

**TÜRKİYE’DE ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ORTA GERİLİM DAĞITIM
ŞEBEKESİNE ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**EVALUATION OF ELECTRIC VEHICLES IMPACT ON MEDIUM VOLTAGE
DISTRIBUTION SYSTEM IN TURKEY**

SEYİT CEM YILMAZ

Prof. Dr. AYNUR ERAY

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2021

Miniş'e, Zeynep'e ve Ponyo'ya

ÖZET

Türkiye’de Elektrikli Araçların Orta Gerilim Dağıtım Şebekesine Etkisinin Değerlendirilmesi

Seyit Cem YILMAZ

Yüksek Lisans, Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aynur ERAY

Şubat 2021, 105 sayfa

Bu çalışmada Türkiye’deki büyük şehirlerden birinde ilgili dağıtım bölgesi SCADA verileri Digsilent PowerFactory yazılımında kullanılarak 36 adet güç trafosu içeren elektrik dağıtım şebekesi için, elektrikli araçların orta gerilim dağıtım şebekesine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla maksimum yüklenmenin gözlemlendiği gün için, 15 dakikalık çözünürlükte yük karakteristiği oluşturulup bu yük karakteristiği, tüm fiderlere dağıtılarak YG/OG güç trafolarından OG/AG dağıtım trafolarına kadar dağıtım şebekesi modellenmiştir. Yazılım ile gerçekleştirilen yük akış analizi sonucunda, maksimum yüklenme durumları, maksimum gerilim düşümü ve EA’lardan reaktif destek alındığı durumda reaktif güç ve güç faktörü değişimi incelenerek 2025 ve 2030 yılları için, rastgele şarj, parkta şarj ve gece tarifesi senaryoları ile

- elektrikli araç sayısının %5 - %37 aralığında değiştirilen yaygınlaşma oranları
- şarj istasyonlarının fidere dağılmış ve fiderin güç trafosuna en uzak noktasında bağlanmış olduğu durumlar
- elektrikli araçların kontrollü şarj kapsamında reaktif katkı verdiği durumlar

incelenmiştir. Çalışma sonucunda EA'ların %37 yaygınlaşma oranında dahi orta gerilim dağıtım şebekesine olumsuz etkilerinin son derece sınırlı olacağı ve gece şarj uygulaması ile şebekeye reaktif güç desteği sağlayarak elektrikli araçların mevcut orta gerilim dağıtım şebekesine olumlu yönde katkı verebileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Dağıtım Şebekesi Etkisi, Reaktif Destek, Gerilim Düşümü, Maksimum Yükleme

ABSTRACT

Evaluation of Electric Vehicles Impact on Medium Voltage Distribution System in Turkey

Seyit Cem YILMAZ

Master of Science, Department of Renewable Energy

Supervisor: Prof. Dr. Aynur ERAY

February 2021, 105 pages

In one of the major cities in Turkey, the impacts of electric vehicles were examined on medium voltage distribution grid that includes 36 power transformers by using Digsilent PowerFactory software with SCADA data. For this purpose, the distribution grid from HV / MV power transformers to MV / LV distribution transformers is modeled by creating a 15-minute resolution load characteristic for the day when the maximum load is observed and this load characteristic is distributed to all feeders. As a result of the load flow analysis performed with the software, maximum loading, maximum voltage drop and the reactive power and power factor change in the case of reactive support from EVs were examined for the years 2025 and 2030 with random charging, charging at parking and night tariff scenarios. It has also been examined for

- penetration rates varied between 5% - 37% of the number of electric vehicles
- situations that charging stations are distributed over the feeder and that EVs are connected to the power transformer at the furthest point

- situations that electric vehicles contribute reactive power within the scope of controlled charging

As a result of the study, it has been shown that even at 37% penetration rate, the negative effects of EVs on the medium voltage distribution grid will be extremely small and electric vehicles can contribute positively to the existing medium voltage distribution grid by providing reactive power support with night charging.

Keywords: Electric Vehicles, Distribution Grid Impact, Voltage Drop, Maximum Loading, Reactive Support

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans dönemim boyunca bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, bana her türlü desteği veren, tezim boyunca benim doğru hedefe varmamı sağlayan, kimi zaman benimle birlikte sabahlara kadar çalışan özverili ve değerli hocam Prof. Dr. Aynur ERAY'a teşekkür ederim.

Değerli yorumlarıyla tezimi güzelleştiren ve zamanlarını hiç esirgmeden bu tez için ayıran değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR'e, Doç. Dr. Merih AYDINALP KÖKSAL'a, Doç. Dr. Murat GÖL'e ve Doç. Dr. Akın BACIOĞLU'na teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tezdeki analizlerimde bana yardımcı olan sevgili arkadaşım Nebi ERDAĞISTANLI'ya, yine aynı şekilde bildiklerini hiç esirgemeyen sevgili arkadaşım Mehmet KOÇ'a ve sektördeki deneyimi ve bilgi birikimi ile hep yolumu aydınlatan Sayın Erkut CEBECİ'ye teşekkürü borç bilirim.

En büyük teşekkürü; hiçbir zaman beni yalnız bırakmayan, her zaman desteklerini hissettiğim, benim mutluluğumla mutlu olan ve onların mutluluğuyla da benim mutlu olduğum canım aileme; eşim Mine ÖZÇELİK YILMAZ'a, kardeşim Zeynep YILMAZ'a, annem Hülya YILMAZ'a ve babam Hasan Paşa YILMAZ'a ederim.

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL KESİM	14
2.1. Elektrikli Araçlar ve Taşıttan Şebekeye Enerji Aktarımı	14
2.2. Elektrik Şebekeleri ve Temel Kavramlar	20
2.3. Elektrikli Araçlardan Şebekeye Enerji Aktarımının İletim Düzeyinde Ekonomik Katkısı	28
3. METODOLOJİ	31
3.1. Dağıtım Şebekesinin Modellenmesi	31
3.2. Elektrikli Araç Sayılarının Belirlenmesi	37
3.3. Elektrikli Araç Yüklerinin Modellenmesi	39
3.4. Senaryoların Belirlenmesi	41
3.5. Dağıtım Şebekesinin Mevcut Durumu	44
4. KONTROLSÜZ ŞARJ DURUMUNDA ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞEBEKEYE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	48
4.1. 2025 Yılı İçin Öngörüler	48
4.2. 2030 Yılı İçin Öngörüler	56
5. KONTROLLÜ ŞARJ DURUMUNDA ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞEBEKEYE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	65
5.1. 2025 Yılı İçin Öngörüler	65

5.2. 2030 Yılı İçin ngrler	73
5.2.1. Gece Tarifesi Stratejisi ile Reaktif Katkı	81
5.2.2. Elektrikli Araç Sayısının Etkisi	84
5.2.3. Şarj Noktası Uzaklığının Etkisi	90
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	92
7. KAYNAKLAR.....	95
EKLER	100
EK 1 – Gün ncesi Piyasası	100
EK 2 - Tez alıŐması Orjinallik Raporu	104
ÖZGEÇMİŐ	105

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Küresel Ölçekte Yollardaki Elektrikli Otomobil Sayısı (2013-2019) [12].....	5
Şekil 2. 23 kWh Batarya Kapasitesine Sahip EA'nın AC Şarj Gücüne Bağlı Olarak Şarj Süreleri	18
Şekil 3. Sinüsel Denge Durumunda R, L, ve C Elemanlarındaki Gerilim ve Akım Arasındaki İlişki [43]	21
Şekil 4. Güç Üçgeni	23
Şekil 5. Geleneksel Elektrik Şebekesi [46].....	24
Şekil 6. İletim Hattının Eşdeğer Devresi [44].....	24
Şekil 7. Digsilent PowerFactory Programında Bu Tez Kapsamında Çizilmiş Tek-Hat Şemasının Bir Kesimi.....	27
Şekil 8. Digsilent PowerFactory Programında Bu Tez Kapsamında Modellenen Bir Güç Trafosu	27
Şekil 9. Gün Öncesi Piyasası Süreçleri [49]	29
Şekil 10. TR-1 Yük Profili	33
Şekil 11. TR-2 Yük Profili	33
Şekil 12. TR-27 Yük Profili	34
Şekil 13. TR-33 Yük Profili	34
Şekil 14. TR-34 Yük Profili	35
Şekil 15. TR-36 Yük Profili	35
Şekil 16. Rastgele Şarj Stratejisi ile EA Yük Profili.....	42
Şekil 17. Parkta Şarj Stratejisi ile EA Yük Profili	43
Şekil 18. Gece Tarifesi Stratejisi ile EA Yük Profili	43
Şekil 19. TR-1 2025 Maksimum Yüklenme Grafiği.....	50
Şekil 20. TR-2 2025 Maksimum Yüklenme Grafiği.....	50
Şekil 21. TR-27 2025 Maksimum Yüklenme Grafiği	51
Şekil 22. TR-33 2025 Maksimum Yüklenme Grafiği	51
Şekil 23. TR-34 2025 Maksimum Yüklenme Grafiği.....	52
Şekil 24. TR-36 2025 Maksimum Yüklenme Grafiği.....	52
Şekil 25. TR-1 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	53
Şekil 26. TR-2 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	53
Şekil 27. TR-27 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	54
Şekil 28. TR-33 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	54
Şekil 29. TR-34 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	55
Şekil 30. TR-36 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	55
Şekil 31. TR-1 2030 Maksimum Yüklenme Grafiği.....	57
Şekil 32. TR-2 2030 Maksimum Yüklenme Grafiği.....	57
Şekil 33. TR-27 2030 Maksimum Yüklenme Grafiği	58
Şekil 34. TR-33 2030 Maksimum Yüklenme Grafiği	58

Şekil 35. TR-34 2030 Maksimum Yüklenme Grafiği	59
Şekil 36. TR-36 2030 Maksimum Yüklenme Grafiği	59
Şekil 37. TR-1 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	60
Şekil 38. TR-2 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	60
Şekil 39. TR-27 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	61
Şekil 40. TR-33 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	61
Şekil 41. TR-34 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	62
Şekil 42. TR-36 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	62
Şekil 43. TR-1 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	67
Şekil 44. TR-2 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	67
Şekil 45. TR-27 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	68
Şekil 46. TR-33 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	68
Şekil 47. TR-34 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	69
Şekil 48. TR-36 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	69
Şekil 49. TR-1 2025 Güç Faktörü Grafiği.....	70
Şekil 50. TR-2 2025 Güç Faktörü Grafiği.....	70
Şekil 51. TR-27 2025 Güç Faktörü Grafiği.....	71
Şekil 52. TR-33 2025 Güç Faktörü Grafiği.....	71
Şekil 53. TR-34 2025 Güç Faktörü Grafiği.....	72
Şekil 54. TR-36 2025 Güç Faktörü Grafiği.....	72
Şekil 55. TR-1 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	74
Şekil 56. TR-2 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	74
Şekil 57. TR-27 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	75
Şekil 58. TR-33 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	75
Şekil 59. TR-34 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	76
Şekil 60. TR-36 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	76
Şekil 61. TR-1 2030 Güç Faktörü Grafiği.....	77
Şekil 62. TR-2 2030 Güç Faktörü Grafiği.....	77
Şekil 63. TR-27 2030 Güç Faktörü Grafiği.....	78
Şekil 64. TR-33 2030 Güç Faktörü Grafiği.....	78
Şekil 65. TR-34 2030 Güç Faktörü Grafiği.....	79
Şekil 66. TR-36 2030 Güç Faktörü Grafiği.....	79
Şekil 67. TR-27 2030 Gece Tarifesi ile Maksimum Yüklenme Grafiği.....	82
Şekil 68. TR-27 2030 Gece Tarifesi ile Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği.....	82
Şekil 69. TR-27 2030 Gece Tarifesi ile Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	83
Şekil 70. TR-27 2030 Gece Tarifesi ile Güç Faktörü Grafiği.....	83
Şekil 71. TR-27 2030 EA Sayısı 2,7M'a Çıktığında Maksimum Yüklenme Grafiği.....	86
Şekil 72. TR-27 2030 EA Sayısı 2,7M'a Çıktığında Gerilim Düşümü Grafiği.....	86
Şekil 73. TR-27 2030 EA Sayısı 2,7M Olduğunda Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği.....	87

Şekil 74. TR-27 2030 EA Sayısı 2,7M'a Çıktığında Güç Faktörü Grafiği	87
Şekil 75. TR-27 2030 EA Sayısı 3,4M'a Çıktığında Maksimum Yüklenme Grafiği	88
Şekil 76. TR-27 2030 EA Sayısı 3,4M'a Çıktığında Gerilim Düşümü Grafiği.....	88
Şekil 77. TR-27 2030 EA Sayısı 3,4M Olduğunda Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği	89
Şekil 78. TR-27 2030 EA Sayısı 3,4M'a Çıktığında Güç Faktörü Grafiği	89
Şekil 79. TR-27 için 2030 3,4M EA Yaygınlaşmasında EA'lar Fider Sonundan Bağlanırsa Gerilim Düşümü Grafiği	90
Şekil 80. Piyasa Takas Fiyatı Arz-Talep Eğrisi.....	101
Şekil 81. 08.11.2019 PTF Değerleri [59]	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Kuzey Amerika'da Kullanılan Elektrikli Araç Şarj Güç Seviyeleri [40]	17
Çizelge 2. Avrupa'da ve Ülkemizde Kullanılan Farklı Şarj Güç Seviyeleri [42]	18
Çizelge 3. YG/OG Güç Trafolarının OG Taraf Aktif Güç Maksimum Talep Tarih ve Değerleri	36
Çizelge 4. Elektrikli Araç Hesaplama Yöntemi.....	38
Çizelge 5. Güç Trafosuna Bağlanacak EA Sayısı	40
Çizelge 6. Elektrikli Araç Seyahat Profilini Oluşturan 5 Gösterge [53].....	41
Çizelge 7. Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Analizler ve Açıklandığı Kesimler	46
Çizelge 8. Güç Trafoları Yük Akış Analizi Sonuçları.....	47
Çizelge 9. Kontrolsüz Şarj Durumunda EA Yaygınlaşması Analiz Sonuçları	64
Çizelge 10. Mevcut Senaryolarla EA'lardan Reaktif Katkı Alınması Analiz Sonuçları	80
Çizelge 11. Gece Tarifesi Senaryosu Eklendiği Durum İçin Analiz Sonuçları	81
Çizelge 12. EA Sayısı Artışına Bağlı Analiz Sonuçları	85
Çizelge 13. EA'ların Fider Sonunda Şarj Olduğu (En Kötü Durum İçin) Gerilim Düşümü	91
Çizelge 14. Örnek Piyasa Takas Fiyatı Hesabı.....	100
Çizelge 15. Sistem Marjinal Fiyatının Hesaplanması Örneği.....	101
Çizelge 16. YAL ve YAT Teklifleri Örneği [59]	102

SİMGELER VE KISALTMALAR

EA	Elektrikli araç
İYM	İçten yanmalı motor
V2G	Araçtan şebekeye (vehicle to grid)
BEV	Bataryalı elektrikli araç (battery electric vehicle)
PHEV	Fişli hibrid elektrikli araç (plug-in hybrid electric vehicle)
PEV	Fişli elektrikli araç (plug-in electric vehicle)
EV	Elektrikli araç
ESS	Enerji depolama sistemleri (energy storage system)
DG	Dağıtık üretim (distributed generation)
GÖP	Gün Öncesi Piyasası
GİP	Gün İçi Piyasası
DGP	Dengeleme Güç Piyasası
WTW	Kaynaktan tekerleğe (well-to-wheels)
YG	Yüksek gerilim (high voltage)
OG	Orta gerilim (medium voltage)
AG	Alçak gerilim (low voltage)

1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar, petrole olan bağımlılığı azaltmak, şehirlerdeki hava kirliliğini önlemek ve CO₂ emisyonlarını azaltmak gibi birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması ve beraberinde ona uygun şarj altyapıları ile haberleşme teknolojilerinin bu sistemlere entegrasyonu ile birlikte, elektrikli araçların gelecekte başka avantajları da olması beklenmektedir.

Yeniden şarj edilebilir bir bataryadan güç alan ve elektrikli aktarım organıyla çalışan araçlar, elektrikli araç olarak tanımlanmaktadır [1]. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta elektrikli aktarım organlarıdır. Elektrikli aracı (EA), aktarım organlarının mekanik olduğu geleneksel bir fosil yakıtlı araçtan ayıran nokta budur. Ayrıca, geleneksel içten yanmalı motorlar (İYM) fosil yakıtlara ihtiyaç duyarken; EA'nın bataryası, geceleri evlerde, çalışma saatlerinde işyerlerinde ve kamuya açık veya ticari olarak sahip olunan şarj istasyonlarında, elektrik şebekesi sisteminden şarj edilebilmektedir [1].

Günümüzün en yeni teknolojiye sahip vasıtalarının elektrikli araçlar olduğu düşünülecek olursa, aslında ilk arabaların da 19. yüzyıl sonlarında üretilen elektrikli arabalar olduğu bilgisi son derece ilginçtir [2]. Elektrikle çalışan araçların geçmişi, elektrik motorunun icadına uzanmaktadır ve şarj edilemeyen pillerle çalışan ilk elektrikli araba prototipi, 1832 ve 1839 yılları arasında, Robert Anderson tarafından icat edilmiştir [3]. Bu tarihten sonra elektrikle çalışan farklı araba prototipleri icat edilse de, verimli elektrik motoru ve pratik şarj edilebilir batarya eksikliği nedeniyle, hiçbirinin gelişmesi gerçekleşmemiştir. Werner Siemens, Antonio Pacinotti ve Zénobe Gramme'nin yüksek verimli DC elektrik motoru geliştirmesi [3], 1859'da Gaston Planté tarafından ilk şarj edilebilir kurşun-asit bataryanın icat edilmesi ile EA'lar, Camille Alphonse Faure tarafından 1881 yılında pazarlanabilir ürün haline getirilmiştir [4]. DC elektrik motorunun ve şarj edilebilir bataryaların teknolojik gelişimi, EA endüstrisine büyük bir destek sağlamıştır. Örneğin New York City'de piyasaya sürülen ilk ticari elektrikli araç 1897 tarihinde yola çıkan elektrikli taksi iken, 3 yıl içinde, karayolu taşıtları içinde %28'lik payla en çok tercih edilen araç olmuştur [5]. 1908'de, ABD'li iş insanı ve mucit Henry Ford tarafından Ford Model T gibi benzinle çalışan araçların piyasaya sürülmesi [1] ile, EA'ların gelişimi büyük bir zorlukla karşılaşmıştır. 1912'de Charles Kettering tarafından elektrikli marş motorunun icadı [2], benzinle çalışan araçları çalıştırmak için el krankına olan ihtiyacı

ortadan kaldırdı. Buna ek olarak; ucuz benzinin varlığı, elektrikli araçlara kıyasla benzinli araçların kullanım maliyetinin daha düşük olmasına neden olmuştur. Öte yandan, elektrikli araçların nispeten daha kısa mesafelere gidebiliyor olması ve yalnızca sınırlı şarj istasyonlarının bulunması nedeniyle, benzinle çalışan araçlar daha fazla kabul görmüş, elektrikli araçlar popülerliğini yitirmiş ve 1935 yılı civarında, yolda tek bir elektrikli araç kalmamıştı [2].

Günümüzde durum, elektrikli araçlar lehine tekrar değişmiş, bataryalar, motor ve güç elektroniği teknolojilerinde onlarca yıllık araştırma ve geliştirme ile iklim değişikliği kaygıları birleşince; elektrikli araçlar tekrar ön plana çıkmıştır. Artık 515 km menzile sahip ve batarya kapasitesinin %80'inin, 200 kW maksimum güçte çalışan süper şarj istasyonları kullanıldığında, 38 dakikada şarj olabildiği binek elektrikli araçlar bulunmaktadır [6].

