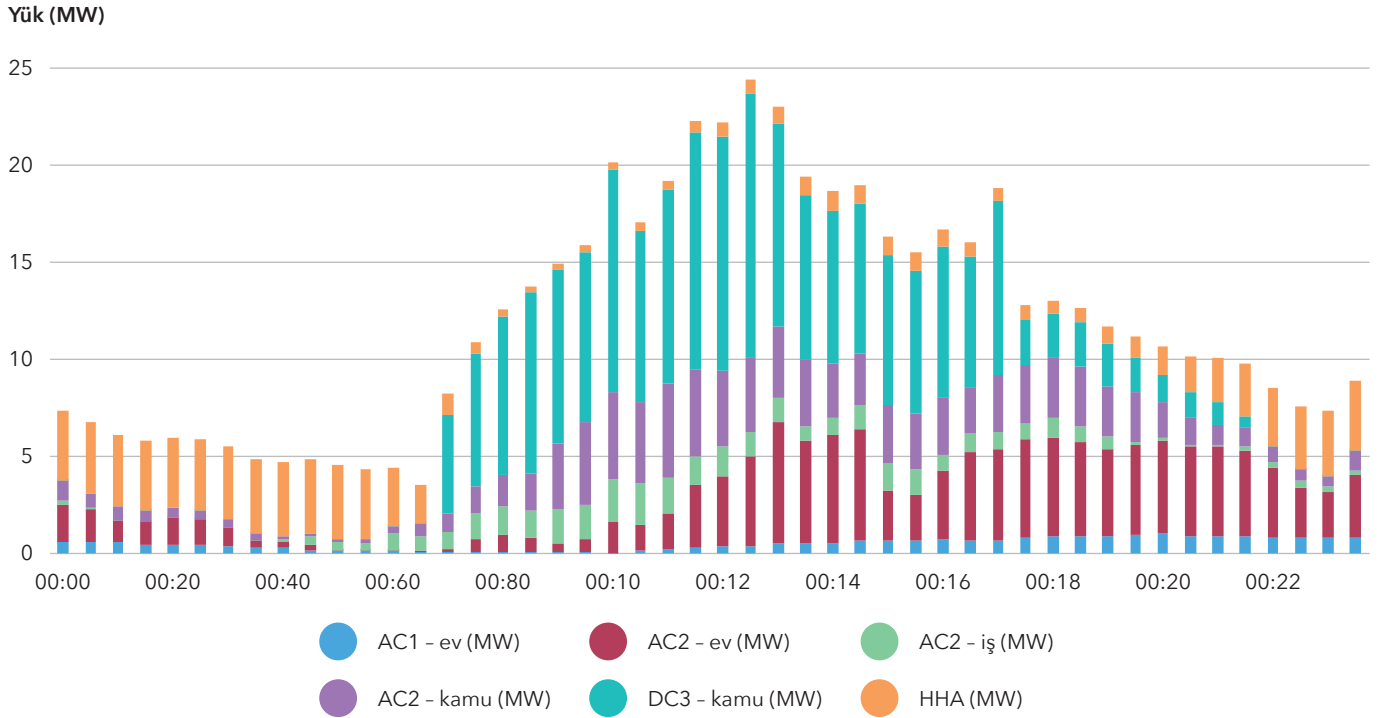
Şekil 33. Akköprü şarj profili TM, evde şarj rutini, hafta içi, 2035 yılı Net0



Şekil 34. Akköprü şarj profili TM, kamusal alanda şarj rutini, hafta içi, 2035 yılı Net0



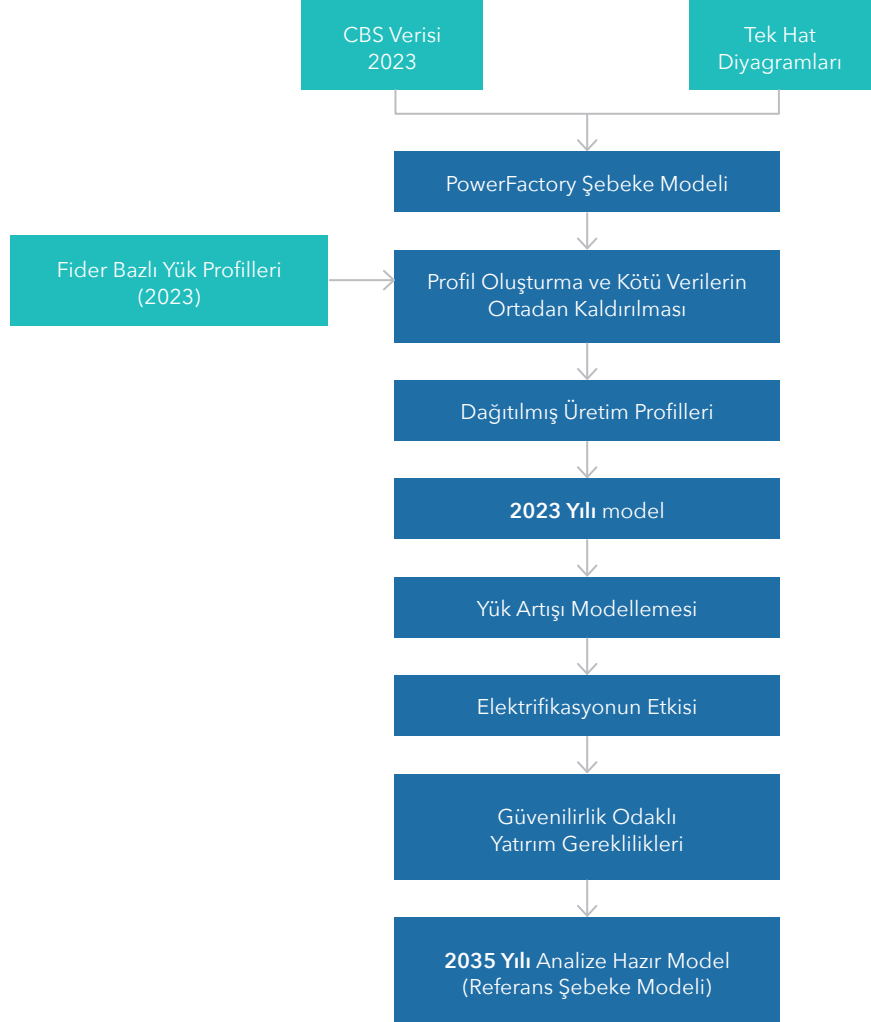
Şekil 35. Akköprü şarj profili TM, kamusal alanda şarj rutini, hafta sonu, 2035 yılı Net0



4.4 Referans şebeke modeli geliştirme

EA'ların pilot dağıtım bölgeleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için, 2035 yılına kadar orta gerilim (OG) referans şebeke modelleri formüle edilmiştir. Bu modeller oluşturulurken, referans şebeke modelinde EA şarj yükünün bulunmadığı ve EA'sız referans şebeke modeli olarak nitelendirildiği önemli bir varsayım yapılmıştır. Bu varsayım, çalışmanın temelini oluşturan BAU Senaryosunun, dağıtım sistemine EA entegrasyonunun devam eden eğilimini yansıttığı düşüncesinden kaynaklanmaktadır. Referans şebeke modelinin geliştirilmesine yönelik prosedürel çerçeve Şekil 36'da görsel olarak temsil edilmektedir. Bu yaklaşım, temel dağıtım şebekesi koşullarının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak EA olmayan referans şebeke modeli ile EA şarj yüklerini içeren sonraki senaryolar arasında net bir ayrım yapılmasını sağlar.

Şekil 36. Referans şebeke modeli geliştirme yaklaşımı

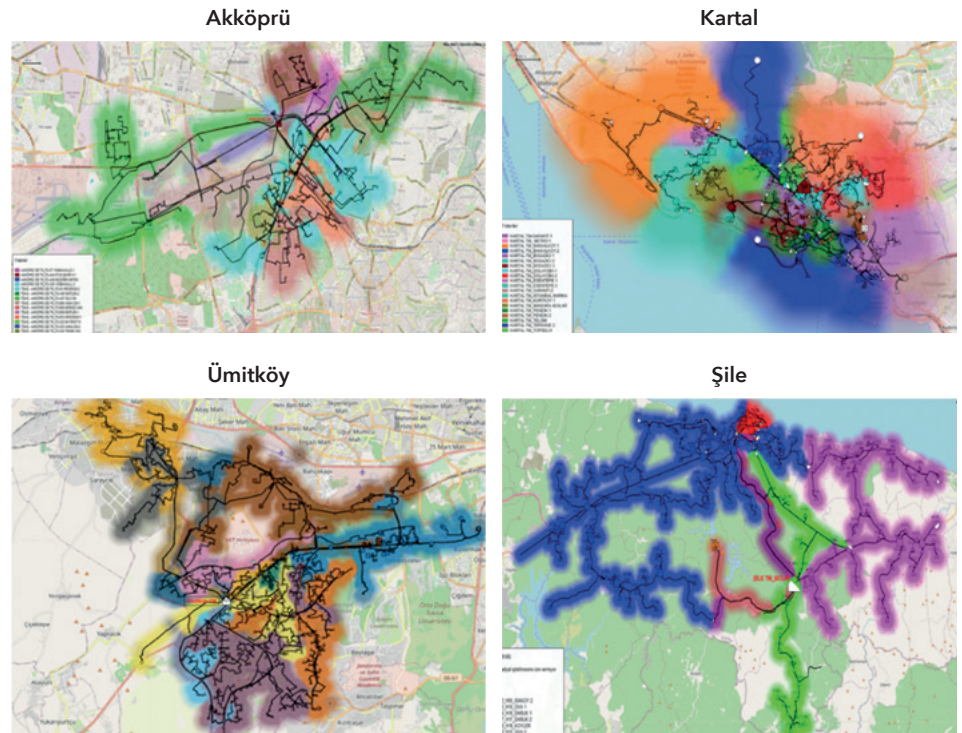


Her bir pilot bölge için Referans Modeli geliştirmek üzere aşağıdaki adımlar uygulanmaktadır:

- **2023 yılı model geliştirme:** Pilot bölgelerin dağıtım şebekesine ilişkin coğrafi bilgi sistemi (GIS) verileri ve tek hat şemaları ilgili DSO'dan temin edilmiştir. Elde edilen bu veriler daha sonra DlgSILENT PowerFactory ortamında titizlikle şebeke modeline dönüştürülmüştür. Şebeke verileriyle birlikte, hatların ve transformatörlerin yükleme koşullarını simüle etmek için fider kaynaklı yük profilleri de elde edilerek modele aktarılmıştır. Bu süreçte, elde edilen yük profilleri potansiyel yanlışlıklar veya anormallikler için filtreleme ve incelemeye tabi tutulmaktadır. Aşağı akış yük verilerinin mevcut olması halinde, bu veriler doğrudan kullanılmıştır. Alternatif olarak, aşağı akış verileri mevcut değilse, fider kaynağından alınan ölçümler, ilgili Orta Gerilim / Alçak Gerilim (OG / AG) transformatörlerinin kapasitesine göre ayarlanarak aşağı akış yüküne uyacak şekilde ölçeklendirilir. Ayrıca, model OG/AG transformatörlerinin Alçak Gerilim (AG) tarafındaki çeşitli

müşteri tiplerini de dikkate almaktadır. Her bir dağıtım şirketi için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)⁵⁵ tarafından belirlenen günlük yük özellikleri modele dahil edilmiştir. Bu özellikler, tipik mevsimsel hafta içi günler için konut, ticari, endüstriyel, sulama ve aydınlatma yüklerini kapsar. Bu faktörlerin entegre edilmesiyle 2023 yılı için şebeke modeli oluşturulur ve 2035 yılına doğru yüklerin projeksiyonu ve gerekli yatırımların belirlenmesi için bir temel sağlanır. Pilot bölgelerin 2023 yılına ait OG şebeke modeli, farklı bölgelere hizmet veren fiderlerin farklı renklerle ayrıldığı Şekil 37'de gösterilmektedir. OG hat yükü, OG/AG trafo yükü ve gerilim seviyeleri dikkate alınarak şebekenin mevcut durumu sırasıyla Şekil 38, Şekil 39 ve Şekil 40'ta gösterilmektedir. Özellikle, OG/AG trafolarının yıllık ortalama yüklenmesi %30-%40 civarında seyrederken, OG hatları için yıllık ortalama yüklenme seviyesi yaklaşık %15'tir. Bu durum başlangıçta yeni yükler için mevcut kapasiteye işaret etse de, ilerleyen bölümlerde bu görünürdeki boşluğa rağmen dağıtım şebekesinin güvenli bir şekilde işletilmesi ve güvenilirliğinin sağlanması için yatırıma ihtiyaç duyulduğu gösterilecektir.

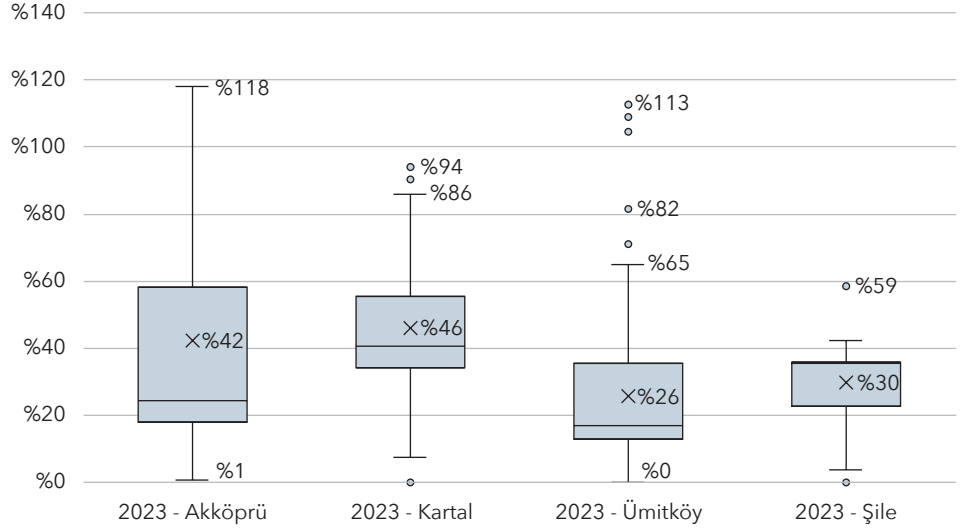
Şekil 37. Pilot bölgelerin OG şebeke modeli - Mevcut sistem 2023 yılı



⁵⁵ EPDK, Tüketici grupların yük eğrileri

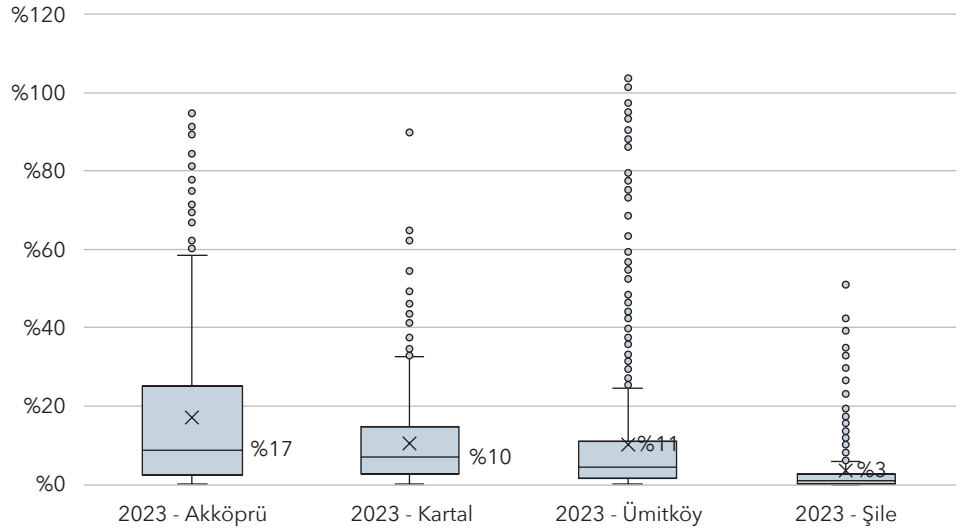
Şekil 38. OG/AG trafo yüklenme seviyesi - Mevcut sistem 2023 yılı

Yüklenme seviyesi

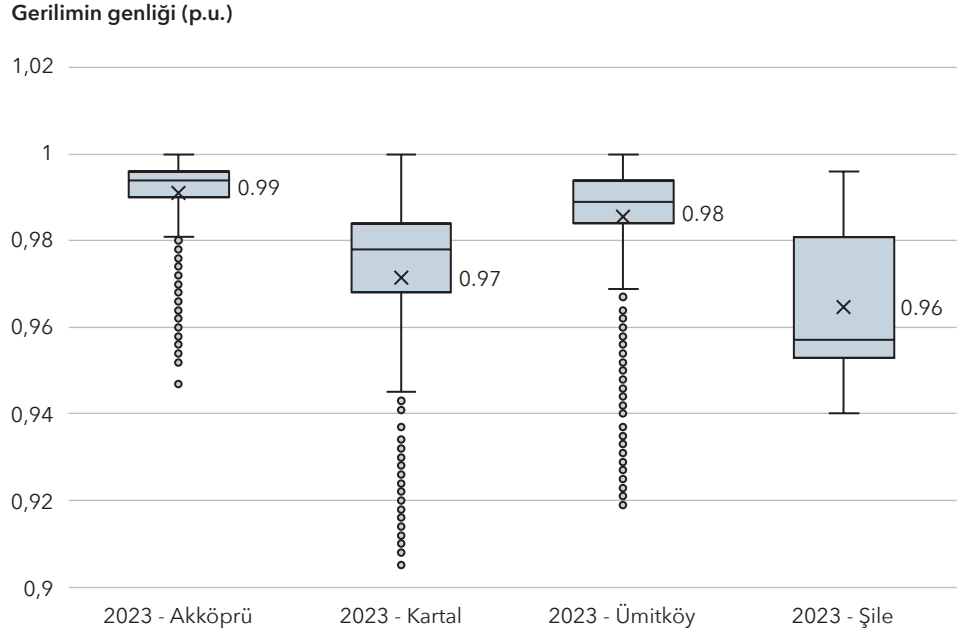


Şekil 39. OG hatları yüklenme seviyesi - Mevcut sistem 2023 yılı

Yüklenme seviyesi



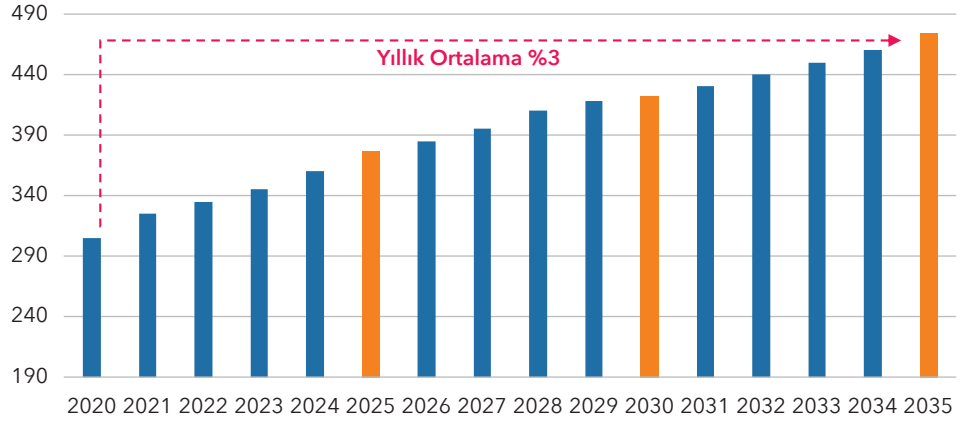
Şekil 40. Pilot bölgelerin gerilim profili - Mevcut sistem 2023 yılı



- Yük büyüme modellemesi:** Pilot bölgeleri besleyen YG trafo merkezleri için yıllık yük eğrilerinin belirlenmesi, mevcut (2023) yük eğrilerinin yıllık talep artış oranı dahil edilerek hedef yıl olan 2035'e ölçeklendirilmesini içermektedir. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi net sıfır yol haritasına göre yıllık ortalama talep artış oranı \approx %3 tahmin edilmektedir (Şekil 41). Bu %3'lük ortalama, tüm ülke için temsili bir değer olarak hizmet etse de, DSO rakamlarının da gösterdiği gibi, metropol bölgelerinin genellikle ulusal ortalamayı aşan talep artışları yaşadığı kabul edilmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada metropol alanlar için yıllık ortalama %5, kırsal alanlar için ise %3'lük bir talep artışı benimsenmiştir. Bu oran, mevcut yükler için talep artışını (dikey büyüme), yeni yüklerin eklenmesini (yatay büyüme) ve elektrikli araç şarj talebi hariç olmak üzere elektrifikasyonun etkisini kapsamaktadır. Bu analizde %7'lik (ortalama) bir elektrifikasyon oranı dikkate alınmıştır. Yük profili üzerindeki ilgili etki, tipik bir hafta için ve saatlik çözünürlükte Şekil 42'de gösterilmektedir. Bu, çeşitli sektörlerin elektrifikasyonundan kaynaklanan yük profilindeki değişiklikleri yansıtmakta ve gelişen talep ortamının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

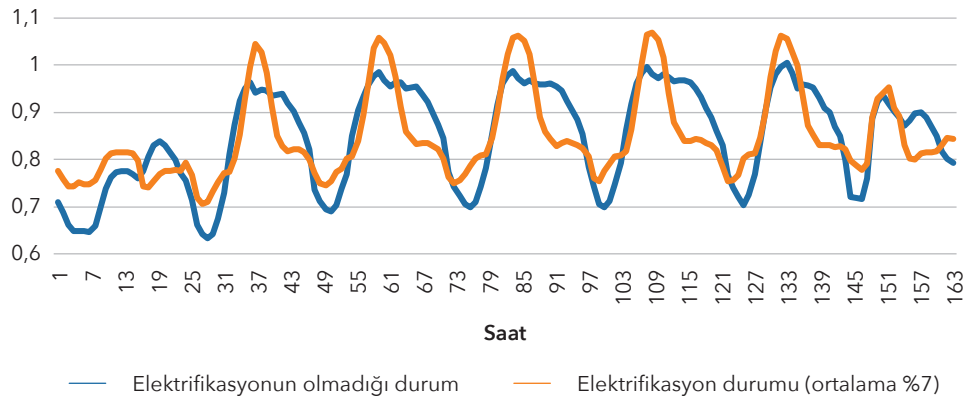
Şekil 41. SHURA Net Sıfır yol haritasına göre yıllık ortalama talep artışı

Elektrik talebi (TWh)



Şekil 42. Elektrifikasyonun tipik bir hafta için ve saatlik çözünürlükte yük profili üzerindeki etkisi

Yük (p.u.)

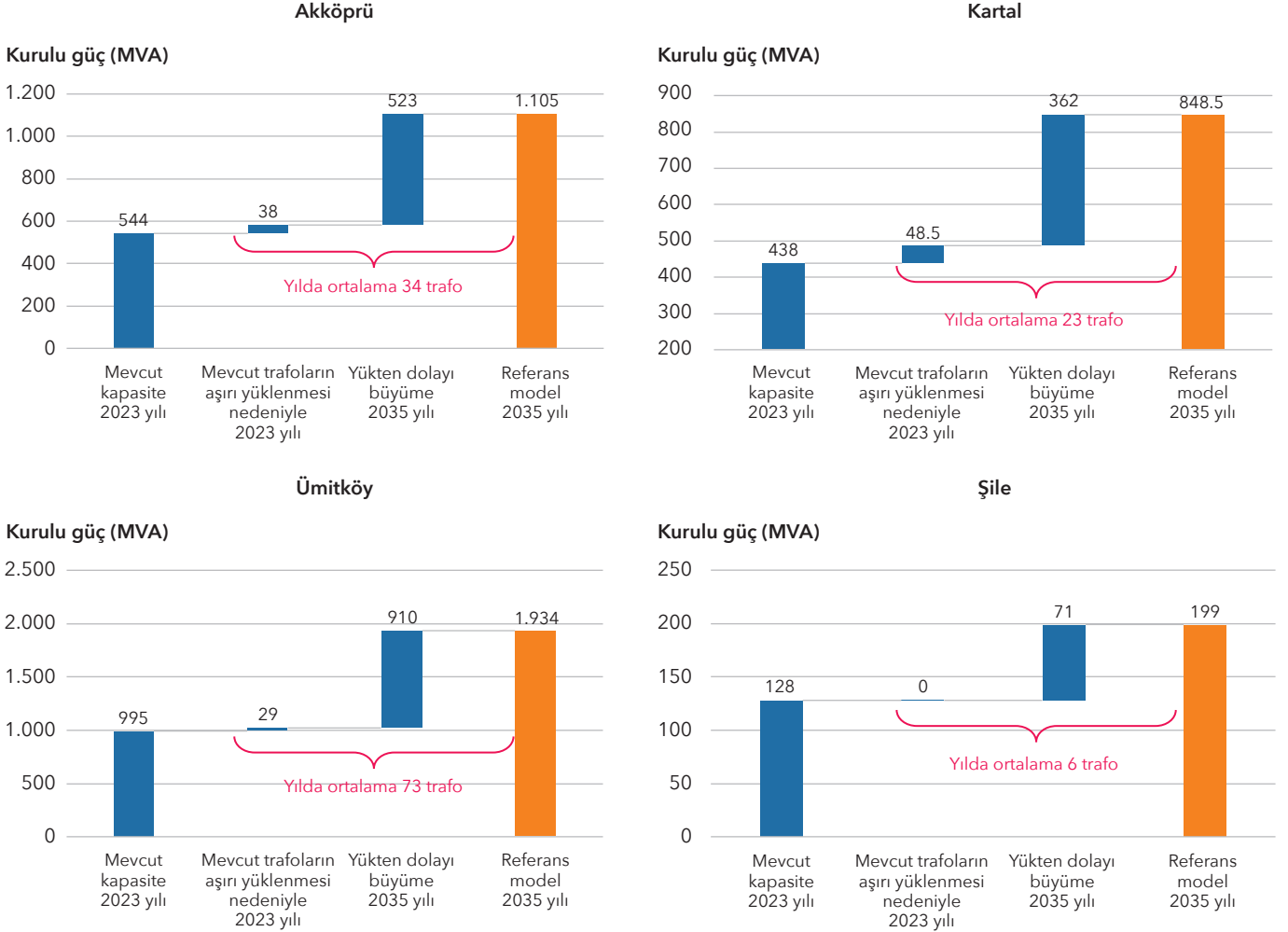


- **Referans şebeke modeli oluşturmak için yatırım gereksinimleri (2035 Yılı - E-mobilite yükleri hariç):** Yukarıda belirtilen yıllık ortalama yük artış oranı kullanılarak, yatırımların ve şebeke güçlendirmelerinin belirlenmesi ve uygulanması, mevcut 2023 modelini 2035 yılı için bir referans şebeke modeline dönüştürmek için çok önemli adımlardır. Bu şebeke güçlendirme gerekliliklerinin arkasındaki temel etmenler birkaç faktörü kapsamaktadır: mevcut hatların aşırı yüklenmesi, OG/AG trafoların aşırı yüklenmesi, tüketici noktalarındaki gerilim düşüşleri, birincil dağıtım şebekesindeki N-1 beklenmedik durum ve en önemlisi şebeke işletimi için gerekli olan güvenilirlik kısıtları. DSO'lar tipik olarak güvenilirlik kısıtlarını müşteri sayısına ve bir OG lateralindeki besleme noktalarına göre değerlendirir. 'Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI)', 'Customer Average Interruption Frequency Index (CAIFI)', ve 'Expected Energy Not Supplied (EENS)' gibi endeksleri hesaplayan ayrıntılı güvenilirlik analizleri

DSO'lar tarafından yaygın olarak yapılsa da, genellikle bir genel kural uygulanır. DSO'lar genellikle bir lateral üzerindeki 16 adet 1,6 MVA OG/AG trafosunu (toplamda yaklaşık 25 MVA kapasite) güvenilirlik kısıtlarını korumak için üst sınır olarak kabul etmektedir. Bu çalışmada, şebeke güçlendirme gereksinimleri sistematik olarak ele alınmaktadır. Aşırı yüklenmiş OG branşmanları veya OG/AG transformatörleri durumunda, paralel elemanların eklenmesi öngörülmektedir. Daha sonra, birincil dağıtım şebekesindeki gerilim düşüşlerinin ve N-1 beklenmedik durumunun bir değerlendirmesi yapılmakta ve gerekirse OG hatlarına yatırım yapılması öngörülmektedir. Son aşamada, laterallerdeki OG/AG transformatörlerinin sayısı incelenir. Güvenilirlik kısıtlamaları ihlal edilirse, belirlenen güvenilirlik standartlarını korumak için gerektiğinde lateral bölünmeleri (iki veya üç laterale) uygulanır. Bu aşamada dikkate alınan takviyelerin yalnızca OG şebekesi ile ilişkili olduğunu belirtmek önemlidir. Sisteme eklenen herhangi bir yeni OG/AG trafosunun, Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi tarafından standartlaştırılan ilgili AG sistemi tarafından kolaylaştırıldığı varsayılmaktadır. Bununla birlikte, EA'ların ve HHA'ların entegrasyonundan kaynaklanan yatırımların hem OG hem de AG seviyelerinde hesaplandığını vurgulamak çok önemlidir. Bu hesaplamaların sonuçları, EA'ların ve HHA'ların entegrasyonunun her iki şebeke seviyesi üzerindeki etkilerine ilişkin kapsamlı bilgiler Bölüm 5'te sunulacaktır.