Elektrikli araçlar, geleneksel fosil yakıtlı araçlara göre sayısız avantaja sahiptir. Bunlar arasında en öne çıkanlar; sürdürülebilirlik, verimlilik, rahatlık ve ekonomidir:

- Sürdürülebilirlikten başlamak gerekirse; bilindiği gibi, elektrikli araçlara geçmenin ana sebebi, egzoz emisyonlarının olmamasıdır ve bu şehirlerimizde yaşanabilirliği ve hava kalitesini iyileştirir. Elektrikli Araçlar, enerji kaynaklarını çeşitlendirerek enerji güvenliğini artırabilir, yeni gelişmiş endüstriler yaratarak ekonomik büyümeyi teşvik edebilir ve en önemlisi egzoz emisyonlarını en aza indirerek çevreyi koruyabilir [7]. Ayrıca; elektrikli araçlar rüzgâr türbinleri veya fotovoltaik panelleri gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrikle şarj edildiğinde, elektrik üretiminden kaynaklanan emisyonlar sadece azalmış olmaz, aynı zamanda sıfıra inmiş olur. Yenilenebilir enerjinin genişlemesinin önündeki ana darboğaz, üretimdeki değişkenlik ve enerji depolama gereksinimi olduğundan, EA'lar, yenilenebilir enerjiye geçişte önemli bir rol oynamaktadır. EA'lar; esasen tekerlekli büyük bir batarya olduğundan, gündüz güneş enerjisi ve gece rüzgâr enerjisi ile şarj edilerek fazla yenilenebilir enerjiyi depolamak için kullanılabilir. Gelecekte, EA'nın başarabileceği, "araçtan şebekeye" veya "V2G" olarak adlandırılan önemli bir işlev daha bulunmaktadır: Şebeke en yoğun zamanda aşırı yüklendiğinde, EA'lar şebekeyi desteklemek için bataryalarındaki güçlerini şebekeye aktarabilir [2].

- Verimlilik konusunda bahsedildiğinde karşımıza çıkan ve elektrikli araçlarla fosil yakıtlı araçları; sera gazı emisyonları, enerji verimliliği ile maliyetler açısından kıyaslarken sıkça kullanılan “kaynaktan tekerleğe” (well-to-wheels, WTW) terimini açıklamak gerekir. Kaynaktan tekerleğe verimlilik, yakıt kaynağından araçların tekerleklerine kadar tüm enerji kayıplarını dikkate alan özel yaşam döngüsü değerlendirmesidir [8]. Kaynaktan tekerleğe analiz, karbon ayak izleri de dâhil olmak üzere toplam enerji tüketimini, enerji dönüşüm verimliliğini ve emisyonları değerlendirmek için kullanılır. Literatürden alınan ve 2015 yılında binek araçlardaki “yeni Avrupa sürüş karakteristiği” ne göre yapılan hesaplamalara göre; direkt enjeksiyon kıvılcım ateşlemeli (DISI: Direct injection spark ignition) benzinli araçta, 100 km yol almak için kaynaktan tekerleğe yaklaşık 213 MJ enerji harcanırken, bataryalı elektrikli araçta, elektrik, doğal gaz ve kömürdeki oranların Avrupa ortalama tüketiminde kullanıldığı durumda, harcanan enerji 133 MJ civarındadır [8]. Diğer bir deyişle, elektrikli araç, benzinli araca göre %38 daha az enerji harcamaktadır. Elektrikli araçlarda verimliliğin yüksek olması nedeniyle, şebeke elektriğinin çoğunlukla fosil yakıtlarla sağlanması durumunda bile, EA kullanımında fosil yakıtlı araca göre, daha az sera gazı emisyonu olacağı çıkarımı yapılabilir [9]. Ayrıca, emisyonlar şebekeyi besleyen üretim santralleri tarafından yapıldığından, kömür veya doğalgaz gibi bir elektrik santralinden kaynaklanan emisyonları yönetmek daha kolaydır. Bu nedenle EA’lar, içten yanmalı motora sahip araçlara göre daha sağlıklı ve çevre dostudur.
- EA’ların önemli bir avantajı da ciddi şekilde kolay ve kullanışlı olmalarıdır. EA’ların vitesleri yoktur ve geleneksel arabalara göre sürmek çok daha kolaydır. İçten yanmalı motor ve mekanik aktarma organlarının olmaması, EA’ları özellikle düşük hızlarda içten yanmalı motorlu araçlara göre çok daha sessiz hale getirmektedir. Ayrıca; EA’lar, daha verimli güç aktarma organları ve elektrikli motorların kullanımından dolayı içten yanmalı motorlu araçlardan daha iyi bir performans göstermektedir [7]. EA’lar, konvansiyonel arabalara kıyasla çok daha az sayıda bileşene ve daha basit bir aktarma organına sahip olduğundan, çok daha az bakım gerektirir.

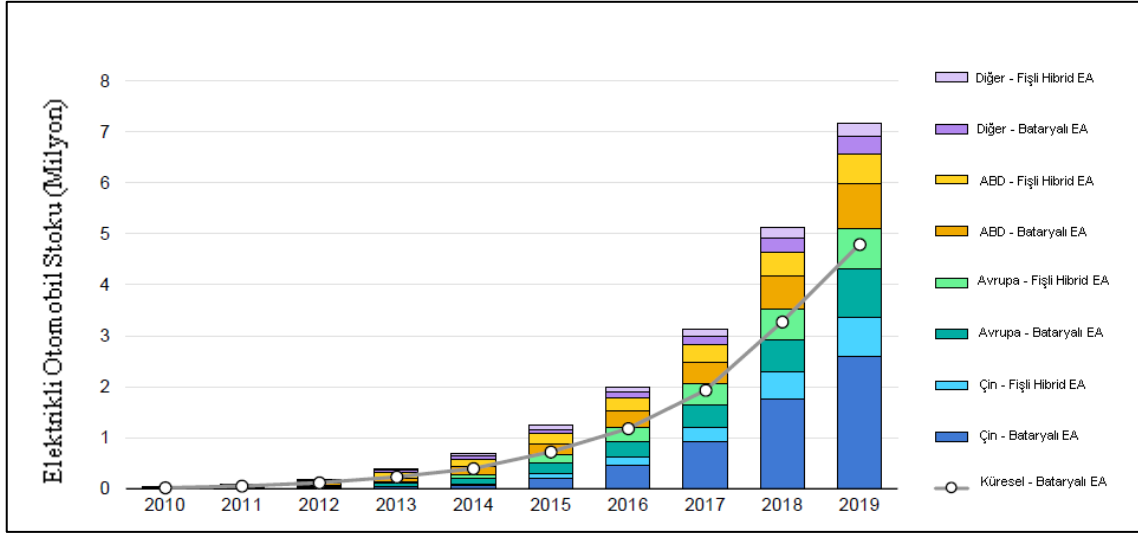
- EA'lar ekonomik açıdan kıyaslandığında, bir elektrikli otomobilin satın alma fiyatı geleneksel bir benzinli arabadan daha yüksek olsa da, otomobillerin kullanım ömrü boyunca toplam maliyeti elektrikli otomobil için yakın gelecekte kesinlikle daha düşük olacaktır. Daha düşük bakım maliyetleri, daha düşük vergiler, daha ucuz yakıt ve devletten gelen sübvansiyonlar nedeniyle EA'ların toplam sahip olma maliyeti (total cost of ownership – TCO) 2030'lu yıllarda İYM araçlardan çok daha düşük olmaktadır [10], [11].

Elektrikli araçların pek çok avantajından bahsedilmiş olsa da, EA'ları bekleyen birçok teknik ve ekonomik zorluk da bulunmaktadır. Aşılmayı bekleyen üç önemli zorluktan ilki, bir yakıt deposunu doldurmak için gereken dakikalar mertebesindeki süre ile kıyaslandığında, EA'ların birkaç saatlik uzun şarj sürelerine ihtiyaç duymasıdır. İkincisi, bugün halka açık yerlerde ve otoyollarda, sınırlı sayıda şarj altyapısı bulunmasıdır. Son olarak, bataryalarının maliyeti hala yüksektir ve bu da batarya boyutunu, sürüş aralığını ve şu anda piyasada bulunan elektrikli arabaların maliyetini etkilemektedir. Dolayısıyla, EA'ların hem teknik hem de ekonomik açıdan iyileştirilmesi gereken muazzam bir potansiyeli vardır.

Sonuç olarak, EA'lar; batarya, motor ve güç elektroniği teknolojisindeki büyük sıçramalar nedeniyle, 100 yıl aradan sonra bir geri dönüş yapmıştır. EA'nın temel avantajları; sıfır egzoz emisyonu, onları güneş ve rüzgâr enerjisinden sürdürülebilir bir şekilde güçlendirme imkânı, üstün verimlilikleri, düşük kaynaktan tekerleğe emisyonları, sürüş ve bakım kolaylığı ile düşük toplam net maliyetleridir.

IEA tarafından yayımlanan Global EV Outlook [12] Raporu'ndaki verilere göre elektrikli otomobil satışları 2019'da küresel olarak 2,1 milyonu aşmış ve zaten rekor sayıda elektrikli otomobilin satıldığı 2018'i geride bırakmıştır, **Şekil 1**. Hafif hizmet tipi binek araç grubundaki bataryalı veya fişe takılan hibrid otomobil stoku dünya çapında 7,2 milyona yükselmiştir. 2019 yılında küresel otomobil satışlarının %2,6'sını ve küresel otomobil stokunun yaklaşık %1'ini oluşturan elektrikli otomobiller, bir önceki yıla göre %40 artış kaydetmiştir. İki ya da üç tekerlekli araçların, otobüslerin ve kamyonların elektrifikasyonunda teknolojik ilerleme oldukça ve bunlar için pazar büyüdükçe, elektrikli araçlar önemli ölçüde genişlemektedir. Elektrikli araçlarla ilgili politika

duyuruları, son yıllarda büyük araç pazarlarında elektrikli araçların piyasaya sürülmesini teşvik etmede kritik önem taşımaktadır.



Şekil 1. Küresel Ölçekte Yollardaki Elektrikli Otomobil Sayısı (2013-2019) [12]

Covid-19 salgını, genel binek otomobil pazarından daha az ölçüde olsa da, küresel elektrikli araç pazarlarını etkilemektedir. Ocak-Nisan 2020 dönemindeki otomobil satış verilerine dayanarak, mevcut tahminler binek otomobil pazarının 2019 yılına göre yıl boyunca % 15 daralacağı, binek ve ticari hafif hizmet araçlarının elektrikli satışlarının ise 2019 seviyelerinde devam edeceği yönündedir. Genel olarak, elektrikli otomobil satışlarının 2020 yılında küresel otomobil satışlarının yaklaşık %3'ünü oluşturacağı tahmin edilmektedir. Bu tahmin, özellikle Çin ve Avrupa'da destekleyici politikalar sebebiyle iyimser bir tahmin olabilir. Her iki pazarda da ulusal ve yerel sübvansiyon programları bulunmaktadır. Çin kısa süre önce sübvansiyon programını 2022'ye kadar uzatmış ve Çin ile Avrupa, yakın zamanda CO₂ emisyon standartlarını güçlendirmiş ve genişletmiştir. Son olarak, Covid-19 kriziyle mücadeleye yönelik, kurtarma önlemlerinin genel olarak araç verimliliğine ve özelde elektrifikasyona odaklanmaya devam edeceğine dair gelişmeler vardır [12].

Elektrikli araçların yaygınlaşması, bu araçların, özellikle kontrolsüz bir şekilde, şarj olurken elektrik şebekesini nasıl etkileyeceği sorusunu da beraberinde getirmektedir. Çok sayıda elektrikli aracın elektrik dağıtım şebekesine bağlanması,

- ***güç talebinde artış:*** Çok sayıda EA'nın, şarj olmak için şebekeye bağlanması elektrik enerji talebinin artmasına neden olacağından, dağıtım şebekesi altyapısı aynı hızla geliştirilmezse, şebekelerde güç talebini karşılamada problemler olabilir.
- ***elektriksel ekipmanların aşırı yüklenmesi:*** Güç talebini karşılamaya yetse bile ekipmanların yüksek oranda yüklenmesi arızalanma ihtimalini ve yaşlanmayı artırmakta, dolayısıyla kullanım ömrünü kısaltmaktadır.
- ***gerilim düşümü, harmonik bozulmalar:*** Elektrik şebekelerinde değişken güç akışından kaynaklanan gerilim düşümü ve harmonik bozulmalar da sıklıkla görülen güç kalitesi problemleridir.
- ***teknik kayıpların artması:*** Güç kalitesi sorunlarının oluşması, şebeke hattındaki transformatörler/trafo ve kablolarda aşırı ısınmaya yol açabileceğinden, şebekeye bağlı cihazların arızalanması veya devre dışı kalmasına ve teknik kayıpların artmasını yol açacaktır.
- ***faz dengesizliği:*** Alçak gerilim şebekesinde meydana gelebilecek bu durum fazların farklı gerilimlerde son kullanıcıya ulaşmasına sebep olabilir bu da şebekeye bağlı elektrik motoru vs. cihazların aşırı ısınmasına ve bozulmasına neden olabilir.

gibi birçok olumsuz etkiye sebep olabilir [13] [14]. Ancak, reaktif güç akışından kaynaklanan güç kalitesi sorunlarına çözüm getirmek için kompanzasyon yöntemleri kullanıldığından, bu amaçla EA'ların kullanılması ve EA'ların şebekeye reaktif güç desteği vermesi, şebekeye olumlu katkısı olacaktır.

Elektrikli araçların şebekeye etkileri üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve aşağıda özetle verilmiştir:

- Wang ve diğerleri [15], elektrikli araçların yüksek seviyede yaygınlaşmasının dağıtım sistemine büyük etki getireceğini öngörmektedir. Monte Carlo simülasyon metodundan faydalanılan çalışmada, kontrolsüz şarj durumu ve elektrikli araçtan şebekeye enerji aktarımına karşılık gelen V2G olmak üzere 2

durum, bir dağıtım fideri üzerinde incelenmiştir. Elektrikli araçların etkisi; sistem yükü, güç kayıpları ve gerilim sapsmaları açısından belirlenmeye çalışılmıştır. Elektrikli araçların 4 farklı seviyede (%10, %30, %60 ve %90) yaygınlaşması senaryolarının araştırıldığı çalışmada, kontrolsüz şarj durumunda mesken yükleri ile elektrikli araç yüklerinin saat 19.00 civarlarında üst üste binmesi sebebiyle, şebeke elemanlarında önemli oranda yüklenme artışı meydana geldiği ortaya konmuştur. Baz senaryoda, aktif güç kayıpları %3,93 iken kontrolsüz şarj durumu için elektrikli araçların %60 yaygınlaşması durumunda %5,21 aktif güç kaybı olacağı belirtilmiştir. Ayrıca, elektrikli araçların rastgele şarj edilmesi durumunda, maksimum aktif yük ile minimum aktif yük arasındaki uçurumun artmasından kaynaklı olarak, daha fazla güç kaybı meydana gelecektir. Yapılan çalışmada maksimum gerilim düşümü, baz senaryoda %4,7 iken %10 yaygınlaşma senaryosunda %5,2 olmuştur. Çalışmanın referans aldığı ülke olan Çin Halk Cumhuriyeti'nde, mevcut regülasyona göre 10 kV seviyesinde maksimum gerilim sapsmasına %7 oranına kadar izin verilmektedir. %60 yaygınlaşma senaryosunda %7,4 gerilim düşümü olmaktadır; %90 yaygınlaşma oranında %8,8 gerilim düşümü olacağı hesaplanmıştır. Çalışmada ayrıca V2G durumu için de analizler yapılmıştır. Yönetmelik tarafından ortaya konulacak teşvikler ile EA sahiplerinin araçlarını belirli saat aralıklarında fişe takılı bırakacağı ve şebeke yöneticisi tarafından gönderilen sinyallere göre araçların devreye girip çıkacağı öngörülmüştür. EA sahiplerinin %50'sinin öngörülen sisteme kaydolacağı ve böylece yaygınlaşan elektrikli araçların yarısının V2G senaryolarına uygun hareket edeceği varsayılmıştır. V2G durumunda, gece 03:00 saatlerinde ve akşam 19:00 saatlerinde iki ayrı tepe oluşacağı ancak yük profilinin kontrolsüz şarj durumuna göre daha düz bir eğriye sahip olacağı gösterilmiştir. Dolayısıyla daha az güç kaybı yaşanacağı tahmin edilebilir ki zaten çalışmada da %60 yaygınlaşma durumu için aktif güç kaybı kontrolsüz şarj durumunda %5,21 iken, V2G durumunda %4,12 olarak ortaya konmuştur. Maksimum gerilim düşümü ise farklı EA yaygınlaşma seviyelerinde değişmemiş, hep %5 civarında olmuştur. Bu çalışmada sonuç olarak, kontrolsüz şarj durumunun ciddi gerilim ve yüklenme problemlerine yol açacağı ve beraberinde teknik kayıpların artacağı ortaya konulmuştur.

- Li ve diğerleri [16], elektrikli araçların etkisini yük profili, güç kaybı ve gerilim değişimleri açısından incelemiştir. 10 kV gerilim seviyesinde mesken ağırlıklı gerçek bir dağıtım fiderinde yürütülen çalışmada, elektrikli araçların, eşit şekilde şebekeye dağıldığı ve 220V gerilimde 10A şarj akımı ile 6 saatte yavaş şarj olduğu varsayılmıştır. Yük profili açısından bakıldığında, akşam saatlerindeki puantın önemli derecede arttığı görülmektedir. Baz senaryoda fiderdeki maksimum güç, anma gücünün %43,31 oranına ulaşabilirken; minimum yük ise anma gücünün %17,92'si kadar olmuştur. Elektrikli araçların %100 oranında yaygınlaştığı senaryoda, maksimum yük anma gücünün %86,62'sine ulaşmış ve yükteki maksimum tepe ile minimum çukur arasındaki boşluk son derece artmıştır. Çalışmada, elektrikli araçların yaygınlaşmasının teknik kayıplar açısından da olumsuz etkilerine vurgu yapılmış ve elektrikli araç yaygınlık oranı, % 50'den %100'e çıktığında, teknik kayıp oranının ivmeli şekilde artmakta olduğu, fiderin ekonomik olmayan çalışma sahasına geçtiği belirtilmektedir. Gerilim düşümü için yapılan analizler sonucunda ise; elektrikli araçların %10 yaygınlaştığı senaryoda maksimum gerilim düşümünün %6,9 ile limitin hemen altında kaldığı, % 20, %30, %50, %100 yaygınlaşma senaryolarında, limitin dışına çıkan terminaller olduğu ve %100 yaygınlaşma durumunda limit dışına çıkan terminal oranının %56,67 olduğu anlaşılmaktadır. Tüm bu analizleri özetlemek gerekirse; rastgele şarj senaryosu durumunda, %10 civarlarındaki elektrikli araç yaygınlaşma oranlarında bir sorun görülmemekle birlikte, daha yüksek oranlardaki yaygınlaşma seviyelerinde fiderde aşırı yüklenme, gerilim düşümü ve teknik kayıpların aşırı yükselmesi gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır.
- Akhavan ve diğerleri [17], Kanada'da gerçek bir dağıtım sistemi üzerinde gerilim değişimleri, güç kayıpları ve yüklenmeler açısından elektrikli araçların etkilerini ortaya koymaktadır. Kırsal bir dağıtım bölgesinin pilot bölge olarak seçildiği çalışmada, maksimum talep yükü 16,18 MVA; anma gerilimi 27,5 kV ve fiderin maksimum kapasitesi 300 A'dir. Fiderin yakın noktalarında, ticari ve sanayi yükleri olmakla birlikte geri kalan bölgelerinde sadece mesken yükleri bulunmakta ve böylece baskın yük tipi mesken olmaktadır. 4 farklı elektrikli araç tipinin modellendiği çalışmada, ortalama 20, 30 ve 40 mil seyahat eden araçların elektrik talebi, kWh olarak hesaplanmıştır. Araçların elektrik bataryası fişe

takmadan önceki şarj yüzdesi sıfır olarak kabul edilmiş ve %100 olana kadar şarj olacağı varsayılmıştır. Elektrikli araç şarj modu olarak EPRI Standartlarındaki Seviye-1 (tek-faz 1,44 kWh) ve Seviye-2 (tek-faz 6 kWh), bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Baz senaryo için yük akış analizi yapıldıktan sonra % 5, %15, %25, %30 elektrikli araç yaygınlaşmaları ve 2 farklı şarj seviyesi için ayrı ayrı yük akış analizleri tekrarlanmıştır. Seviye-1 şarj durumunda, maksimum gerilim düşümü sadece fiderin sonlarındaki birkaç yük noktasında %6'ya ulaşmış, onun dışında %5 limiti içerisinde yer almıştır. Kanada'da en çok yaygınlaşacağı tahmin edilen Seviye-2 şarj durumunda ise, %25 ve %30 yaygınlaşma durumlarında, gerilim düşümü %6-8 civarlarına kadar yükselmekte ve müşterilerin yarısına gerilim limitleri dışında enerji tedarik edilmektedir. Ayrıca çalışma, güç kayıpları açısından da elektrikli araçların kontrolsüz şarj edilmesinin önemli ölçüde olumsuz etkisi olacağını ortaya koymuştur. Mühendislik pratiğinde %3 güç kaybına kadar olan kayıp oranları kabul edilebilir kayıp olarak görülmekte iken, Seviye-2 ile yapılan şarj durumunda %15 yaygınlaşmada bile %3,04 güç kaybı görülmektedir. %25 yaygınlaşmada bu oran %4,57; %30 yaygınlaşmada ise %5,2'dir. Fider yüklenmesi açısından da, Seviye-2 şarj durumunda %25 ve %30 yaygınlaşmalarda aşırı yüklenmeler meydana gelmekte; 14,5 MW olan fiderin taşıyabileceği yük 18-20 MW civarlarına çıkmakta; dolayısıyla bu seviyede yaygınlaşma durumunda ek yatırım gerekmektedir.