Her bir pilot bölge için gerekli OG/AG trafo yatırımı miktarı Şekil 43'te gösterilmektedir. Şekil 43'ten de görülebileceği gibi, pilot bölgelerdeki ortalama OG/AG trafo yatırımı sayısı yılda 30 trafo civarındadır ve bu da DSO'nun rakamlarına çok yakındır. Ümitköy bölgesindeki OG/AG trafo yatırımlarının sayısı, bölgenin yüksek binalarla karakterize edilen yoğun gelişimi nedeniyle nispeten yüksektir.

Şekil 43. 2035 referans şebeke modelinin oluşturulması için gerekli OG/AG trafo yatırım miktarı



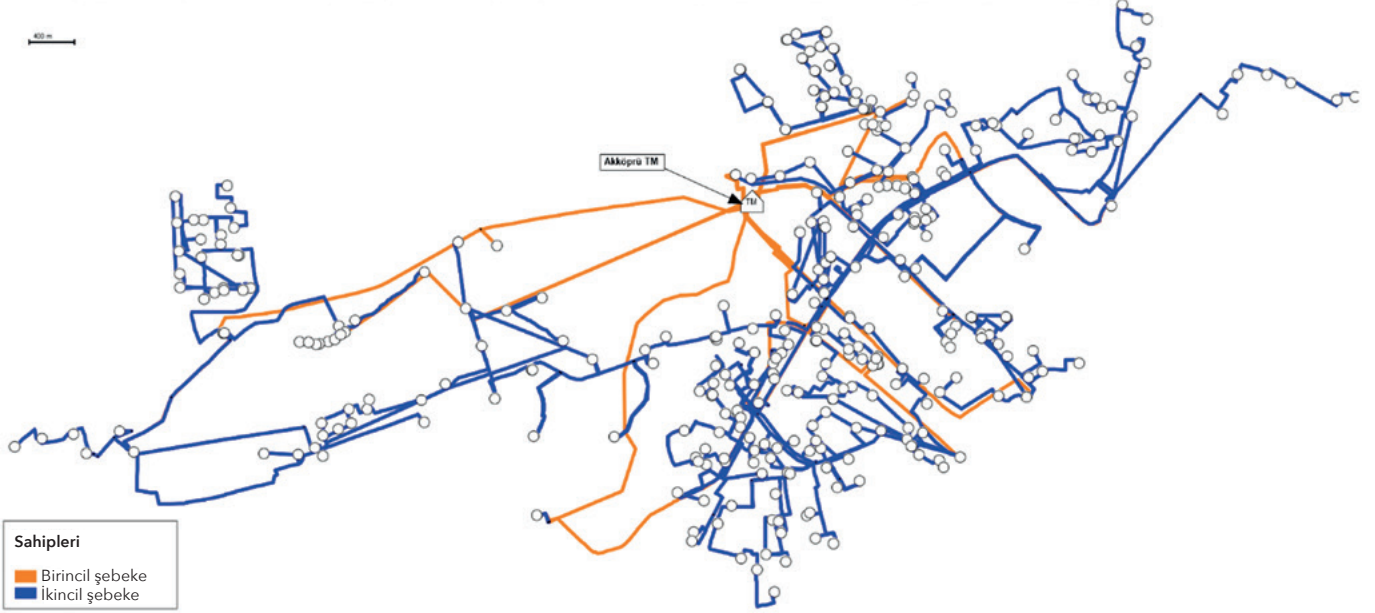
OG hatları için 2035 yılına kadar yük artışını karşılayacak yatırım gereksinimleri Tablo 9’da özetlenmiştir. Tablo incelendiğinde, Akköprü bölgesindeki mevcut OG hat uzunluğunun 2023 yılı itibariyle 210 kilometre (km) olduğu görülmektedir. Daha önce tartışılan yük artışı senaryosu ve dolayısıyla Şekil 43’te ayrıntıları verilen OG/AG trafo büyümesi dikkate alındığında, yük artışının etkisini ele almak için 64 km’lik ek OG hattı gerekecektir. Bu 64 km’nin 27 km’si yük artışı sonrası birincil dağıtım şebekesindeki aşırı yüklenmeden, 35 km’si ikincil dağıtım şebekesindeki aşırı yüklenmeden ve 13 km’si de güvenilirlik kriterlerinden kaynaklanmaktadır. Burada birincil şebeke ana trafo merkezlerini ve lateralleri birbirine bağlayan kolları kapsarken, ikincil şebeke yalnızca dağıtım transformatörlerini besleyen lateralleri kapsamaktadır. Akköprü bölgesi için birincil ve ikincil şebeke konfigürasyonu Şekil 44’te gösterilmektedir. Birincil şebeke için takviyelerin hesaplanması, radyal yapısı ve ikincil şebekeye kıyasla daha az sayıda kavşak içermesi nedeniyle nispeten kolaydır. Ancak ikincil şebeke, saha kısıtlamalarından daha fazla

etkilenmektedir. İkincil şebeke ile ilgili bilinmezlikler ve belirsizlikler göz önüne alındığında, güçlendirme hesaplamaları için yalnızca şebeke analizine güvenmek gerekli tüm yatırımları yakalayamayabilir. Bu zorluğu ele alırken, ortalama bir katsayı oluşturmak için pilot DSO'lar tarafından işletilen ikincil ve birincil şebekeler arasındaki oran incelenmiştir. Bu katsayı daha sonra ikincil şebeke için daha gerçekçi yatırımlar üretmek için kullanılır. Bu faktörler dikkate alındığında, tüm pilot bölgelerdeki yıllık ortalama OG hattı yatırımı, DSO'lar tarafından bildirilen rakamlarla uyumlu olarak %2,3 civarında seyretmektedir.

Tablo 9. 2035 referans şebekesinin oluşturulması için gerekli OG hattı yatırım miktarı

	Uzunluk (km)			
	Akköprü	Kartal TM	Ümitköy	Şile
Mevcut OG Hatları - 2023 Yılı	210	307	688	462
Toplam Şebeke Genişletme Gereksinimi - 2035 Yılı	64	68	171	57
Birincil Şebeke Yatırımı (Şebeke analizinden)	27	31	58	15
Aşırı Yükleme Dayalı İkincil Şebeke Yatırımı (Şebeke analizinden)	24	33	46	12
Güvenilirliğe Dayalı İkincil Şebeke Yatırımı (Şebeke analizinden)	13	2	67	18
Gerilim Düşümü Tabanlı İkincil Şebeke Yatırımı (Şebeke analizinden)	0	2	0	12
İkincil/birincil oranı	0,9	1,1	0,8	0,8
Mevcut ikincil/birincil oran (Enerjisa DSO'ların ortalaması, saha kısıtlamaları dikkate alınarak mevcut şebeke topolojisine dayanmaktadır)	3,3	3,3	3,3	3,3
Saha kısıtlamaları/gereksinimleri dikkate alınarak beklenen ikincil şebeke genişletmesi (3,3 oranı uygulanarak)	88,7	99,5	186,9	49,5
Şebeke analizinden hesaplanan genişletmeye ek olarak ek ikincil şebeke genişletmesi	52,2	62,3	73,8	7,5
2035 Yılına Kadar Toplam Yatırım	103,5	125,9	177,3	34,5
2035 Yılı Toplam Hat Uzunluğu	314	433	865	497
2023'ten 2035'e Yıllık Ortalama Hat Yatırımı	9	10	15	3
Yıllık Ortalama Hat Yatırım Oranı	%3,3	%2,9	%2	%0,6

Şekil 44. Akköprü bölgesinde birincil ve ikincil şebeke



Referans şebeke modelinin 2023 yılı üzerine inşa edilmesi için gereken yatırım, Akköprü bölgesi için yıllık 37 milyon TL'lik yeni yatırıma karşılık gelmektedir (2023 yılı fiyatlarıyla). Yatırım maliyetinin detayları Tablo 10'da sunulmuştur. OG/AG trafoları ve OG hatlarının maliyeti BAŞKENT EDAŞ ve AYEDAŞ verilerine dayanarak hesaplanmıştır.

Tablo 10. 2035 referans şebekesinin oluşturulması için gerekli OG yatırım miktarı

Pilot Bölge		Akköprü	Kartal	Ümitköy	Şile	
OG/AG Trafosu (AG barası dahil)	2023 yılında mevcut	Kapasite (MVA)	544	438	995	128
	2035 yılına kadar yapılan yatırım	Kapasite (MVA)	561	410	939	71
		Maliyet (milyon TL, 2023)	285	209	550	63
	Her yıl için yatırım miktarı	Kapasite (MVA)	47	34	78	6
	Maliyet (milyon TL, 2023)	24	17	46	5	
OG Hatları	2023 yılında mevcut	Uzunluk(km)	210	307	688	462
	2035 yılına kadar yapılan yatırım	Uzunluk (km)	114	115	177	35
		Maliyet (milyon TL, 2023)	164	166	255	50
	Her yıl için yatırım miktarı	Uzunluk (km)	10	10	15	3
	Maliyet (milyon TL, 2023)	14	14	21	4	
2035 Yılına Kadar Toplam Yatırım (milyon TL, 2023)			449	375	805	113
Yıllık Gerekli Yatırım (milyon TL, 2023)			31	67	9	

4.5 Şarj istasyonlarının boyutlandırılması ve yerleşimi

Referans şebeke modeli 2035 yılı için oluşturulduktan sonra, Bölüm 4.3'ten hesaplanan EA ve HHA yükü, dağıtım sisteminin hizmet alanındaki şarj noktaları arasında dağıtılır. Şarj noktaları aşağıdaki gibi kategorize edilmiştir: İşyerinde Şarj (AC2W), Kamusal Alanlarda AC şarj (AC2 P), DC hızlı kamusal şarj (DC3 P) ve Evde Şarj (AC1 H ve AC2 H). Kamusal şarj öncelikle ticari ve kamusal uygulamalara hitap eder ve geleneksel benzin istasyonlarına benzer şekilde işlev görmeyi amaçlar⁵⁶. Mevcut durumda, birçok şarj noktası otoyolların yanına veya alışveriş merkezleri gibi ilgi çekici noktalara stratejik olarak yerleştirilmekte ve sürücülere iş, yemek veya alışveriş gibi faaliyetlerle uğraşırken araçlarını şarj etme kolaylığı sağlamaktadır⁵⁷. Bu nedenle, kamuya açık şarj noktalarının ana bulvarlardaki mevcut benzin istasyonlarında ve pilot bölgelerdeki alışveriş merkezlerinde yer alacağı varsayılmaktadır. İşyeri şarjı ile ilgili olarak, bir Teknopark'ta olduğu gibi, tüm EA'ların çalışma saatleri içinde şarj edilmesine olanak tanıyan uygun bir altyapının mevcut olduğu varsayılmaktadır. Kamuya açık şarj noktalarının kurulu kapasitesi ve her bir pilot bölgedeki soket sayısı sırasıyla ve Tablo 11 ve Tablo 12'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu dağılım, hesaplanan yükün farklı şarj kategorilerine kapsamlı bir şekilde tahsis edilmesini sağlayarak çalışmada dikkate alınan çeşitli şarj senaryolarını ve altyapı varsayımlarını yansıtmaktadır.

Tablo 11. Her bir pilot bölgede kamuya açık şarj noktalarının kurulu kapasitesi

Trafo Merkezi Adı	Elektrikli Araç Sayısı - 2035 Yılı (Bin)		Şarj noktalarının toplam kapasitesi (kW)											
	BAU	Net0	BAU						Net0					
			Evde şarj etme rutini			Kamusal alanda şarj etme rutini			Evde şarj etme rutini			Kamusal alanda şarj etme rutini		
			AC2 İş	AC2 Kamu	DC3 Hızlı Kamu	AC2 İş	AC2 Kamu	DC3 Hızlı Kamu	AC2 İş	AC2 Kamu	DC3 Hızlı Kamu	AC2 İş	AC2 Kamu	DC3 Hızlı Kamu
Akköprü	14,97	32,76	5.500	8.900	2.500	5.500	3.700	9.500	12.050	19.600	5.400	12.050	8.103	20.810
Ümitköy	14,97	32,76	5.500	8.914	4.758	5.500	3.722	9.508	11.983	19.549	5.500	11.983	8.103	20.810
Kartal	11,33	24,79	4.200	6.700	1.900	4.200	2.714	7.230	9.195	14.676	4.200	9.195	5.925	15.795
Şile	2,83	6,20	1.050	1.650	500	1.050	704	1.800	2.298	3.616	1.089	2.298	1.547	3.941

⁵⁶ Borges, J., Loakimidis, C., Ferrao, P., 2010. Fast charging stations for electric vehicles infrastructure. https://www.researchgate.net/publication/271435550_Fast_charging_stations_for_electric_vehicles_infrastructure

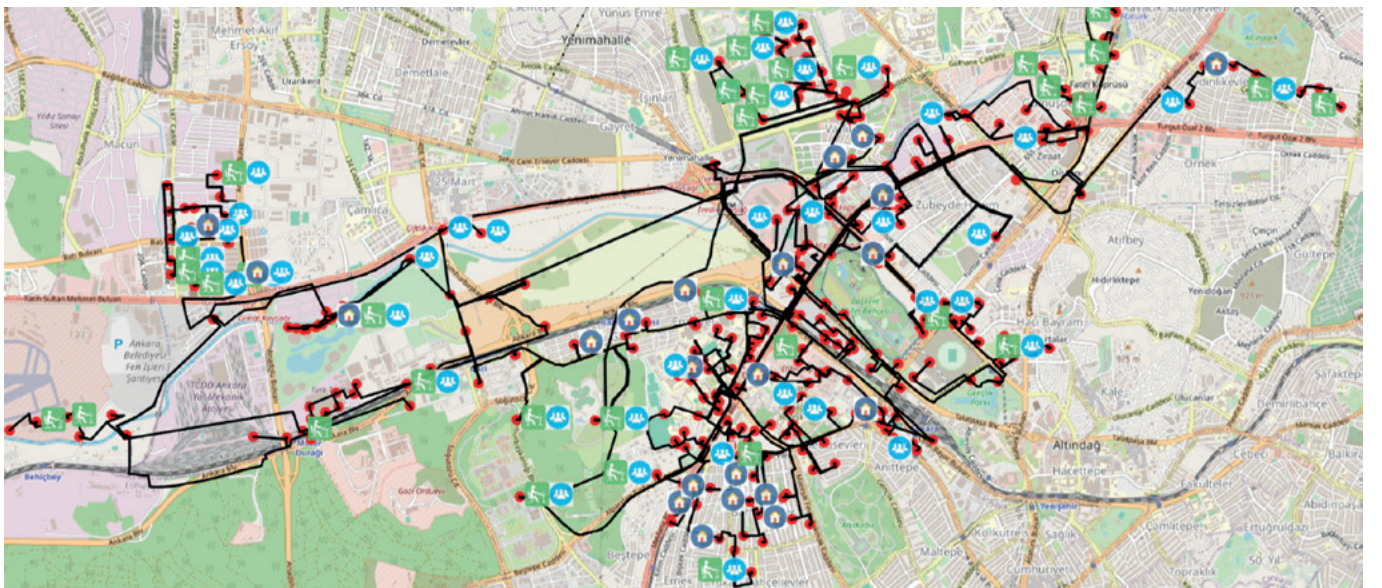
⁵⁷ <https://lisans.epdk.gov.tr/epvys-web/faces/pages/lisans/elektrikSarjAgilisletmecisi/sarjIstasyonuOzetSorgula.xhtml>

Tablo 12. Her bir pilot bölgedeki kamuya açık şarj noktalarının sayısı

Trafo Merkezi Adı	Elektrikli Araç Sayısı - 2035 Yılı (Bin)		Şarj edilecek soket sayısı											
	BAU	Net0	BAU						Net0					
			Evde şarj etme rutini			Kamusal alanda şarj etme rutini			Evde şarj etme rutini			Kamusal alanda şarj etme rutini		
			AC2 İş	AC2 Kamu	DC3 Hızlı Kamu	AC2 İş	AC2 Kamu	DC3 Hızlı Kamu	AC2 İş	AC2 Kamu	DC3 Hızlı Kamu	AC2 İş	AC2 Kamu	DC3 Hızlı Kamu
Akköprü	250	405	26	56	250	174	26	547	897	547	379	217	8103	20810
Ümitköy	250	407	44	47	250	163	44	557	894	557	370	192	8103	20810
Kartal	191	305	18	36	191	140	18	413	667	413	295	148	5925	15795
Şile	48	75	5	10	48	31	5	96	150	96	75	40	1547	3941

Mevcut veriler doğrultusunda yapılan ankete göre, kamuya açık şarj istasyonlarının yıllık kapasite faktörü %20 civarındadır. İşyerleri için, şarj işleminin gerçekleştirileceği haftalık 45 saatlik çalışma süresi göz önünde bulundurulduğunda, yıllık kapasite faktörü %26 civarındadır. Bu kapasite faktörleri, kamuya açık şarj istasyonlarının kurulu kapasitesini belirlemek için kullanılır. Evde şarj noktalarının, OG/AG trafolarının kurulu kapasitesine bağlı olarak esas olarak konut tüketicilerini besleyen trafolarla dağıtılacağı varsayılmıştır. Akköprü bölgesindeki şarj noktaları Şekil 45'te gösterilmektedir.

Şekil 45. Akköprü bölgesinde elektrikli araç şarj noktalarının mekânsal dağılımı



4.6 Duyarlılık analizi

Duyarlılık analizi, ana senaryolar olan BAU ve Net0 için varsayılanların dışındaki koşullarda EA'ların ve HHA'ların etkisini değerlendirmek için dikkate alınan senaryoların üzerinde gerçekleştirilmiştir. İncelenen durumlar Tablo 13'te sunulmaktadır. Tatiller nedeniyle aşırı şarj etme düzenlerini, optimize edilmiş şarjı (akıllı ve çift yönlü) ve otoyol şarjının eşzamanlı etkisini içerir.

Tablo 13. Bu çalışmada dikkate alınan duyarlılık analizleri

No	Kilit parametre	Ana Soru
Vaka 1	Tatil dönemlerinde aşırı şarj	Eşzamanlı ve yoğun şarjın şebekeye etkisi nedir?
Vaka 2	Akıllı Şarj Mekanizmaları	EA'ların esneklik pencerelerini en iyi şekilde kullanmak suretiyle EA şarjının akıllı şarj potansiyeli nedir?
Vaka 3	Araçtan şebekeye (V2G) Etkisi	Çift yönlü EA şarjının şebekeye etkisi nedir?
Vaka 4	Otoyolda şarj etme	Otoyollarda artan şarjın şebekeye etkisi nedir?

Vaka 1'de analiz, resmi bayramlar gibi belirli zamanlar öncesinde/süresince artan şarj faaliyetlerinin etkisini araştırmaktadır. Bireylerin, araçları halihazırda belirli bir şarj seviyesine sahip olsa bile şarj etme faaliyetinde buldukları senaryo dikkate alınmaktadır. Bu durum, bayramlarda uzun süreli seyahatlere veya araç kullanımına hazırlanırken şarj talebinin artması olasılığını öngörmektedir. Analizler, bu belirli olaylar sırasında şarj altyapısı ve şebekesi üzerindeki potansiyel yükü anlamayı ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu tür farklı şarj olaylarının anlaşılması şebeke yönetimi stratejileri ve altyapı planlamasına yönelik öngörüler sağlayacaktır.

Vaka 2'de, EA'ların ve HHA'ların yükünün şebeke içinde daha az yoğun saatlere yeniden dağıtılmasının etkileri araştırılmaktadır. Bu, şarj modellerinde esneklik sunan ve şebeke kaynaklarının daha dengeli ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan mekanizmalarla ilgili potansiyel faydaların ve zorlukların araştırılmasını içerir. Bu esneklik, çok zamanlı fiyatlandırmaların/ tarifelerinin uygulanması, dinamik fiyatlandırma mekanizmaları ve akıllı sözleşmeler gibi farklı mekanizmalarla elde edilebilir. Analiz, akıllı şarj yoluyla esneklik önlemlerinin etkisini değerlendirerek EA ve HHA yüklerinin dağılımını optimize etme, yoğun saatlerde şebeke kısıtlarını en aza indirme ve daha sürdürülebilir ve esnek bir elektrikli mobilite altyapısını teşvik etme konusunda içgörü sağlamayı amaçlamaktadır.

Vaka 3, özellikle AG dağıtım şebekesi seviyesindeki etkilere odaklanarak araçtan şebekeye (V2G) deşarjın etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Temel amaç, V2G entegrasyonunun dağıtım sistemindeki kısıtların azaltılmasında ve potansiyel olarak ek yatırım ihtiyacının ertelenmesinde nasıl

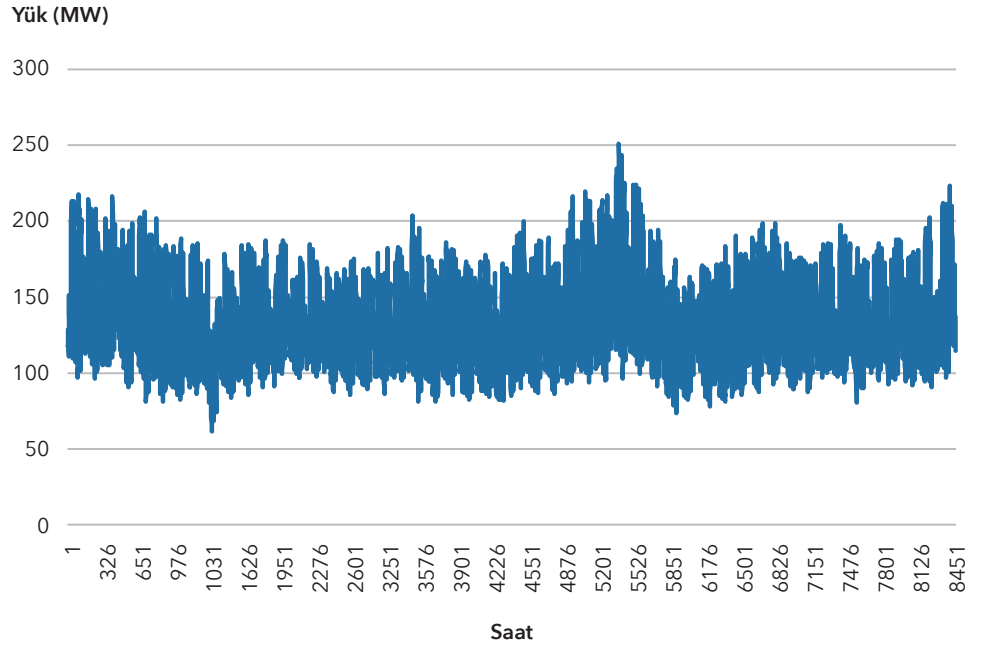
bir rol oynayabileceğini değerlendirmektedir. Araştırma, elektrikli araçlardan şebekeye çift yönlü enerji akışını analiz ederek, potansiyel faydaların kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Bu faydalar arasında şebeke performansının optimize edilmesi, kısıtların azaltılması ve altyapı yatırımlarının stratejik olarak ertelenmesi yer almaktadır. Analiz, dağıtım sistemindeki zorlukların ele alınmasında bir çözüm olarak V2G deşarjının stratejik olarak uygulanmasına ve sonuçta genel şebeke esnekliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik değerli içgörülere katkıda bulunmaktadır.

Vaka 4, şarj altyapısının genişletilmiş ve potansiyel olarak daha zayıf bir fider aracılığıyla sağlandığı otoyol istasyonlarında elektrikli araç şarjının etkilerini araştırmaktadır. İlave olarak simüle edilmiş Doğru Akım (DC) hızlı şarj senaryolarının etkileri de dikkate alınmaktadır. Araştırma, özellikle uzun ve potansiyel olarak daha az sağlam fiderlerle hizmet verilen otoyollar boyunca şarj faaliyetlerinin etkisini inceleyerek, dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerini anlamayı amaçlamaktadır. Bu, genişletilmiş fider uzunluklarıyla ilişkili potansiyel zorlukların ve hızlı DC hızlı şarj teknolojisinin etkisinin değerlendirilmesini içerir. Analizden elde edilen bulgular, otoyollar boyunca şarj altyapısının optimize edilmesine ve bu özel şarj senaryolarını barındırmak için dağıtım sisteminin esnekliğinin artırılmasına yönelik içgörüler sunacaktır.

4.7 Şebeke analizi ve temel performans endeksleri

Referans şebeke modelinin 2035 yılı için oluşturulması ve EA ve HHA filusunun entegre edilmesinin ardından, her bir pilot dağıtım bölgesi için ayrı ayrı kapsamlı bir şebeke analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, EA'ların ve HHA'ların pilot şebekeler üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Şebeke analizi, 2035 yılının tamamı için yarı dinamik bir yük akışı analizini kapsamakta olup, burada EA ve HHA yükleri 30 dakikalık bir çözünürlükle haftalık bazda modellenmektedir. Şekil 46, Akköprü'deki YG trafo merkezinden gözlemlenen yıllık aktif yükü saatlik çözünürlükte sunmaktadır. Simülasyon çalışmaları DigSilent PowerFactory yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve entegre EA'ların ve HHA'ların etkisi altında şebekenin davranışının ayrıntılı bir şekilde incelenmesine olanak sağlamıştır. Bu yaklaşım, araç filosu ile dağıtım şebekesi arasındaki dinamik etkileşimlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını kolaylaştırarak potansiyel zorlukların belirlenmesine ve etkili çözümlerin formüle edilmesine yardımcı olmaktadır.

Şekil 46. Akköprü YG trafo merkezinde görülen yıllık yük



Yürütülen analizler, EA'ların ve HHA'ların dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kapsamlı bir dizi temel performans ve etki endeksini içermektedir. Dikkate alınan endeksler aşağıdaki şekildedir:

- **OG ve AG hatlarda aşırı yükler (%):** Herhangi bir saatteki yükü %90 olarak belirlenen termal yükleme kapasitesine yaklaşan bir hat aşırı yüklenmiş sayılır. Bu endeks, dağıtım sisteminin EA'lar ve HHA'ların getirdiği ek yükü karşılama kabiliyetinin kritik bir ölçüsü olarak hizmet eder.
- **OG ve AG baralarındaki gerilim düşüşleri (%):** Herhangi bir saatte nominal gerilimin %10'unu aşan gerilim düşüşleri, düşük gerilim sorununun göstergesi olarak kabul edilir. Bu gerilim düşüşlerinin izlenmesi ve analiz edilmesi, dağıtım şebekesinin kararlılığını ve güvenilirliğini sağlamak için çok önemlidir.
- **OG fiderlerinin ve OG/AG transformatörlerinin kapasite faktörleri (%):** Yıllık bazda hesaplanan kapasite faktörleri, OG fiderlerinin ve OG/AG trafolarının kullanım seviyeleri hakkında fikir verir. Bu endeks, şebeke bileşenlerinin verimliliğini ve yük taşıma kapasitelerini anlamaya yardımcı olur.
- **Yatırım gereksinimleri (OG Hatları, AG hatları ve OG/AG transformatörleri):** Çalışma OG hatları, AG hatları ve OG/AG trafoları için yatırım ihtiyaçlarını değerlendirmektedir. Bu, EA'ların yarattığı artan talepleri karşılamak için gereken ek altyapının belirlenmesini içerir.

Aşırı yükler ve düşük voltaj olayları gibi operasyonel zorluklar, her iki senaryo için (BAU ve Net0) için incelenmiştir. Bu karşılaştırma, EA'ların ve HHA'ların şebekenin operasyonel bütünlüğü üzerindeki etkisinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Hesaplanan kapasite faktörleri, mevcut altyapının yeterliliğine ilişkin öngörüler sunarak gelecekteki yatırım kararlarına rehberlik eder. Bu kapsamlı yaklaşım, farklı senaryolar altında şebekenin performansının bütüncül bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak, EA ve HHA'ların şebekeye entegrasyonu için etkili stratejilerin formüle edilmesine yardımcı olur.

5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde pilot bölgeler üzerinde yapılan simülasyonların analiz sonuçları sunulmaktadır. Duyarlılık analizinin sonuçları ve bulgular tartışılmaktadır.

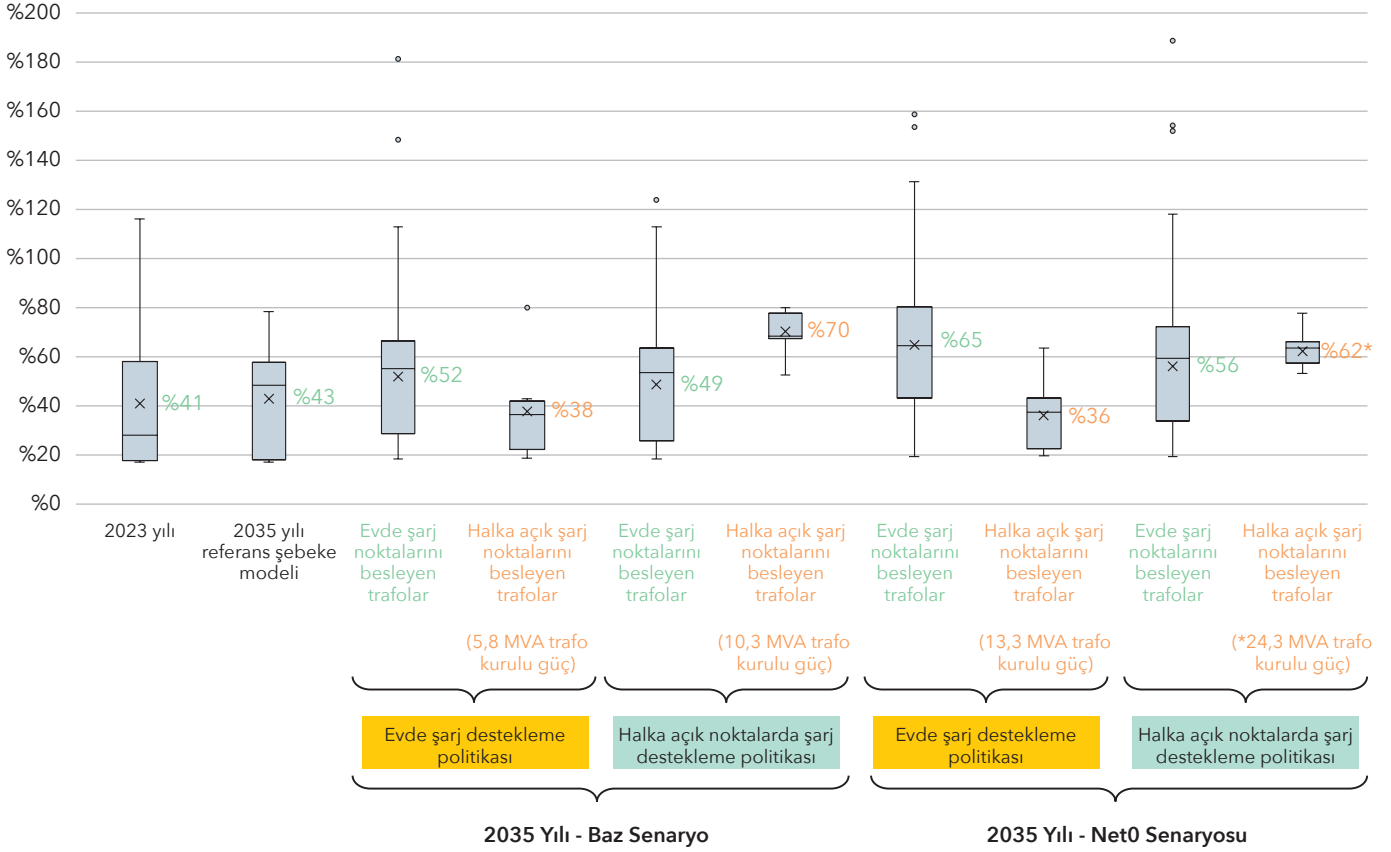
5.1 Dağıtım şebekeleri üzerindeki etki

Geliştirilen referans şebeke modeli (Bölüm 4.4'te) ve hesaplanan elektrikli araç (EA) ve hafif hizmet araçları (HHA) şarj profilleri (Bölüm 4.3'te) göz önünde bulundurularak, (Bölüm 4.7'de) tartışılan temel performans endeksleri dikkate alınarak şebeke analizleri yapılmıştır. Akköprü bölgesi için farklı elektrikli araç entegrasyon senaryoları altında orta gerilim/alçak gerilim (OG/AG) trafosunun yüklenme seviyesi Şekil 47'de gösterilmektedir. Burada, şebeke analizinin sonuçlarını etkili bir şekilde göstermek ve EA'ların ve HHA'ların etkisini vurgulamak için OG/AG trafoları iki ayrı gruba ayrılmıştır:

- **EA olmayan trafo:** Bu kategori, 2035 yılı referans şebeke modelinde yer alan ve şebekeye entegrasyonlarının ardından EA'lara ve HHA'lara hizmet vermeyecek olan OG/AG trafolarını kapsamaktadır.
- **Ev - EA trafo:** Bu trafolar, AC1 ve AC2 ev tiplerini kapsayacak şekilde yerleşim alanlarında ve evlerde bulunan şarj noktalarını beslemek üzere tasarlanmıştır.
- **Kamu - EA trafo:** Bu grup, işyerlerinde ve kamuya açık şarj istasyonlarında (AC2 ve DC3) bulunan şarj noktalarına güç sağlamak üzere tasarlanmış OG/AG transformatörlerini kapsar. Bu transformatörler genellikle EA'lar ve HHA'lar için kurulur.

Şekil 47. Akköprü bölgesindeki OG/AG trafosunun yüklenme seviyesi

Yüklenme seviyesi

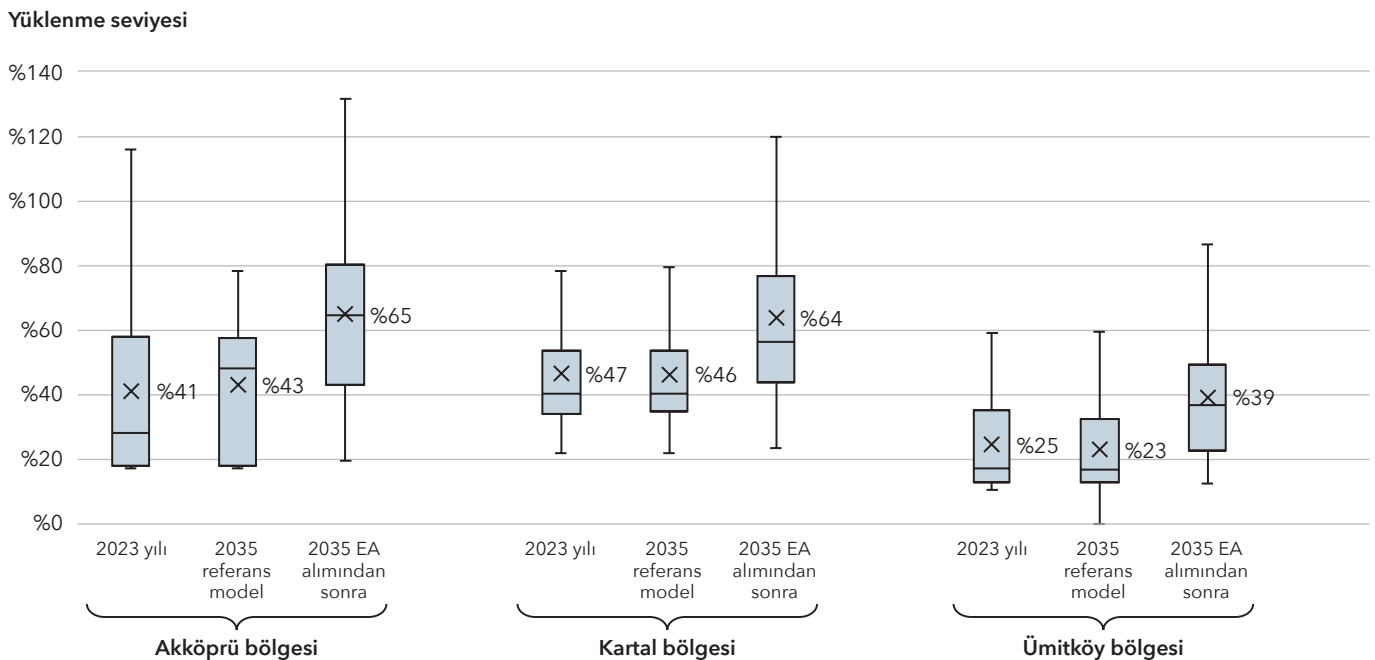


Şekil 48’de, 2023 yılında OG/AG trafolarının yıllık ortalama yükü yaklaşık %42’dir. Bu ortalama yükleme, 2035 yılındaki referans şebeke modeline bakıldığında, dağıtım sistemleri için standart işletme seviyesine ulaşmayı amaçlayan öngörülen yatırım seviyelerini yansıtabilecek şekilde 2023 yılındakine yakın kalmaktadır (bkz. Şekil 49). Özellikle, 2035 yılı referans şebeke modelinde, potansiyel Ev-EA trafolarının ortalama yükü, EA’ları barındırmadaki rolleri göz önüne alındığında büyük önem taşımaktadır. Şekil 49 daha detaylı incelendiğinde, elektrikli araçların olmadığı durumda (referans şebeke modeli) Ev-EA trafolarının yıllık ortalama yükünün %43’ten, baz (BAU) ve net sıfır (Net0) senaryolarının evde şarj rutinleri altında sırasıyla %52 ve %65’e kayda değer bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu rakamlar, Ev-EA trafolarının ortalama yüklenmesi için maksimum değerleri temsil etmektedir. Çünkü evde şarj rutini ağırlıklı olarak konutlarda şarj etmeye odaklanmaktadır. Buna karşılık, kamu alanlarında şarj rutinleri altında, Ev-EA trafolarının ortalama yükündeki artış, referans şebeke modeline kıyasla daha az belirgindir. Bu durum, bu senaryoda elektrikli araçların çoğunun kamuya açık yerlerde şarj edilmesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, kamuya açık elektrikli araç trafolarının ortalama yükü BAU Senaryosu için yaklaşık %70 ve Net0

Senaryosu için kamuya açık şarj rutinleri altında %62'dir. Ortalama yükleme yüzdesinin trafoların kurulu kapasitesine dayandığına dikkat etmek önemlidir. BAU Senaryosunda, kamu tabanlı şarj rutinleri kapsamında 10,3 MVA OG/AG trafo kurulmuştur. Ancak Net0 Senaryosu için bu sayı 24,3 MVA'ya çıkmaktadır. Bu nedenle, Net0 Senaryosunda yükleme seviyesi BAU'ya kıyasla daha düşük görünse de, şebekenin durumunu kapsamlı bir şekilde anlamak için kurulu kapasiteye göre yükleme yüzdesini dikkate almak çok önemlidir.

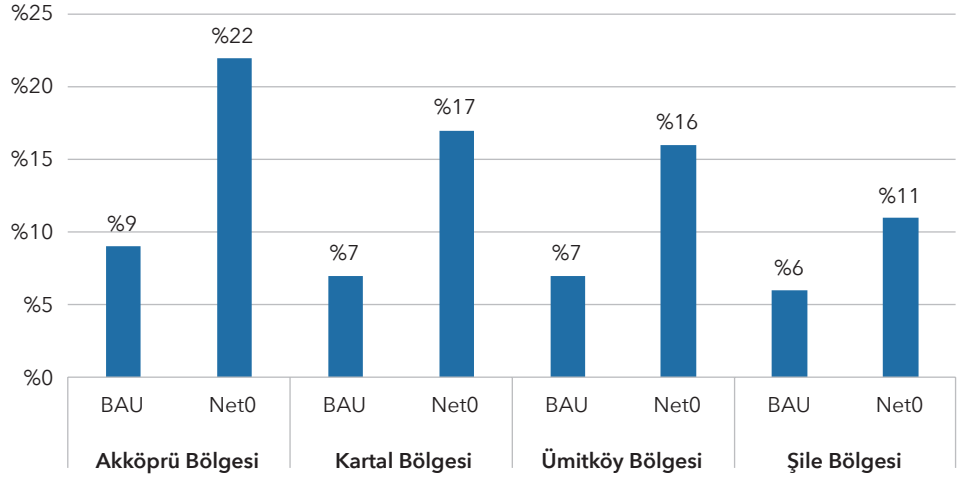
EA'ların pilot bölgelerdeki OG/AG trafolarının ortalama yüklenmesi ve aşırı yüklenmesi üzerindeki etkisi sırasıyla Şekil 48 ve Şekil 49'da sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, tüm bölgelerde elektrikli araç kullanımı trafoların ortalama yükünü BAU Senaryosunda ortalama %7, Net0 Senaryosunda ise %17 oranında artırmaktadır. Buna ek olarak, ya yatırım yoluyla ya da akıllı şarj gibi EA şarj yönetim mekanizmaları yoluyla hafifletilmesi gereken birkaç aşırı yükleme gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, evde ve kamusal alanda şarj rutinleri altındaki yükleme seviyesi artışı arasındaki fark Şekil 49'da gösterilmektedir. Görüleceği üzere, e-mobilite yüklerinin ev bazlı şarj rutini durumunda OG/AG trafolarının yıllık ortalama yükleme seviyesi üzerindeki etkisi, kamu bazlı şarj rutinine göre daha fazladır. Bunun temel nedeni, ev bazlı şarj rutini durumunda, e-mobilite yüklerinin, diğer yük türleri, yani konut yükleri tarafından da yüklenen mevcut OG/AG trafolarına entegre edilecek olmasıdır. Bununla birlikte, kamusal şarj rutini için çoğu durumda şarj istasyonları, kabul edilebilir bir yükleme seviyesi sağlayan kendi transformatörleri aracılığıyla dağıtım şebekesine bağlanacaktır.

Şekil 48. Elektrikli araç alımından sonra trafo yükleme seviyesi: Net0 Senaryosu, evde şarj rutini



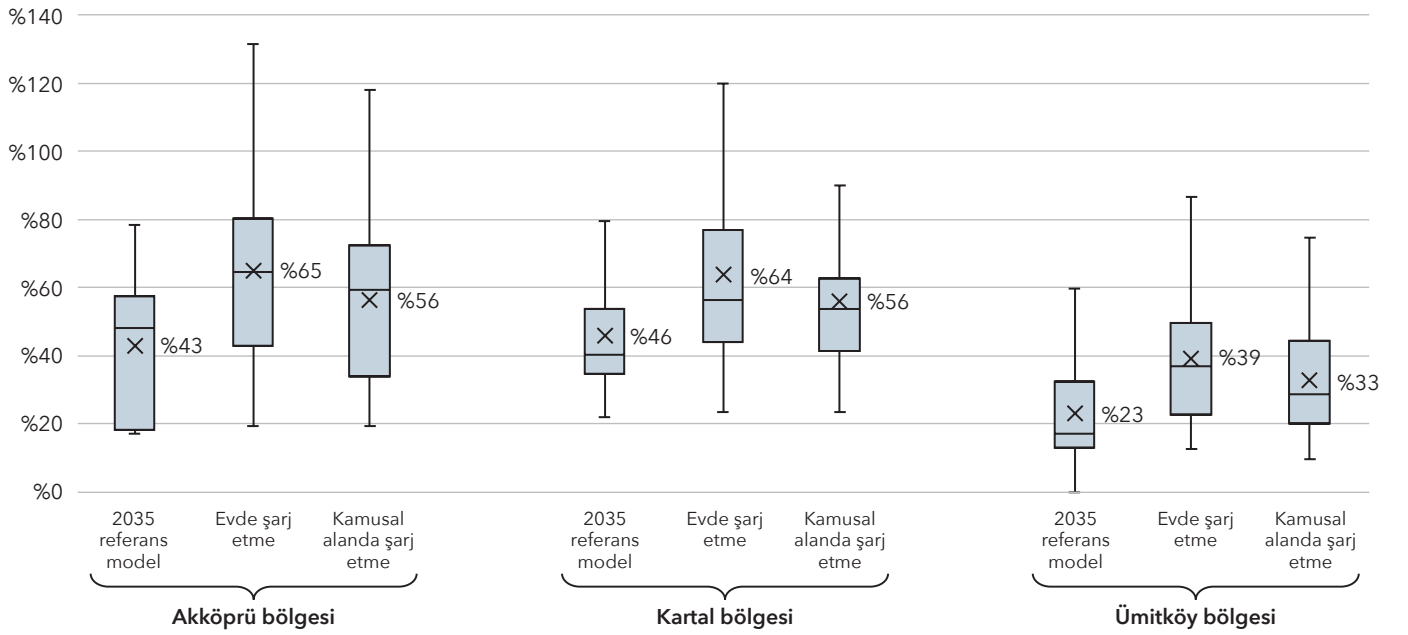
Şekil 49. Elektrikli araç alımından sonra trafo yükünde artış - Evde şarj rutini

Yüklenme seviyesi



Şekil 50. OG/AG trafolarının yüklenmesinin EA etkisi: Evde şarj ve kamusal alanda şarj

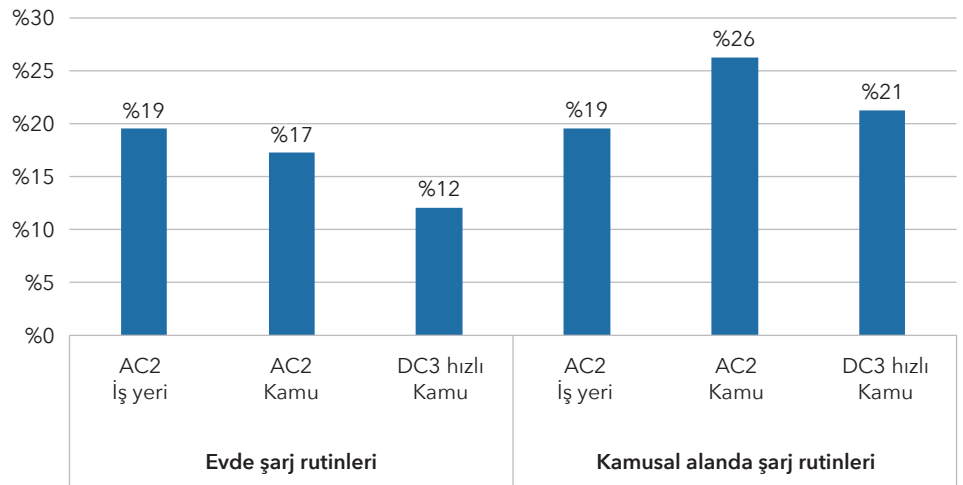
Yüklenme seviyesi



Net0 Senaryosu altında kamusal şarj altyapılarının yıllık ortalama kullanım faktörü Şekil 51’de gösterilmektedir. Şekil 51’de, işyerlerindeki şarj altyapılarının ortalama kullanım faktörü %19 civarındadır. Bunun nedeni, çalışma saatlerinin 8-9 saat, haftada 5 iş günü olarak düşünüldüğünde, işyeri şarj altyapısının bir yılda 2340 saatten fazla şarj hizmeti sunmamasıdır ki bu da bir yılın yaklaşık %26’sına denk gelmektedir. Tesadüf etkisi göz önünde bulundurulduğunda (Bölüm 4.3’te sunulan profillere dayanarak) kullanım faktörü %19’a düşmektedir. AC2 kamusal şarj noktası için, kullanım faktörü evde şarj rutini altında %17’den kamusal alanda şarj rutini %26’ya kadar değişmektedir. DC3 hızlı şarj noktaları için, kullanım faktörü evde ve kamusal şarj rutinleri için sırasıyla %12 ve %21’dir. AC2 kamusal şarj altyapısının şarj süresi DC3 hızlı şarj altyapısından daha uzun olduğundan, ilgili kullanım faktörünün de DC3 hızlı şarj istasyonlarından daha yüksek olduğu unutulmamalıdır.

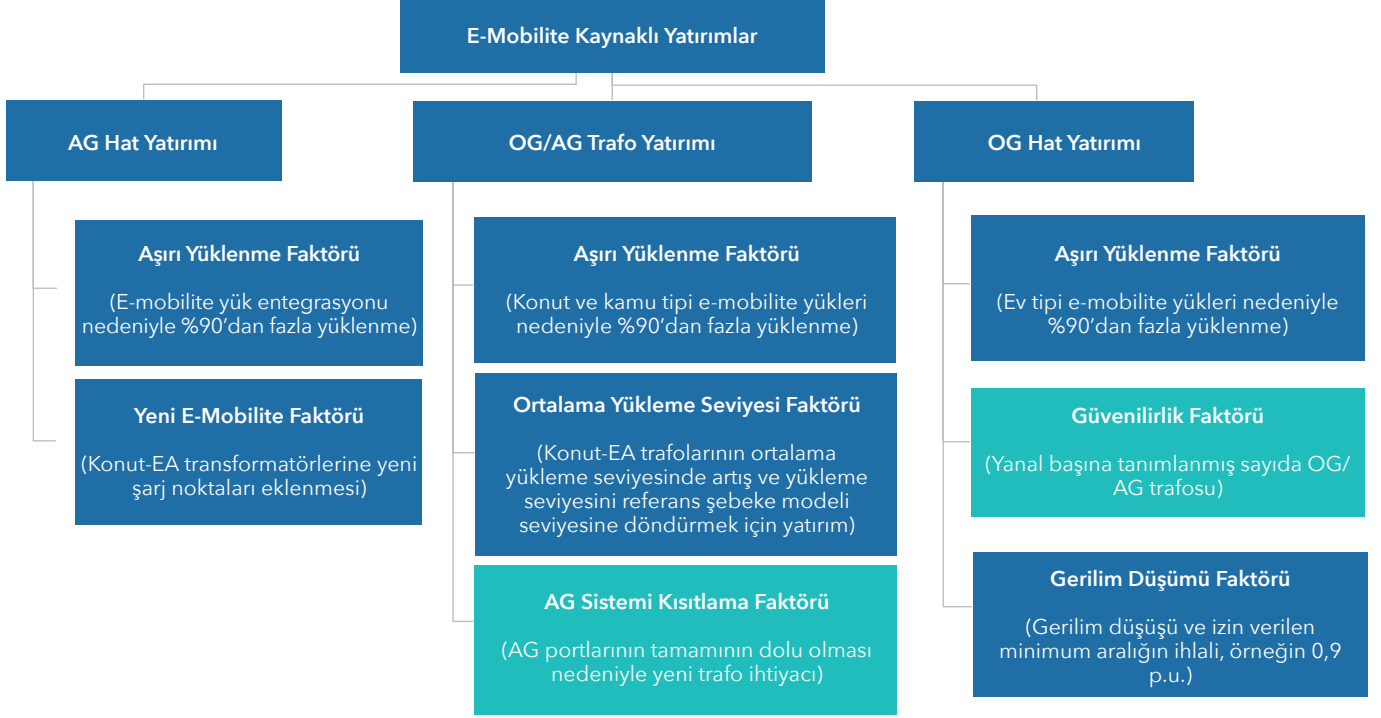
Şekil 51. Kamusal şarj altyapılarının yıllık ortalama kullanım faktörü

Yıllık ortalama kullanım faktörü



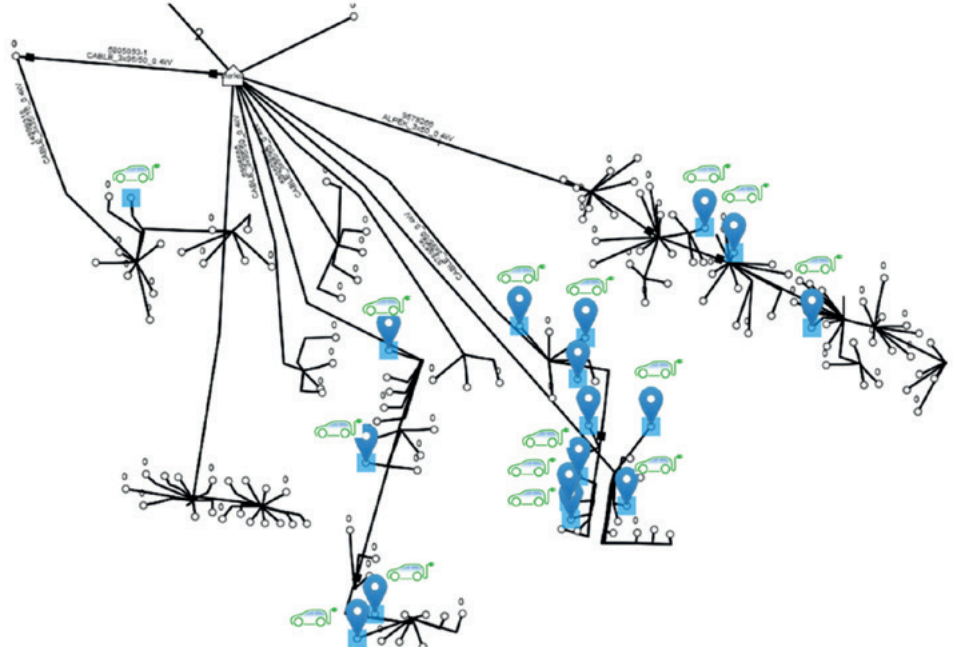
EA’ların ve HHA’ların dağıtım sistemi üzerindeki etkisiyle başa çıkmak için gerekli yatırımlar çeşitli açılardan değerlendirilmelidir. E-mobilite kaynaklı yatırım gereksinimleri Şekil 52’de gösterilmektedir.

Şekil 52. E-mobilitenin yatırım gereksinimi unsurları

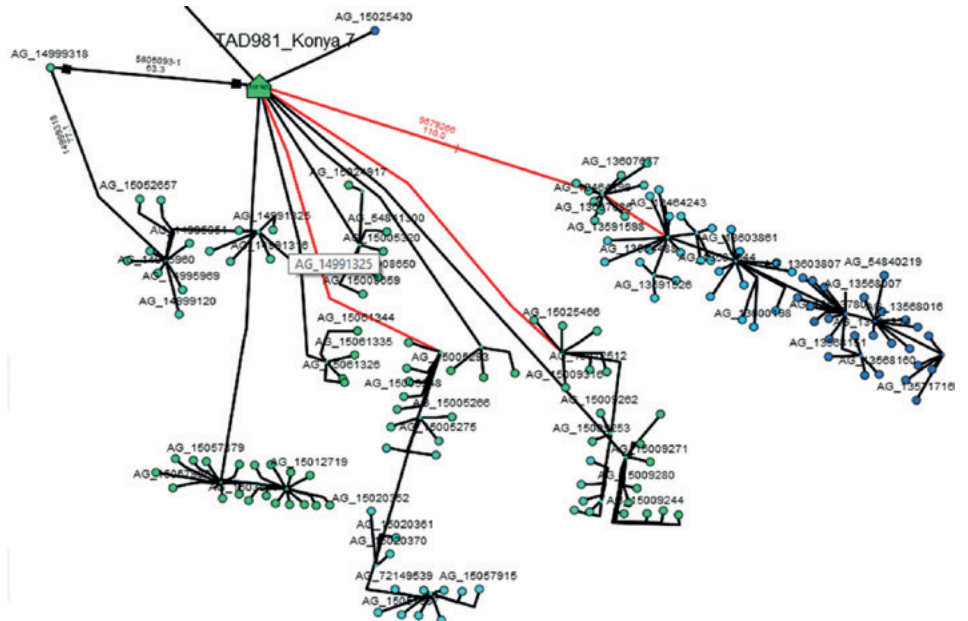


Şekil 52'den de görülebileceği üzere, e-mobilitenin yatırım boyutu üç ana kategoriye ayrılmaktadır. EA artışının etkilediği en alt nokta olan AG sisteminden başlayarak, e-mobilite yük entegrasyonunun dağıtım sistemlerine etkisini araştırmak için aşağıdan yukarıya bir yaklaşımın önü açılmıştır. Şekil 53'te 1.000 kVA OG/AG trafosundan görülen tipik bir AG şebekesi gösterilmekte ve burada EA yükleri de vurgulanmaktadır. Elektrikli araç yükleri şarj edilirken, bazı hatlar aşırı yüklenmeye (Şekil 54'te gösterilen ilgili kapasitenin %90'ından fazla yüklenme) maruz kalabilir.