- Farkas ve diğerleri [18], 15 dakikadan kısa sürede elektrikli araç bataryasını şarj edebilen hızlı şarj istasyonlarının, orta gerilim şebekesine etkisini incelemişlerdir. Hızlı şarjın doğası gereği yüksek miktarda güce ihtiyacı olacağı ve bunun için de bu istasyonların orta gerilim seviyesinden bağlanacağını öngörmüşlerdir. Özellikle otoyollardaki benzin istasyonlarının yanında elektrikli araç istasyonlarının var olacağını düşünmüşler ve buna göre bir YG/OG trafo bölgesinde, Digsilent PowerFactory yazılımı ile modelleme yapmışlardır. Gerilim seviyesindeki değişimler ve elektrik şebekesi ekipmanlarının yüklenmeleri açısından, elektrikli araçların etkisini incelemek üzere gerçek bir dağıtım bölgesinde gerçek elektrikselleştirmeyle yapılan simülasyonlar sonucunda, elektrik şebekesinin hızlı şarj istasyonlarından çok fazla etkilenmediği ortaya konulmuştur. Hızlı şarj istasyonlarının entegre olması neticesinde en fazla gerilim

düşümü olan nokta, baz modele göre sadece %1 daha düşüktür ve limitler dahilindedir. Güç trafosundaki yüklenme de çok yüksek olmamış, trafo yükü baz modele göre sadece %6 daha yüksek olmuştur.

- Rautiainen ve diğerleri [19] de benzer şekilde gerçek dağıtım bölgelerini modellemiştir. Elektrikli araç etkisinin hem şebeke yüklenmesi açısından, hem de gerilim değişimi açısından önemli düzeyde olmadığı gösterilmektedir. %50 oranında fişe takılabilir elektrikli araç yaygınlaşması ve %30 bataryalı elektrikli araç yaygınlaşmasının aynı anda olduğu senaryoda bile, puant yükteki artış sadece %15 kadar olmuştur. %100 elektrikli araç yaygınlaşmasında ise bu artış %26 kadar olmuştur ve aşırı yüklenen dağıtım trafolarının oranı ise %20 kadardır. Araştırma, elektrikli araçların yüksek oranlarda yaygınlaşması durumunda bile, belirlenen 2 farklı dağıtım bölgesi için herhangi bir probleme yol açmayacağını göstermektedir. Bunun sebebi olarak, modellenen Finlandiya şebekesinin elektrik ısıtıcılarının ve sauna sobalarının yüksek güç ve enerji talebine göre dizayn edilmiş olması gösterilebilir.

Sonuç olarak; elektrikli araçların, gerilim düşümü ve şebeke ekipmanlarının aşırı yüklenmesi kriterlerine göre dağıtım şebekesine etkisinin değerlendirilmesi her ülke, coğrafya hatta dağıtım şebekesi için ayrı ayrı yapılmalıdır. Genel geçer bir etki söz konusu olmamakta; farklı şebeke konfigürasyonu, ekipman anma güçleri, ekipman mevcut yüklenmeleri, elektrikli araç yaygınlaşma oranları ve şarj stratejileri, elektrikli araçların dağıtım şebekesine etkisini ciddi oranda değiştirmektedir [2].

Elektrikli araçların gerilim değişimleri ve ekipman aşırı yüklenmeleri açısından elektrik şebekesine etkilerini ortaya koyan çalışmaların yanı sıra, bu tez kapsamında olan elektrikli araçlardan reaktif güç desteği alınması konusunda da literatürde çalışmalar bulunmaktadır [20], [21], [22], [23], [24], [25]. Reaktif güç kompanzasyonu sayesinde güç faktörü düzeltilir, sistemde kayıplara sebep olan reaktif akımlar daha düşük seviyelere çekilir [22]. Reaktif güç kompanzasyonu ayrıca elektrik şebekesinde gerilim düzenlemesi yapmanın da bir yoludur [20], [21]. Dağıtım sisteminde klasik bir yöntem olarak kullanılan sabit kompanzasyon tesislerine ek olarak elektrikli araçlardan da reaktif katkı alınabilir. Türkiye'nin büyük şehirlerindeki metropol bölgelerinde yer altı kablo yatırımlarının fazlalığı sebebiyle şebeke yükleri genellikle kapasitif karakteristik taşımaktadır. Dolayısıyla, endüktif özellikte kompanzasyona ihtiyaç duyulmaktadır.

Bunun için yapılan reaktör yatırımlarına ek olarak, elektrikli araçlardan alınacak reaktif güç desteği hem reaktör yatırım miktarlarını azaltacak hem de bu yatırımlara rağmen yüksek kapasitif yüke sahip trafo bölgelerinde güç faktörünü düzeltmeye yardımcı olarak güç kayıplarını azaltacaktır. Elektrikli araçlardan alınacak reaktif güç desteği, araç şarj ünitesindeki AC/DC evirici çeşitli kontrol stratejileri ile anahtarlayarak elde edilebilir [23], [24].

Kesler ve diğerleri [25], 3-faz araç dışı çift yönlü elektrikli araç şarj ünitesinin reaktif güç desteği vermek için kullanılması durumu için bir kontrolcü geliştirilmesini ve bunun deneysel olarak test edilmesini göstermişlerdir. Önerilen sistem kontrolcüsü; araçtan aktif güç bilgisini alırken, şebeke yöneticisinin reaktif güç komutu göndermesiyle birlikte hat akımını ve batarya akımını toplam harmonik bozulma limitleri içerisinde kalarak ayarlamakta ve istenilen reaktif gücü sağlamaktadır. Çalışmada 12,5 kVA gücünde araç dışı bir elektrikli araç şarj ünitesi deneysel olarak test edilmiştir. Anma gücünde (12,5 kVA) 1,0 birim güç faktöründe, 0,4 kapasitif güç faktöründe ve 0,8 endüktif güç faktöründe test yapılmış ve istenilen reaktif güç desteği 3 şebeke sinüs çevriminden önce, yani çok kısa bir zaman diliminde, sağlanmıştır. Bu esnada, batarya tüm bu reaktif destek operasyonu boyunca olumsuz bir etkiye maruz kalmamış ve DC batarya akımı, DC şarj olma akımı standartlarını yerine getirebilmiştir. Bataryanın farklı SOC değerlerine göre testler yinelenmiş ve sonuç olumlu olmuştur. Kısaca; bu çalışma, bir araç dışı elektrikli araç şarj ünitesi sistemi ile şebeke yöneticisi tarafından yönetilecek reaktif güç desteğinin, araç bataryasına herhangi bir zarar vermeden mümkün olduğunu göstermektedir.

Elektrikli araçların yaygınlaşmasının elektrik dağıtım şebekesine etkisi konusunda Türkiye özelinde de çalışmalar yapılmıştır. Temiz [26] çalışmasında alçak gerilim (AG) seviyesinde ikisi gerçek verilerle, bir tanesi ise jenerik verilerle oluşturulmak üzere, 3 farklı dağıtım bölgesini; dağıtım trafosu ve hat yüklenmeleri, gerilim düşümü ve şebeke kayıpları kriterleri üzerinden değerlendirmiştir. Monte Carlo simülasyonları sonucunda oluşturulan elektrikli araç yükleri Digsilent PowerFactory yazılımına adapte edilmiş ve yük akış analizleri sonucunda AG şebekede yatırım ihtiyacı oluşturacak seviyede, elektrikli araçların sistemi etkilediği ortaya konulmuştur. Şen [27] yaptığı çalışmada aynı dağıtım fideri üzerinde 11 adet dağıtım trafosunu incelemiş, EA'ların yaygınlaştığı durumda dağıtım trafolarının yüklenme seviyelerini ve gerilim değişimlerini analiz etmiştir. İstanbul Avrupa yakasından seçilen pilot bölgede, ilgili dağıtım şirketinden

Coğrafi Bilgi Sistemi bilgileri edinilen ve CYME programında modellenen benzetim çalışmaları sonucunda kritik seviyede yüklenen bir şebeke ekipmanına rastlanılmamış, kayıp oranları ideal seviyede kalmış ve gerilim düşümü neredeyse olmamıştır. Benzer sonuçlara AG şebekede çalışan başka tez çalışmaları da ulaşmıştır [28], [29]. Türkiye elektrik dağıtım şebekelerini orta gerilim seviyesinde inceleyen çalışmada [30], 8 farklı pilot dağıtım bölgesi incelenmiş, Monte Carlo simülasyonları sonucunda oluşturulan EA yükleri Digsilent PowerFactory yazılımında kullanılarak, şebeke analizleri yapılmıştır. Şehir içi ve kırsal olmak üzere farklı karakteristikte dağıtım bölgeleri seçilmiş olan çalışmada şebeke yükleri TEİAŞ Otomatik Sayaç Okuma Sistemi'nden fider bazlı olarak edinilmiş, dağıtım şebekeleri ilgili işletmecilerin Coğrafi Bilgi Sistemlerinden alınmıştır. 2030 yılında Türkiye karayollarında 2,5 milyon EA olacağını tahmin eden çalışma, kontrolsüz şarj durumunda yoğun saatlerdeki yükte %12,5 artış öngörmüştür.

Literatürde incelenen çalışmalardan, gerçek bir dağıtım bölgesini gerçek SCADA verileri ile modellemesi ve elektrikli araçların sadece etkisini gözlemlemek değil aynı zamanda nasıl basit ama etkili bir yöntemle dağıtım şebekesine katkı sağlanacağını göstermesiyle ayrılan bu tez çalışması önerilirken, güç sistemi operatörlerinin gerilim ve frekans desteklerini hangi koşullarda satın alacaklarının belirlenmesi amacıyla:

- Frekans desteği için mevzuatta yer alan yan hizmet politikalarının incelenmesi ve iletim sistemi operatörünün kullanması için primer frekans desteği ile sekonder frekans desteğini tamamlayıcı, üçüncü bir frekans desteği önerisi sunulması,
- Gerilim desteği konusunda ise mevzuatta sadece limitler yer aldığından, dağıtım sistemi operatörünün bu limitlere uyması

göz önüne alınarak, reaktif destek ile gerilim sorununun nasıl çözümleneceği ve elektrikli araç bataryalarından bu desteğin nasıl alınacağını, ekonomik ve teknik olarak ortaya konulması hedeflenmiştir.

Türkiye iletim ve dağıtım şebekesi özelinde, güç sistemi operatörlerinin elektrikli araçlardan gerilim ve frekans desteklerini, hangi ekonomik ve teknik koşullarda sağlayacaklarının belirlenmesi üzerine literatürde çalışmaya rastlanmaması, önerilen tezin özgün değeridir. Literatürdeki en yakın çalışma sadece bir evin tüketimi ve üretimi üzerinden yapılan akıllı ev çalışmasıdır [31]. Türkiye ölçeğinde elektrikli araçların

yaygınlaşmasını içeren sektör raporları mevcuttur fakat bu çalışmalar taşıttan şebekeye enerji aktarımını içeren modeller veya analizler sunmamaktadır.

Tez çalışmasında, yan hizmet politikaları incelendiğinde frekans desteğine gerek olmadığına anlaşılması üzerine frekans tepkisini içeren bir çalışma yapılmamış, sadece EA'ların dağıtım şebekesinin gerilimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Öneride planlanan çalışmalara ek olarak, EA'ların, dağıtım şebekesindeki güç trafosu, iletim hatları, dağıtım fiderleri gibi elektriksel ekipmanların maksimum yüklenmesine etkisi ve EA'lardan reaktif destek alınması durumunda şebeke güç faktörü değişimi de incelenmiştir.

Bu amaçla, elektrikli araçların elektrik dağıtım şebekesine etkilerini ortaya koymak amacıyla, Türkiye'de büyük şehirlerden birinde 36 adet güç trafosu içeren elektrik dağıtım şebekesi üzerinde çalışma yapılarak,

- Dağıtım şebekesindeki güç trafoları, dağıtım merkezleri, indirici merkezler ve KÖK binaları altındaki dağıtım ve iletim fiderleri ile birlikte, canlı manevralarda kullanılan en güncel tek-hat şemaları kullanılarak, Digsilent PowerFactory programında çizilmiş ve şebeke ekipmanlarına ait karakteristikler ve özellikler modelde tanımlanmış,
- Dağıtım fiderlerine ait, 1 Aralık 2019 – 1 Aralık 2020 tarihleri arasındaki, maksimum yükler, SCADA sisteminden alınmış ve bu yükler Digsilent PowerFactory programında tanımlanıp yük akış analizleri yapılarak ve güç trafolarının 1 yıl içerisindeki maksimum yüklendiği gün belirlenerek, o güne ait 15 dakikalık çözünürlükte yük karakteristiği oluşturulup bu yük karakteristiği, tüm fiderlere dağıtılarak, TEİAŞ güç trafolarından OG/AG dağıtım trafolarına kadar dağıtım şebekeleri modellenmiş,
- Türkiye ve modellenen pilot bölgeler için, 2025 ve 2030 yılları için elektrikli araç sayıları belirlenmiş,
- Elektrikli araçların farklı şarj algoritmaları çerçevesinde enerji kullanımlarını inceleyen literatür çalışmasının sonucu kullanılarak, elektrikli araç yükleri modellenmiş, ve üç farklı şarj senaryosu için, şebekelerin maksimum yüklenme durumları, maksimum gerilim düşümü ve EA'lardan reaktif destek alındığı durumda reaktif güç ve güç faktörü değişimi incelenerek, elektrikli araçların mevcut dağıtım şebekesine etkileri tartışılmıştır.

2. KURAMSAL KESİM

2.1. Elektrikli Araçlar ve Taşıttan Şebekeye Enerji Aktarımı

Araçlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını ortadan kaldırmak için, içten yanmalı motora sahip araçların bataryalı ve fişli hibrid elektrikli araçlarla (sırasıyla BEV ve PHEV) değiştirilmesi, şebeke operatörü için bir fırsat sunmaktadır. Tüm fişli elektrikli araçlarda (PEV), araç içinde şebekeden elektrik depolayan bataryalar bulunur. Bataryada depolanan enerjinin birincil amacı elektrikli aracı hareket ettirmek olsa da, gerektiğinde bataryalar gücünü şebekeye aktarabilir. PEV'ler, hem sürücüye nakliye sağlayacak, hem de elektrik şebekesinin kararlılığı için güç depolaması sağlayacak iki işleve hizmet etme potansiyeline sahiptir. PEV'lerde, bataryalar özel olarak vatandaşa aittir, güç sistemi operatörleri ise bataryalara erişim hizmeti için ücret öder. Bu sayede güç sistemi operatörleri gerilim ve frekans desteği alabilmektedir, elektrikli araç sahibi ise ek bir kazanç elde etmektedir. Fakat; şebeke operatörlerinin enerji depolamak için büyük miktarda batarya satın almaları, ekonomik olarak uygun değildir [32].

BEV ve PHEV'lerin bir diğer faydası, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonuna destek olabilmesidir. Güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji sistemlerinin önemli bileşenleridir ancak ikisi de şebekede dalgalanmalara neden olmaktadır. Elektrikli araç bataryaları yardımcı bir kaynak oluşturmak için şebekeye bağlanabilir. "Taşıttan Şebekeye Enerji Aktarım Sistemi" [Vehicle to Grid (V2G)] olarak bilinen bu sistemler, yenilenebilir kaynakların dalgalanma sorunlarına uygun çözüm olabilir. Baloglu ve Demir [33], ekonomik analizi çeşitli açılardan incelenmiştir. Bu çalışmanın bulguları, bir V2G sisteminin, pilin yaşlanma maliyetlerinin akıllı bir enerji yönetim sistemi ile en aza indirilebileceğini ve bu sistemlerin fosil yakıtlı jeneratörlere hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha iyi alternatifler olduğunu göstermektedir.

Shafie-Khah ve diğerleri [34], PEV'lerin şebekeden yük çekmesinin ve şebekeyi beslemesinin ne gibi etkileri olacağını göstermişlerdir. Gerçek dünya örnekleri ve elektrik piyasaları incelenmiş, farklı market tipleri kategorize edilmiştir. Çalışmanın önemli bir yorumu, piyasada döner yedekler ve yan hizmetler piyasası olduğu müddetçe PEV'lerin önemli bir rol oynayamayacağı şeklindedir.

Habib ve diğerleri [35], kapsamlı bir literatür özeti sunmaktadır. V2G uygulama kabiliyetine sahip bir aracın; aktif gücün düzenlenmesi, reaktif gücü desteklemek, vadi dolulukları ile yük dengelemek, mevcut harmonikleri filtrelemek, puant yük tıraşını sağlamak ve işletme maliyetini düşürmek ve gelir elde etmek gibi çeşitli özellikler sunduğu ve bu özelliklerin döner yedek sağlama ile gerilim ve frekans kontrolü sağlayacağı vurgulanmıştır. Bunların yanı sıra bazı zorlu konular da V2G'yi beklemektedir. Bataryanın zamanla bozulması, PEV ile şebeke arasında etkileşimin sağlanabilmesi için, dağıtım şebekesi yönetiminde köklü değişiklikler gerekmesi ve ilgili altyapı yatırımlarının yapılması gerekliliği, üzerinde çalışılması gereken konulardır. Makalenin önemli bir diğer sonucu ise V2G teknolojisinin ekonomik yararlarının görülebilmemesinin, şarj/deşarj ve araç toplama (vehicle aggregation) stratejilerine bağlı olduğu yorumudur.

V2G'nin temel fikri, elektrikli araç bataryasında depolanan enerjinin bir kısmının, şebeke stresini azaltmak ve yenilenebilir üretimdeki dalgalanmaları dengelemek için, yoğun talep süreleri boyunca şebekeye geri döndürülebilmesidir [36]. Bu temel fikri desteklemek amacıyla çalışma, şebeke operatörlerine puant güç tıraşının sağlanmasında ve yenilenebilir üretimdeki dalgalanmalara çözüm olarak ek faydalar elde edecekleri bir iş modeli önermiştir.

Han ve Han [37], V2G frekans düzenlemesinin ekonomik uygulanabilirliğini, batarya aşınmasını göz önüne alarak, literatürde ilk defa ortaya koymuşlardır. Yaptıkları çalışmanın sonuçları, V2G düzenlemesinin, mevcut piyasa koşullarında bile batarya aşınma maliyetinin üstesinden gelmek için yeterli teşvik sağlayabileceğini göstermektedir. Frekans düzenleme özelliğinin, çoğu durumda şarj etme ve boşaltma döngüsü derinliğinin sığ olacağı göz önüne alındığında, V2G servisini daha kârlı kılan toplayıcılarla (aggregators) birlikte mümkün olacağını ortaya koymaktadırlar.