Şekil 53. Tipik bir AG şebekesinin 1.000 kVA OG/AG trafosundan görünümü



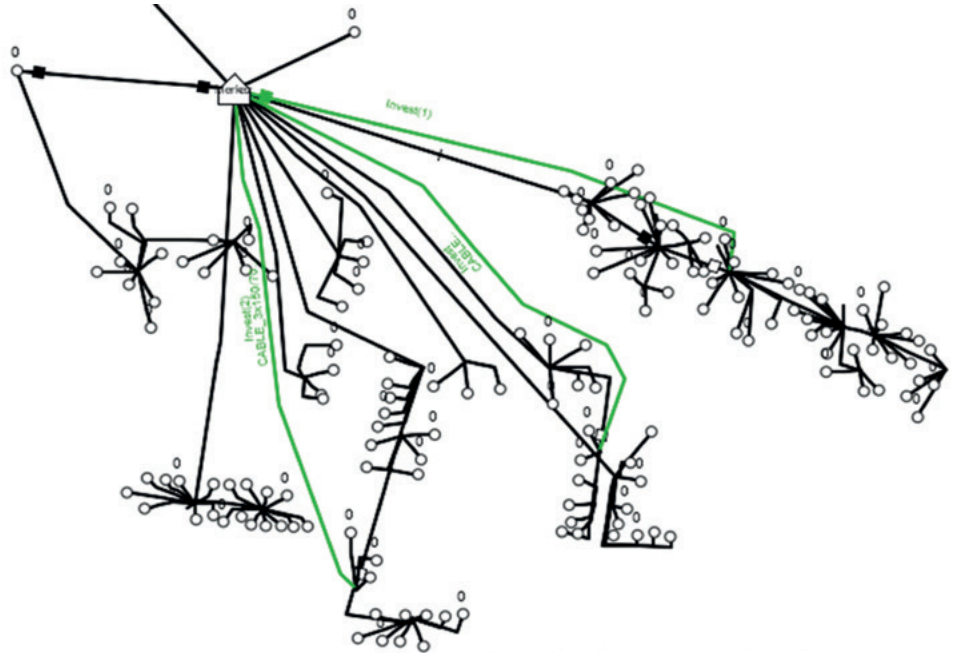
Şekil 54. E-mobilite yük entegrasyonu nedeniyle AG şebekesinin aşırı yüklenmesi



Burada yatırım odaklı çözüm, OG/AG trafosunun AG panosundan daha fazla AG fiderinin eklenmesidir. Dolayısıyla, OG/AG trafosunun AG panosunda port bulunması durumunda, e-mobilite kaynaklı AG hattı yatırımları gerçekleştirilebilir. Örneğin, Şekil 55'te e-mobilite yük etkisini telafi etmek için üç yeni AG fideri eklenmiştir. Ancak, OG/AG trafosunun AG panosunda AG

portunun kullanılmaması durumunda, AG hatlarından OG/AG trafolarına ve OG hatlarına doğru kademeli bir yatırım yapılması gerekecektir ki bu husus bir sonraki bölümde ele alınacaktır.

Şekil 55. E-mobilite yükü kaynaklı AG şebeke yatırımı (yeşil çizgiler yatırım yapılan AG fiderleridir)



İkinci kategori, OG/AG transformatörlerine ilişkin yatırım gereksinimleridir. EA'ların dağıtım şebekesi üzerindeki etkisini azaltmaya yönelik bu yatırım türü, aşağıda tartışılacak olan üç faktör dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Daha sonra, bu faktörlerin dağılımında OG/AG transformatörleri yatırım gereksiniminin özeti sunulacaktır.

- **Aşırı yükleme faktörü:** OG/AG trafolarının aşırı yüklenmesi, EA ve HHA'ların entegrasyonundan sonra hem Ev-AG hem de Kamu-AG trafolarında gözlemlenebilir. Aşırı yüklenen trafolar için, EA'lar ve HHA'ların artışına paralel yükleme seviyesini azaltmak için yatırımlar yapılmalıdır. Burada, trafonun yükseltilmesinin mümkün olması durumunda aşırı yüklü trafo yükseltilir (örneğin 1,2 MVA trafonun 1,6 MVA trafo ile değiştirilmesi). Yükseltmenin mümkün olmadığı durumlarda ise paralel bir aktarım düşünülür.
- **Ortalama yükleme seviyesi faktörü:** Yaygın dağıtım sistemi işletme uygulamaları doğrultusunda, dağıtım sistemi operatörleri (DSO'lar) genellikle sistem güvenilirliğini sağlamak için trafo yükünü belirli eşikler dahilinde tutmayı hedefler. Örneğin, Şekil 47'de gösterildiği gibi Akköprü bölgesindeki OG/AG trafolarının ortalama yükleme seviyesini ele alalım.

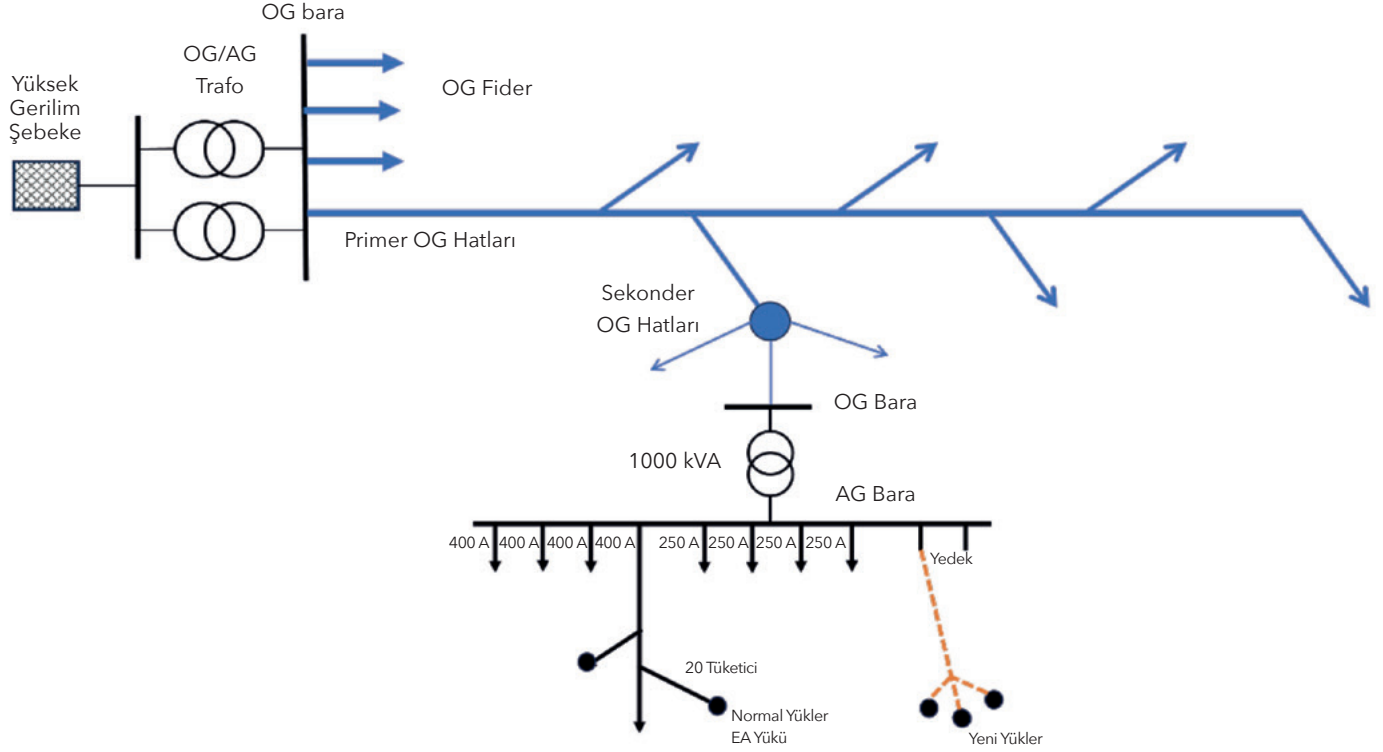
EA'ların entegrasyonundan önce, bu ortalama yüklemeye yaklaşık %42'dir. Bununla birlikte, kalan %58'in ek yük için mevcut kapasite olarak yanlış anlaşılması gerektiğini anlamak çok önemlidir. Bu %42'lik yüklemeye seviyesi, sistemin normal koşullar altında güvenilir bir şekilde çalışmasını ve olası arızalara dayanmasını sağlayan yük çakışması ve güvenilirlik kriterleri gibi faktörlere göre belirlenir. Ortalama yüklemeye seviyesinin bu eşğin üzerine çıkması, 'Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI)' ve 'System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)' gibi sistem güvenilirliği ölçütleri üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Bir arıza durumunda, daha fazla sayıda müşteri etkilenecektir. Bu riskleri azaltmak ve sistem güvenilirliğini korumak için OG/AG trafolarının yüklenme seviyesini EA alımı öncesi koşullara geri getirmek üzere yatırım yapılması gerekmektedir. Bu durum, dağıtım şebekelerinin güvenilirliğini korurken elektrikli mobilitenin artan taleplerini karşılamak için proaktif planlama ve altyapı iyileştirmelerinin önemini vurgulamaktadır.

- **AG sistem kısıtları faktörü:** Şekil 56, hem OG hem de AG şebekelerini içeren bir dağıtım sisteminin tipik bir düzenini sunmaktadır. Bu şemada, OG/AG transformatörünün çıkış ucunda belirli sayıda AG bağlantı noktası belirlenmiştir. Bu AG bağlantı noktaları, elektriğin son kullanıcılara dağıtılması için bağlantı noktaları olarak hizmet vermektedir. Tablo 14, Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi tarafından tanımlanan AG panolarına ilişkin yönergeleri özetlemektedir.⁵⁸ Örneğin, Şekil 56'da gösterildiği gibi 1.000 kVA'lık bir OG/AG transformatörü düşünüldüğünde, 10 AG portu belirlenmiştir. Bu bağlantı noktalarından ikisi tipik olarak OG/AG trafosunun kurulumundan sonra beklenen gelecek yükleri karşılamak için ayrılmıştır. Ancak, bu çalışma için seçilen pilot bölgeler gibi yoğun nüfuslu metropollerde, bu ayrılmış bağlantı noktaları bile hızlı yük artışı nedeniyle zaten dolu olabilir. Sonuç olarak, e-mobilite şarj tesislerine olan talep artarsa - örneğin, evde elektrikli araç şarjından kaynaklanan aşırı yüklenmiş AG fiderleri veya yüksek katlı konutlarda EA otoparklarının kurulması nedeniyle - tüm portlar zaten kullanıldığından yeni AG fiderleri eklemek zor olabilir. Bu koşullar altında, uygulanabilir tek çözüm, bölgedeki e-mobilite yükleri için ek AG bağlantı noktaları sağlamak üzere yeni bir OG/AG trafosunun eklenmesi olabilir. Bu durum önemli bir noktayı vurgulamaktadır: ilgili OG/AG trafosunun yüklemeye seviyesi izin verilen sınırlar içinde kalsa bile, AG bağlantı noktalarının doygunluğu ilave OG/AG trafolarına yatırım yapılmasını gerektirebilir. Ayrıca, yeni OG/AG trafo kurulumunun ardından, aşağıda tartışılacak olan OG hatlarına daha fazla yatırım yapılması gerekebilir.

⁵⁸ TEDAŞ, 2015. ALÇAK GERİLİM DAĞITIM PANOLARI TEKNİK ŞARTNAMESİ.

<https://www.tedas.gov.tr/FileUpload/MediaFolder/cc6ffb86-7888-4606-a962-c706c7ef6722.pdf>

Şekil 56. OG ve AG sistemlerinin tipik gösterimi ve aralarındaki etkileşim

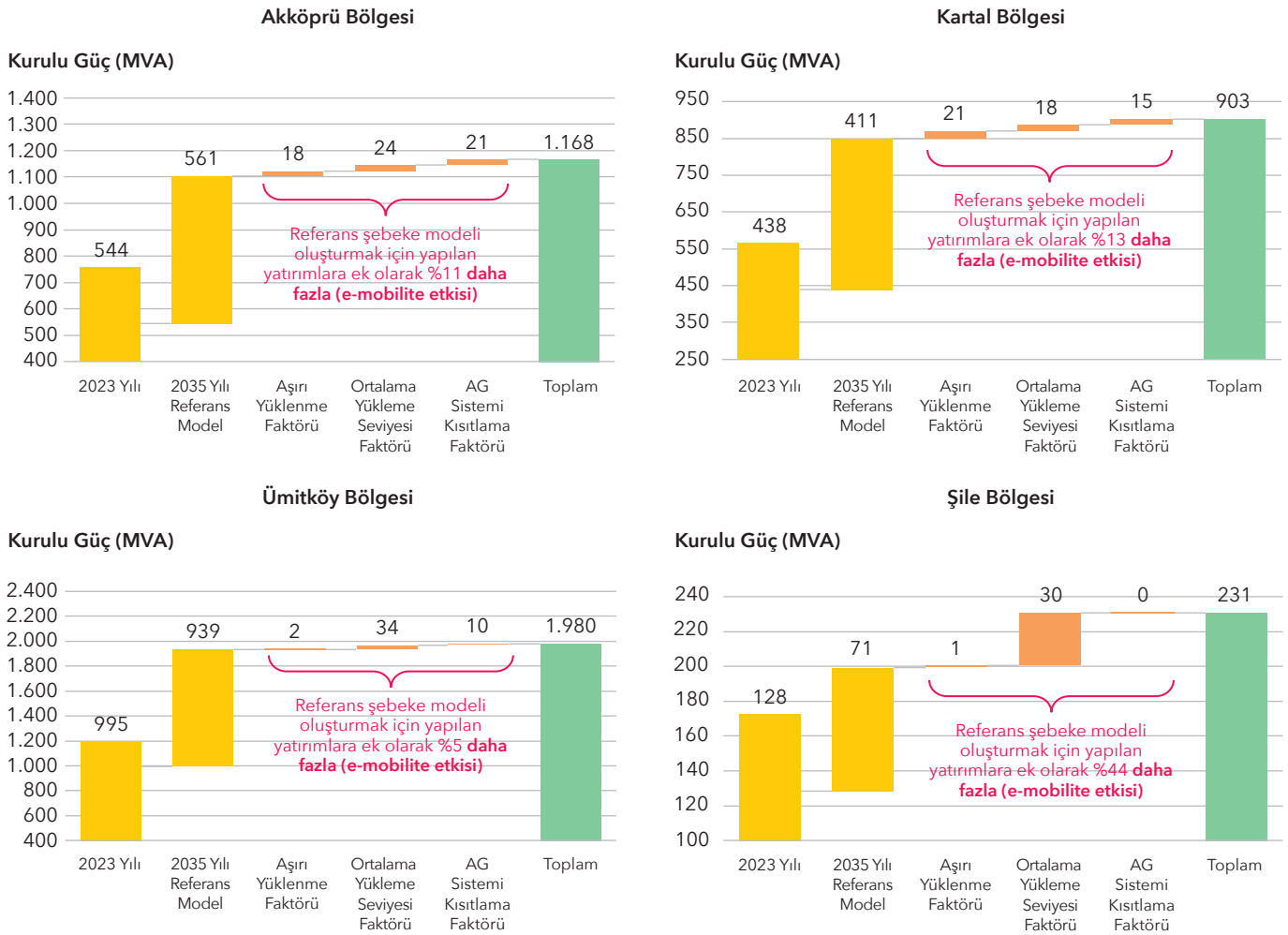


Tablo 14. Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi tarafından tanımlanan AG pano ekipman kılavuzu

AG Pano Ekipman Kılavuzu														
		400 kVA		630 kVA		800 kVA		1.000 kVA		1.250 kVA		1.600 kVA		
Ana giriş	Ana bara ve kesiti (Kalay kaplı elekttronik bakır)	40x10 mm ²		60x10 mm ²		80x10 mm ²		100x10 mm ²		120x10 mm ²		2x(100x10mm ²)		
	Ana baraya bağlantı	Aksi belirtilmedikçe direkt bağlantı												
	Akım trafosu	600/5		1.000/5		1.200/5		1.600/5		2.000/5		2.500/5		
Besleme çıkışları	DSYA	Anma akımı	160A	250 A	160A	250A	160A	250A	250A	400A	250A	400A	250A	400A
		Buşon tipi	00 Boy	1 Boy	00 Boy	1 Boy	00 Boy	1 Boy	1 Boy	2 Boy	1 Boy	2 Boy	1 Boy	2 Boy
		DSYA tipi	Ana bara terminalleri arası mesafe 185mm olacaktır											
		Besleme çıkış sayısı	2	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5
Sokak aydınlatma girişi	DSYA	Anma akımı	160A		160A		160A		160A		160A		160A	
		Buşon tipi	00 Boy		00 Boy		00 Boy		00 Boy		00 Boy		00 Boy	
		Kontaktör	(AC-5a)											
Sokak aydınlatma çıkışı		Anma akımı						Alıcı tarafından sipariş formunda belirtilecektir. ≤4						
T.M. iç ihtiyaç devresi	Eriyen telli sigorta (D tipi), Kartuş sigorta	İşletme sınıfı: gG, Anma akımı: > 20 Amp.												
İç ihtiyaç devresi		İşletme sınıfı: gG, Anma akımı: > 6 Amp.												
Ölçü devresi		İşletme sınıfı: gG, Anma akımı: > 2 Amp.												

OG/AG trafolarına ilişkin yukarıda tartışılan yatırım kriterleri dikkate alındığında, e-mobilite kaynaklı OG/AG trafo yatırım gereksinimi, evde şarj rutini ve Net0 Senaryosu için Şekil 57’de gösterilmektedir. Görülebileceği üzere, EA’ların OG/AG trafoları üzerindeki etkisini azaltmak için büyükşehirlerde referans şebeke modeli oluşturmak için yapılan yatırımlara ek olarak ortalama %10 daha fazla yatırım yapılması gerekmektedir. Başka bir deyişle, zaten yatırım yapılması gereken değere ek olarak %10 daha fazla OG/AG trafo yatırımı, e-mobilite yükünün OG/AG trafo yatırım gereksinimleri üzerindeki etkisidir.

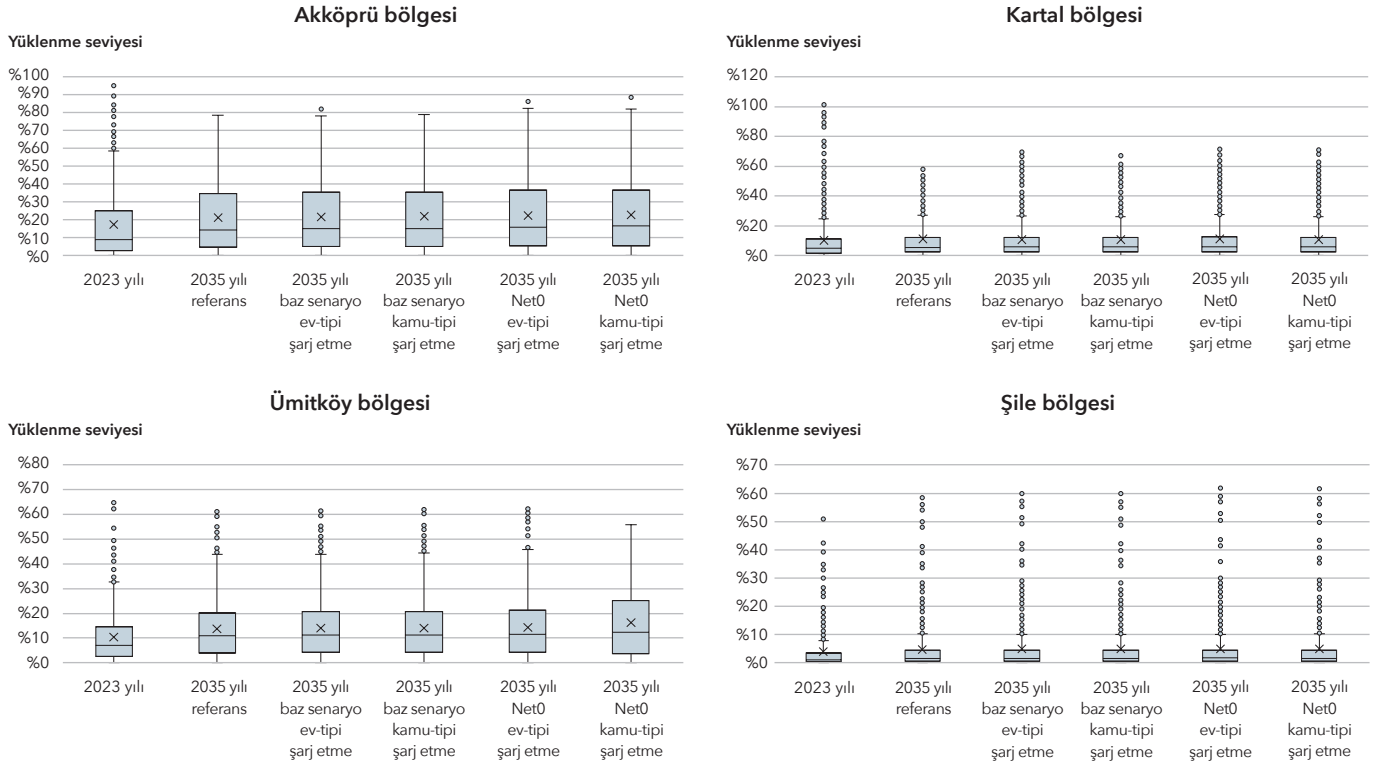
Şekil 57. E-mobilite kaynaklı OG/AG trafo yatırım gereksinimi



E-mobilite kaynaklı OG hatları yatırım gereksinimi için aşırı yüklenme, güvenilirlik ve gerilim düşümü faktörleri dikkate alınmalıdır (bkz. Şekil 52)

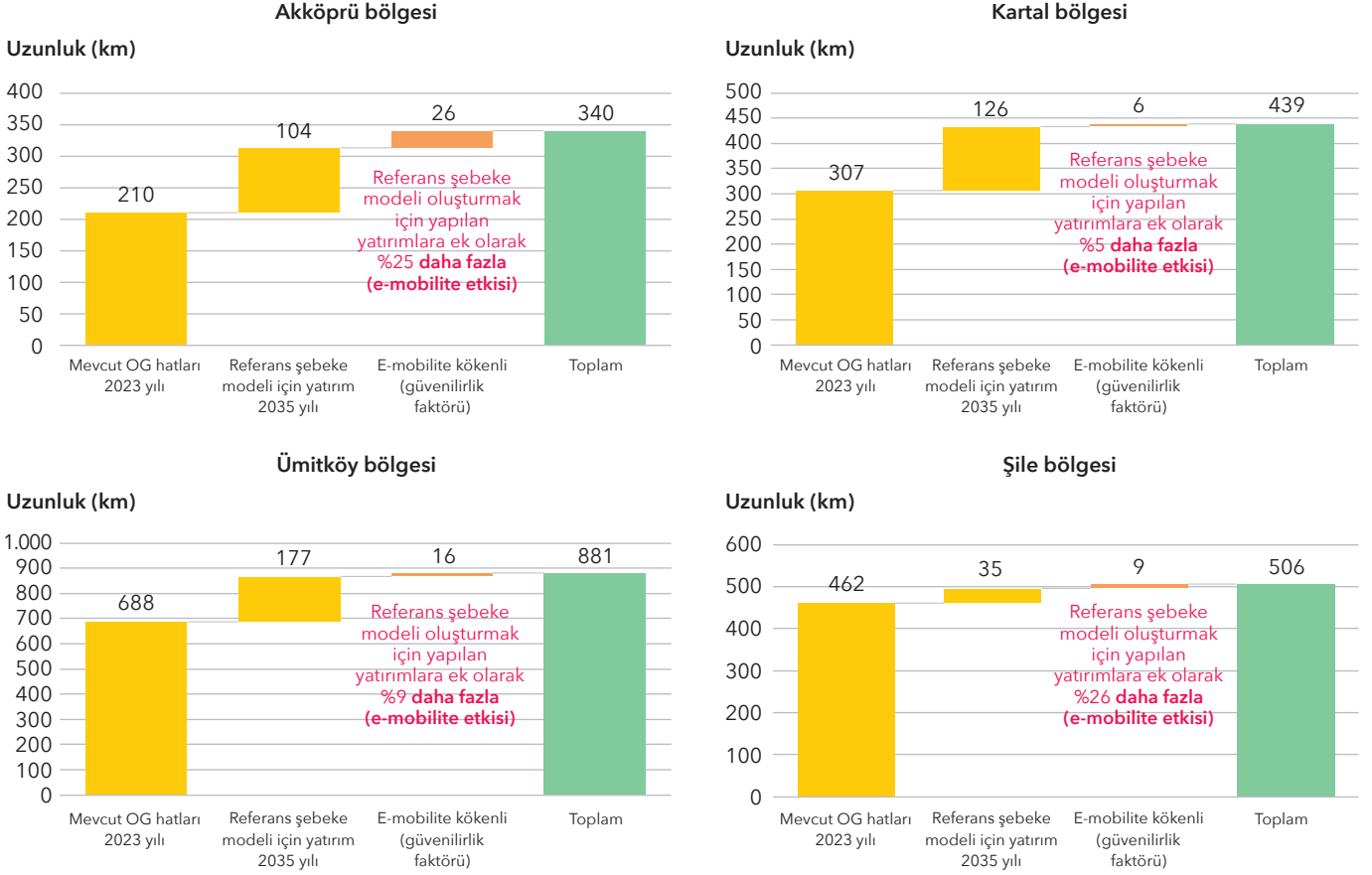
- **Yükleme faktörü:** Aşırı yüklenme faktörü, e-mobilite yüklerinin entegrasyonunu takiben ilgili yüklenme seviyelerinin %90'ı aştığı hem birincil hem de ikincil şebekelerdeki OG hatlarını değerlendirir. Bu tür aşırı yüklenme senaryoları hem kamu hem de ev tipi e-mobilite yüklerinden kaynaklanabilir. Ancak, bu faktör OG hatları üzerindeki potansiyel gerilimi gösterse de, mevcut OG hatlarında yüklenme perspektifinden bakıldığında hala yeterli kapasite bulunabileceğinden, OG hattı yatırımı için birincil itici güç olmayabilir. Çeşitli e-mobilite şarj senaryoları ve rutinleri altında OG hatlarının yüklenme profilleri Şekil 58'de gösterilmektedir. Burada, OG hatlarının yüklenmesinin e-mobilite yük entegrasyonu sonrasında küçük dalgalanmalar yaşadığı görülmektedir. Ancak, yalnızca yüklenme seviyelerine güvenmek, mevcut OG hatlarının e-mobilite yüklerini yeterince karşılayabildiğini gösterebileceğinden yanıltıcı olabilir. Bununla birlikte, OG hattı yatırımı için kilit husus, OG hatlarının mevcut kapasitesi yeterli görünse bile OG hattı yükseltmelerini gerektirebilecek güvenilirlik faktöründe yatmaktadır. Bu önemli husus aşağıda ayrıntılı olarak incelenecektir.