Sarabi ve diğerleri [38], elektrikli taşıt katkısının şebeke yardımcı hizmetlerine uygulanabilirliğini araştırmıştır. Makalelerinde araçtan şebekeye yardımcı hizmetlerin teknik olanakları değerlendirilmektedir. Şebekeye destek olasılığını güç, enerji ve uygun zaman aralığı açısından değerlendirmek üzere, EV filosunun sayısı ve işe gidiş geliş davranışı ile ilgili farklı senaryolar oluşturulmuştur. Fransız regülasyonunu inceleyen çalışma primer kontrol, sekonder kontrol, tersiyer kontrol, puant gücü tıraşlama, reaktif

güç kompanzasyonu ve yenilenebilir enerji desteği olmak üzere 6 yan hizmet için uygun V2G senaryolarını belirlemiştir. 100 araçlık filoların yer aldığı senaryolarda ekonomik olarak uygun bir sonuç çıkmamış, en az 500 araçlık filo gerektiği ortaya çıkmış; 5.000 araçlık filoların yer aldığı senaryolar ise 6 hizmeti de vermekte ekonomik olarak uygun çıkmıştır.

Arslan ve Karasan [39], bir grup insanın bir araya gelerek elektrik harcamalarını azaltmak amacıyla oluşturduğu ve içerisinde çeşitli yenilenebilir kaynakların olduğu sanal enerji santralinin (virtual power plant-VPP) maliyet ve emisyon açısından analizini, PHEV'lerin de yaygın olarak şebekeye bağlandığı bir durum için yapmışlardır. Kaliforniya eyaleti için yapılan ve gerçek verilerden yola çıkılan vaka analizinde ortalama olarak %29,5 maliyet azaltma ile %79 CO₂ ve %83 NO_x emisyon azaltımı elde edilmiştir. Sonuçlar PHEV entegre edilmiş bir VPP oluşumunun toplum için sağlayabileceği fırsatları göstermektedir.

Erdinc [31], şarj ve “araçtan eve (V2H)” çalışma modları ile iki yönlü güç akışı özelliğine sahip elektrikli araçlar, puant kırpmaya fırsatına sahip enerji depolama sistemleri (ESS'ler) ve enerjinin şebekeye geri dönmesini sağlayan küçük ölçekli dağıtık üretim (DG) üniteleri barındıran akıllı ev yapısını ele almıştır. ESS ve DG birimlerinin teknik ve ekonomik etkilerini değerlendirmek için dinamik fiyatlandırma ve puant güç sınırlandırmasına dayalı farklı talep tarafı katılımı (DR) stratejileri de dahil olmak üzere farklı vaka analizleri yapmıştır. Çalışma sonucunda temel durumla karşılaştırıldığında ilave DG ve ESS üniteleri ile %35'ten fazla maliyet düşmesi elde edileceği ortaya çıkmıştır.

Buraya kadar elektrikli araçlardan ve taşıttan şebekeye enerji aktarımından literatürdeki çalışmalarla birlikte bahsettikten sonra elektrikli araç şarj seviyelerinden ve elektrikli araç örneklerinden söz edilebilir.

EA batarya şarj cihazları, tek yönlü veya çift yönlü güç akışıyla dahili ve harici olarak sınıflandırılabilir. Tek yönlü şarj, mantıklı bir ilk adımdır çünkü donanım gereksinimlerini sınırlar, ara bağlantı sorunlarını basitleştirir ve bataryanın zayıflamasını azaltma eğilimindedir. Çift yönlü bir şarj sistemi ise şebekeden bataryaya şarj ile bataryadan şebekeye şarjı sağlar. Tipik dahili şarj cihazları, ağırlık, alan ve maliyet kısıtlamaları nedeniyle yüksek gücü sınırlar [40].

Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE International), SAE J1772 standardının bir parçası olarak Kuzey Amerika’da kullanılan elektrikli araç şarj sistemleri için genel fiziksel, elektriksel, iletişim ve performans gereksinimlerini tanımlamıştır ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), uluslararası uygulama için IEC 62196-1 uyarınca SAE J1772 standardının çoğunu benimsemiştir. Bu standartta Seviye-1, Seviye-2 ve Seviye-3 olmak üzere 3 temel şarj modu bulunmaktadır, ayrıntılar **Çizelge 1**’de belirtilmiştir.

Çizelge 1. Kuzey Amerika’da Kullanılan Elektrikli Araç Şarj Güç Seviyeleri [40]

Güç Seviyesi Modları	Şarj Ünitesi Yeri	Genel Kullanım	Güç Seviyesi	Şarj Süresi
Seviye-1 120 Vac (US) 230 Vac (EU)	Araç içi 1-faz	Ev veya ofis	1,4 kW 1,9 kW	4-11 sa 11-36 sa
Seviye-2 240 Vac (US) 400 Vac(EU)	Araç içi 1-faz veya 3-faz	Özel veya halka açık	4 kW 8 kW 19,2 kW	1-4 sa 2-6 sa 2-3 sa
Seviye-3 208-600 Vac veya Vdc	Araç dışı 3-faz	Ticari	50 kW 100 kW	0,4-1 sa 0,2-0,5 sa

Elektrikli araç güç seviyeleri ile ilgili Türkiye’yi ilgilendiren standart ise tüm Avrupa’daki araçların şarj ünitesini, bağlantı şeklini, bağlantı fişini ve prizini tanımlamada kullanılan IEC 61851 standartıdır. IEC 61851-1’e göre 4 farklı şarj modu bulunmaktadır [41]. Bunlardan;

- **Mod 1;** ev tipi prize bağlanılan durumda geçerli olan AC yavaş şarjı
- **Mod 2;** ev tipi prize bağlanılan durumda geçerli olan fakat bağlantısında koruma iletkenini de içeren AC yavaş şarjı
- **Mod 3;** içerisinde kontrol ve koruma kısımlarını da barındıran özel bir EA soket çıkışına bağlanılan durumda geçerli olan AC yavaş veya hızlı şarjı
- **Mod 4;** harici hızlı şarj istasyonuna bağlanılan durumda geçerli olan DC hızlı şarjı

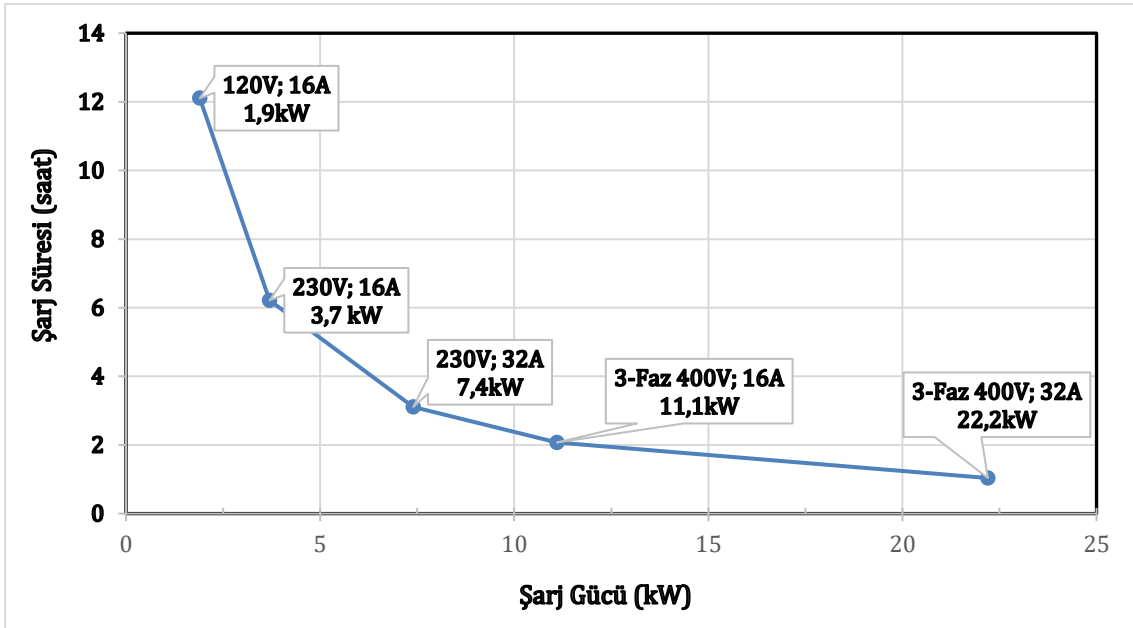
ifade etmektedir.

Avrupa’da geçerli olan farklı şarj yöntemlerine göre kullanılan güç seviyeleri **Çizelge 2**’de belirtilmiştir.

Çizelge 2. Avrupa'da ve Ülkemizde Kullanılan Farklı Şarj Güç Seviyeleri [42]

Şarj Yöntemi	Bağlantı	Güç (kW)	Maksimum Akım (A)	Genel Kullanımı
Normal Güç	1-Faz AC Bağlantı	3,7	10-16	Evsel
Orta Seviyede Güç	1 veya 3-Faz AC Bağlantı	3,7-22	16-32	Özel / Halka Açık
Yüksek Güç	3-Faz AC Bağlantı	>22	>32	Halka Açık
Yüksek Güç	DC Bağlantı	>22	>3,225	Halka Açık

Çizelge 2'deki bilgilerden faydalanılarak; AC olarak ve farklı anma güçlerinde şarj olma durumuna bağlı olarak şarj süresi 12 saatten 1 saate kadar çeşitlilik gösteren ve bu çalışma kapsamında ortalama batarya kapasitesi olarak değerlendirilen 23 kWh batarya kapasitesinin şarj süreleri Şekil 2'de belirtilmiştir.



Şekil 2. 23 kWh Batarya Kapasitesine Sahip EA'nın AC Şarj Gücüne Bağlı Olarak Şarj Süreleri

Elektrikli araçların şarj seviyeleri kadar önemli olan bir diğer nokta ise şarj stratejileridir. Habib ve diğerleri [35], 4 temel şarj stratejisinden bahsetmiştir. Bunlar;

- ***KontROLSÜZ ŞARJ***, elektrik şebeke operatörüyle herhangi bir iletişim olmadan EA'ların kullanıcıları tarafından uygun görüldüğü zaman ve sıklıkta şarj edildiği stratejidir. Aslında bu strateji için akıllı şarjın olmadığı durum da denilebilir. Ne tarife ile ne teşviklerle ne de akıllı çift yönlü iletişim ve kontrol ile EA kullanıcıları yönlendirilir. Bu şarj stratejisi, şebeke topolojisine vs. göre değişmekle birlikte, puant zamanlarda şebekeyi zorlayabilir.
- ***KONTROLLÜ ŞARJ***, çift taraflı enerji akışına izin veren V2G senaryolarına da izin veren akıllı sayaçların ve sensörlerin sistemde olduğu, sistem operatörü ile EA kullanıcısı arasında çift yönlü iletişimin olduğu, enerji akışının ise tek yönlü veya çift yönlü olabileceği daha karmaşık bir stratejidir. Bu tez kapsamında EA'lardan reaktif katkı alınması ve EA'ların gece tarifesine yönlendirilmesi kontrollü şarj içerisinde değerlendirilmiştir.
- ***ERTELEMELİ ŞARJ***, şarjın evde yapıldığı fakat regülasyon tarafından belli bir saatten sonra şarja izin veren stratejidir.
- ***PUANT DIŞI ŞARJ***, farklı tarife fiyatlandırmaları ile kullanıcıları puant saatler yerine şebeke yükünün az olduğu saatlere yönlendiren stratejidir. Ertelemeli şarj ile puant dışı şarj, kontrollü şarjın birer parçası olabilirler.

2.2. Elektrik Şebekeleri ve Temel Kavramlar

Güç sistemlerinde kullanılacak olan temel kavramlardan bahsetmek gerekirse ilk olarak; sıkça karşılaşılan fazör ile başlanabilir.

Fazör

Sabit frekanslı sinüs dalgası biçiminde gerilim, gerilimin maksimum (tepe) değeri ve faz açısı olmak üzere iki farklı karakteristik özelliğe sahiptir.

V_{mak} maksimum değerinde ve $\cos(\omega t)$ faz açısına göre δ faz farkına sahip bir gerilimin anlık değeri:

$$v(t) = V_{\text{mak}} * \cos(\omega t + \delta)$$

şeklindedir.

Sinüsel bir gerilimin etkin (rms) değeri:

$$V = V_{\text{mak}} / \sqrt{2}$$

“Euler” eşitliğini göz önüne alırsak sinüsel büyüklükler, $e^{j\phi} = \cos\phi + j \sin\phi$ şeklinde fazör olarak ifade edilmektedir.

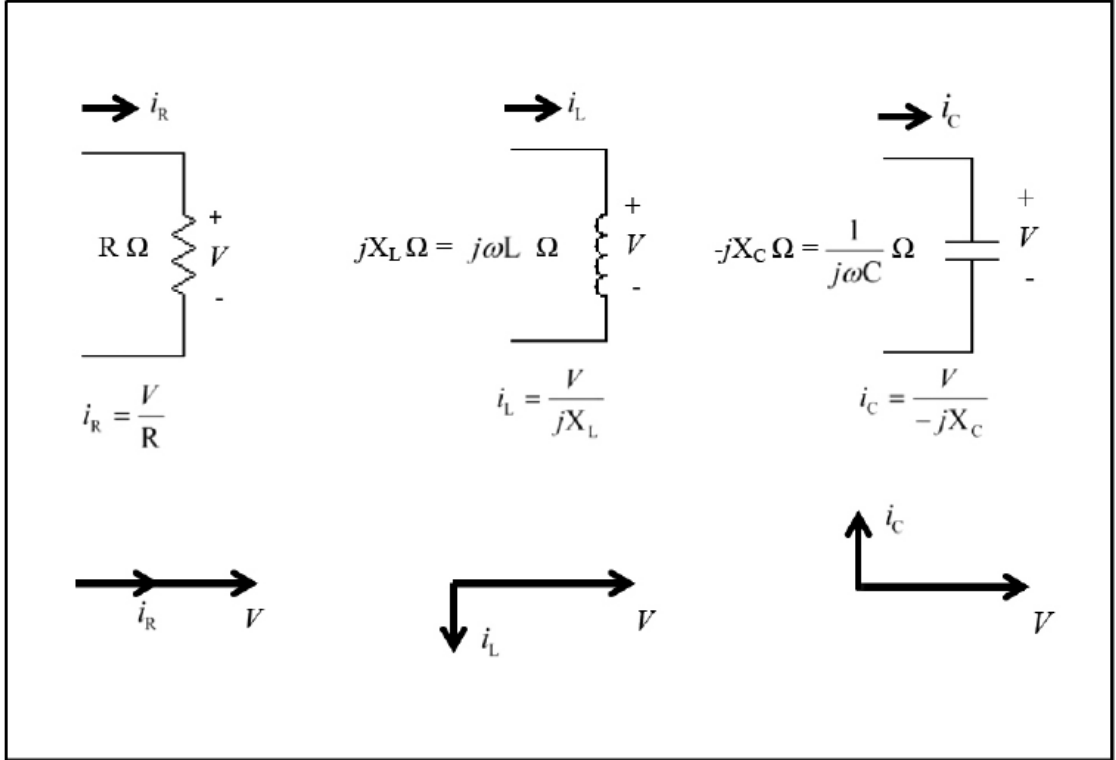
Herhangi bir gerilimin rms değerinin üstel, kutupsal (polar) ve kartezyen olmak üzere, üç farklı şekilde gösterimi vardır:

$$V = V e^{j\delta} \quad (\text{üstel})$$

$$V = V \angle \delta \quad (\text{kutupsal})$$

$$V = V \cos(\delta) + j V \sin(\delta) \quad (\text{kartezyen})$$

Elektrik devrelerinde kullandığımız direnç, bobin ve kondansatör için gerilim ve akım fazörleri arasındaki ilişki **Şekil 3**'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3. Sinüsel Denge Durumunda R, L, ve C Elemanlarındaki Gerilim ve Akım Arasındaki İlişki [43]

Tek-Faz Alternatif Akım (AC) Devrelerinde Güç

Güç, zamana göre enerji değişim oranıdır. Bir elektrik yükünün çektiği anlık güç, bu yüke düşen anlık gerilimin bu yük üzerinden geçen anlık akım ile çarpımıdır. Güç reel ve sanal bileşenler olarak;

$$p(t) = V I_R (1 + \cos[2(\omega t + \delta)]) + V I_X \sin[2(\omega t + \delta)] = p_R(t) + p_X(t) \quad (1)$$

yazılır. Burada I_R ve I_X , sırasıyla akımın reel ve sanal kısımlarıdır.

Eşitlik1; rezistif yük tarafından çekilen gücün, $p_R(t)$, çift frekanslı bir sinüs olduğunu gösterir ve ortalama değeri “P” **gerçek güç** olarak tanımlanır ve

$$P = V I_R = V I \cos(\delta - \beta) \quad (2)$$

eşitliği ile hesaplanır. Birimi Watt olarak verilir.

Eşitlik1’de, $p_X(t)$ ile gösterilen ve yükün reaktif bileşenleri tarafından çekilen reaktif güç, sıfır ortalama değerindedir ve çift frekanslı bir sinüstür. $p_X(t)$ ’nin genliği “Q” ise;

$$Q = V I_X = V I \sin(\delta - \beta) \quad (3)$$

“Q”, **reaktif güç** olarak adlandırılır. Reaktif güç gerçek güçle aynı birimleri içerir. Fakat reaktif gücün birimi Volt Amper Reaktif (VAR) olarak kullanılır.

Güç Faktörü

Güç faktörü , Eşitlik1'e göre $\cos(\delta - \beta)$ terimidir. Güç faktörü açısı ise gerilim ile akım arasındaki $(\delta - \beta)$ açısıdır. Doğru akım (Direct Current - DC) devrelerinde yük tarafından çekilen güç; DC yük gerilimi ile DC yük akımının çarpımıyken, alternatif akım devrelerinde yük tarafından çekilen ortalama güç; yük üzerindeki gerilimin rms değeri, yükten geçen akımın rms değeri ve güç faktörü $\cos(\delta - \beta)$ 'nın çarpımına denk gelir.

Endüktif yüklerde akım gerilimden geride olduğu için, yani β değeri δ 'dan küçüktür, bu yüzden güç faktörü geride denir. Kapasitif yüklerde ise, akım gerilimden ilerde olduğu için, yani β değeri δ 'dan büyüktür, güç faktörü ilerde denir.

Kompleks Güç ve Güç Üçgeni

AC devrelerde aktif ve reaktif güç; kompleks güç yardımıyla hesaplanır. Gerilimdeki faz açısı “ δ ” ve akımdaki faz açısı “ β ” olmak üzere, bir devre elemanının uçları arasındaki gerilimin $V L^\delta$, elemanlar üzerinden geçen akımın ise $I L^\beta$ olduğu varsayılırsa; kompleks güç, gerilim ile akımın kompleks eşleniğinin çarpımından oluşur ve:

$$S = V I^* = [V L^\delta][I L^\beta]^* = V I L^{(\delta - \beta)} = V I \cos(\delta - \beta) + j V I \sin(\delta - \beta) \quad (4)$$

$$S = P + jQ \quad (5)$$

eşitlikleri ile verilir.

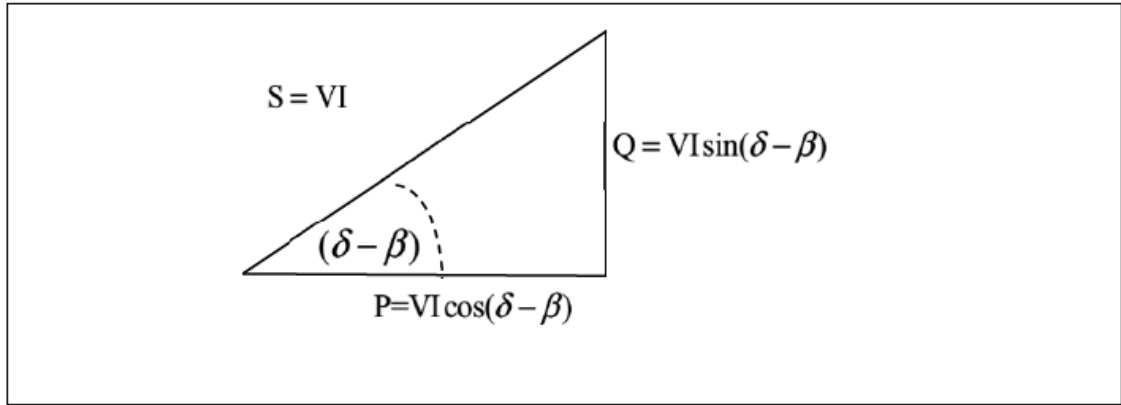
Kompleks gücün büyüklüğüne görünür güç denir, “S” ile gösterilir ve VA birimine sahiptir. Görünür güç, aktif güç ve reaktif güç arasındaki bağıntı **Şekil 4**'teki güç üçgeni ile özetlenebilir [43]:

$$P = V I \cos(\delta - \beta) \quad (6)$$

$$Q = V I \sin(\delta - \beta) \quad (7)$$

$$Q = P \tan(\delta - \beta) \quad (8)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9)$$



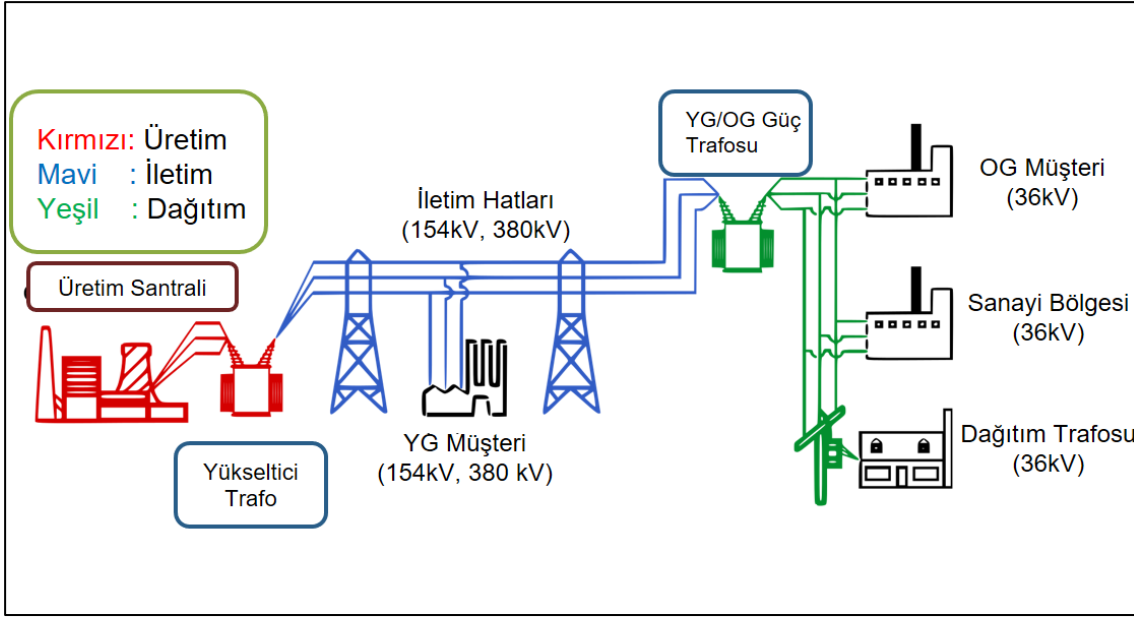
Şekil 4. Güç Üçgeni

İletim ve Dağıtım Şebekesi

Elektrik iletim sisteminin amacı, elektrik enerjisi üreten santrallerin veya üretim istasyonlarının yüklerle birbirine bağlanmasıdır. Çoğu iletim hattı için üç fazlı AC elektrik sistemi kullanılır. Çalışma frekansı Amerika Birleşik Devletleri'nde 60 Hz ve Avrupa, Avustralya ve Asya'nın bir bölümünde 50 Hz'dir. Üç fazlı sistemin üç fazlı iletkenleri vardır. Sistem gerilimi, hatlar arası gerilim olarak da adlandırılan iletkenler arasındaki rms voltajı olarak tanımlanır. Faz iletkeni ile topraklama arasındaki, faz-toprak voltajı adı verilen gerilim, faz-faz arası gerilimin kök üçe bölünmesine eşittir [44].

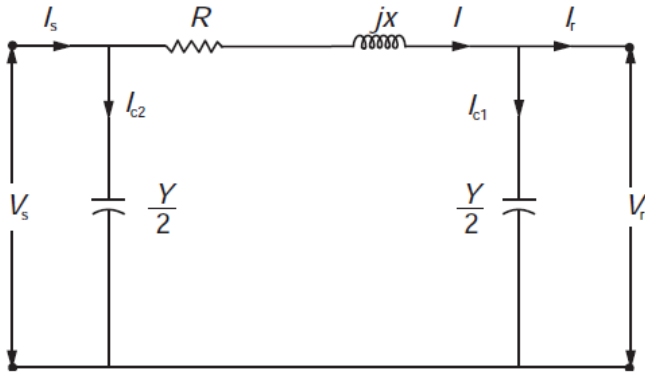
Şekil 5, Türkiye için tipik bir elektrik sistemini göstermektedir.

Elektrik enerjisi dağıtımı, elektrik enerjisi dağıtımının son aşamasıdır; elektriği iletim sisteminden bireysel tüketicilere taşır. İletim sistemi ile dağıtım sistemi arasındaki trafo merkezleri iletim sistemine bağlanır ve iletim gerilimini 2 kV ile 36 kV arasında değişen orta gerilime düşürür [45].



Şekil 5. Geleneksel Elektrik Şebekesi [46]

İletim ve Uzun Dağıtım Hatlarının π -Eşdeğer Devresi



Şekil 6. İletim Hattının Eşdeğer Devresi [44]

π -eşdeğer devresinde, Şekil 6'da görüldüğü üzere her iletkenin kapasitansının iki yarıya bölündüğü varsayılır, bir yarısı kaynak ucunda iletken ve nötr arasında ve diğer yarısı da yük ucunda şöntlenir [44].

Yükün az olduğu durumlarda kaynağa doğru kapasitif bir akım akar. Bu yüzden kaynak tarafından yüke doğru gerilim düşmesi gerekirken artış gösterebilir.

Per-Unit Sistem

Per-unit sistemde; gerilimler akımlar, empedanslar ve güçler, önceden tanımlanmış temel büyüklüklerin yüzdeleri (veya birim başına değeri) olarak normalleştirilmiş bir şekilde ifade edilir. Bu açıklama yönteminin avantajları arasında sistem temsilinin kolaylığı, trafo dönüşüm oranlarının ortadan kaldırılması ve sayı ifadelerinin basitliği yer alır.

Per-Unit (p.u.) büyüklüğü, önceden tanımlanmış bir temel miktarın ondalık kesri olarak ifade edilen miktardır. Örneğin, 1000 V olarak bir baz gerilim seçildiyse, 920 V bir gerçek gerilim, 0,92 p.u. olarak ifade edilmektedir. Per-Unit sistemde tutarlılığı sağlamak için gerilim ve voltamper olmak üzere iki temel büyüklük seçilir. Baz gerilim genellikle nominal sistem gerilimidir; baz voltamper ise, bir ekipman anma gücünün birkaç katı olarak seçilebilir. Tipik olarak, en büyük döner makine anma gücü veya alternatif olarak bu değere yaklaşan uygun bir yuvarlak sayı kullanılır. Seçilen baz (base) gerilim V_{base} ve seçilen baz voltamper VA_{base} ise, diğer baz miktarlar şu şekilde türetilir [47]:

$$I_{base} = \frac{VA_{base}}{V_{base}} \quad (9)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} \quad (10)$$

Yük Akış Analizi

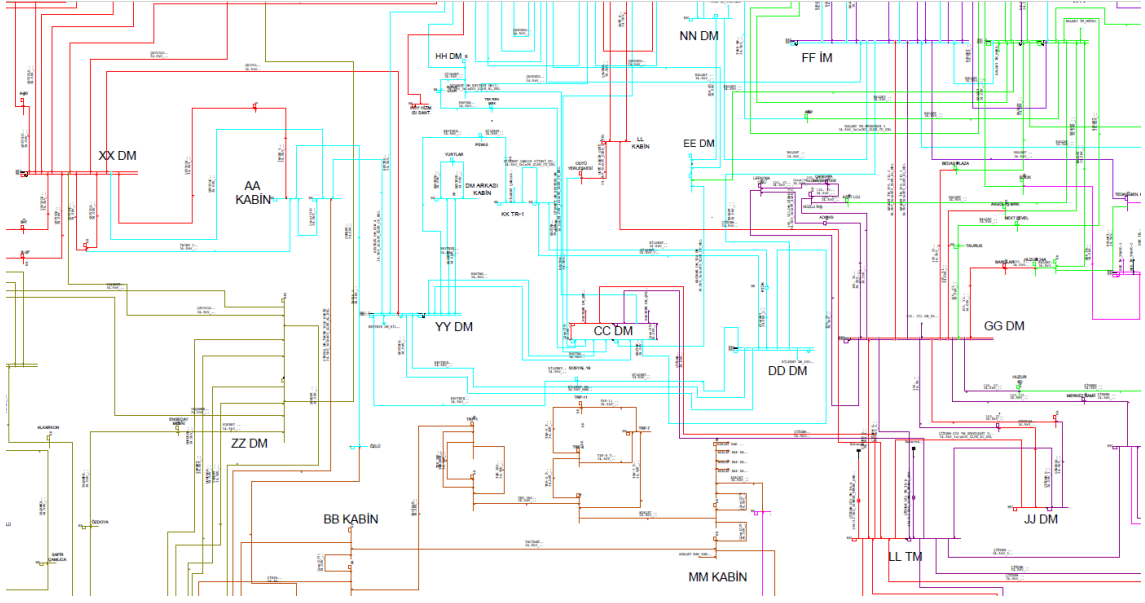
Yük akış analizinin amacı, olası değişken üretim ve yük durumları için güç akışlarını, aktif, reaktif yükleri ve bara voltajlarını incelemektir. Aslında her bara için 4 büyüklük tanımlamak mümkündür: Gerilimin büyüklüğü ve açısı ile aktif ve reaktif güç. Bu parametrelerden herhangi 2 tanesinin bilinmesi ile diğer parametrelerin bulunması yük akış analizi sayesinde gerçekleşir [48]. Yük akış analizlerinde baralar; yük barası (P-Q), üretim barası (P-V) ve salınım barası olmak üzere 3 şekilde gruplandırılır. Yük baralarında sistemden çekilen aktif ve reaktif güçler bilinir, gerilimin büyüklüğü ve faz açısı hesaplanması gerekir. Üretim baralarında aktif güç ve gerilim genliği bilinirken, gerilim faz açısı ve reaktif güç bulunması gerekir. Salınım barası ise genellikle sistemde bir tane seçilir; gerilimin büyüklüğü ve faz açısı bilinirken, aktif ve reaktif güçler hesaplanır.

Elektrik Şebekesinin Modellenmesi

Karmaşık elektrik dağıtım sisteminde binlerce baranın olması sebebiyle yük akışı analizlerini manuel olarak yapmak mümkün olmamaktadır. Bunun yerine bu tezde de kullanılan Digsilent PowerFactory gibi modelleme araçları kullanılarak elektrik şebekesinin karakteristikleri ve yükleri tanımlanır; dağıtım şebekesinin kaynağı olan iletim sistemi ile dağıtım sistemi arasındaki güç trafolarının primer barası salınım barası kabul edilerek 1 p.u. gerilimde sıfır derece faz açısında kabul edilir ve geri kalan baralardaki değerler hesaplanır.

Tez kapsamında modellenen OG şebekenin tek-hat şemasının bir kesimi **Şekil 7**'de verilmiştir. **Şekil 7**'de yer alan tek-hat şemasında her bir güç trafosuna farklı bir renk verilmiştir. Bir Dağıtım Merkezi'nden çıkıp diğer dağıtım merkezine giden her çizgi iletim fideri veya dağıtım fideri olmak üzere 2 olasılık taşımaktadır. Eğer iletim fideri ise, OG seviyesinde sadece merkezden merkeze güç taşımak için kullanılan ve bu iki merkez boyunca sadece havai hat veya kablo içeren bir şebeke elemanını belirtmektedir. Eğer dağıtım fideri ise, içerisinde birden fazla OG/AG dağıtım trafosu barındıran, kabloların bir OG/AG dağıtım trafosunun 3 hücresinden (giriş, çıkış, trafo hücreleri) girdi çıktı yaparak bir başka merkeze doğru güç sağlayan yapıdaki şebeke elemanını göstermektedir.

Digsilent PowerFactory yazılımı kullanılarak güç trafolarının ve dağıtım trafolarının modellenmesi yapılırken, **Şekil 8**'de görüldüğü gibi, her bir trafo için; anma gücü, primer ve sekonder taraflardaki anma gerilimi, doğru bileşendeki (positive sequence) kısa devre gerilim yüzdesi gibi temel parametreler tanımlanıp yazılıma aktarılmaktadır.



Şekil 7. Digsilent PowerFactory Programında Bu Tez Kapsamında Çizilmiş Tek-Hat Şemasının Bir Kesimi

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\Trafolar\TEIAS\154/31.5kV_100MVA_YNyn0_SNF_C(1).TypTr2

Basic Data	Name	154/31.5kV_100MVA_YNyn0_SNF_C(1)	OK
Description	Technology	Three Phase Transformer	Cancel
Version	Rated Power	100, MVA	
Load Flow	Nominal Frequency	50, Hz	
Short-Circuit VDE/IEC	Rated Voltage		
Short-Circuit Complete	HV-Side	154, kV	Vector Group
Short-Circuit ANSI	LV-Side	34,5, kV	HV-Side YN
Short-Circuit IEC 61363			LV-Side YN
Short-Circuit DC			<input type="checkbox"/> Internal Delta Winding
Simulation RMS	Positive Sequence Impedance		Phase Shift 0, *30deg
Simulation EMT	Short-Circuit Voltage uk	11,03, %	Name YNyn0
Protection	Copper Losses	80, kW	
Power Quality/Harmonics	Zero Sequence Impedance		
Reliability	Short-Circuit Voltage uk0	10, %	
Hosting Capacity Analysis	SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0, %	
Optimal Power Flow			

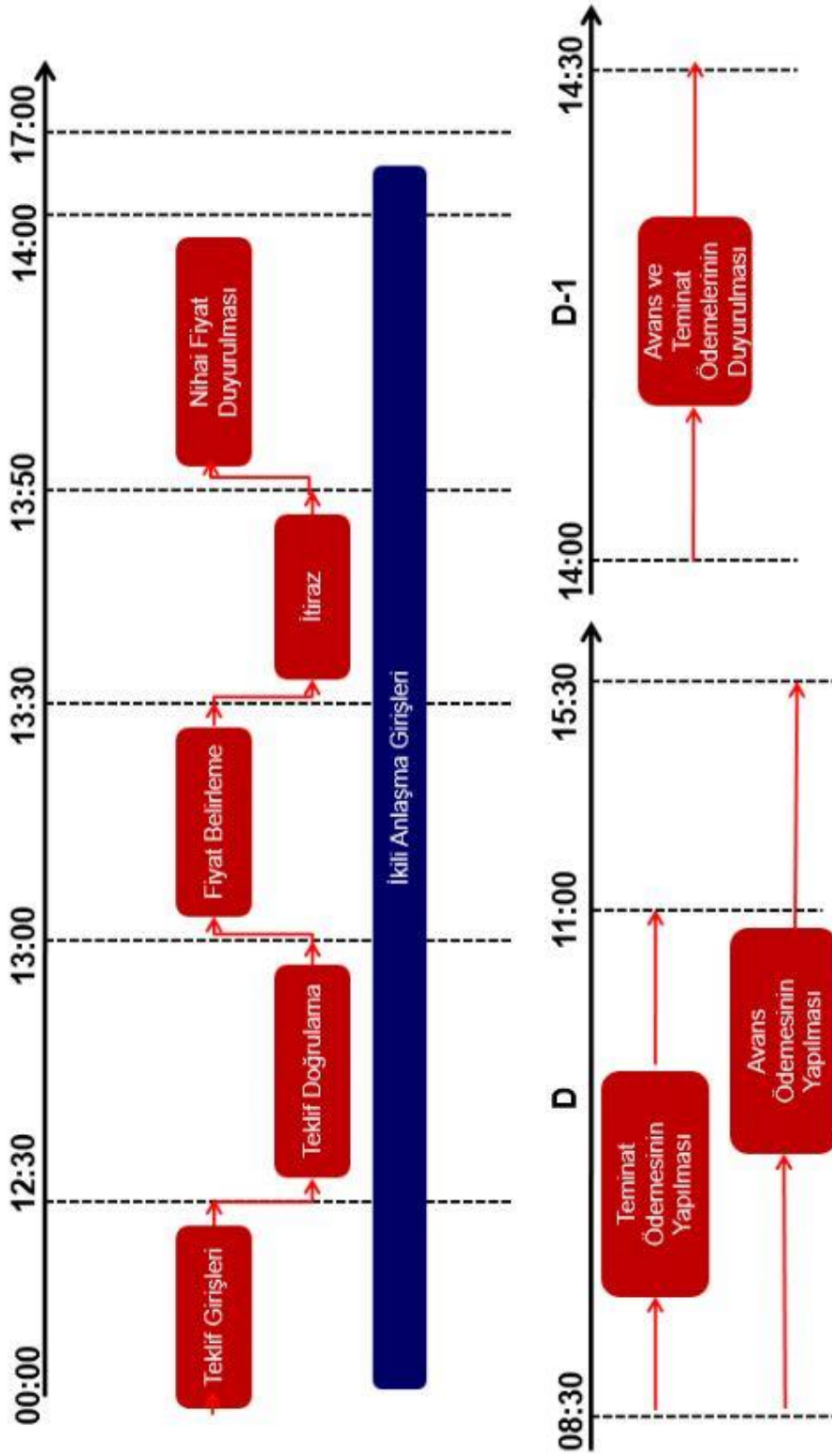
Şekil 8. Digsilent PowerFactory Programında Bu Tez Kapsamında Modellenen Bir Güç Trafosu

2.3. Elektrikli Araçlardan Şebekeye Enerji Aktarımının İletim Düzeyinde Ekonomik Katkısı

İletim seviyesinde ekonomik katkıdan bahsedilebilmesi için mevcut piyasaların incelenmesi gerekmektedir. Bu kısımda mevcut durum aktarıldıktan sonra verilebilecek ekonomik katkı değerlendirilecektir.

Mevcut piyasalar incelendiğinde:

- **Gün Öncesi Piyasası (GÖP):** Gün Öncesi Piyasası, piyasa işletmecisi tarafından işletilen, uzlaştırma dönemi bazında önümüzdeki gün içerisinde teslim edilecek elektriğin alım satım işlemleri için kurulan, toptan satış spot elektrik piyasasıdır. GÖP, piyasa katılımcılarının gün öncesinde üretimlerini veya tüketimlerini ve ikili anlaşmalarını dengeleme fırsatı sağlar; ayrıca sistem operatörüne dengeli bir sistem sağlar. Gün Öncesi Piyasası, adından da anlaşılacağı üzere, piyasa takas fiyatını bir gün öncesinde belirler. Bunun için sistem operatöründen aldığı uygun kapasiteyi, saat 09:30'da duyurur. Katılımcılar 12:30'a kadar tekliflerini sistem üzerinden girerler. Saat 13:00'e kadar teklifler kontrol edilip onaylanır veya reddedilir. Kabul edilen teklifler 13:00 - 13:30 arasında değerlendirilip saatlik bazda piyasa takas fiyatı oluşturulur. 13:30'dan 13:50'ye kadar piyasa katılımcılarına itiraz süresi tanınır; itirazlar saat 13:50 – 14:00 arasında değerlendirilir ve sonucu katılımcıya bildirilir. Saat 14:00'da ertesi günün 24 saatine ilişkin fiyat ve eşleşmeler nihai olarak duyurulur. Gün Öncesi Piyasası süreçleri **Şekil 9**'da verilmiştir. Piyasa takas fiyatının (PTF) bir saat aralığı için hesaplanmasına dair örnek bir hesap yöntemi **EK-1**'de verilmiştir.
- **Gün İçi Piyasası (GİP):** Türkiye'de bir gün içi piyasasının kurulmasına yönelik hazırlıklar Haziran 2011'de başlamış ve Gün içi Piyasası 1 Temmuz 2015'te faaliyete geçmiştir. Gün içi piyasasının birincil faydası, enerji dengesizliği tarafında olacaktır. Gün içi piyasasının açılmasıyla birlikte, dengesizliklerin bir kısmı bu pazarın içine yerleştirilmiştir.