Şekil 58. Çeşitli e-mobilite şarj senaryoları ve rutinleri altında OG hatlarının yüklenme profilleri



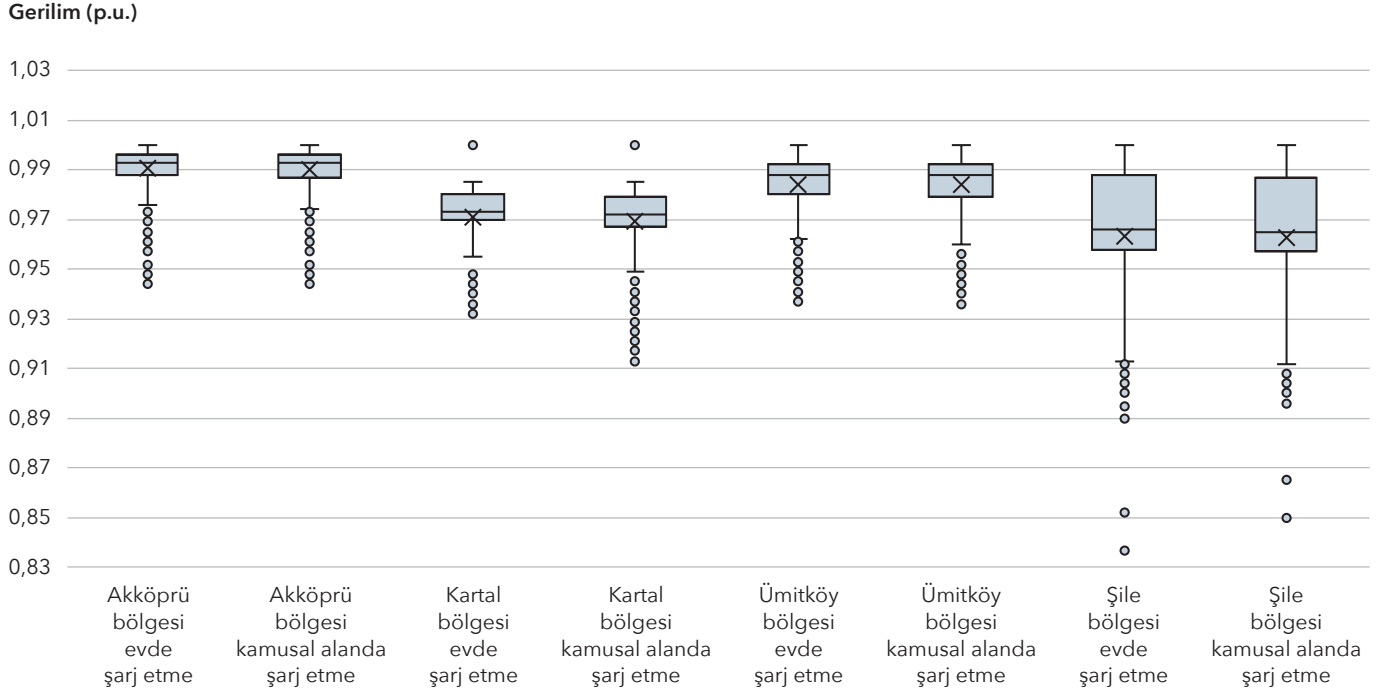
- **Güvenilirlik faktörü:** OG hatlarının güvenilirlik faktörü, bir arıza meydana geldiğinde etkilenebilecek müşteri sayısı ile ilgilidir. DSO'lar tipik olarak bir OG lateralindeki müşteri ve besleme noktası sayısına bağlı olarak güvenilirlik kısıtlarını dikkate alır. 'Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI)', 'Customer Average Interruption Frequency Index (CAIFI)' ve 'Expected Energy Not Supplied (EENS)' gibi endeksleri hesaplayan detaylı güvenilirlik analizleri DSO'lar tarafından yaygın olarak yapılsa da, genellikle bir genel kural uygulanır. DSO'lar genellikle bir lateral üzerindeki 16 adet 1,6 MVA OG/AG trafosunu (toplamda yaklaşık 25 MVA kapasite) güvenilirlik kısıtlarını korumak için üst sınır olarak kabul etmektedir. OG/AG trafo yatırımı bölümünde tartışıldığı üzere, e-mobilite yükü yaklaşık %10 daha fazla OG/AG trafo yatırımına neden olabilir. Bu durum, bir lateral üzerindeki OG/AG trafo sayısı artacağından güvenilirlik faktörünü ihlal edebilir. Bu nedenle, e-mobilite kaynaklı OG/AG trafo yatırımından sonra, güvenilirlik faktörünü karşılamak için ikincil şebekede (ve ihtiyaç duyulması halinde birincil şebekede) gerekli OG hattı yatırımları yapılmalıdır. Güvenilirlik faktörüne bağlı olarak e-mobilite kaynaklı OG hattı yatırımı Şekil 59'da gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, e-mobilite yüklerinden kaynaklanan güvenilirlik endişelerini hafifletmek için referans şebeke modelini oluşturmak için gerekenlere (yük artışı ve şebeke genişlemesinden kaynaklanan yatırımlar) ek olarak %16 daha fazla OG hattı yatırımı gerekmektedir. Başka bir deyişle, zaten yatırım yapılması gereken değerlerin üzerine %16 daha fazla OG hattı yatırımı, e-mobilite yükünün OG hatları yatırım gereksinimleri üzerindeki etkisidir.

Şekil 59. Güvenilirlik faktörü gereği e-mobilite kaynaklı OG hattı yatırımı



- Gerilim düşümü faktörü:** E-mobilite yükü de dahil olmak üzere herhangi bir yeni yük entegrasyonu, dağıtım sistemlerinde gerilim düşüşüne neden olabilir ve e-mobilite yükü alımından sonra sistem gerilim profili kontrol edilmelidir. Gerilim düşüşünün izin verilen minimum gerilim büyüklüğü seviyesi olan 0,9 p.u.'yu ihlal etmesi durumunda, OG hat yatırımları yapılmalıdır. Pilot bölgelerin Net0 Senaryosu altında elektrikli araç alımından sonraki gerilim profili Şekil 60'da gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, metropol pilot bölgelerinde gerilim profili, BAU Senaryosundan daha fazla sayıda elektrikli aracın entegre edildiği Net0 Senaryosu için bile hala izin verilen aralıktadır. Bununla birlikte, kırsal bölgede, yani Şile bölgesinde, elektrikli araç yükselişinden sonra voltaj düşüşünü telafi etmek için 5 km daha fazla OG gereklidir.

Şekil 60. Net0 Senaryosunda EA alımından sonra pilot bölgelerin voltaj profilleri



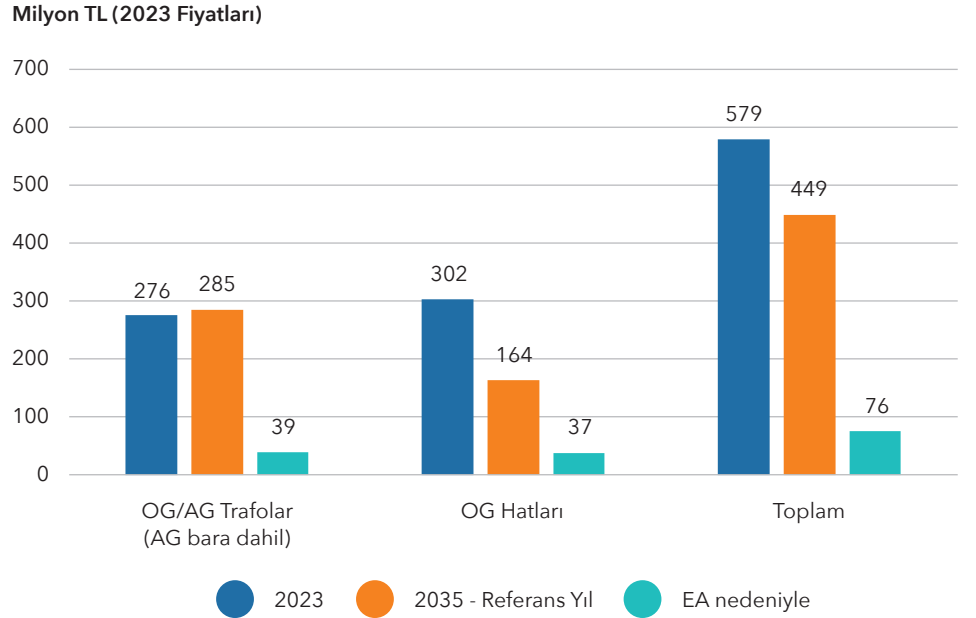
EA yükselişinden sonra OG hatlarında yapılması gereken yatırımların özeti Tablo 15'te raporlanmıştır. Görüldüğü üzere, metropol alanda, e-mobilite yüklerinin etkisini nötrlemek için 2035 şebeke referans modelinde yapılması gereken yatırımın üzerine ortalama %12 ilave OG hattı yapılması gerekmektedir. Başka bir deyişle, %12'lik etkiyi sindirmek için normal yatırımların üzerine %12 daha fazla yatırım yapılmalıdır.

Tablo 15. EA yükselişinden sonra OG hatlarında gerekli yatırımların özeti

Pilot Bölgesi		Akköprü	Kartal	Ümitköy	Şile	
OG/AG Trafosu (AG bara dahil)	Mevcut, 2023 Yılı	Kapasite (MVA)	544	438	995	128
	2035 Yılına Kadar Yapılan Yatırımlar (EA hariç)	Kapasite (MVA)	561	410	939	71
		Maliyet (milyon TL, 2023)	285	209	550	63
	Elektrikli Araç Alımından Dolayı Ek Yatırım	Kapasite (MVA)	63	54	46	31
Maliyet (milyon TL, 2023)		39	34	29	14	
OG Hatlar	Mevcut, 2023 Yılı	Uzunluk (km)	210	307	688	462
	2035 Yılına Kadar Yapılan Yatırımlar (EA hariç)	Uzunluk (km)	114	115	177	35
		Maliyet (milyon TL, 2023)	164	166	255	50
	Elektrikli Araç Alımından Dolayı Ek Yatırım	Uzunluk (km)	26	6	16	14
Maliyet (milyon TL, 2023)		37	9	23	12	
2035 Yılına Kadar Toplam Yatırım - EA Hariç (milyon TL, 2023)		449	375	805	113	
Elektrikli Araç Alımından Kaynaklanan Ek Yatırım (milyon TL, 2023)		76	43	52	26	
Elektrikli Araç Alımından Dolayı Ek Yatırım Oranı		% 17	% 11	% 6	% 23	

Yapılan şebeke analizine göre, pilot metropol alanlardaki e-mobilite yükünün etkisi, şebeke genişletme ihtiyaçlarını karşılamak için normalde yapılması gereken yatırıma ek olarak yaklaşık %12 daha fazla yatırım gerektirmektedir. Akköprü bölgesi için gerekli yatırımların dağılımı Şekil 61’de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi OG/AG trafolarının payı OG hatlarından daha fazladır. Toplamda, incelenen metropol bölgeler için, gerekli yatırımların %62’si OG/AG trafoları içindir ve bu da çoğunlukla aşırı yüklenme ve AG sistem kısıtlama faktörlerinden kaynaklanmaktadır. Geri kalan %38’lik kısım ise çoğunlukla güvenilirlik faktörü nedeniyle yatırım yapılan OG hatları içindir.

Şekil 61. E-mobilite yüklerinin etkisini sınırlamak için Akköprü bölgesinde yapılan yatırımların maliyeti



5.2 Duyarlılık analizi

Bu bölümde, EA’ların ve HHA’ların ana senaryolar olan BAU ve Net0 için varsayılanlardan farklı koşullardaki etkisini değerlendirmek için dikkate alınan senaryolara ek olarak duyarlılık analizleri yapılmıştır.

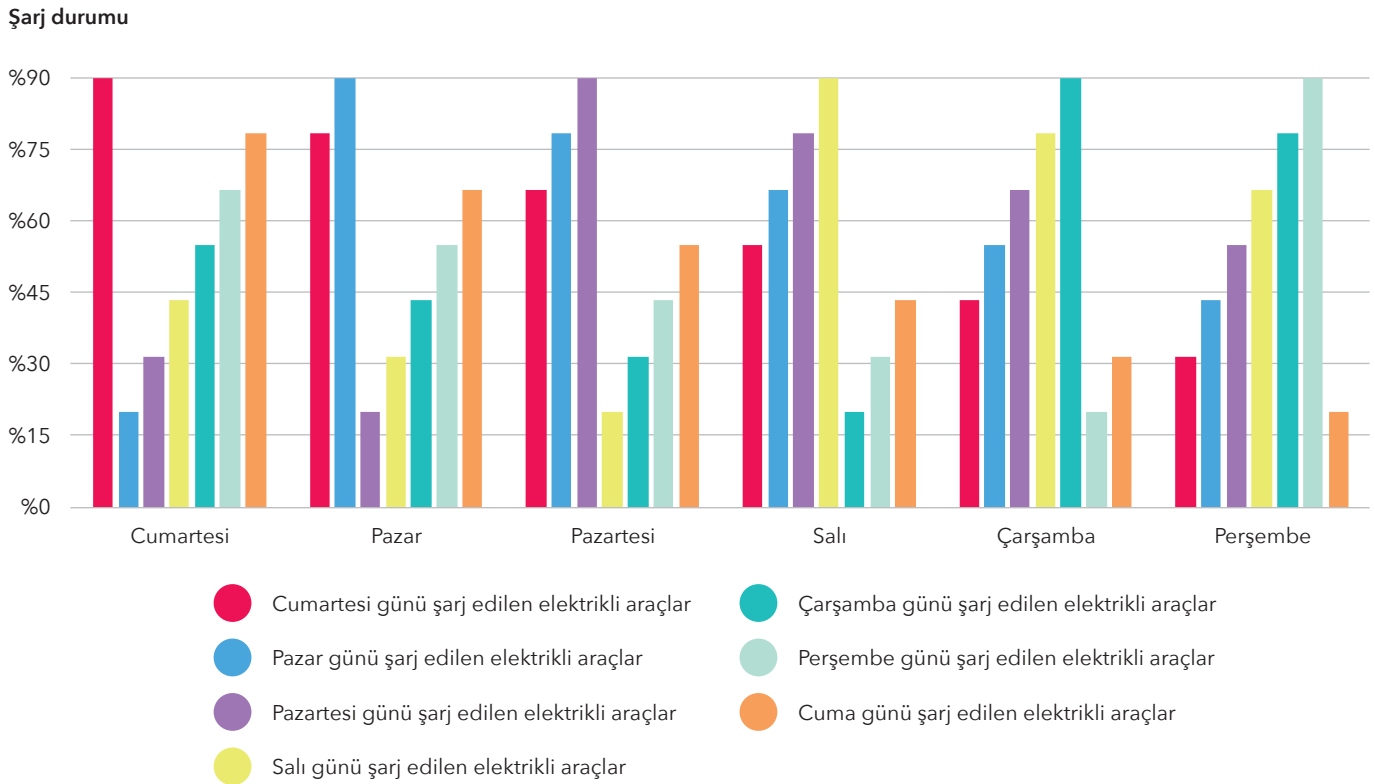
5.2.1 Vaka 1: Tatil zamanlarında aşırı şarj etme durumu

Şimdiye kadar, Bölüm 4.3’te geliştirilen EA elektrik yük profilleri, e-mobilite yüklerinin dağıtım sistemi üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. Söz konusu profiller, pilot bölgelerdeki e-mobilite yüklerinin hafta içi ve hafta sonlarına ilişkin normal şarj davranışını temsil etmektedir.

Bununla birlikte, bazı özel günlerde dağıtım sistemlerini aşırı derecede etkileyebilecek ve önemli ölçüde aşırı yüklenmeye neden olabilecek yoğun şarj gerçekleşebilir. Bu durumda, insanların çoğunun seyahat edeceği resmi bayram gibi uzun bir tatil öncesi yoğun şarj davranışı dikkate alınmıştır.

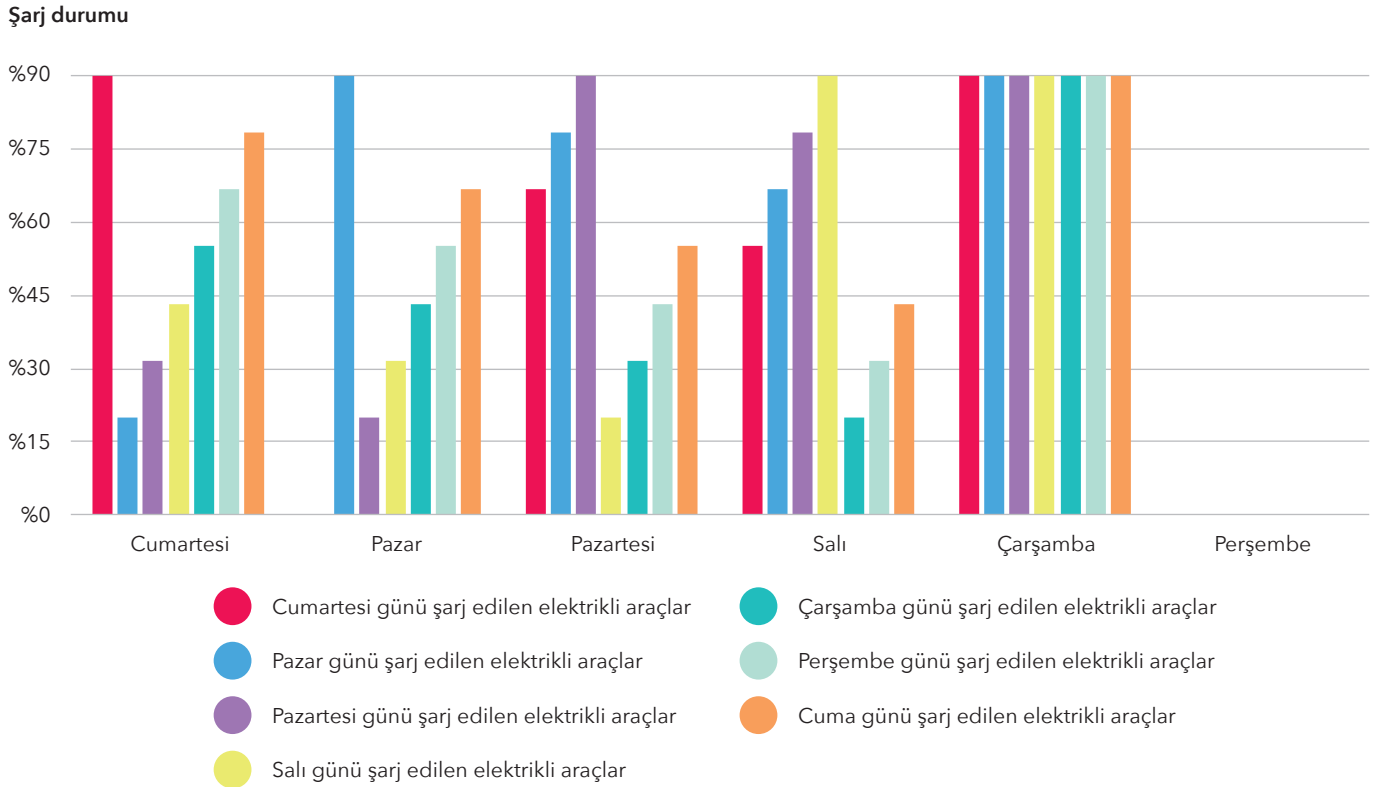
Normal bir haftaya karşılık gelen şarj davranışı Şekil 62’de sunulmuştur. EA’nın bataryasının ortalama kapasitesi ve ayrıca izin verilen şarj durumu aralığı (bkz. Bölüm 4.3) üzerine yapılan varsayımına dayanarak, her pilot bölgedeki EA’lar haftada bir kez ilgili kapasitenin %90’ına kadar şarj edilmekte ve ortalama olarak bu şarj sonraki 6 gün için enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Bu nedenle, Şekil 62’den de görülebileceği gibi, Cumartesi günü şarj edilen elektrikli araçlar %90 şarj durumuna ulaşmakta ve şarj seviyeleri hafta boyunca kademeli olarak azalmaktadır. Aynı koşullar haftanın diğer günlerinde şarj edilen bakım araçları için de gözlemlenebilir.

Şekil 62. Haftanın farklı günlerinde şarj edilen araçların şarj durumu - Normal Hafta

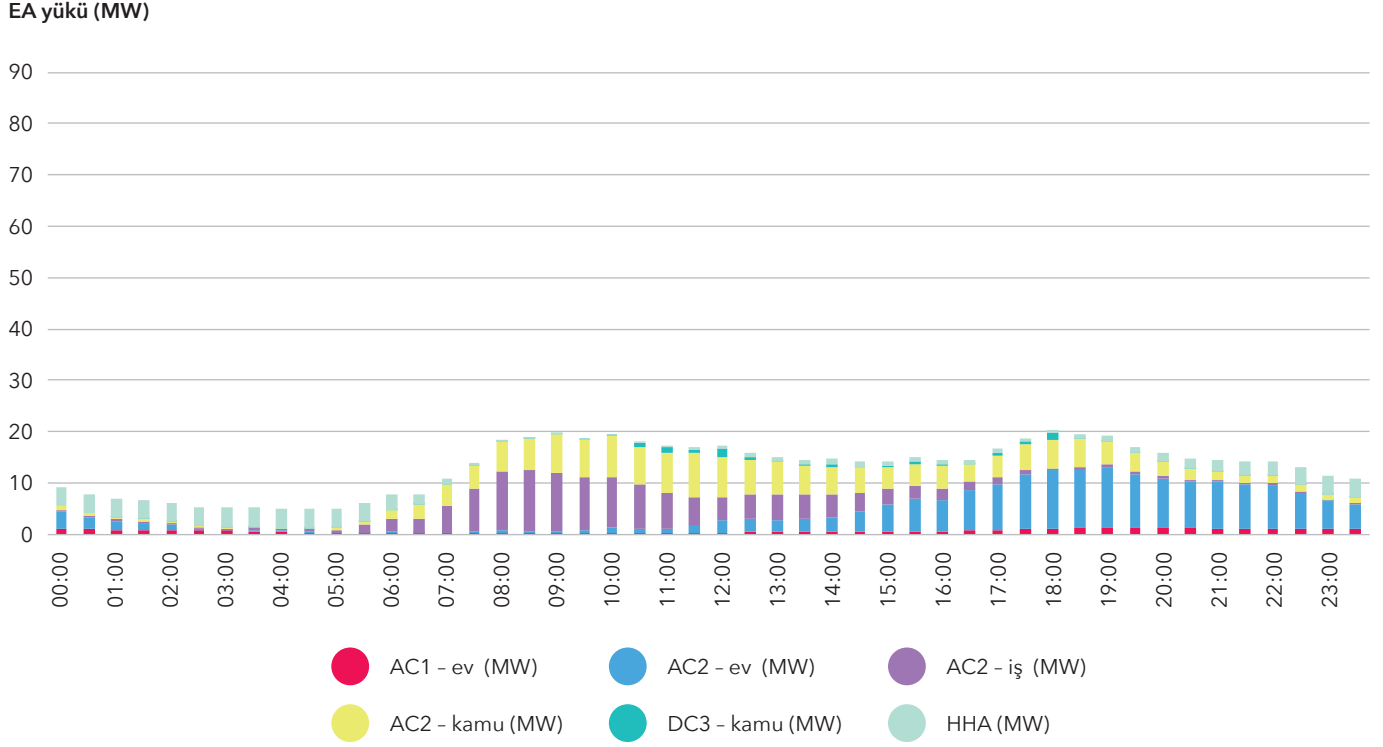


Tatillerin Perşembe gününden itibaren başladığı varsayıldığında, bölgedeki EA'ların çoğu şarj olacak ve böylece uzun yolculuk için EA'lardan yararlanabileceklerdir. Tatil başlamadan önceki gündeki kapsamlı şarj davranışı Şekil 63'te gösterilmektedir. Şekil 63'de, EA'ların çoğu zaten önemli miktarda şarja sahip olsa da, Çarşamba günü maksimum şarj durumuna ulaşmak için tekrar şarj edilmektedir. Bu şarj daha sonra tatil döneminde uzun mesafelere seyahat etmek için kullanılacaktır. Çarşamba günü normal durum ve tatil başlamadan önceki gün için EA yük profili sırasıyla Şekil 64'te ve Şekil 65'te gösterilmektedir. Şekil 64 ve Şekil 65 karşılaştırıldığında, böyle bir durumda en yüksek EA yükünün normal durumun 4 katına kadar çıkabildiği görülmektedir (Akköprü Bölgesi). Evde şarj rutininin en olumsuz durumu (evlerde kontrolsüz şarj) temsil ettiği düşünülmektedir.