Şekil 9. Gün Öncesi Piyasası Süreçleri [49]

- **Dengeleme Güç Piyasası (DGP):** Dengeleme Güç Piyasası, talebin gerçek zamanlı olarak dengelenmesi amacıyla, Sistem İşletmecisi tarafından işletilen ve 15 dakika içerisinde çıkış gücündeki değişimle elde edilen rezerv kapasitesinin, satıldığı veya satın alındığı organize toptan elektrik pazarıdır. Kendi hesabına kayıtlı olan dengeleme birimlerine (15 dakika içinde çıkış gücünü değiştirebilecek üretim tesisleri) sahip olan piyasa katılımcıları, Dengeleme Güç Piyasasına katılmakla yükümlüdür. Dengeleme Güç Piyasası işlemleri bir gün öncesinde, Gün Öncesi Piyasası kapandıktan hemen sonra başlar ve gerçek zamana kadar devam eder. Dengeleme Güç Piyasası teklifleri, Gün Öncesi Piyasası gibi, saatlik olarak, günlük olarak sunulur. Dengeleme Güç Piyasasına ilişkin talimatlar, teklif verme süresinin bitiminden başlayarak ilgili günün sonuna kadar herhangi bir zamanda bildirilebilir. DGP teklifleri, Sistem İşletmecisine sunulduktan sonra Sistem İşletmecisi gerçek zamanlı talep-arz dengesini sağlamak için gerçek yükü izler. Sistemin dengelenmesi gerektiğinde (örneğin, gerçek yük ile üretim programları arasındaki fark) Sistem İşletmecisi, sistemi yeniden dengelemek için Dengeleme Güç Piyasası talimatlarını (yük alma ve yük atma talimatları) verir. Enerji açığı olduğunda sistem yöneticisi, üretim santrallerinden yük almasını; enerji fazlası olduğunda ise yük atmasını ister. Piyasa Katılımcıları yük alma ve yük atma yönünde ayrı ayrı olmak üzere 15 miktar seviyesinde yük alma ve yük atma teklifi bildirebilirler.

Türkiye'deki mevcut GÖP, GİP ve DGP gibi piyasalar incelendiğinde sistemin güvenilirliğini sağlayacak birçok kural olduğu frekans korumak adına regüle bir piyasa olduğu gözükmektedir. Hem Türkiye elektrik piyasasının ekonomik anlamda pek çok önlem içerdiği için elektrikli araç bataryalarındaki güce ihtiyaç duymadığı hem de üretilen ve tüketilen enerji miktarının elektrikli araçların bataryalarındaki kapasitenin yanında çok büyük olduğu görüldüğü için bu tez kapsamında elektrikli araçtan elektrik şebekesine enerji aktarımının ekonomik boyutu ile ilgilenilmediğinin belirtilmesi gerekir. İleri çalışmalarda bu konu mikro-şebeke alanında çalışılırsa daha makul olabilir.

3. YÖNTEM

Bu kesimde, çalışmada izlenen yöntem ve kullanılan verilerin nasıl oluşturulduğu açıklanacaktır. Bu amaçla önce dağıtım şebekesinin sonra elektrikli araçların yüklerinin modellenmesi açıklanmış ve çalışmada kullanılan senaryolara yer verilmiştir.

3.1. Dağıtım Şebekesinin Modellenmesi

Elektrikli araçların yaygınlaşmasının 36 kV gerilim seviyesindeki elektrik dağıtım şebekesine etkilerini ortaya koymak amacıyla, Türkiye'nin büyükşehirlerinden bir tanesinde, 36 kV gerilim seviyesindeki elektrik dağıtım şebekesi, TEİAŞ güç trafolarından (bu trafolar dahil) OG/AG dağıtım trafolarına kadar (bu trafolar hariç), Digsilent PowerFactory programında modellenmiştir. Şehrin çevre yolu içerisinde kalan alan, çalışma alanı olarak belirlenmiş ve bu alandaki TEİAŞ'a ait 36 adet güç trafosu ve bu güç trafolarına bağlı elektrik şebekesi, dağıtım trafolarına kadar modellenmiştir.

Elektrik dağıtım şebekesi modelinden bahsedilmesi gerekirse;

- Orta gerilim seviyesindeki dağıtım merkezleri, indirici merkezler ve KÖK (kesici ölçü kabin) binaları model içerisinde yer almış, bu merkezlerden çıkan iletim fiderleri ve dağıtım fiderleri kablo kesitlerine ve karakteristiklerine göre modele eklenmiştir.
- İçerisinde birçok dağıtım trafosu barındıran ring veya radyal yapıdaki dağıtım fiderlerine ait yükler 1 Aralık 2019 – 1 Aralık 2020 tarihindeki maksimum yükler baz alınarak SCADA sisteminden edinilmiş ve modele bu yükler tanımlanmıştır.
- Dağıtım fiderlerine ait yükler modele tanımlandıktan sonra yük akış analizleri çalıştırılmış ve modeldeki iletim fiderleri yüklenmeleri, gerçek SCADA verileri ile kıyaslanarak eş zamanlılığı sağlayacak şekilde dağıtım fideri yükleri uygun katsayılarla çarpılmıştır. Bunun sonucunda iletim fiderlerinin maksimum yüklendiği durumdaki yükler dağıtım fiderlerine kendi içlerindeki maksimum yüklenme oranlarına göre pay edilmiş olmuştur. Tüm bu yüklerin uygun katsayılarla girilmesinden sonra nihai yük akış analizi sonuçları **Çizelge 8**'de verilmiştir.

- Son işlem olarak, güç trafolarının 1 yıl içerisindeki maksimum yüklendiği gün belirlenmiş ve o güne ait 15 dakikalık çözünürlükte yük karakteristiği oluşturulmuştur. Bu karakteristik ilgili güç trafosunun altındaki tüm dağıtım fiderlerine tanımlanmıştır. Böylece Digsilent PowerFactory programında 15 dakikalık çözünürlükte 24 saatlik yarı dinamik analizler yapılabilmektedir

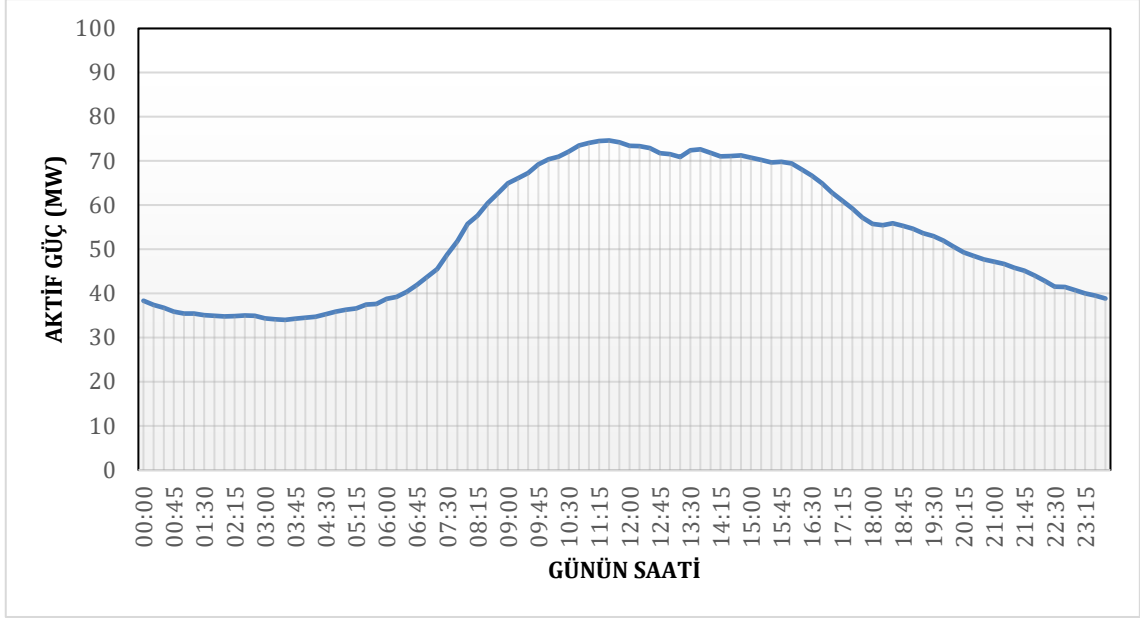
Modellenen 36 adet güç trafosundan, örnek olarak seçilen ve Kesim5'te ayrıntılı incelenen, 6 güç trafosuna ait yük profilleri **Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15**'te verilmiştir. Modellenen güç trafolarının 36 kV tarafındaki maksimum aktif güç değerleri ve bu aktif güç değerlerinin oluştuğu tarih saatler **Çizelge 3**'te sunulmuştur. TEİAŞ'ın ve dağıtım şirketlerinin veri güvenliği amacıyla güç trafolarının gerçek isimleri kullanılmamış; onun yerine trafolar 1'den 36'ya kadar numaralandırılarak paylaşılmıştır.

6 güç trafosu seçilirken trafoların mevcut yüklenme durumlarına göre seçim yapılarak

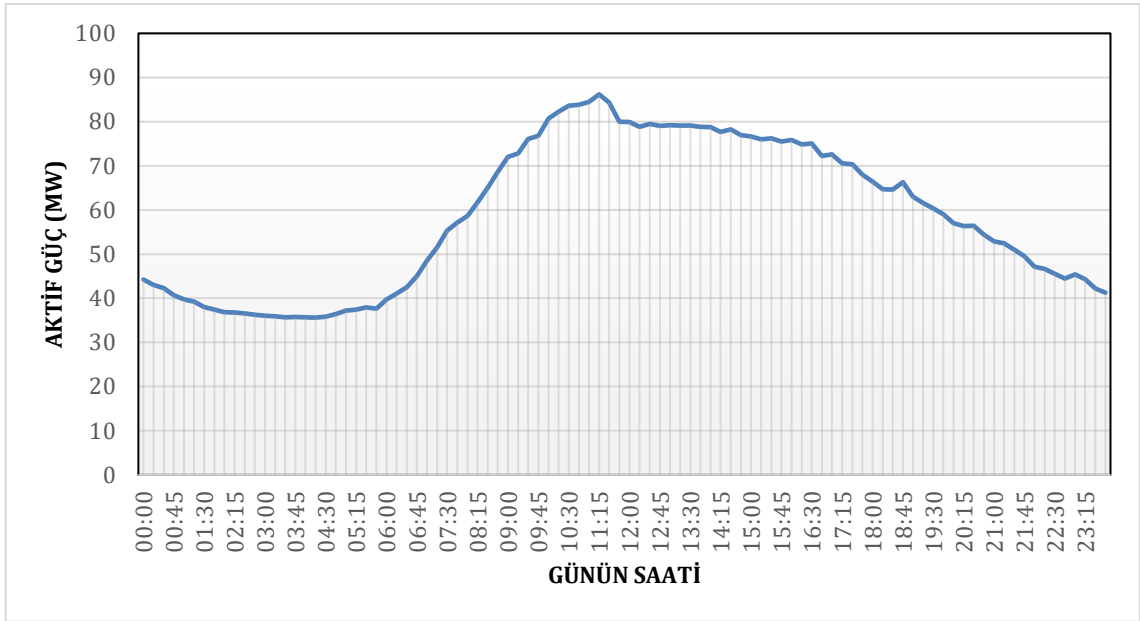
- En fazla yüklü olarak TR-2 ve TR-27
- En az yüklü olarak TR-34 ve TR-36
- Orta seviyede yüklü olarak TR-1 ve TR-33

olmak üzere 6 güç trafosu seçilmiştir. Tüm trafolar, reaktif gücün aktif güce oranını veren ve Elektrik Şebeke Yönetmeliği'ne [50] göre kapasitif yükler için 0,15 endüktif yükler için 0,20 üst sınırı olan, $\tan(\Phi)$ değerleri göz önüne alınarak incelendiğinde TR-33 gece saatlerinde ceza durumunda olması nedeniyle özel olarak seçilmiştir.

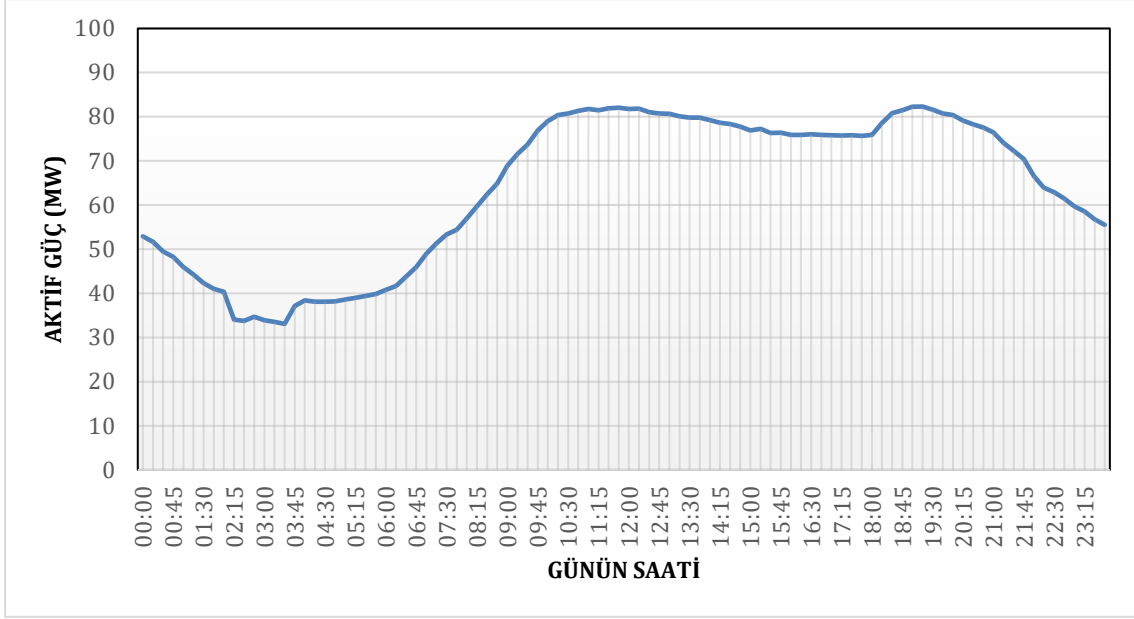
Yük profilleri incelendiğinde, TR-1 ve TR-2 kullanıcılarında ticarethane ve kamu kurumlarının yoğunlukta olduğu; TR-27 ve TR-33 kullanıcılarında iş yerlerinin yanı sıra meskenlerin de yoğunluk teşkil ettiği, TR-34 ve TR-36 kullanıcılarının ise ağırlıklı olarak mesken kullanıcıları olduğu söylenebilir.



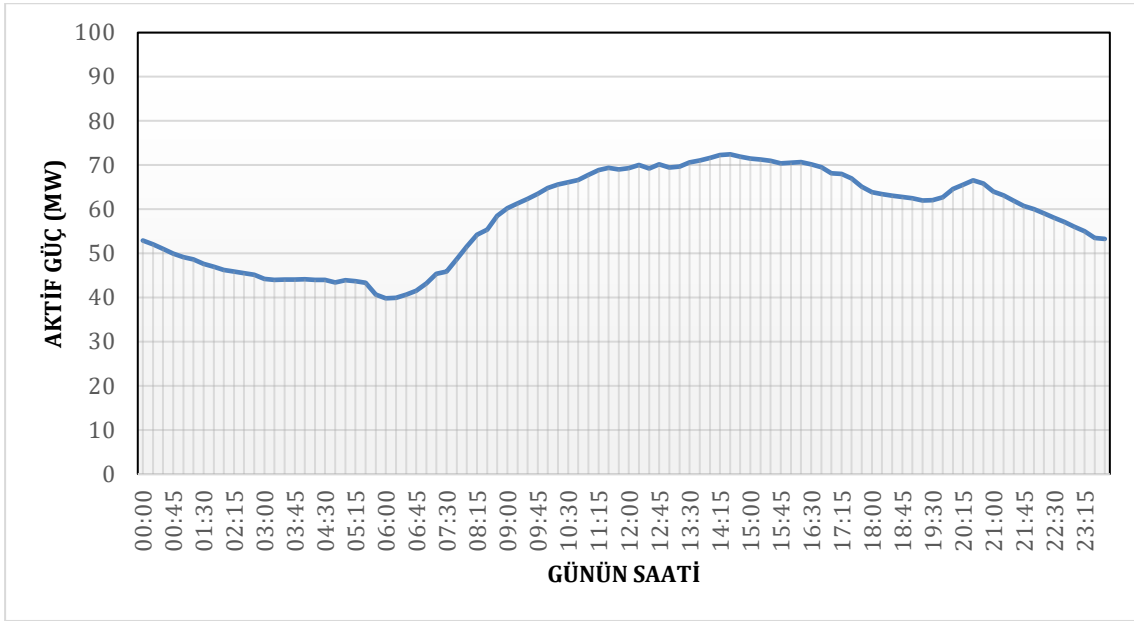
Şekil 10. TR-1 Yük Profili



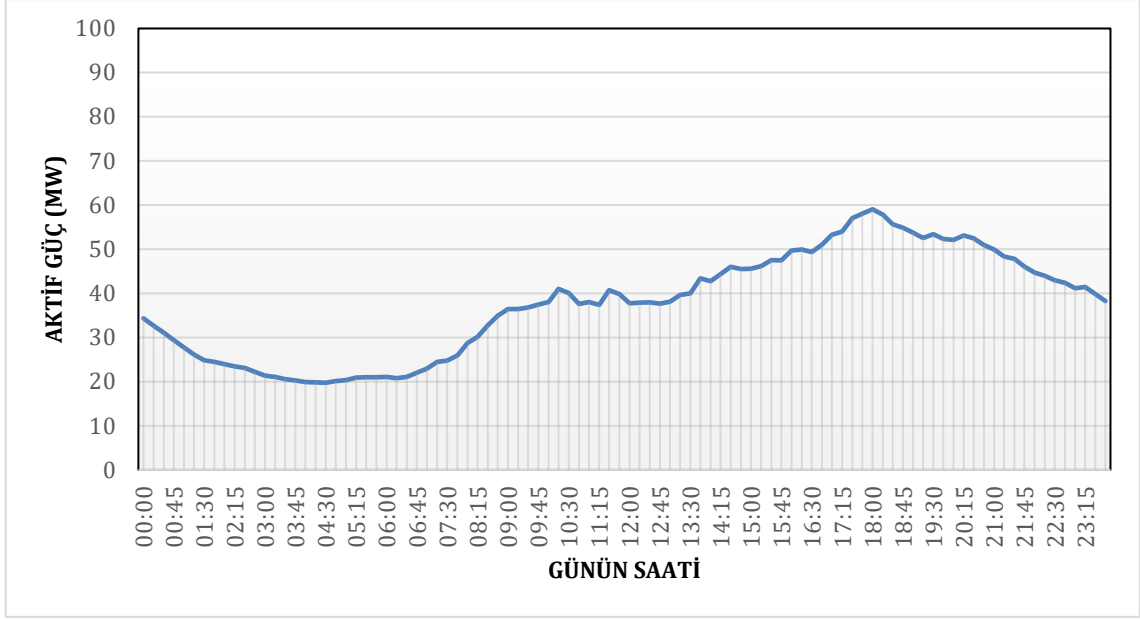
Şekil 11. TR-2 Yük Profili



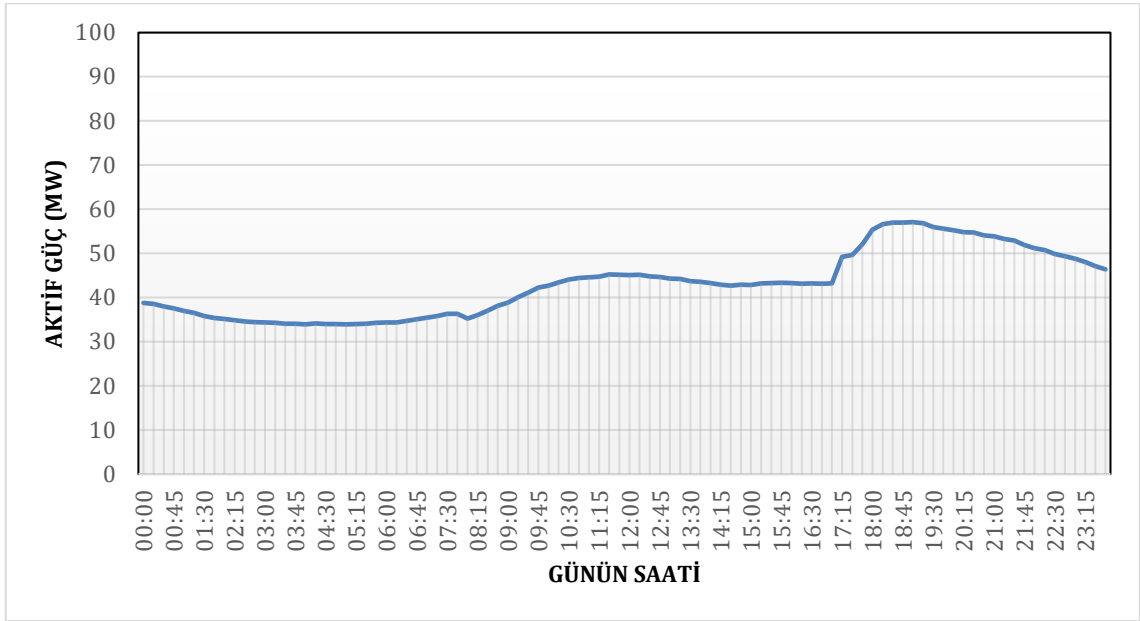
Şekil 12. TR-27 Yük Profili



Şekil 13. TR-33 Yük Profili



Şekil 14. TR-34 Yük Profili



Şekil 15. TR-36 Yük Profili

Çizelge 3. YG/OG Güç Trafolarının OG Taraf Aktif Güç Maksimum Talep Tarih ve Değerleri

Güç Trafosu	OG Taraf Aktif Güç			
	Maks. Talep (MW)	Maks. Talep Tarihi	Maks. Talep Saati	Kurulu Güç (MVA)
TR-1	75	11.02.2020	11:30	100
TR-2	86	11.02.2020	11:15	100
TR-3	82	11.2.2020	11:30	100
TR-4	32	05.12.2019	17:45	50
TR-5	33	24.1.2020	17:30	50
TR-6	24	08.1.2020	17:15	50
TR-7	81	03.11.2020	18:15	100
TR-8	60	17.09.2020	15:15	100
TR-9	60	07.05.2020	16:30	100
TR-10	77	29.09.2020	19:30	100
TR-11	62	12.02.2020	19:45	100
TR-12	79	14.02.2020	12:30	100
TR-13	70	23.01.2020	18:45	100
TR-14	68	20.07.2020	16:45	100
TR-15	43	03.09.2020	15:30	100
TR-16	35	02.07.2020	20:45	100
TR-17	83	23.11.2020	10:30	100
TR-18	79	23.11.2020	10:15	100
TR-19	76	10.02.2020	12:15	100
TR-20	77	16.09.2020	15:15	100
TR-21	81	18.08.2020	11:30	100
TR-22	75	25.12.2019	18:45	100
TR-23	79	21.01.2020	19:00	100
TR-24	77	13.3.2020	11:00	100
TR-25	68	07.05.2020	19:30	100
TR-26	63	01.02.2020	18:45	100
TR-27	82	10.02.2020	19:15	100
TR-28	59	19.06.2020	16:30	100
TR-29	86	18.12.2019	11:30	100
TR-30	73	18.03.2020	15:30	100
TR-31	80	19.08.2020	20:15	100
TR-32	79	09.04.2020	20:00	100
TR-33	72	10.08.2020	14:30	100
TR-34	59	19.11.2020	18:00	100
TR-35	80	10.11.2020	10:45	100
TR-36	57	19.01.2020	19:00	100

3.2. Elektrikli Araç Sayılarının Belirlenmesi

Elektrikli araç sayılarının, 2025 ve 2030 yıllarında Türkiye ve modellenen pilot bölge için belirlenmesinde, *Avrupa’da 2025 ve 2030 yıllarında kaç elektrikli binek araç olacağı* ve *halihazırda Türkiye binek araç pazarının Avrupa binek araç pazarına oranı* bilgilerinden yararlanılmıştır:

- *Avrupa’da 2025 ve 2030 yıllarında kaç elektrikli binek araç olacağı* bilgisi, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)’nın “Küresel Elektrikli Araç Görünümü 2020 (Global EV Outlook 2020)” Raporu’ndan elde edilmiştir [12]. Bu rapordaki veriler üzerinden hesaplar yapıldığında, 2019 yılı itibariyle küresel ölçekte 7.167.825 elektrikli binek araç olduğu ve Avrupa’da ise bu sayının 1.756.556 olduğu anlaşılmaktadır. Ülkelerin belirlenmiş politikaları doğrultusundaki senaryoya göre küresel elektrikli binek araç sayısının 2025 yılında 43.344.521 adet; 2030 yılında ise 119.131.232 adet olacağı öngörülmüştür. 2019 yılındaki Avrupa elektrikli binek araç sayısının küresel ölçekteki elektrikli binek araç sayısına oranının 2025 ve 2030 yıllarında değişmeyeceği varsayılırsa, Avrupa elektrikli binek araç sayısının

2025 yılında 10.622.064 adet;

2030 yılında ise 29.194.453 adet

olacağı söylenebilir.

- *Türkiye binek araç sayısının Avrupa binek araç sayısına oranı*; Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği (ACEA)’nin Raporu’na göre 2018 yılında Avrupa karayollarında bulunan otomobil sayısı 267.834.417 adetti; TÜİK’ten alınan verilere göre ise bu sayı aynı yıl Türkiye için 12.398.190 adetti. Türkiye’deki binek araç sayısının Avrupa’daki binek araç sayısına oranının, yaklaşık % 4,63, benzer politikalar çerçevesinde elektrikli binek araçta da geçerli olacağı varsayılırsa Türkiye’de elektrikli binek araç sayısı 2025 yılı için 491.701 adet; 2030 yılı için ise 1.351.426 adet olacağı söylenebilir. Modellenen bölgedeki elektrikli binek araç sayısı hesaplanırken yine TÜİK’ten alınan verilere göre oranlama yapılmıştır. Elektrikli araç hesaplama yöntemi, kullanılan oranlamayı içerecek şekilde, **Çizelge 4**’te gösterilmiştir.

Çizelge 4. Elektrikli Araç Hesaplama Yöntemi

	A	B	C	Veri Kaynağı / Kullanılan Formül
1	Seçilen İl Otomobil Sayısı	2019	1.489.336	TÜİK
2	Türkiye Otomobil Sayısı	2019	12.503.049	TÜİK
3	Avrupa binek araç sayısı	2018	267.834.417	ACEA
4	Türkiye binek araç sayısı	2018	12.398.190	TÜİK
5	Küresel EA Binek Araç Sayısı	2019	7.167.826	IEA EV 2020 Report
6	Avrupa EA Binek Araç Sayısı	2019	1.756.557	IEA EV 2020 Report
7	Küresel EA Binek Araç Sayısı	2025	43.344.521	IEA EV 2020 Report
8	Küresel EA Binek Araç Sayısı	2030	119.131.233	IEA EV 2020 Report
9	Avr/Küresel, EA Otomobil Oranı	2019	24,51%	C6/C5
10	Avrupa EA Otomobil Sayısı	2025	10.622.066	C7*C9
11	Avrupa EA Otomobil Sayısı	2030	29.194.459	C8*C9
12	Binek araç TR / Avrupa Oranı	2018	4,63%	C4/C3
13	TR EA Otomobil Sayısı	2025	491.701	C10*C12
14	TR EA Otomobil Sayısı	2030	1.351.426	C11*C12
15	Otomobil Seçilen İl / TR Oranı	2019	11,91%	C1/C2
16	İl EA Otomobil Sayısı	2025	58.570	C13*C15
17	İl EA Otomobil Sayısı	2030	160.979	C14*C15
18	Metropol / İl Tüketim Oranı	2020	85,99%	SCADA
19	Metropol EA Otomobil Sayısı	2025	50.365	C16*C18
20	Metropol EA Otomobil Sayısı	2030	138.426	C17*C18

Her bir güç trafosuna bağlanacak elektrikli binek araç sayısı ilgili güç trafosunun maksimum yükünün, büyükşehir ilindeki çevre yolu içerisinde ve yoğun yerleşimin olduğu, Metropol bölgesinin maksimum yüküne oranında dağıtılmış ve **Çizelge 5**'te belirtilmiştir. Türkiye için tahminlenen elektrikli araç sayısı en kötü senaryoyu dahi kapsaması için Kesim 5.2.2'de farklı EA yaygınlaşma sayıları ile analizler bir güç trafosu bölgesinde tekrar yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında analizi yapılan sayılar [30] ve [51] çalışmalarında yer alan farklı senaryolardaki EA sayılarını da kapsamaktadır.

3.3. Elektrikli Araç Yüklerinin Modellenmesi

Elektrikli araç yükleri belirlenirken Zhou ve diğerleri [52] tarafından yayımlanmış araştırma makalesinden faydalanılmıştır. Bu çalışmada elektrikli araçların farklı şarj algoritmaları çerçevesinde enerji kullanım durumları ortaya konmuştur. Ayrıca birden fazla parametre optimum hale getirilerek çok amaçlı bir şarj stratejisi önerilmiştir. MATLAB kodlarını açık kaynak olarak yayımlayan makale yazarları, Wang ve diğerleri [53] tarafından 2014 yılında yayımlanan "Pekin Binek Araç Seyahat Anketi" çalışmasından yararlanmışlardır. Pekin'de 112 elektrikli binek araçtaki GPS'ler üzerinden 4892 adet veri toplanan seyahat profili çalışmasında Haziran 2012'den Mart 2013'e kadar kayıt alınmış ve hafta içi günlerinde elde edilen 5 gösteregeye ait ortalamalar **Çizelge 6**'da verilmiştir.

EA modellenirken, ortalama değerler olan,

- Batarya kapasitesinin 23 kWh,
- Enerji tüketiminin 0,175 kWh/km,
- Araçların şarj kapasitesinin 15 kW,
- Aracın şarjda kalma süresinin 5 saat

değerleri göz önüne alınmıştır [52]. Ayrıca bu tezde,

- bu ortalama değerler temel alınarak MATLAB'da açık kaynak kodlu olarak yapılan modelleme [52] çalışmasından faydalanılmıştır.
- EA'ların yaygınlaşma senaryolarında BEV ve PHEV olmak üzere iki türün toplamının yaygınlaşma sayıları kullanılmıştır.

Çizelge 5. Güç Trafosuna Bağlanacak EA Sayısı

Güç Trafosu	OG Taraf Aktif Güç Max Demand (MW)	2025 Binek EA Sayısı	2030 Binek EA Sayısı
TR-1	75	1.507	4.141
TR-2	86	1.740	4.781
TR-3	82	1.654	4.547
TR-4	32	642	1.764
TR-5	33	658	1.808
TR-6	24	482	1.325
TR-7	81	1.634	4.490
TR-8	60	1.217	3.345
TR-9	60	1.211	3.328
TR-10	77	1.555	4.274
TR-11	62	1.243	3.417
TR-12	79	1.589	4.367
TR-13	70	1.425	3.917
TR-14	68	1.377	3.784
TR-15	43	1.199	3.295
TR-16	35	1.180	3.243
TR-17	83	1.669	4.587
TR-18	79	1.601	4.402
TR-19	76	1.538	4.228
TR-20	77	1.558	4.281
TR-21	81	1.640	4.508
TR-22	75	1.522	4.184
TR-23	79	1.602	4.404
TR-24	77	1.551	4.263
TR-25	68	1.379	3.791
TR-26	63	1.275	3.504
TR-27	82	1.661	4.567
TR-28	59	1.197	3.291
TR-29	86	1.740	4.782
TR-30	73	1.481	4.070
TR-31	80	1.619	4.449
TR-32	79	1.590	4.371
TR-33	72	1.462	4.018
TR-34	59	1.192	3.275
TR-35	80	1.621	4.455
TR-36	57	1.152	3.166

Çizelge 6. Elektrikli Araç Seyahat Profilini Oluşturan 5 Gösterge [53]

Gösterge	Birim	Ortalama Değer
Günlük Toplam Mesafe	km	35,4
Yolculuk Başına Mesafe	km	15,5
Seyahat Süresi	saat	1,51
Yolculuk Başına Süre	saat	0,63
Günlük Seyahat Sıklığı	defa	2,29

Çalışmada, batarya ve şarj istasyonu özellikleri mevcuttaki ticari ürünlerin ortalaması alınarak oluşturulmuş; bu iki girdiye elektrikli araç özellikleri ve seyahat profilleri eklenmiş ve toplamda dört girdi ile açık kaynak olarak yayımladıkları MATLAB kodu vasıtasıyla elektrikli araç yükleri oluşturulmuştur. Seyahat profili önce matematiksel modellere dönüştürülmüş, diğer bir deyimle gerçek veriler seyahat karakteristikleri diyebileceğimiz istatistiksel modellere çevrilmiş ve şarj stratejilerine göre Monte Carlo Simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Böylece seyahat bilgileri, elektrik faturaları ve bu tez kapsamında kullanılacak olan elektrik yükleri oluşturulmuştur.

3.4. Senaryoların Belirlenmesi

Zhou ve diğerleri [52] çalışmasında bulunan şarj senaryolarından “*Rastgele*” ve “*Parkta Şarj*” stratejileri bu tez kapsamında kullanılmış; bunlara ek olarak kullanıcıların yarısının gece 00:00 – 08:00 saatleri arasında araçlarını şarj edeceği bir tarife ile yönlendirildikleri durum için ise “*Gece Tarifesi*” isimli şarj stratejisi ortaya konmuştur. 240.000 elektrikli binek araca ait 24 saatlik elektrik talep yük profili; rastgele şarj stratejisi için **Şekil 16**’da, parkta şarj stratejisi için **Şekil 17**’de ve gece tarifesi stratejisi için **Şekil 18**’de verilmiştir.

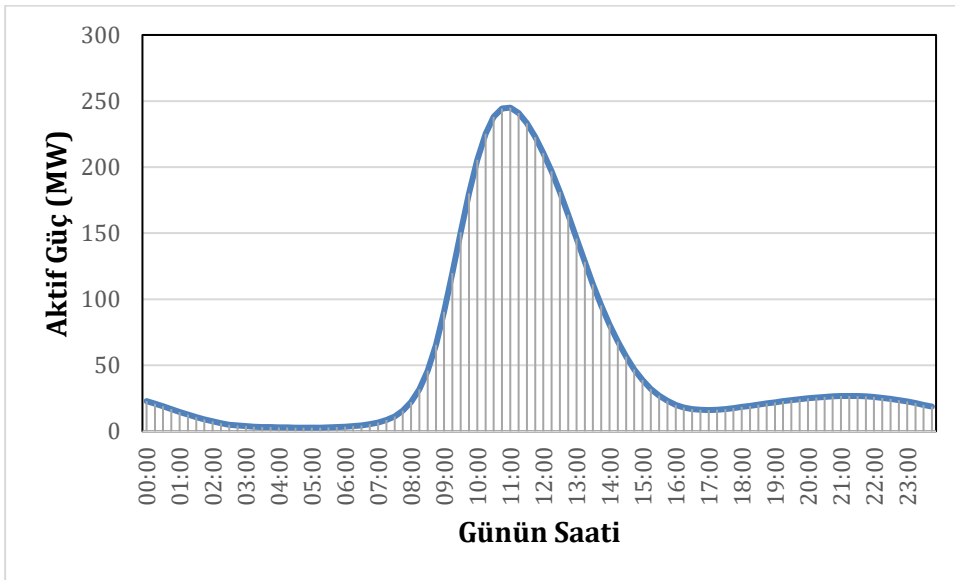
Elektrikli araç kullanıcıları araçlarını şarj ederken farklı şarj stratejileri izleyeceklerdir. Örneğin, araçlarını eve geldikten sonra ve aracın tamamını şarj etmeye yetecek kadar zaman olduğu durumda şarj ediyorsa bu strateji, Zhou ve diğerleri [52] tarafından “Charging at Parking” stratejisi olarak adlandırılmıştır. İlgili strateji, bu çalışmada kullanılırken “Parkta Şarj” olarak ifade edilmiştir.

Elektrikli araç sahiplerinin araçlarını şarj ederken tamamen rastgele davranış gösterdikleri ya da diğer bir deyişle onları herhangi bir stratejiye yönlendirecek amaç taşımadıkları durum için “Randomness” (“Rastgele”) şarj stratejisi tekdüze dağılımdan

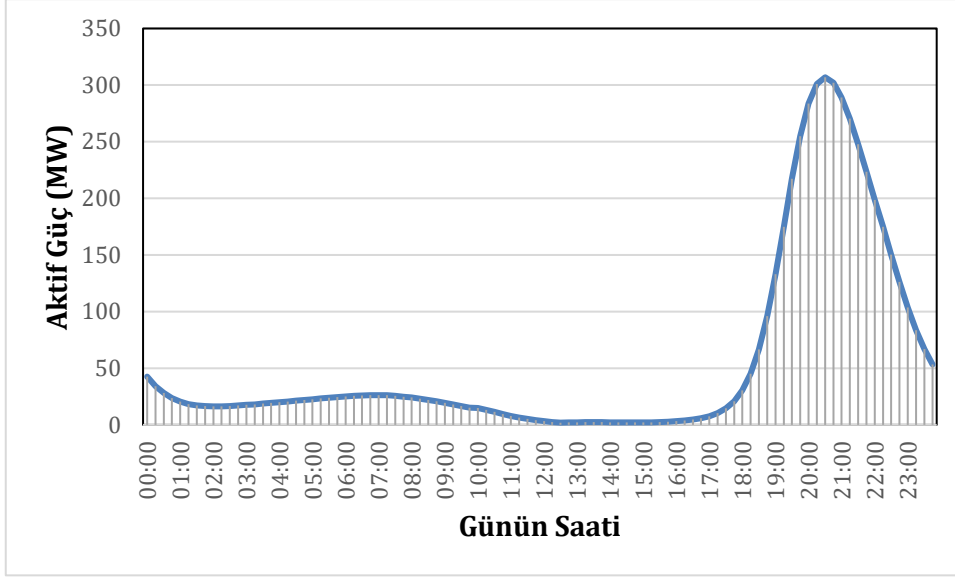
matematiksel olarak üretilmiş; bunun sonucunda elektrikli araç şarj yükü, bir şarj stratejisi olmadığı için doğrudan sürüş profilini oluşturan göstergelerden en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonu yaratıldıktan sonra stokastik simülasyon yöntemi olan Monte Carlo simülasyonları neticesinde elde edilmiştir [52].

Kontrolsüz şarj senaryoları dahilinde elektrikli araçların yaygınlaşması durumunda en çok, evde şarj ve işte şarj durumlarının ortaya çıkacağı tahmin edilmekte bunun da gündüz ve akşam puantını artıracığı öngörülmektedir. Bu durum, yukarıda şarj stratejileri açıklanan rastgele ve parkta şarj senaryolarının kullanılmasının makul bir yaklaşım olacağını göstermektedir.