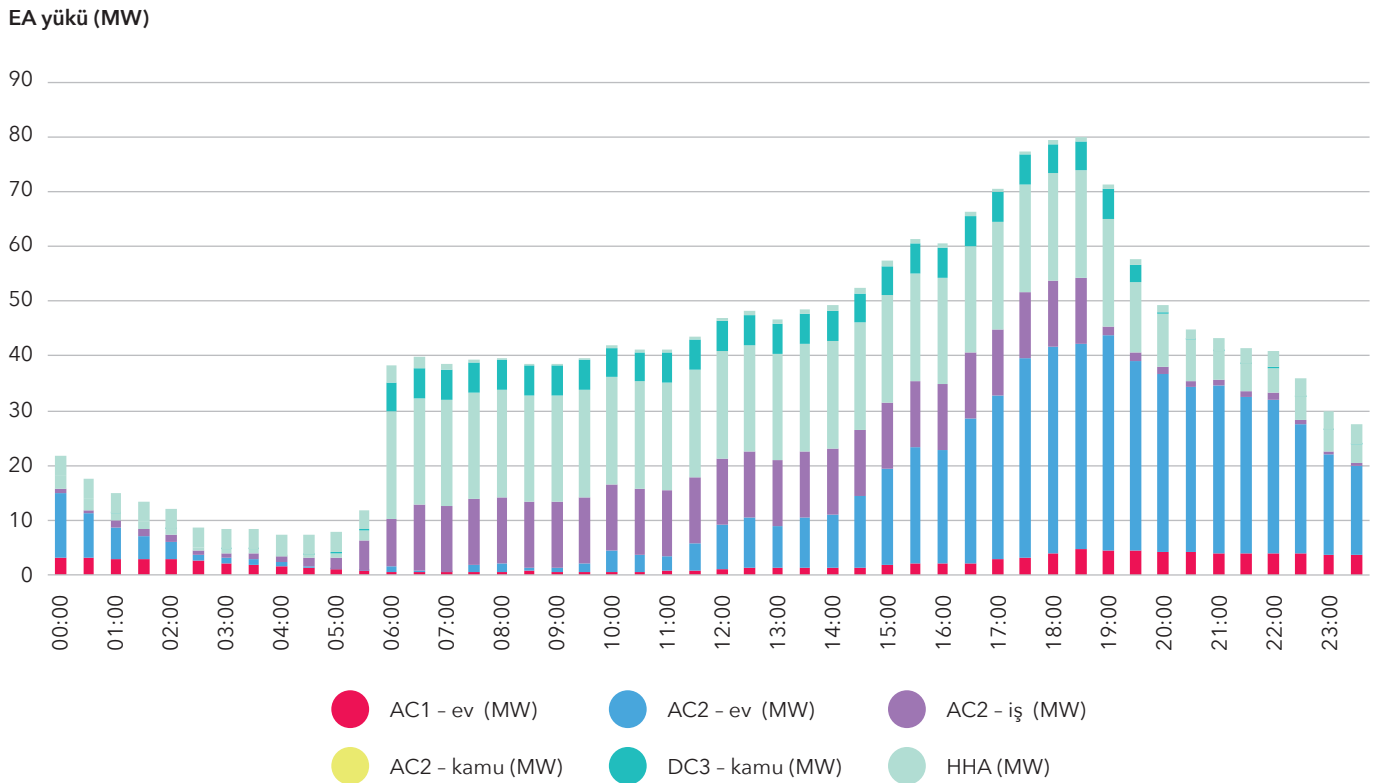
Şekil 63. Haftanın farklı günlerinde şarj edilen araçların şarj durumu - Bayram haftası başlangıcı



Şekil 64. Şarj yük profili: Normal hafta- Akköprü bölgesi, ev tipi şarj, Net0 Senaryosu



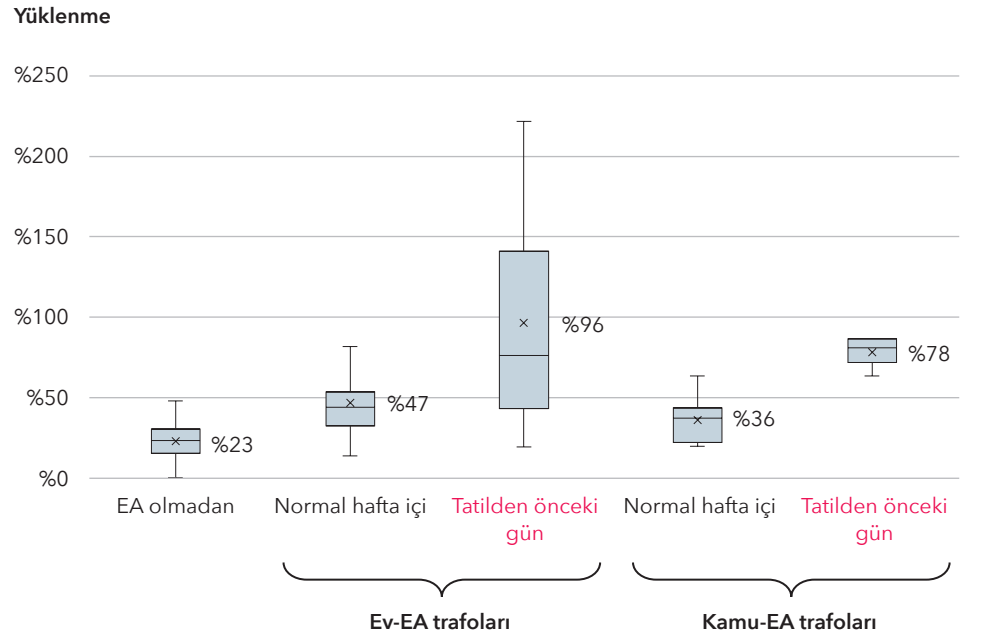
Şekil 65. Şarj yük profili: Tatil haftası başlangıcı- Akköprü bölgesi, ev tipi şarj, Net0 Senaryosu



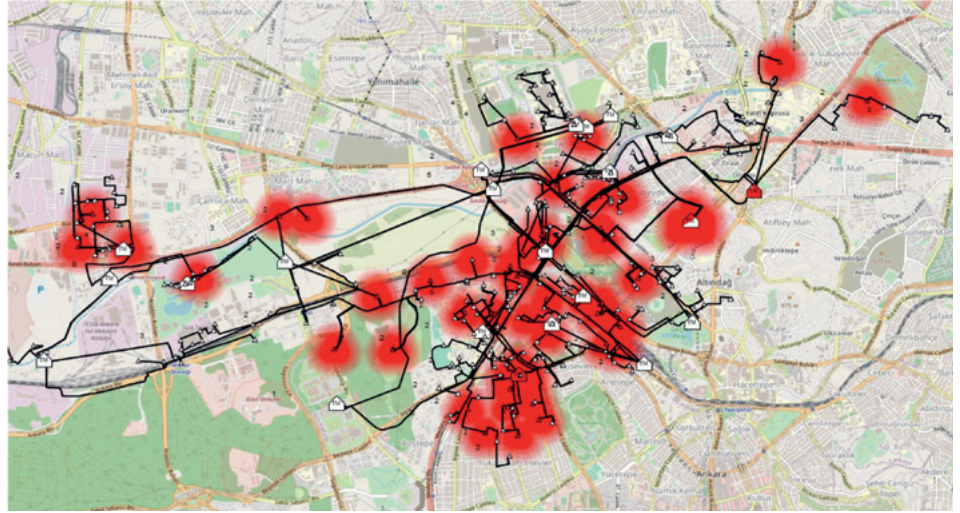
Tatil başlamadan önceki gün aşırı şarjın etkisi Şekil 66'da gösterilmektedir. Şekil 66'dan de görülebileceği gibi, söz konusu hafta için ve normal koşullar altında, yerleşim bölgelerindeki e-mobilité yüklerine hizmet eden trafoların ortalama yüklenmesi %47 civarındadır ve bu oran %96'ya çıkmıştır. Buna ek olarak, birkaç OG/AG trafosu aşırı yüklenmeye maruz kalacaktır. Kamuya açık şarj istasyonunu besleyen OG/AG trafoları için ortalama yükleme %36'dan %78'e çıkmıştır. OG/AG trafolarındaki aşırı şarjdan kaynaklanan aşırı yüklenme Şekil 67'de gösterilmektedir. Bu aşırı yüklemeye başa çıkmak için yatırım yapmak rasyonel bir çözüm olarak görülmemektedir. Bunun temel nedeni, böyle bir sorunun yılda sadece birkaç saat boyunca ortaya çıkmasıdır. Bununla birlikte, çözüm olarak ilave yatırımın seçilmesi durumunda, sistem farklı şarj olaylarının çakışması nedeniyle çok yüksek piklere dayanamayacağından (örneğin, Akköprü Bölgesi için normal koşulların dört katına kadar) gerekli yatırım çok yüksek olacaktır.

Bu tür koşullarla başa çıkmak için en etkili çözümler olan akıllı ve kontrollü şarj uygulamaları ilerleyen bölümlerde tartışılacaktır.

Şekil 66. Tatilden bir gün önce aşırı yüklenmenin etkisi - Akköprü bölgesi



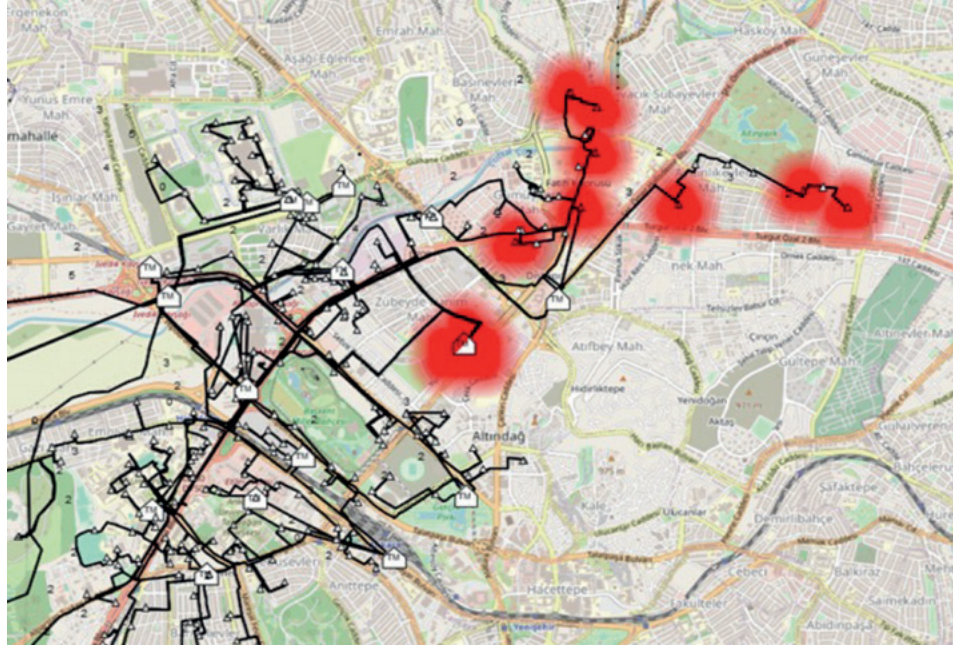
Şekil 67. OG/AG trafolarındaki yüksek şarjdan kaynaklanan aşırı yüklenme - Akköprü bölgesi



5.2.2 Vaka II: Akıllı şarj

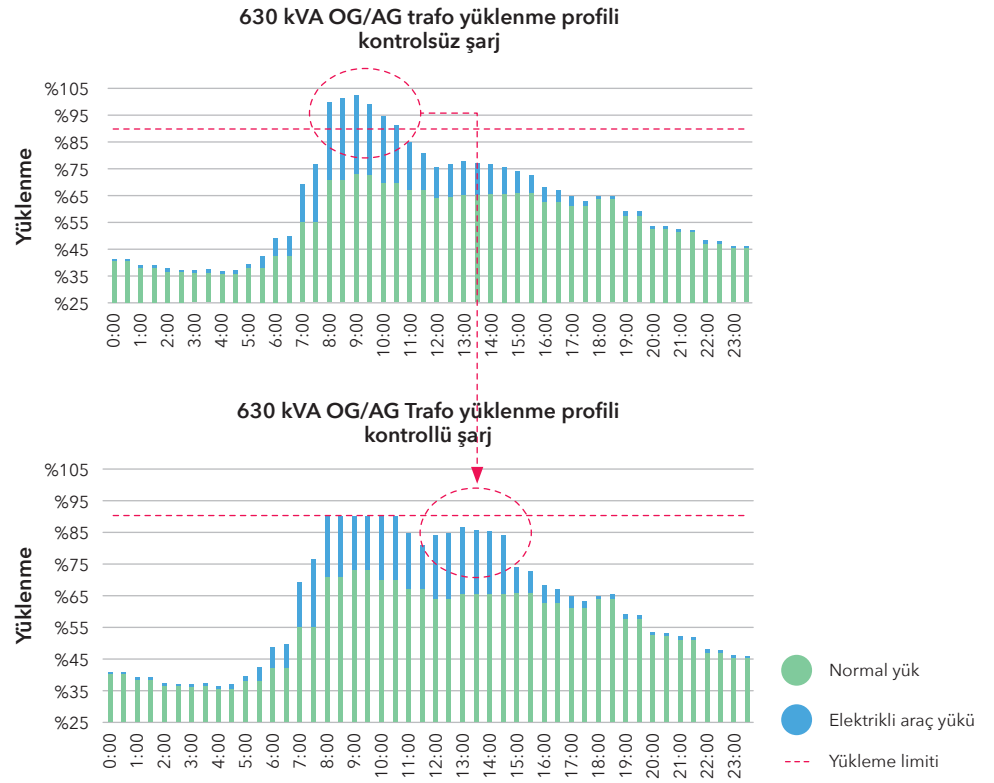
Bölüm 4.3'te geliştirilen e-mobilite yük profilleri, şarj alışkanlıklarının olasılık dağılım fonksiyonlarını takip ettiği kontrolsüz şarj davranışı ile ilişkilidir. Bununla birlikte, Bölüm 2.2.1'de tartışıldığı gibi, akıllı şarj/kontrollü şarj, sürdürülebilir bir enerji ekosistemi içinde EA'ların kullanımını optimize etmenin ayrılmaz bileşenleridir. Bu stratejiler, EA'ların şarj sürecinin verimliliğini en üst düzeye çıkaracak, şebeke üzerindeki yükü en aza indirecek ve hem tüketiciler hem de kamu hizmetleri için maliyetleri potansiyel olarak azaltacak şekilde yönetmeyi amaçlamaktadır. Bu duyarlılık analizinde, e-mobilite yüklerinin sıkışık saatlerden daha az sıkışık saatlere kaydırılmasının şebeke üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Akköprü bölgesindeki dağıtım sisteminin bir kısmı Şekil 68'de gösterilmektedir. Net0 Senaryosu ve evde şarj rutini altında 2035 yılı 19 Ocak, sabah 9:30 ile ilişkili senaryo koşulları gösterilmektedir.

Şekil 68. E-mobilite yüklerinden kaynaklanan OG/AG trafo aşırı yüklenmesi - Akköprü bölgesi



Şekil 68’de 385 elektrikli aracın (AC tip 2, 3,7 kW) aynı anda şarj edilmesi nedeniyle 11 OG/AG trafosu aşırı yüklenmiştir (%90’dan fazla yükleme). 63 kVA OG/AG trafosunun (11 aşırı yüklü trafodan biri) yükleme profili Şekil 69’da gösterilmektedir. Burada, OG/AG trafosunun yükü, e-mobilite yüklerinin trafoların aşırı yüklenmesi üzerindeki etkisini vurgulamak için normal yük ve e-mobilite yükü olarak ikiye ayrılmıştır. Şekil 69’da gösterildiği gibi, 8:00-10:00 saatleri arasındaki e-mobilite yükünün bir kısmının 12:00-15:00 dönemine kaydırılması durumunda, eşzamanlı şarj nedeniyle o bölgedeki aşırı yüklenme sorunu çözülebilir. Şekil 69’da 219 elektrikli araca ait yükün söz konusu döneme kaydırıldığı görülmektedir. Bu değer, şarj olan EA’ların %56’sının kaydırılmasına karşılık gelmektedir. İncelenen vakaların çoğunda, EA yükleri yenilenebilir enerjinin bol olduğu saatlere kaydırılabilir, örneğin güneş enerjisi için öğle vakti ve rüzgâr enerjisi için yüksek rüzgâr saatleri (gece vakti) gibi. Bu koşullar altında, yenilenebilir enerji EA şarjı yoluyla absorbe edilebilir ve yenilenebilir enerji kesintisi (curtailment) önlenir. Kontrollü ve akıllı şarjı mümkün kılacak esneklik mekanizmaları mevcutsa (Bölüm 5.3 ve 6’da daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır), elektrikli araç şarjının dağıtım sistemleri üzerindeki etkisi sınırlandırılabilir ve şebeke yatırımları ertelenebilir, hatta azaltılabilir.

Şekil 69. E-mobilite yüklerini besleyen 630 kVA OG/AG trafosunun yüklenmesi - Kontrolsüz şarj profili ve akıllı (kontrollü) şarj



Şekil 70. E-mobilite yükünün Akköprü Bölgesi'ndeki dağıtım sisteminin bir bölümü üzerindeki etkisi: Akıllı (Kontrollü) şarj ve kontrolsüz şarj

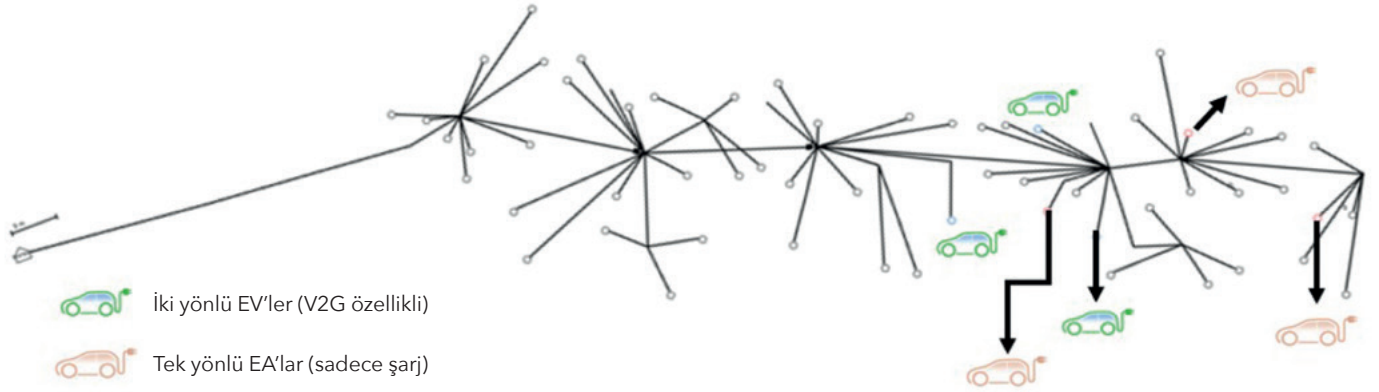


5.2.3 Vaka 3: Araçtan şebekeye (Vehicle to grid - V2G)

Akıllı şarjın gelişmiş bir şekli olarak, çift yönlü şarj veya araçtan şebekeye (V2G) mekanizmaları, EA şarjını optimize etmek için kullanılabilir. EA'larda depolanan enerji dağıtım sistemlerinde kısıt yönetimi amacıyla kullanılabilir. V2G yaklaşımlarını gerçekleştirmek için belirli seviyelerde teknoloji ve uzlaştırma mekanizmaları gerekli olsa da, bu bölümde potansiyellerini anlamak için dağıtım şebekesi üzerindeki etkileri incelenecektir.

Bir AG şebekesinin tipik bir temsili Şekil 71'de gösterilmektedir; burada sistem hem V2G katkısı sağlayabilen çift yönlü EA'lara hem de yük olarak şebekeye entegre edilen tek yönlü şarj olan EA'lara ev sahipliği yapmaktadır. Tablo 16, Şekil 71'de gösterilen tipik AG şebekesine bağlı EA'lar için şarj durumunu özetlemektedir.

Şekil 71. V2G özellikli EA'lara sahip tipik AG şebekesi

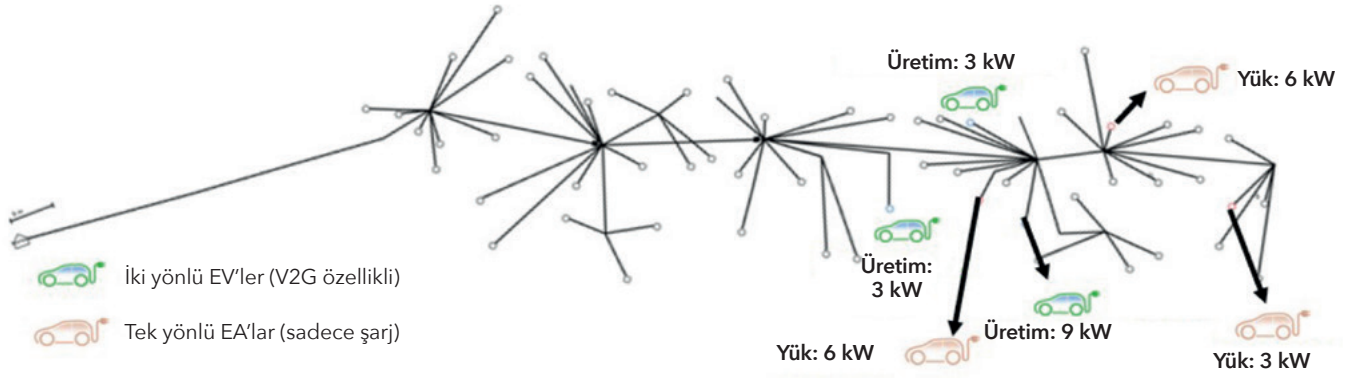


Tablo 16. Şekil 71'de gösterilen tipik bir AG şebekesinde EA'ların şarj durumu

Öge	Değer
EA Şarj Yüğü (sadece tek yönlü EA'lar)	14 kW (yaklaşık 4 AC2 bağlantılı araç)
V2G özellikli EA'larda kullanılabilir şarj	20 kW (10 AC2 tip 2 bağlantılı araç)

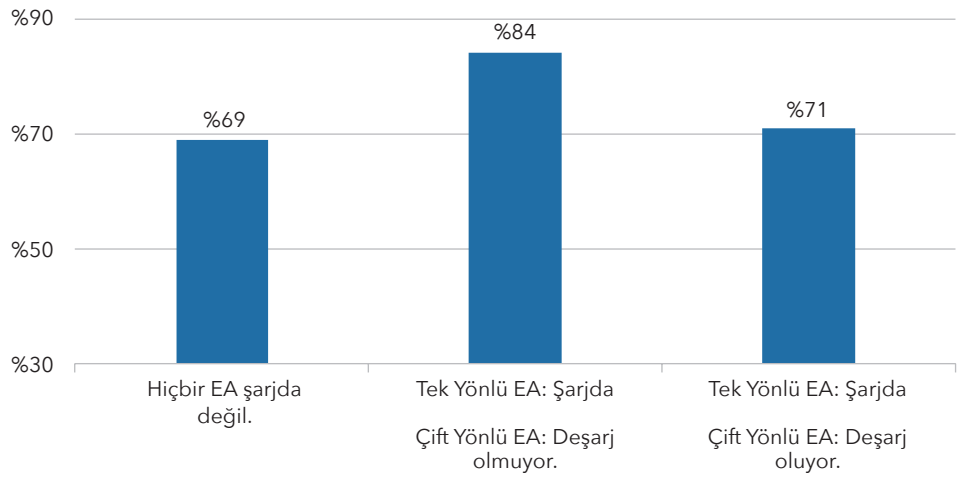
Tek yönlü olarak şarj olan EA'ların ve deşarj olan V2G özellikli EA'ların teorik gösterimi Şekil 72'de gösterilmektedir. Burada, V2G katkısının AG ana hat yükü ve gerilim profili üzerindeki etkisi sırasıyla Şekil 73 ve Şekil 74'te sunulmuştur. Görülebileceği üzere, V2G hat yükünü azaltabilir ve incelenen AG şebekesinin gerilim profilini iyileştirebilir.

Şekil 72. Tek yönlü EA'ların şarj edilmesi ve V2G özellikli EA'ların deşarj edilmesine ilişkin teorik bir gösterim

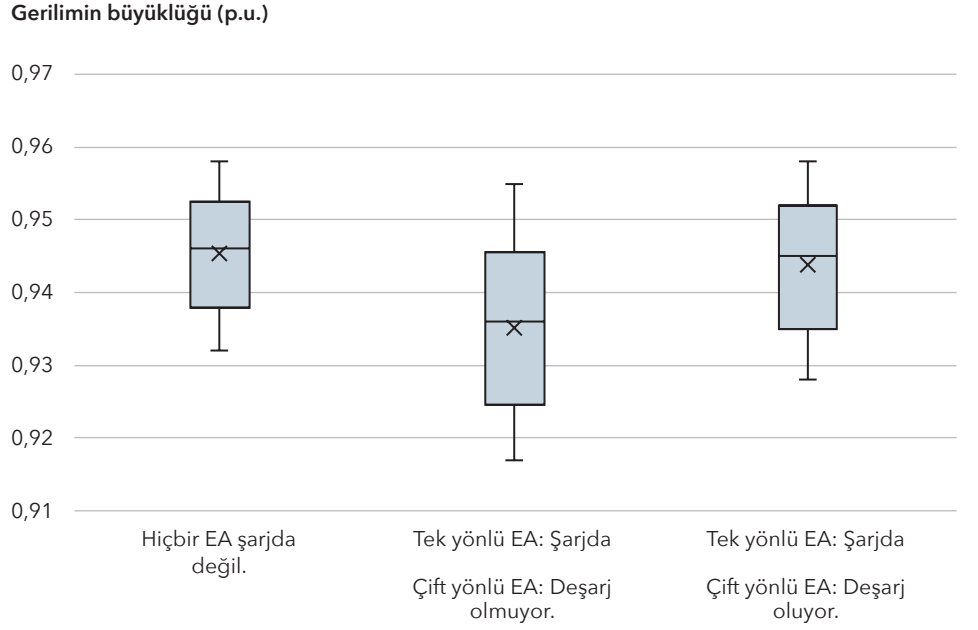


Şekil 73. Şekil 63'te gösterilen şebekenin ana AG hattı yükü üzerindeki V2G etkisi

Yüklenme seviyesi

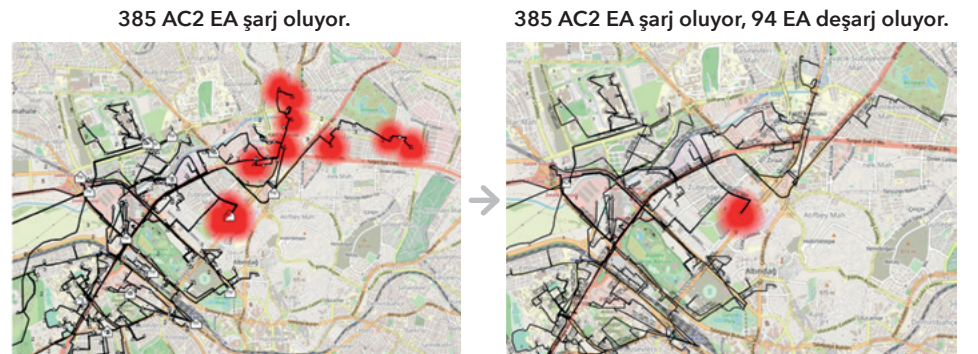


Şekil 74. Şekil 63'te gösterilen şebekenin gerilim profili üzerindeki V2G etkisi



Bu teorik örnekten yola çıkarak, Şekil 68'de gösterilen Akköprü dağıtım şebekesinin bir bölümündeki gerçek veriler üzerinde örnek (önceki bölümde tek yönlü akıllı şarj durumu için kullanılanla aynı durum) ele alınmıştır. Bölüm 5.2.2'de belirtildiği gibi, 385 AC2 elektrikli araç aynı anda şarj edilmekte ve bu da 11 OG/AG trafosunun aşırı yüklenmesine neden olmaktadır. Burada, 94 V2G özellikli AC2 EA'nın deşarj edilmesiyle, 10 OG/AG trafosundaki aşırı yüklenme hafifletilebilir (bkz. Şekil 75). Bu durumda, e-mobilite kaynaklı aşırı yüklemenin üstesinden gelmek için e-mobilite yükünün %25'i aralığında bir deşarj yeterlidir. V2G'nin gerçekleştirilmesi için belirli düzeyde altyapılar ve mekanizmalar gerekli olsa da, e-mobilite yüklerinin dağıtım sistemleri üzerindeki etkisini sınırlamak ve gerekli yatırımları ertelemek için etkili bir yaklaşım olabilir.

Şekil 75. V2G'nin Akköprü dağıtım şebekesinin bir bölümü üzerindeki etkisi



5.2.4 Vaka 4: Otoyolda şarj etme

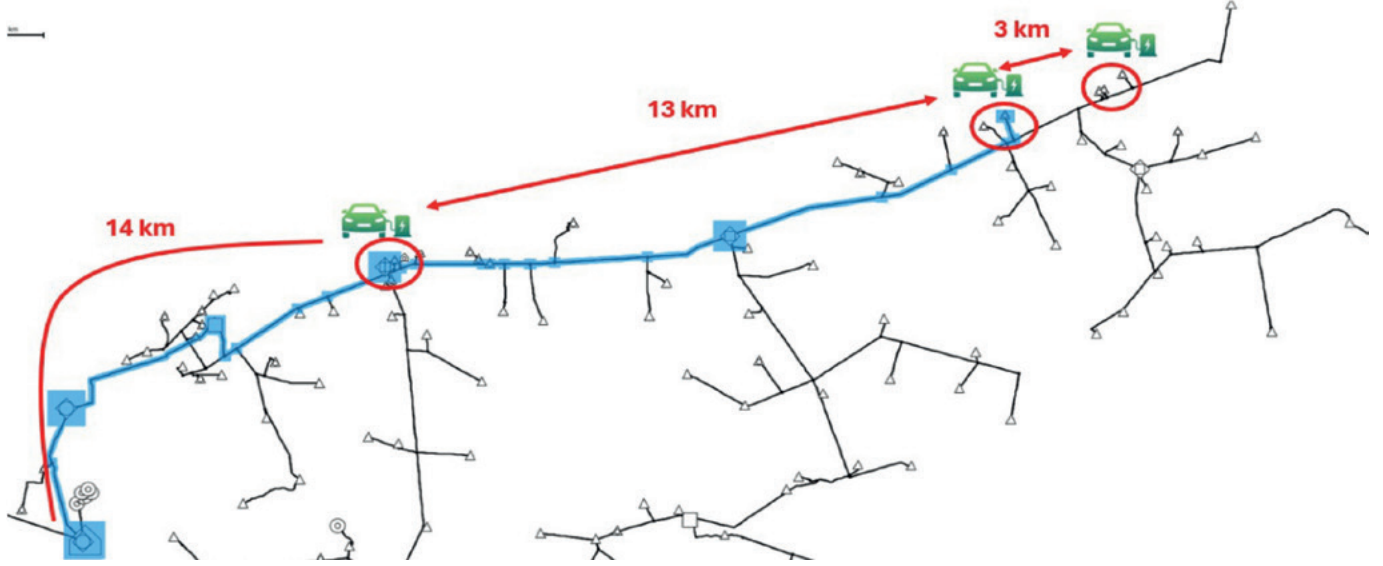
Otoyollarda ve yollarda bulunan yakıt istasyonlarında şarj etmenin şebeke etkisi bu duyarlılık analizi altında incelenmiştir. Metropol alanlardaki ve otoyollardaki e-mobilite yüklerinin şebeke etkisi arasındaki temel farklar şunlardır:

1. Metropol bölgelerdeki dağıtım şebekeleri normalde bölgedeki yük artışını karşılamak için iyi yatırım yapılmış şebekelerdir. Ancak, yol ve otoyollardaki akaryakıt istasyonları normalde 20 kilometre (km) gibi yüksek mesafelerde 'Swallow' tipi iletkenler gibi zayıf dağıtım hatları üzerinden beslenmektedir. Bu tür zayıf bağlantılar gerilim sorununa yol açabilir.
2. Metropol bölgelerdeki e-mobilite yükleri farklı şarj teknolojilerinin bir karışımıdır ve ev tipi şarj rutini şarj profilinin bel kemiğini oluşturacaktır. Ancak, otoyollarda şarj durumunda tercih hızlı DC şarj olacaktır. Bu nedenle, farklı şarj durumları çakışabilir ve dağıtım şebekesine yüksek oranda e-mobilite puant yükü yüklenebilir.

Otoyol üzerindeki şarj istasyonunun tipik gösterimi Şekil 76'da sunulmuştur; burada şebeke yapılandırması gerçek duruma çok yakındır. Görülebileceği üzere, kaynak ile ilk şarj istasyonu çifti arasındaki mesafenin 14 km ve kaynak ile en uzak istasyon çifti arasındaki mesafenin 30 km olduğu bir fider üzerinde 6 şarj noktası bulunmaktadır. Varsayımlar şunlardır:

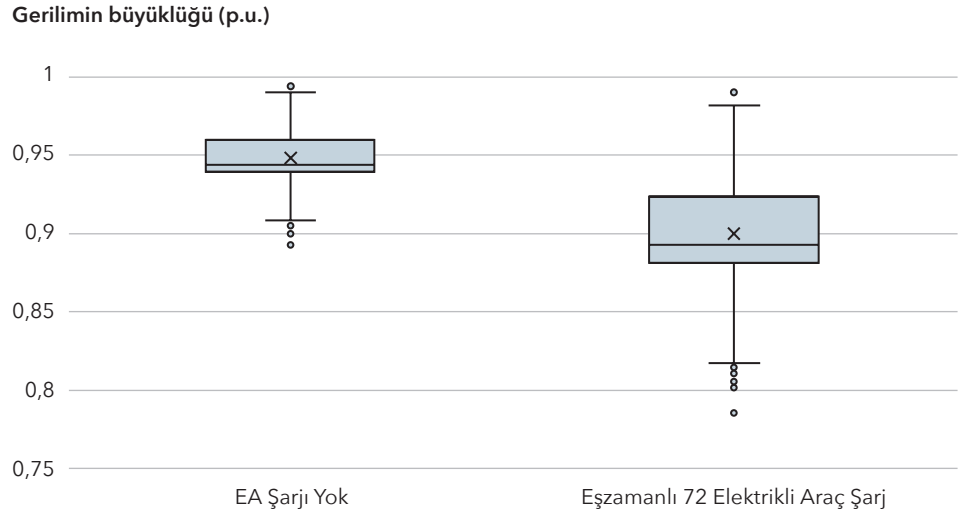
- Akaryakıt istasyonları yaklaşık 9 MW kapasiteli 'Swallow' tipi iletken ile beslenmektedir
- Her şarj istasyonunda 3 şarj sırası mevcuttur;
- Her şarj sırasında 2 şarj noktası mevcuttur;
- Her şarj noktasında 2 şarj soketi mevcuttur;
- Şarj istasyonu başına toplam 12 soket ve fider başına 72 şarj soketi;
- DC hızlı şarj teknolojisi 100 kW değerinde kabul edilmiştir;
- E-mobilite yükünün simülasyon zirvesi 7.200 kW'a ulaşabilir.

Şekil 76. Otoyoldaki tipik şarj işlemi

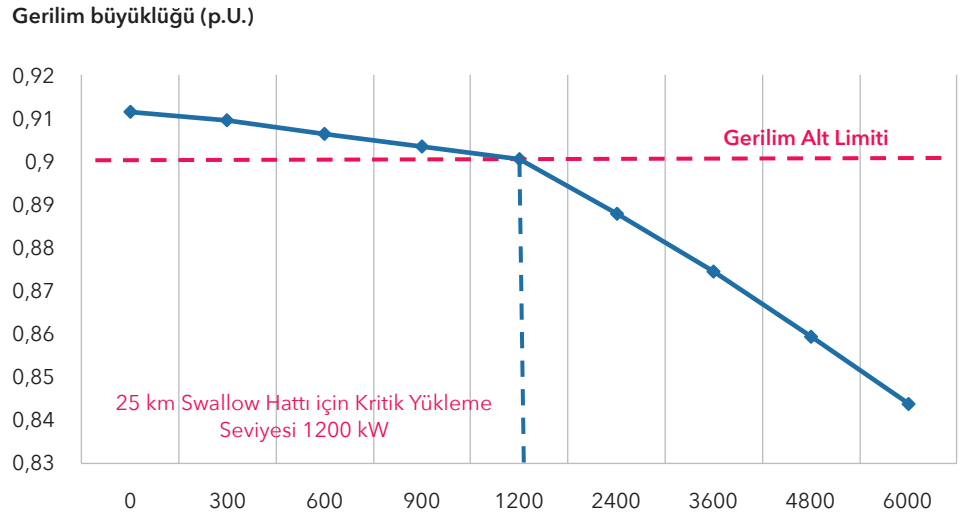


Şekil 76'da gösterilen şebekenin gerilim profili Şekil 77'de gösterilmektedir. Şekil 77'den görüleceği üzere, yakıt istasyonlarındaki tüm şarj soketlerinin e-mobilite yükleriyle (100 kW DC) yüklenmesi durumunda, şebekede gerilim düşüşü kaçınılmaz olacaktır. Böyle bir durum, insanların EA'ları ile seyahat ettiği ve şarj noktalarının çoğunun dolu olacağı tatil zamanlarında da meydana gelebilir. Gerilimi izin verilen çalışma seviyesinde tutmak için, besleme iletkenlerinin güçlendirilebileceği bir yatırım bir çözüm olabilir. Bununla birlikte, bu tür durumlar yılda birkaç gün olabileceğinden, kontrollü şarj gibi operasyonel önlemler de uygulanabilir bir çözümdür. Şekil 78, 6 şarj istasyonunu besleyen 25 km'lik bir 'Swallow' hattı için kritik yüklemeye seviyesini göstermektedir. Görülebileceği gibi, gerilim açısından bakıldığında 1.200 kW, 12 DC hızlı şarjlı EA'ya karşılık gelen kritik yüklemeye seviyesidir. Başka bir deyişle, ya aynı anda sadece 12 EA şarj edilecek ya da 72 soketin tamamının dolu olması durumunda, kritik yüklemeye seviyesini korumak için şarj gücü 100 kW'tan 17 kW'a (1.200 kW'ın 72'ye bölünmesi) düşecektir. Bu koşullar altında şarj süresi 30 dakikadan 3 saate çıkabilir.

Şekil 77. Şekil 68’de gösterilen şebekenin gerilim profili: Otoyoldaki hızlı şarj işlemi



Şekil 78. 6 şarj istasyonunu besleyen 25 km’lik bir ‘Swallow’ hattı için kritik yükleme seviyesi



5.3 Bulguların tartışılması

5.3.1 Dağıtım şebekesi etkisi ve yatırım gereksinimleri

Türkiye'nin toplam nüfusunun ve elektrik talebinin yaklaşık %14'ünü temsil eden dört pilot bölge ve Türkiye'nin büyük şehirlerinden (İstanbul ve Ankara) elde edilen verilerin analiz sonuçları 11 milyon EA'nın (HHA'lar dahil), EA'lar hariç yük artışını karşılamak için yapılması gereken yatırıma ek olarak %12 daha fazla yatırım yapılması koşuluyla Türkiye'nin dağıtım şebekesine entegre edilebileceğini göstermektedir. 2035 yılına kadar 5 milyon elektrikli aracın (HHA'lar dahil) entegrasyonunu öngören BAU Senaryosunda ise, e-mobilite yükünü karşılamak için %3,5 daha fazla yatırım gerekmektedir. 2035 yılında 11 milyon EA projeksiyonu, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefine ulaşması için ulaştırma sektöründe gerekli elektrifikasyon miktarını temsil eden SHURA analizine dayanmaktadır. Tahmini e-mobilite kaynaklı yatırımlar, optimize edilmiş EA şarjından elde edilebilecek fayda ve tasarrufları içermemektedir.

Bu yatırım ihtiyacının ana itici gücü, OG/AG trafoları ve OG hatları yatırım planları üzerindeki AG sistemi etkisidir. Kontrolsüz ve aynı zamanda ekonomik bir şarj yöntemi olan evde şarj rutini, yeni AG fiderlerinin kullanılması ve e-mobilite yüklerine hizmet etmek için yedek AG portlarının kullanılması gerekliliğini beraberinde getirmektedir. Ancak, AG bağlantı noktasının mevcut olmaması durumunda (ki bu özellikle büyükşehirlerde yaygın bir durumdur), yeni OG/AG trafoları ve OG hatlarına yatırım yapılması gerekecektir.

Şekil 79'deki diyagram, e-mobilite yüklerinin dağıtım şebekesi altyapısı üzerindeki artan etkisini göstermektedir. Diyagram, ilk yatırımın yeni AG hatlarına yönlendirildiği aşağıdan yukarıya bir yaklaşımın ana hatlarını çizmektedir. Daha sonra bu yatırım, EA'nın benimsenmesine yönelik gelişen ihtiyaçları yansıtacak şekilde OG/AG trafolarına ve OG hatlarına doğru kademeli olarak artmaktadır. Şekil 80, özellikle OG/AG transformatörlerine ilişkin yatırım faktörlerinin bir dökümünü sunmaktadır. Özellikle, bu yatırımların önemli bir kısmı AG sistem kısıtlamalarına ve ortalama yükleme seviyesi artış faktörüne atfedilebilir. Bu faktörler öncelikle güvenilirlikle ilgili hususlardan kaynaklanmakta ve artan e-mobilite talepleri karşısında şebeke istikrarını ve performansını sağlamanın kritik önemini altını çizmektedir.

OG hat yatırımları incelendiğinde, yatırım gereksinimlerinin neredeyse tamamının güvenilirlik kaygılarından kaynaklandığı görülmektedir. Bu durum, OG hatlarının tipik olarak %10 ila %15 arasında değişen nispeten düşük ortalama yükleme seviyesi ile açıklanmaktadır. Bu durum, e-mobilite yüklerinin yarattığı ilave yükü kaldırabilecek sağlam bir altyapının gerekliliğinin altını çizmektedir. Özetle, e-mobilite yüklerinin dağıtım şebekesine getirdiği baskın yük, ağırlıklı olarak güvenilirlik perspektifinden kaynaklanmaktadır.

Bu durum, hem dağıtım sistemi planlayıcıları ve sermaye harcaması (CapEx) karar vericileri (EPDK) hem de T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) gibi politika belirleyici ve düzenleyici kurumlar tarafından proaktif önlemler alınmasını gerektirmektedir.

Bu bulgulara dayanarak, Türkiye'nin metropol alanlarında öngörülen 11 milyon EA'lık e-mobilite yükünü karşılamak için yatırım ön koŖulları aŖađıdaki gibidir:

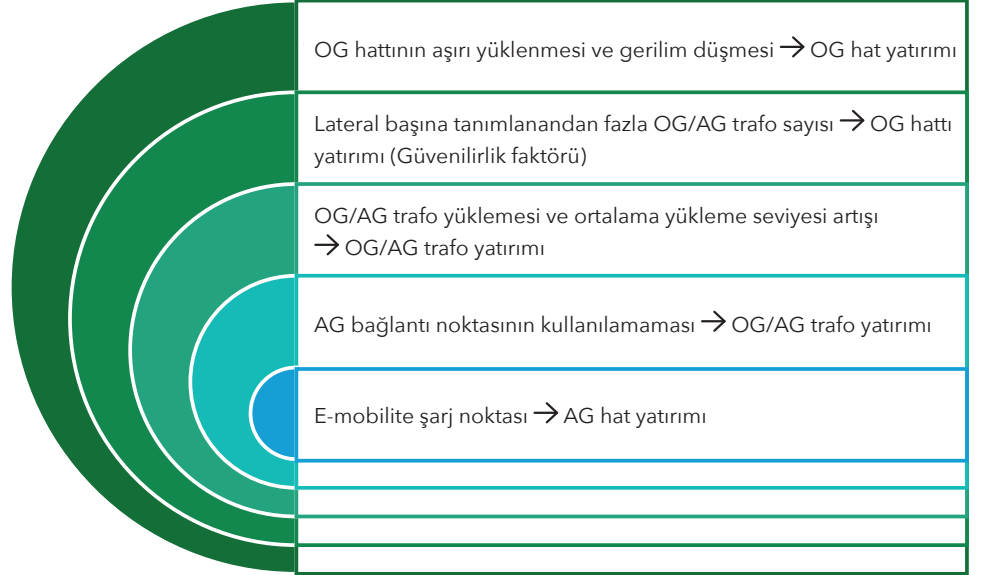
- 2035 yılına kadar yapılması gerekenin üzerine %10 daha fazla OG/AG trafo yatırımı;
- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırıma ek olarak %16 daha fazla OG hattı yatırımı;
- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırımın üzerine %12 daha fazla toplam yatırım maliyeti.

BAU Senaryosuna karŖılık gelen 5 milyon elektrikli araç için yatırım gereksinimleri Ŗu Ŗekildedir:

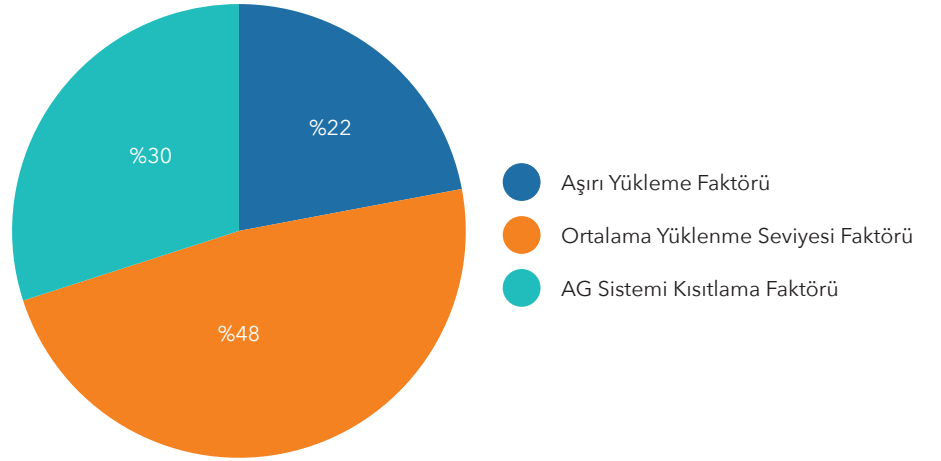
- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırıma ek olarak %3 daha fazla OG/AG trafo yatırımı;
- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırıma ek olarak %5 daha fazla OG hattı yatırımı;
- 2035 yılına kadar yapılması gereken yatırıma ek olarak %3,5 daha fazla toplam yatırım maliyeti.

E-mobilite yüklerinden kaynaklanan ek yatırım gereksinimlerinin ana itici gücü güvenilirlik faktörleri olduğundan, ETKB ve EPDK gibi politika belirleyici ve düzenleyici kamu kurumları, e-mobilite odaklı yatırım harcamalarını DSO'lara tahsis etmek veya güvenilirlik kriterlerini mümkün olduğunca gevŖetmek arasında bir denge kurmayı düşünmelidir.

Şekil 79. E-mobilite yüklerinin aşağıdan yukarıya etkisi



Şekil 80. OG/AG trafo yatırımında farklı faktörlerin payı



5.3.2 Şebeke etkilerini azaltmak için kontrollü ve akıllı şarj çözümleri

Analiz sonuçları, şebeke yatırımlarının hızını korumanın yanı sıra, kamusal ve evde şarj noktalarında EA şarjının optimizasyonunu sağlayabilecek kontrollü ve akıllı şarj mekanizmalarının kullanılmasının önemine işaret etmektedir. Bunlar, fiyat sinyallerine dayalı akıllı "tek yönlü" şarjdan, çift yönlü şarj (V2G) mekanizmalarına, yerel otomasyon çözümleriyle desteklenen basit kontrollü şarja kadar uzanmaktadır.

Akıllı şarj mekanizmaları, sistem maliyetlerinden tasarruf etmek, özellikle de ihtiyaç duyulan maksimum kapasiteyi karşılayacak yatırım gerçekçi

görünmediğinde şebeke yatırımlarından tasarruf etmek için çok önemlidir. Örneğin, tatil öncesi aşırı şarj gibi nadiren meydana gelen özel yük koşullarında (Duyarlılık Analizi Vaka 1), Akköprü bölgesindeki EA'ların puant yükü, dağıtım şebekesi üzerinde ciddi etkilere yol açabilecek normal şarj zamanlarındakine kıyasla 4 katına kadar artmaktadır. Bu sayı Türkiye'nin farklı bölgelerinde değişiklik gösterebilir; ancak bu tür özel günlerde eş zamanlı şarj nedeniyle EA şarjından kaynaklanan yük artışı kaçınılmazdır. Bu durum, şarj noktalarının sayısını mekansal ve zamansal olarak sınırlandırarak ya da yerinde yük yönetimi kullanarak, örneğin şarj sürelerini optimize ederek ve otomasyon çözümlerinin yardımıyla yönetilebilir.

EA şarjı ve deşarjı, fiyat sinyallerine dayalı olarak şebekenin daha verimli ve dolayısıyla maliyet-etkin işlemlerini sağlayabilir. Bu sinyaller şebekeden (örneğin şebeke kapasitesinin ne zaman mevcut olduğunu belirtmek için) ve elektrik piyasasından (örneğin yenilenebilir enerji üretiminin fazla olduğu zamanı belirtmek için) gelebilir. Bu bilgilerin müşterilerin kullanımına açık olması halinde, elektrikli araçların talep tarafı katılımı ile şebeke hizmeti vermesini sağlayan dinamik ve bölgesel tarifeler gibi örtülü esneklik önlemleri daha gelişmiş çözümler olarak uygulanabilir. Örneğin, tatil günlerine yaklaşırken şarj fiyatı/tarifi daha makul olabilir ancak tatil başlamadan tam bir gün önce şarj fiyatları önemli ölçüde artırılabilir. Fiyatlandırma politikalarının uygun şekilde duyurulmasıyla, aşırı eşzamanlı şarj durumları önlenir. Başka bir seçenek olarak bölgesel fiyatlandırma yaklaşımlarıyla, mobil yüklerin şebekede daha az sıkışık bölgelere yönlendirmek için daha az sıkışık bölgelerdeki şarj fiyatları yönetilebilir.

Çalışmada ele alınan akıllı şarj uygulamalarından biri (Duyarlılık Analizi Vaka 2), EA yüklerinin yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olduğu saatlere doğru kaydırılmasını incelemektedir. Akıllı şarj mekanizmaları sayesinde, e-mobilite yükleri daha az sıkışık saatlere kaydırılabilir. Örneğin, Duyarlılık Analizi Vaka 2'de aşırı yüklenme 385 adet EA'nın (AC tip 2, 3,7 kW) aynı anda şarj edilmesinden kaynaklanmaktadır ve bu durum 11 OG/AG trafosunun %90'dan fazla yüklenmesine neden olmaktadır. Bu analizde, şarj yükünün %56'sı, yani 219 EA'nın şarjı başka bir zamana kaydırılarak OG/AG trafoları üzerindeki aşırı yük hafifletilmiştir. Buna ilave olarak, yenilenebilir enerji üretim kesintisini (curtailment) önlemek için düşük yük ve yüksek yenilenebilir enerji üretiminin olduğu saatler de hedeflenebilir. Her iki şarj yani evde şarj ve kamusal alanda şarj rutini altında, yenilenebilir enerji, enerji depolama gibi esneklik önlemleri ve EA şarjı arasındaki sinerjiden elde edilebilecek faydalar açıkça görülmektedir. Şebeke entegrasyonu açısından faydalar, EA'lardan kaynaklanan ilave yükün yönetilmesi, alan soğutması için klima kullanımı nedeniyle zaten yüksek olan yükü artırdığı yaz aylarında daha belirgin olacaktır. Dağıtık enerji kaynakları ve batarya depolama, ilave EA yükünü karşılamak için önemli faydalar yaratır ve böylece dağıtım

şebekeleri üzerindeki operasyonel ve yatırım etkisini azaltır. E-mobilite yük kaydırmasının uygun mekanizmalar ve teknolojik hazırlık gerektirdiği unutulmamalıdır. Örneğin, ilk aşamada çok zamanlı ve dinamik fiyatlandırma mekanizmaları gereklidir ve bu mekanizmalar daha sonra EA'ların belirli bir saatteki esnekliğinden faydalanmak için toplayıcılar aracılığıyla esneklik toplama mekanizmasına kadar geliştirilebilir. Ek bir adım da bölgesel esneklik piyasasının kurulmasıdır, böylece toplanan esneklik DSO koordinasyonu ile yerel esneklik piyasasında alınıp satılabilir.

V2G mekanizmaları, belirli seviyedeki EA şarj talebinin V2G'ye hazır EA'lar tarafından karşılandığı kontrollü şarj/deşarj mekanizmaları olarak da düşünülebilir. Gerçekleştirilen simülasyonda (Duyarlılık Analizi Vaka 3), e-mobilite yükünün sadece %25'inin diğer mevcut araçlarla karşılanmasıyla, Akköprü bölgesindeki OG/AG trafolarının çoğunun aşırı yüklenmesi hafifletilebileceği görülmüştür. EA esnekliğini değerlendirmek için zamanla değişen fiyatlandırmanın mevcudiyetine ilave olarak, V2G uygulamaları için belirli seviyelerde teknoloji ve uzlaştırma mekanizması hazırlığı gereklidir. Örneğin, evde şarj noktalarından V2G esnekliği sağlanması için akıllı sözleşmeler aracılığıyla toplayıcılar tarafından etkinleştirilen bir toplama mekanizması gerekecektir. Burada hem bölgesel esneklik piyasasına dayalı uzlaştırma hem de yerel eşler arası ticaret mekanizmaları kullanılabilir. Her iki durumda da blok zinciri uygulamaları gibi gelişmiş kayıt altyapıları gerekecektir. Kamuya açık şarj noktalarında V2G için, şarj hizmeti sağlayıcılarının otoparkları veya havalimanlarının otoparkı gibi EA'ların nispeten uzun süre kalacağı otoparklar uygun bir seçeneği temsil etmektedir. Burada, şarj durumu seviyesi ve izin verilen şarj vedeşarj sayısı müşterilerden istenebilir ve park faturasında indirim gibi faydalarla telafi edilebilir. V2G mekanizmalarının yalnızca e-mobilite yüklerinden kaynaklanan kısıtları azaltmayı hedeflemediğini, aynı zamanda EA dışı yükler için kısıt yönetiminde de yararlanıcı olabileceğini unutmamak gerekir.

Akıllı şarj mekanizmalarının mevcut olmadığı durumlarda son seçenek, yerel otomasyon çözümlerinin e-mobilite yükünü kontrol etmeye katkıda bulunabileceği basit kontrollü şarjdır. Örneğin, otoyollarda şarj durumunda, bir haftalık fider üzerindeki ardışık şarj noktalarında şarjın koordinasyonu zor bir durumdur. Burada, fiderin yüklenme seviyesine veya e-mobilite yükünden kaynaklanan gerilim büyüklüğü düşüşüne bağlı olarak, eşzamanlı nominal şarj sınırlandırılabilir. Başka bir deyişle, ardışık şarj noktasında simülasyon şarjının kaçınılmaz olması durumunda (tatil zamanlarında yollarda aşırı şarj gibi), iletilen güç, toplam iletilen güç besleme hattının kritik yüklenme seviyesinden daha az olacak şekilde sınırlandırılabilir. Elbette böyle bir durumda EA şarj süresi artacaktır.

5.3.3 E-Mobilite yüklerinin sorunsuz entegrasyonu için dikkat edilmesi gereken hususlar

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, farklı pilot bölgelere ilişkin yatırım gereksinimlerinde önemli farklılıklar bulunmaktadır. Öne çıkan bir örnek olarak, hem Akköprü hem de Ümitköy bölgelerindeki EA sayısı aynı olmasına rağmen, e-mobilite yüklerinin ilgili dağıtım sistemleri üzerindeki etkisi aynı değildir. Bu gözlem, şarj altyapısının uygun sayısını ve konumunu belirlemek için şebekeye özel planlamaya ve ayrıca e-mobilite yüklerinin etkisini sınırlamak için yatırım gereksinimlerine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Diğer önemli nokta ise e-mobilite yüklerinin entegrasyonunu kolaylaştıran akıllı şarj mekanizmalarının çoğunun ileri çözümler, teknoloji ve uzlaştırma mekanizmaları gibi hazırlık seviyeleri gerektirmesidir. Burada en önemli sorunlardan biri, Türkiye’de kamuya açık şarj istasyonlarının kullanımına ilişkin veri ve izleme eksikliğidir. Bu durum genellikle yatırımcıların elindedir ve bu nedenle planlamacıların etkili teşvik mekanizmaları oluşturması zorlu bir süreçtir. Örneğin, Türkiye’de EPDK tarafından geliştirilen Şarj@TR platformu, kamuya açık şarj istasyonlarının konumunu, kullanılabilirliğini ve şarj modellerine erişilemediği durumlarda şarj tarifelerini sağlasa da, şarj düzenleri (patterns) erişilebilir değildir. Hollanda, şarj noktalarının kullanımının izlenmesi ve toplanan verilerin kamuya açık bir şekilde paylaşılması konusunda en iyi uygulama örneğini temsil etmektedir. Hollanda’dan elde edilen kanıtlar, şarj altyapısının kullanım faktörlerinin yoğun pazarlarda bile düşük kaldığını ve şarj hizmetleri pazarını daha da geliştirmek için izleme verilerine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Örneğin, Amsterdam’daki kamuya açık şarj noktalarının ortalama kullanım oranı %35 olup, bu oran diğer Hollanda şehirlerine ve Avrupa’daki yerlere kıyasla yüksektir. Elektrikli araçların park sürelerinin yalnızca %20’sini gerçek şarj için kullanmaları, daha fazla optimizasyon potansiyeline işaret etmektedir⁵⁹. Daha genel olarak, hedefe yönelik politika tasarımına olanak tanıyacak şarj noktalarının kamuya açık kullanım verilerinin eksikliği söz konusudur.

⁵⁹ Wolbertus, R., van den Hoed, R., and Maase, S., 2016. Benchmarking charging infrastructure utilization. World Electric Vehicle Journal 8(4), 748-765. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/316561797_Benchmarking_Charging_Infrastructure_Utilization



6. Türkiye Ulaştırma Sektörü Dönüşümünde Öncelikli Alanlar

Gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarına dayanarak, enerji politika belirleyicileri, piyasa düzenleyicileri, dağıtım şebekesi şirketleri, otomotiv endüstrisi, şarj teknolojisi geliştiricileri ve yatırımcıları, şehir planlamacıları ve akademik çevreler başta olmak üzere tüm paydaşlar için beş öncelikli alan önerilmektedir. Politika önerileri öncelik veya önem sırasından ziyade hangi paydaş gruplarını veya enerji sektörünün hangi bölümünü etkilediklerine bağlı olarak kategorize edilmiştir.

1) Elektrikli araç ve şarj hizmetleri piyasasının paralel olarak hızlandırılması

Avrupa Birliği (AB), Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Çin'deki öncü elektrikli araç (EA) pazarlarından elde edilen deneyimler, hem EA'ların benimsenmesini hem de şarj altyapısının geliştirilmesini teşvik etmek için hükümetler tarafından yönetilen kapsamlı bir politika çerçevesinin önemini vurgulamaktadır. Bu yaklaşım, EA'ların geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla maliyet açısından rekabetçi hale gelmesini sağlamak için çok önemlidir.

- **Satın alma teşvikleri:** Fiyat veya vergi indirimleri gibi satın alma teşviklerinin uygulanması EA satışlarını önemli ölçüde canlandırabilir. Bu teşvikler, Fransa'daki 'Bonus-Malus' Programı gibi içten yanmalı motorlu araçların aşamalı olarak kullanımdan kaldırılmasını amaçlayan tedbirlerle stratejik olarak birleştirilmelidir. Bu program, düşük emisyonlu araçlarda fiyat indirimlerini, daha yüksek emisyonlu araçlar üzerindeki vergiler yoluyla finanse etmektedir. Öncü ülkelerden biri olan Norveç de aynı yolu izlemektedir; yüksek emisyonlu araçlar yerine sıfır ve düşük emisyonlu araçları seçmek her zaman daha ekonomiktir. Bu da yüksek emisyonlu arabalar için yüksek vergiler, düşük ve sıfır emisyonlu arabalar için ise daha düşük vergiler içeren otomobil vergi sistemindeki "kirleten öder ilkesi" ile sağlanmaktadır. Uzun bir süredir, çevreyi kirleten araçlara uygulanan vergiler, gelirlerde herhangi bir kayıp olmaksızın sıfır emisyonlu araçlara yönelik teşvikleri kısmen finanse etmiştir.⁶⁰ Norveç'te, emisyonuna sahip tüm yeni otomobiller için satın alma vergisi ağırlıklı olarak, karbondioksit (CO₂) ve NO_x emisyonlarının bir kombinasyonu ile hesaplanmaktadır. Vergi kademeli olup, yüksek emisyonlu büyük arabaları çok daha pahalı hale getirmektedir. Son yıllarda, satın alma vergisi kademeli olarak emisyonlara daha fazla ve araç ağırlığına daha az vurgu yapacak şekilde ayarlanmıştır. Buna ilave olarak, düşük gelir gruplarını daha az kirletici araçları tercih etmeye teşvik etmek için hurda indirimi programları uygulamaya konulabilir. Türkiye'de yerli üretim EA Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu (TOGG) için faizsiz kredi gibi bazı kolaylıklar öngörülmektedir.

⁶⁰ Norsk elbilforening, n.d. Norwegian EV policy. <https://elbil.no/english/norwegian-ev-policy/>

- **Kamu liderliği:** Hükümetler EA pazarını teşvik etmek için proaktif bir rol üstlenmelidir. Bu, iddialı hedefler belirlemeyi, düzenleyici destek sağlamayı ve EA teknolojisini ilerletmek için araştırma ve geliştirmeye yatırım yapmayı gerektirecektir. Norveç örneğinde, Norveç Parlamentosu 2025 yılına kadar satılan tüm yeni otomobillerin sıfır emisyonlu (elektrikli veya hidrojenli) olması yönünde ulusal bir hedef belirlemiştir. 2022 yılı sonu itibariyle Norveç'te kayıtlı araçların yüzde 20'sinden fazlası bataryalı elektrikli (BEA) araçlardır. Bataryalı elektrikli araçlar 2022 yılında yüzde 79,2'lik bir pazar payına sahip olmuştur. Geçişin hızı, politika araçları ve çok çeşitli teşviklerle yakından ilgilidir. Türkiye, Ekim 2021'de Paris İklim Anlaşmasını onaylamış ve 2053 yılına kadar net sıfır karbon emisyonuna ulaşma taahhüdünde bulunmuştur. Bu onayla birlikte, net sıfır karbon emisyonuna yönelik iki farklı yol haritası yayınlanmış ve ulaştırma sektörü elektrifikasyonunun rolü vurgulanmıştır^{61,62}; ancak, ulaştırma sektörünün elektrifikasyonu için kamu tarafından resmi olarak yayınlanmış uzun vadeli bir plan bulunmamaktadır⁶³.
- **Kamu ve filo araçlarının elektrifikasyonu:** Otobüsler gibi toplu taşıma araçlarının ve teslimat ve taksi hizmetleri de dahil olmak üzere ticari filoların elektrifikasyonu, emisyonları önemli ölçüde azaltabilir ve elektrikli araçların benimsenmesini teşvik edebilir. Kamu teşvikleri veya destekleri, filo işletmecilerini elektrikli araçlara geçiş yapmaya teşvik edebilir.
- **Şarj altyapısı:** Menzil kaygısını hafifletmek ve EA'nın yaygın olarak benimsenmesini kolaylaştırmak için güçlü bir şarj altyapısı kurulmalıdır. Kamu, şehir merkezleri, otoyollar ve park tesisleri gibi stratejik yerlerde şarj istasyonlarının konuşlandırılmasına yatırım yapmalıdır. Ayrıca, kamu-özel sektör ortaklıkları, işletmeleri kendi tesislerinde şarj altyapısı kurmaya teşvik edebilir.
- **Aşamalı yaklaşım:** Pazar gelişiminin ilk aşamalarında kritik öneme sahip olsa da, sürdürülebilir ve rekabetçi bir pazar oluşturmak için EA teşvikleri aşamalı olarak kaldırılmalıdır. Bu, yumuşak bir geçişe olanak tanır ve EA pazarının uzun vadede uygulanabilirliğini sağlar.

Hükümetler, bu politikaları birbirleriyle bağlantılı olarak uygulayarak elektrikli mobiliteye geçişi hızlandırabilir ve benimseme engellerine çözüm getirebilir. Bu bütünsel yaklaşım, sürdürülebilir ve rekabetçi bir EA pazarının temelini oluşturmaktadır.

⁶¹ SHURA, 2023. Net Zero 2053: A Roadmap for the Turkish Electricity Sector.

<https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/05/Net-Zero-EN.pdf>

⁶² IPC, n.d. TURKEY'S DECARBONIZATION PATHWAY NET ZERO IN 2050 -EXECUTIVE SUMMARY.

<https://ipc.sabanciuniv.edu/Content/Images/CKeditorImages/20211103-20111678.pdf>

⁶³ ekonomim, 2023. 'Türkiye'nin elektrikli araçlarda 2030 hedefi şarj sistemine bağlı'.

<https://www.ekonomim.com/ekonomi/turkiyenin-elektrikli-araclarda-2030-hedefi-sarj-sistemine-bagli-haberi-693362>

2) E-mobilite odaklı dağıtım şebekesi yatırım stratejilerinin geliştirilmesi

Çeşitli EA entegrasyon senaryolarını ve 2035 yılına kadar şarj rutinlerini dikkate alan şebeke analizine dayanarak, 11 milyon EA'yı barındırmanın dağıtım şebekesine yapılan yatırımda önemli bir artış gerektireceği açıktır. Özellikle, yıllık ortalama %5'lik bir büyüme oranı öngörülen EA dışı yük artışını telafi etmek için halihazırda planlananın ötesinde en az %12'lik bir yatırım artışının gerekli olduğu tahmin edilmektedir. E-mobilite odaklı yatırım ihtiyacının temel nedeni, AG şebekesinin karşılaştığı ve güvenilirlik kriterlerini doğrudan etkileyen kısıtlamalardır. Yatırım gereksinimleri AG sisteminden kaynaklanmakta ve daha sonra OG ve AG trafolarının yanı sıra basamaklı bir şekilde OG hatlarını da etkilemektedir. Bu ihtiyacı karşılamak için, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) ve T.C. Enerji Piyasaları Düzenleme Kurumu (EPDK) gibi politika belirleyici ve düzenleyici kurumlar, e-mobilite ile ilgili sermaye harcamalarını (CapEx) dağıtım sistemi operatörlerine (DSO'lara) tahsis etmelidir. Bu tahsis, DSO'ların güvenilirlik standartlarına ilişkin endişelerini hafifletmeye yardımcı olacaktır. Alternatif olarak, politika belirleyici ve düzenleyici kurumlar, EA'ların artışını karşılamak için güvenilirlik kriterlerini yeniden gözden geçirebilir. Özellikle, e-mobilite ile ilgili yatırımların çoğunun aşırı yük faktörlerinden ziyade güvenilirlik endişelerinden kaynaklandığı göz önüne alındığında, politika belirleyici ve düzenleyici kurumlar, EA'ların şebekeye daha sorunsuz entegrasyonunu kolaylaştırmak için 'Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI)' ve 'Customer Average Interruption Frequency Index (CAIFI)' limitleri gibi güvenilirlik eşiklerini biraz gevşetebilir. Ancak bu sorunun ele alınması, güvenilirlik ile e-mobilite odaklı yatırım harcamaları arasında dikkatli bir denge kurulmasını gerektirmektedir. Bu denge, ETKB ve EPDK gibi politika belirleyiciler tarafından, DSO'lar (veya Elektrik Dağıtım Hizmetleri Derneği (ELDER) gibi koordinasyon dernekleri) ile koordineli olarak optimize edilmelidir. Tamamlayıcı çözüm, her bir trafonun belirli kapasitesinin e-mobilite yüklerine tahsis edilmesi ve böylece DSO'ların bu kapasiteyi yalnızca e-mobilite yükleri için tahsis edebilmesi olabilir. Ticari veya ev gibi diğer yük türleri için kapasite ihtiyacı olması durumunda, yeni trafolar planlanmalıdır. Sonuç olarak, güvenilirlik standartlarını korurken EA'ların şebekeye sorunsuz entegrasyonunu sağlamak için işbirliğine dayalı bir yaklaşım şarttır.

3) Zamana ve bölgeye özgü şarj önlemlerinin geliştirilmesi

A. Zamana göre değişen şarj fiyatlandırması stratejilerinin geliştirilmesi:

Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'daki olgunlaşmış EA piyasalarından alınan dersler, akıllı şarj uygulamalarını kolaylaştırmada elektrik fiyatlandırmasının önemini vurgulamaktadır. Akıllı şarj, özellikle şebeke yükünün düşük olduğu veya yenilenebilir enerji kaynaklarının üretiminin yüksek olduğu dönemlerde elektrikli araçların uygun maliyetli ve şebeke

dostu bir şekilde şarj edilebilmesini ifade eder. Zamana göre değişen fiyatlar/tarifeler, elektrik üretimi ve dağıtımının gerçek maliyetlerine yakın bir şekilde uyum sağlayarak, şarj faaliyetlerini yoğun olmayan saatlere yönlendirebilir ve hem elektrikli araç sahiplerine hem de genel şebeke istikrarına fayda sağlayabilir. Orta ve uzun vadede, gün öncesi, gün içi ve dengeleme piyasaları da dahil olmak üzere toptan elektrik piyasalarının daha da geliştirilmesi, daha dinamik fiyatlandırma yapılarını desteklemek için gereklidir. Daha kısa dengesizlik dönemleri ve arz-talep dinamikleri tarafından yönlendirilen fiyatlandırma mekanizmaları şebekedeki esnekliğin değerini daha iyi yakalayabilir. Bu toptan satış fiyatları daha sonra zamana göre değişen fiyatlandırma planları aracılığıyla tüketici faturalarına yansıtılabilir. Kısa vadede, elektrik piyasasının serbestleşmesi ilerledikçe, elektrikli araçlar için çok zamanlı (ToU) tariflerin/fiyatlandırmaların uygulamaya konulması, EA şarjının doğasında var olan esneklikten faydalanabilir. Türkiye’de halihazırda düzenlenmiş fiyatlandırma çerçevesinin bir parçası olarak ToU tarifeleri bulunmaktadır, ancak e-mobilité yükleri için düzenleyici otoriteler tarafından yalnızca üst ve alt sınır düzenlenmektedir. Şarj fiyatı gün öncesi ve gün içi piyasalar tarafından saatlik çözünürlükte belirlenen maliyeti yansıtan bir fiyat olmalıdır. EA’ya özel tarifeler bu yaklaşımı genişletebilir. Yenilenebilir enerji ve EA’ların giderek daha fazla benimsenmesi ve piyasanın daha rekabetçi hale gelmesiyle birlikte, dinamik fiyatlandırma modellerinin doğal olarak ortaya çıkması muhtemeldir. Bununla birlikte, piyasa dinamikleri dinamik fiyatlandırma yapılarının ortaya çıkmasına yol açmazsa, düzenleyiciler gelecekte daha dinamik EA tarifeleri uygulanmasına ön ayak olabilir. Bu tarifeler, enerji tedarikçilerini yenilikçi fiyatlandırma teklifleri geliştirmeye teşvik edebilir. Her durumda, düzenleyici taraflar EA tarifelerinin EA’ların şebekeye maliyet etkin bir şekilde entegre edilmesindeki etkinliğini yakından izlemelidir. Tarife yapılarının sürekli değerlendirilmesi ve ayarlanması, elektrikli araçların enerji piyasasına başarılı bir şekilde entegrasyonunu sağlamak için gerekli olacaktır. Son olarak, özellikle dağıtım şebekesinin önemli ölçüde aşırı yüklenme yaşayabileceği resmi bayramlardan önceki günlerde aşırı şarjın etkileri azaltılabilir. Yoğun olmayan dönemlerde EA şarjını teşvik etmek ve yoğun zamanlarda caydırmak için bu tür olaylardan önceki günlerde fiyat ayarlamaları yapılabilir.

B. Şebekeleri en etkin şekilde kullanmak üzere çok zamanlı şebeke fiyatlandırmasının uygulanması

Özellikle elektrik şebekelerinin hacimsel kullanım süresi fiyatlandırması, EA’lar gibi dağıtık enerji kaynaklarının mevcut şebeke kapasitesini en verimli şekilde kullanabilmesini sağlamak için temel bir koşuldur. Elektrik şebekelerini kullanmanın maliyetinin sistem puantına (talep ücretleri olarak adlandırılır) dayandığı diğer şebeke tarife tasarımlarıyla karşılaştırıldığında, ağırlıklı olarak hacimsel bir tasarım, EA’lar gibi daha esnek elektrikli son kullanımlar için daha uygundur. Özellikle yüksek kapasiteli şarj işindeki şarj noktası operatörleri

(CPO'lar), örneğin otoyollar boyunca kamuya açık şarj alanlarını işletenler, nadiren meydana gelen puant dönemler için ödeme yapmak yerine (örneğin ulusal bayramlarda, bkz. Bölüm 5.2.) yıl boyunca şarj edilen elektrik hacmine dayalı olarak sınırlandırılmış şebekeleri kullanma maliyetleri ile daha kolay piyasa koşullarıyla karşı karşıya kalabilecektir. Şebeke kullanımına bağlı olarak şebeke tarifesine zamanla değişen bir unsur eklemek, tüm tüketicileri şarj şebeke için en uygun zamanlara kaydirmaya teşvik edecek ve ayrıca enerji dönüşümü ilerledikçe elektrik sistemine eklenen çeşitli diğer elektrikli son kullanımlara daha uygun olacaktır. Zamana göre değişen şebeke tarifeleri, şebeke yatırım ihtiyaçlarının doğru bir şekilde değerlendirilmesine ve aşırı yatırımdan kaçınılmasına (dolayısıyla maliyetlerin tüm kullanıcılar arasında paylaşılmasına) yardımcı olur.

C. Şebekeye daha yüksek oranda elektrikli araç entegre etmek için bölgeye özgü şarj fiyatlandırması stratejilerinin geliştirilmesi: Bulgular, e-mobilitenin benimsenmesinin dağıtım şebekesinde hat/transformatör aşırı yüklenmesi ve belirlenen sınırları aşan voltaj düşüşleri gibi zorluklara yol açabileceğini göstermektedir. Ancak, bu sorunların DSO'lar tarafından hizmet verilen tüm bölgelerde aynı olmadığını vurgulamak çok önemlidir. Aslında, e-mobilite yüklerinden kaynaklanan aşırı yüklenme, belirli bölgelerde daha belirgin olma eğilimindedir ve e-mobilitenin doğal hareketliliğinden yararlanılarak ele alınabilecek bölgesel zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Potansiyel çözümlerden biri, çeşitli uzlaştırma mekanizmaları ve bölgeye özgü fiyatlandırma stratejileri kullanılarak e-mobilite yüklerinin şarj amacıyla daha az sıkışık fiderlere yönlendirilmesidir. Bu tür önlemler dağıtım sistemleri içinde esneklik piyasalarının kurulmasını gerektirmektedir; bu piyasalar esneklik, talep tarafı katılımı seçenekleri, V2G ve taraflar arası olanakların bir araya getirilmesini sağlayacak ve böylece şebeke esnekliğini ve güvenilirliğini artıracaktır. Ancak bu mekanizmaların uygulanması, yerel teknik kısıtların hafifletilmesiyle ilişkili maliyetleri doğru bir şekilde yansıtan fiyatlandırma stratejilerinin benimsenmesini gerektirmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD'de) iletim seviyesinde lokasyonel marjinal fiyatlandırma (LMP) yaygın olmakla birlikte, özellikle dağıtık üretim seviyelerinin yüksek olduğu Kaliforniya gibi eyaletlerde dağıtım lokasyonel marjinal fiyatlandırma (DLMP) kavramı şu anda değerlendirilmektedir. Bu stratejilerin benimsenmesi, elektrikli araçların enerji ekosistemine verimli bir şekilde entegrasyonunu teşvik ederken e-mobilite ile ilgili şebeke zorluklarını etkili bir şekilde yönetebilir.

4) Dağıtım şebekeleri üzerindeki e-mobilite yük etkisini sınırlandırmak için akıllı şarj mekanizmalarının planlanması, geliştirilmesi ve uygulanması

A. Elektrikli araç şarj altyapısının şebekeye entegre planlanması

Şarj altyapısı planlaması, mevcut veya planlanan şebeke kapasitesi haritaları ile eşleştirilen beklenen şarj talebinin ayrıntılı haritasını içermelidir. Bu

yaklaşım, şarj altyapısının şebekeye uygun ve maliyet açısından optimum şekilde konuşlandırılmasını sağlar. DSO'lar, planlama sürecinde bilinçli karar almayı kolaylaştırmak için barındırma kapasitesi haritaları gibi şebeke kapasitesi hakkında bilgi sağlamalıdır. Bu sürece, çalışmadaki pilot bölgelerde gösterildiği gibi bölgesel özellikleri dikkate alacak ülke çapında bir planlama süreci yardımcı olabilir. Hem ulaştırma hem de enerji sektörü paydaşlarını içeren koordineli paydaş süreçleri, erken aşamalarda bilgi alışverişinin ve planlamanın sağlanmasına yardımcı olabilir.

B. Şebeke dostu elektrikli araç gelişimini desteklemek için akıllı teknolojilerin yaygınlaştırılması:

Dünya çapında yapılan çeşitli fiyatlandırma uygulamaları, EA'ların elektrik sistemine entegrasyonunu optimize etmek için akıllı şarj mekanizmalarının entegre edilmesinin etkinliğini ortaya koymuştur. Bu akıllı teknoloji, şarj noktası tüketimine ilişkin verileri ölçen ve ileten gelişmiş ölçüm sistemlerinden⁶⁴, fiyatlandırma sinyallerine veya şarjı kontrol edebilen herhangi bir sinyale yanıt olarak ayarlanabilen otomatik şarj gibi çözümlere kadar uzanmaktadır. Bu nedenle, hem şu anda hem de gelecekte kullanılan şarj altyapısının, hemen kullanılmasa bile akıllı işlevsellik içermesi zorunludur. Politika belirleyiciler, özellikle çok sayıda EA'nın uzun süreler boyunca şarj olmasının beklendiği işyerlerinde ve halka açık şarj istasyonlarında olmak üzere, tüm şarj altyapısı için bu asgari zeka düzeyini zorunlu kılmalıdır. Bu, yoğun saatlerde kullanım üzerinde kontrol sağlar ve optimize edilmiş şarj potansiyelini en üst düzeye çıkarır.

C. Elektrikli araç şarjı ile yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji depolama arasında sinerji oluşturulması:

Enerji ve ulaşım planlamasına yönelik kapsamlı bir yaklaşım, elektrikli araçların şebekeye uygun maliyetli bir şekilde entegre edilmesi ve faydalarından istifade edilmesi için elzemdir. Orta ve uzun vadede, yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etmek ve elektrikli araçlar gibi esnek yükleri etkin bir şekilde yönetmek için detaylı fiyatlandırma yapıları gibi verimli piyasa mekanizmaları gereklidir. Mevcut toptan satış piyasalarının maliyetleri daha iyi yansıtacak şekilde iyileştirilmesi, toptan satış seviyesinde lokasyonel fiyatların oluşturulması, perakende piyasalarının saatlik çözünürlüğe iyileştirilmesi ve son kullanıcılara saatlik elektrik fiyatlarının sağlanması ve son olarak Dağıtım Lokasyonel Marjinal Fiyatlandırma (DLMP) konseptinin oluşturulması, yenilenebilir enerjilerin entegrasyonunu teşvik etmek ve EA'lar gibi elektrikli yüklerin etkin bir şekilde yönetilmesi için orta ve uzun vadeli yapılar arasındadır. Örneğin, güneşli yaz günleri gibi yoğun güneş enerjisi üretim dönemlerinde, fiyat ayarlamaları yoluyla elektrikli araç şarjının teşvik edilmesi, şebeke kullanımını optimize edebilir ve aşırı güneş enerjisi üretiminin neden olduğu voltaj dalgalanmaları gibi teknik kısıtlamaları

⁶⁴ Türkiye'de MASS projesi, Türk akıllı şebeke sisteminin finansman bloğu olarak akıllı sayaçların yurt içinde geliştirilmesini ve 21 DSO'nun tamamında yaygın olarak kullanılmasını hedeflemektedir. Bu proje, e-mobilite yükleri için akıllı şarj mekanizmasına giden yolu açabilir. (<https://www.mass.org.tr/>)

hafifletebilir. Bu sadece EA sahiplerine fayda sağlamakla kalmaz, aynı zamanda dağıtım şebekesinin istikrarını da artırır. Ayrıca, zamanla değişen şebeke fiyatlandırmasının uygulanmasının geliştirilmesi ve mevcut altyapının verimliliğinin en üst düzeye çıkarılması, maliyetli şebeke yatırımlarının ertelenmesi için çok önemlidir. Toptan piyasa fiyatlarıyla bağlantılı zamanla değişen fiyatlandırma planlarına dayanan akıllı elektrikli araç şarj tarifeleri, manuel bildirimler veya otomatik yük yönetimi teknolojileri aracılığıyla tüketicileri en uygun şarj süreleri konusunda bilgilendirebilir. Politika belirleyiciler, dinamik fiyatlandırma mekanizmalarından yararlanarak ve akıllı şarj uygulamalarını daha çok teşvik ederek, EA'ların şebekeye sorunsuz entegrasyonunu kolaylaştırırken daha sürdürülebilir ve esnek bir elektrik ekosistemini teşvik edebilirler. Paydaşlar arasında devam eden işbirliği ve fiyatlandırma stratejilerinin sürekli değerlendirilmesi, dağıtım şebekesi üzerindeki etkisini en aza indirirken EA şebeke entegrasyonunun faydalarını en üst düzeye çıkarmak için kritik önem taşıyacaktır.

D. Eşzamanlı ve aşırı şarjın etkisini yönetmek için yerel otomasyon planlarının geliştirilmesi:

Akıllı şarj mekanizmalarına ek olarak, mevcut ve gelecekteki şarj altyapısının yerel otomasyon yeteneklerini entegre etmesi çok önemlidir. Bu otomasyon özellikleri, dağıtım sistemlerinin güvenilir çalışmasını önemli ölçüde etkileyen eşzamanlı şarj olaylarının kontrol edilmesini ve sınırlandırılmasını sağlar. Örneğin, bir OG hattına bağlı otoyollar boyunca bulunan şarj istasyonları senaryosunu dikkate alalım. Bu kurulumda birden fazla aracın aynı anda şarj edilmesi potansiyel olarak voltaj sorunlarına yol açarak DSO hizmet alanındaki genel elektrik kalitesini etkileyebilir. Yerel otomasyon çözümleri uygulanarak, eş zamanlı şarj olaylarının meydana gelmesi, fiderin kritik yüklemesini aşmamalarını sağlamak için sınırlandırılabilir. Bu proaktif yönetim, teslim edilen elektriğin kabul edilebilir kalite seviyesinin korunmasına yardımcı olarak dağıtım sisteminin istikrarını ve güvenilirliğini korur. Bu tür otomasyon seçeneklerinin şarj altyapısına dahil edilmesi, yalnızca elektrikli araç şarjının verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda şebekenin esnekliğine de katkıda bulunur ve sonuçta elektrikli araçların enerji ekosistemine sorunsuz entegrasyonunu destekler.

5) EA şarjı için yeni iş modellerinin değerlendirilmesi, geliştirilmesi ve uygulanması

EA şarj altyapısında küresel çapta kaydedilen ilerlemeye rağmen, sürdürülebilir bir iş modeli oluşturmak birçok şirket için önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Kamu destek programları, EA şarj pazarının ticarileştirilmesini kolaylaştırmak için çok önemlidir. Kullanım oranları değişmekle birlikte, en iyi durumlarda bile, Avrupa'da %30 civarında kalmaktadır. Norveç ticari operasyonları başarıyla uygularken, daha az olgunlaşmış pazarlar genellikle kamu sektörünün kısmi desteğine

güvenmektedir. Ancak, EA pazarı olgunlaştıkça, kamu sektörü desteğinin azalması ve kendi kendine sürdürülebilirlik ihtiyacının vurgulanması beklenmektedir. Türkiye’de EA şarj altyapısına yönelik destek politikaları, ticari operasyonlara geçişe odaklanmalı ve kullanımdaki EA sayısına bağlı olarak destekler kademeli olarak azaltılmalıdır. Ayrıca, kurulum maliyeti desteklerinin devam eden işletme maliyetlerinden ayrılması ticari uygulanabilirliği teşvik etmektedir. Karar alma süreçlerini bilgilendirmek ve verimliliği artırmak için şarj noktalarının kullanım verilerinin izlenmesi ve kamuyla paylaşılması zorunludur. Düşük kapasiteli faktör konumlarıyla başa çıkmak için, her iki sektörden kaynakların ortak yatırımına olanak tanıyan kamu-özel ortak finansman modelleri araştırılmalıdır. Ayrıca, bölgeler arasında asgari EA şarj altyapısı kapsamını sağlamak için potansiyel olarak kamu ihaleleri yoluyla elektrik şebekesi şirketleri aracılığıyla işletme düşünülebilir. Batarya destekli şarj cihazları, enerji depolama olanağı sunarak talebe göre yük kaydırma ve puant saatlerde enerjinin kullanılmasına olanak sağlayarak, sistem esnekliği sağlar. Tüm bu stratejiler EA şarj altyapısının verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır.

NOTLAR

NOTLAR

İstanbul Politikalar Merkezi

İstanbul Politikalar Merkez (İPM) demokratikleşmeden iklim değişikliğine, transatlantik ilişkilerden çatışma analizi ve çözümüne kadar, önemli siyasal ve sosyal konularda uzmanlığa sahip, çalışmalarını küresel düzeyde sürdüren bir politika araştırma kuruluşudur. İPM araştırma çalışmalarını üç ana başlık altında yürütmektedir: İPM-Sabancı Üniversitesi-Stiftung Mercator Girişimi, Demokratikleşme ve Kurumsal Reform, Çatışma Çözümü ve Arabuluculuk. 2001 yılından bu yana İPM, karar alıcılara, kanaat önderlerine ve paydaşlara uzmanlık alanına giren konularda tarafsız analiz ve yenilikçi politika önerilerinde bulunmaktadır.

European Climate Foundation

European Climate Foundation (ECF) Avrupa'nın düşük karbonlu bir toplum haline gelmesine yardımcı olabilmek ve iklim değişikliğiyle mücadelede uluslararası alanda güçlü bir lider rolü oynayabilmek amacıyla kurulmuştur. ECF, her türlü ideolojiden uzak kalarak düşük karbonlu bir topluma geçişin "nasıl" olacağı konusunu odağına alır. Ortaklarıyla yaptığı iş birliği kapsamında ECF, bu geçişte kilit rol oynayacak patikaları ve farklı alternatiflerin sonuçlarını ortaya çıkararak bu tartışmalara katkı sağlamayı hedefler.

Agora Energiewende

Agora Energiewende; Özellikle Almanya ve Avrupa olmak üzere tüm dünyada temiz enerjiye başarılı bir geçiş yapılmasını sağlamak amacıyla veri odaklı, politik açıdan uygulanabilir stratejiler geliştirir. Bir düşünce kuruluşu ve politika laboratuvarı olan Agora; yapıcı bir fikir alışverişi sağlarken siyaset, iş ve akademi dünyasından paydaşlarla da bilgi birikimini paylaşmayı hedefler. Kâr amacı gütmeyen ve bağışlarla finanse edilen Agora, kendini kurumsal ve siyasi çıkarılara değil, iklim değişikliğiyle mücadeleye adanmıştır.



SHURA
ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ MERKEZİ

Bankalar Caddesi, No:2, Minerva Han,
Kat:3, 34420 Karaköy/İstanbul
T: 0 (212) 292 49 39
E-posta: info@shura.org.tr
www.shura.org.tr

SHURA Kurucu Ortakları

İPM | IPC İSTANBUL POLİTİKALAR MERKEZİ
SABANCI ÜNİVERSİTESİ KAMPUSU
İSTANBUL POLICY CENTER
AT SAKAKLI ÜNİVERSİTESİ