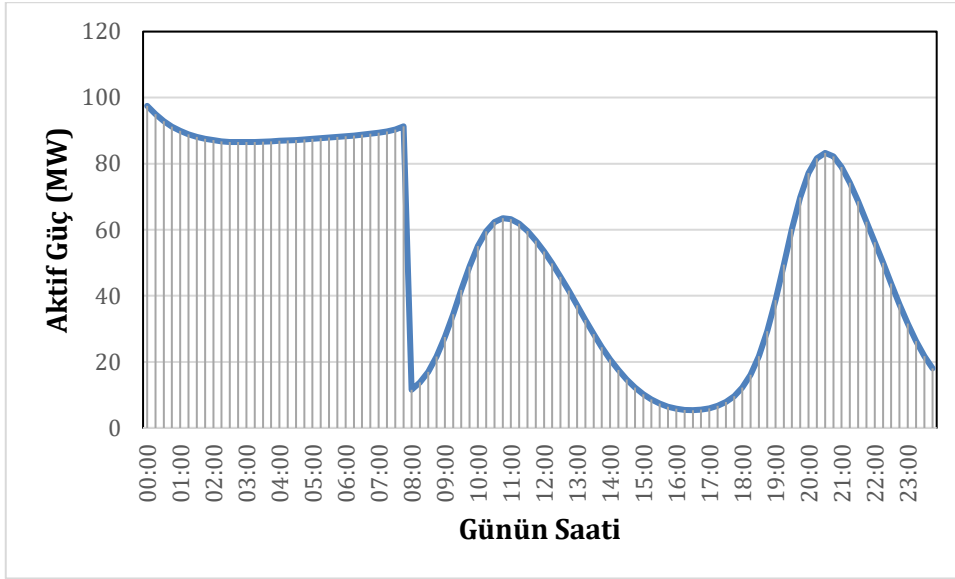
Yukarıda söz edilen iki stratejiye ek olarak bu çalışma kapsamında üretilmiş şarj stratejisi ise gece tarifesi ismi verilen şarj stratejisidir. Gece tarifesi, uygun teşvikler ile araçların yarısının gece 00:00 ile 08:00 arasında şarj olacağı ve şebeke yöneticisinin bu saatler arasında araç gruplarını şebekeye eşit yük oluşturacak şekilde sırayla devreye alıp çıkaracağı, araç tüketim tarifesine uymayan kullanıcıların (diğer yarının) ise yine gündüz ve akşam saatlerinde şebeke puantını artırdıkları şarj stratejisidir.



Şekil 16. Rastgele Şarj Stratejisi ile EA Yük Profili



Şekil 17. Parkta Şarj Stratejisi ile EA Yük Profili



Şekil 18. Gece Tarifesi Stratejisi ile EA Yük Profili

3.5. Dağıtım Şebekesinin Mevcut Durumu

Modellenen dağıtım bölgesindeki 36 adet güç trafosuna ait yük akış analizi sonuçları Çizelge 8'de verilmiştir. Bu çizelgede;

Kurulu güç (MVA); İlgili güç trafosunun etiket kurulu güç bilgilerinden maksimum olanı; [örneğin ONAN (Oil Mineral Natural Convection Air Natural Convection) 80 MVA ile ONAF (Oil Mineral Natural Convection Air Forced Convection)100 MVA güç trafosunda 100 MVA'yı]

YG Taraf Gerilim Değeri (p.u.); Güç trafosu primer tarafının gerilim seviyesini per unit cinsinden değerini

OG Taraf Gerilim Değeri (p.u.); Güç trafosu sekonder tarafının gerilim seviyesini per unit cinsinden değerini

Yüklenme Oranı (%); Güç trafosunun primer tarafındaki görünür gücün kurulu güce oranının yüzdesel ifadesini

OG Taraf Akım Değeri (A); Güç trafosunun sekonder sargısından çekilen akım değerinin büyüklüğünü

OG Taraf Aktif Güç (MW); Güç trafosunun sekonder sargısından dağıtım şebekesi yönünde çekilen aktif güç değerini

OG Taraf Reaktif Güç (MVAR); Güç trafosunun sekonder sargısından dağıtım şebekesi yönünde çekilen reaktif güç değerini

OG Taraf Görünür Güç (MVA); Güç trafosunun sekonder sargısından çekilen kompleks gücün büyüklüğünü

OG Taraf $\cos(\Phi)$, güç trafosunun sekonder tarafında dağıtım şebekesi tarafından çekilen aktif gücün görünür güce oranını

OG Taraf $\tan(\Phi)$, güç trafosunun sekonder tarafında şebekeden çekilen reaktif gücün şebekeden çekilen aktif güce oranını

göstermektedir.

Çizelge 8'de yer alan değerler bulunurken girdi olarak, Yöntem Kesimi'nde açıklandığı gibi, her bir trafo bölgesindeki 1 Aralık 2019'dan 1 Aralık 2020 tarihine kadar olan 1

yıllık süredeki maksimum akımlar baz alınmıştır. **Çizelge 3**'teki maksimum talep tarihleri de baz alınarak, 15 dakikalık çözünürlükte 24 saatlik, yük profilleri oluşturulmuştur. Elektrikli araçların dağıtım şebekesine etkisinin ve dağıtım şebekesine verebileceği reaktif katkının incelendiği bu çalışmada Kesim 3.1'de açıklandığı gibi, 6 adet güç trafosu örnek olarak seçilmiştir. **Çizelge 8**'de sarı dolgu ile belirtilen 6 trafo bölgesine ait sonuçlar 2025 ve 2030 yılları için ayrı ayrı verilecektir.

Ayrıca; seçilen yıl, farklı EA sayısı ve senaryolara göre değişen analiz sonuçlarının hangi kesimde açıklandığı **Çizelge 7**'de sunulmuştur. Bu çizelgede geçen kontrollü ve kontrolsüz şarj ifadeleri daha önceki kesimlerde tanım olarak açıklanmakla beraber bu tez kapsamında da elektrikli araçların rastgele ve parkta şarj senaryolarında bağlansa bile reaktif güç sağladıkları durumda kontrollü şarj tanımında yer aldığını ve gece tarifesine uyan senaryonun her zaman kontrollü şarj sınıfında yer verildiğini belirtmek faydalıdır.

Çizelge 8'de verilen $\tan(\Phi)$ değerlerinin negatif olması, dağıtım şebekesinden güç trafosuna doğru reaktif güç sağlandığını diğer bir deyişle şebekenin kapasitif özellikte olduğunu göstermektedir. Böylece, maksimum yüke sahipken yapılan yük akış analizleri sonucunda, seçilen şehir merkezi bölgesindeki 36 güç trafosundan 33 tanesinin kapasitif güç faktörüne sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda; elektrikli araçlardan şebekeye sağlanacak reaktif gücün, kapasitif dağıtım şebekesinin kompanzasyonunu sağlayacak şekilde, endüktif yönde olması tercih edilmelidir.

Çizelge 7. Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Analizler ve Açıklandığı Kesimler

	Öngörü Yılı	Çalışılan Trafo Bölgesi Sayısı	Senaryolar	Türkiye Elektrikli Araç Sayısı (Milyon)	Şarj İstasyonlarının Güç Trafosu'na Göre Konumu	Açıklandığı Kesim
Kontrolsüz Şarj Durum Çalışmaları	2025	6	Rastgele Parkta Şarj	0,5	Fider Boyunca Dağılmış Vaziyette	4.1
	2030	6	Rastgele Parkta Şarj	1,3		4.2
Kontrollü Şarj Durum Çalışmaları	2025	6	Rastgele Parkta Şarj	0,5		5.1
	2030	6	Rastgele Parkta Şarj	1,3		5.2
		1	Rastgele Parkta Şarj Gece Tarifesi	1,3		5.2.1 / 5.2.2
				2,7		5.2.2
				3,4		5.2.2
				3,4		Fider Sonunda

Çizelge 8. Güç Trafoları Yük Akış Analizi Sonuçları

Güç Trafosu	Kurulu Güç (MVA)	YG Taraf Gerilim (p.u.)	OG tarafı							
			Gerilim Değeri (p.u.)	Yüklenme Oram (%)	Akım Değeri (A)	Aktif Güç (MW)	Reaktif Güç (MVAR)	Görünür Güç (MVA)	cos(Φ)	tan(Φ)
TR-1	100	1	1,0036	75	1250	75	-7	75	0,9956	-0,0945
TR-2	100	1	0,9965	87	1448	86	-2	86	0,9998	-0,0200
TR-3	100	1	0,9987	82	1374	82	-3	82	0,9992	-0,0401
TR-4	50	1	0,9995	64	533	32	-1	32	0,9990	-0,0450
TR-5	50	1	1,0004	65	546	33	-2	33	0,9983	-0,0579
TR-6	50	1	0,9977	48	401	24	0	24	1,0000	0,0000
TR-7	100	1	0,9941	81	1362	81	1	81	0,9999	0,0117
TR-8	100	1	0,9977	60	1011	60	-1	60	1,0000	-0,0087
TR-9	100	1	0,9989	60	1005	60	-2	60	0,9997	-0,0261
TR-10	100	1	0,9963	77	1294	77	-1	77	1,0000	-0,0081
TR-11	100	1	0,9994	62	1032	62	-2	62	0,9994	-0,0352
TR-12	100	1	1,0023	79	1318	79	-6	79	0,9969	-0,0795
TR-13	100	1	0,9999	71	1183	71	-3	71	0,9989	-0,0470
TR-14	100	1	0,9975	68	1144	68	-1	68	0,9999	-0,0140
TR-15	100	1	1,0012	59	994	59	-4	59	0,9982	-0,0605
TR-16	100	1	1,0007	59	979	58	-3	59	0,9986	-0,0528
TR-17	100	1	0,9987	83	1387	83	-3	83	0,9992	-0,0410
TR-18	100	1	0,9982	80	1331	79	-3	79	0,9995	-0,0324
TR-19	100	1	0,9997	76	1277	76	-4	76	0,9989	-0,0480
TR-20	100	1	1,0028	77	1292	77	-7	77	0,9965	-0,0843
TR-21	100	1	1,0044	81	1361	81	-8	82	0,9947	-0,1030
TR-22	100	1	0,9997	76	1264	75	-4	75	0,9989	-0,0469
TR-23	100	1	1,0025	79	1330	79	-6	80	0,9967	-0,0815
TR-24	100	1	1,0007	77	1287	77	-5	77	0,9982	-0,0598
TR-25	100	1	0,9988	68	1145	68	-2	68	0,9995	-0,0312
TR-26	100	1	1,0014	63	1058	63	-4	63	0,9980	-0,0640
TR-27	100	1	1,0015	82	1379	82	-6	83	0,9974	-0,0716
TR-28	100	1	0,9954	60	998	59	2	59	0,9996	0,0280
TR-29	100	1	0,9998	86	1445	86	-5	86	0,9985	-0,0541
TR-30	100	1	1,0017	73	1229	73	-5	74	0,9975	-0,0709
TR-31	100	1	1,0072	80	1344	80	-11	81	0,9910	-0,1349
TR-32	100	1	0,9942	79	1326	79	1	79	0,9999	0,0137
TR-33	100	1	1,0087	73	1217	72	-11	73	0,9876	-0,1587
TR-34	100	1	1,0050	59	990	59	-7	59	0,9929	-0,1201
TR-35	100	1	1,0005	80	1345	80	-5	80	0,9983	-0,0592
TR-36	100	1	1,0008	57	956	57	-3	57	0,9985	-0,0548

4. KONTROLSÜZ ŞARJ DURUMUNDA ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞEBEKEYE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Bu kesimde, Kesim 3.2’de açıklandığı gibi, 2025 yılı öngörü çalışmalarında 500.000, 2030 çalışmalarında 1 milyon 350 bin elektrikli binek araç olacağı düşünülmüş ve Yöntem Kesimi’nde açıklandığı gibi, bu araç sayılarının ilgili katsayılarla orantılanmasıyla, güç trafosu bölgeleri için hesaplanan elektrikli binek araç sayıları göz önüne alınmıştır. Güç trafosu bölgelerindeki elektrikli binek araç sayılarının, ilgili trafo bölgelerindeki abone sayılarına bölünmesiyle elde edilen yaygınlaşma oranının, 2025 yılı için pilot bölgelerde %5’e, 2030 için pilot bölgelerde %15’e ulaşıldığı belirlenmiştir.

4.1. 2025 Yılı İçin Öngörüler

Tüm ülkede 2025 yılında yaklaşık yarım milyon elektrikli araç olacağı varsayılarak rastgele şarj edilme ve parkta şarj edilme senaryoları ile, analizler yapılmıştır. Seçilen güç trafoları için, mevcut durumda maksimum yüklenmenin olduğu günde, rastgele ve parkta şarj senaryoları ile EA eklenmesinin maksimum yüklenmeye etkisi yüklenme durumları günün saatine karşı çizilmiş ve sırasıyla, **Şekil 19, Şekil 20, Şekil 21, Şekil 22, Şekil 23 ve Şekil 24**’te verilmiştir. Aynı senaryolarla, seçilen güç trafolarında, EA eklenmesinin yaratacağı yüzde değişim olarak gerilim düşmesi, günün saatine karşı çizilmiş ve sırasıyla, **Şekil 25, Şekil 26, Şekil 27, Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30**’da gösterilmiştir.

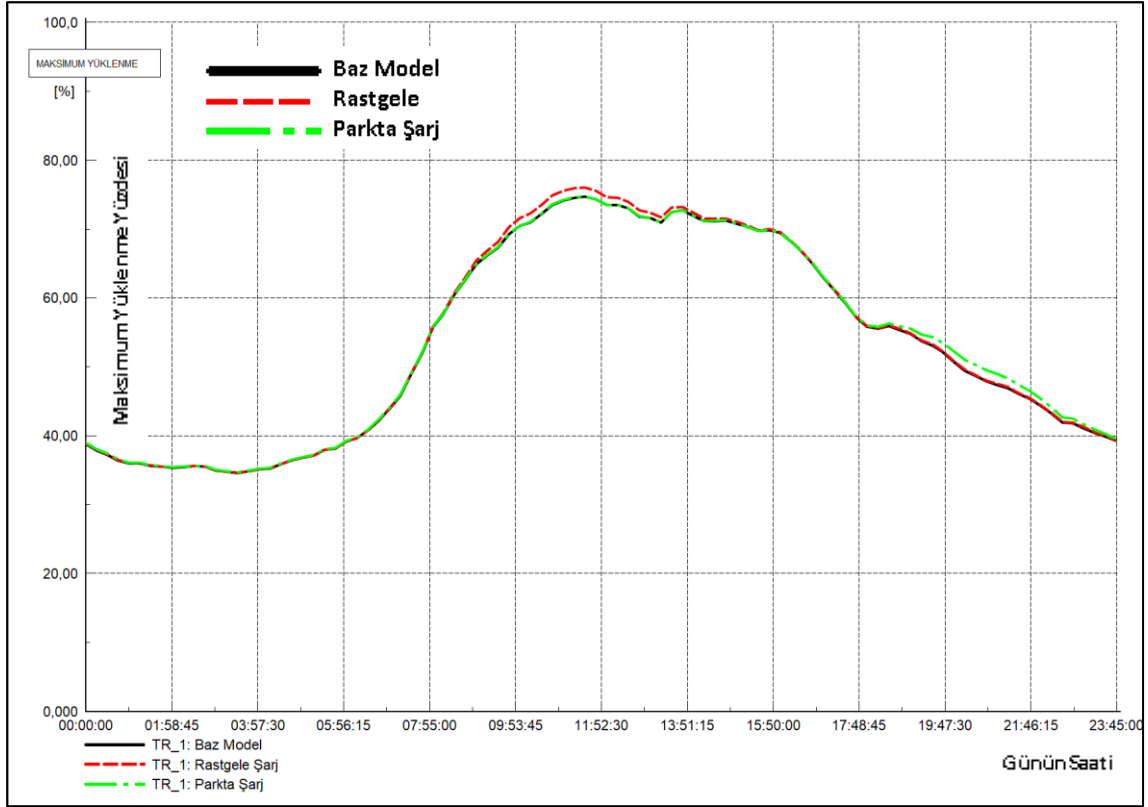
Mevcut yük profili göz önüne alındığında, yüklenme oranının yüksek olması nedeniyle, en belirgin elektrikli araç etkisinin görülmesi beklenen, TR-27’de mevcut gündüz puantı %82,2 iken, rastgele şarj senaryosu ile %83,6 olmuş; mevcut akşam puantı ise %82,4 iken parkta şarj senaryosu ile %83,5 olmuştur. Modellenen 36 güç trafosu içerisinde en yüksek tepe noktasına sahip olan TR-2’de %86,5 oranındaki mevcut gündüz puantı, rastgele şarj senaryosunda %88,2 gündüz puantına erişmiştir.

TR-27’ye ait yük profili, gün içinde yüksek gece saatlerinde diğer trafolarla kıyaslandığında görece daha düşük olması nedeniyle kontrollü şarj senaryolarında örnek güç trafosu olarak seçilmiştir.

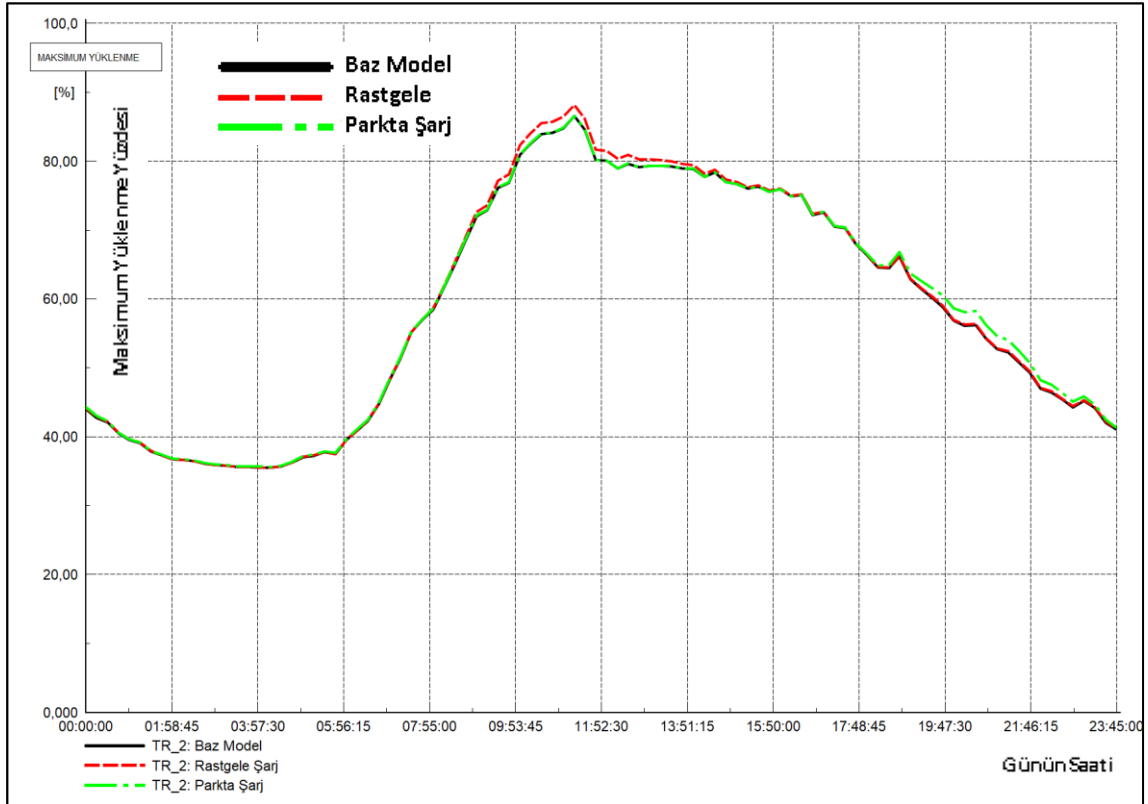
2025 yılı %5 yaygınlaşma oranı göz önüne alındığında, Rautiainen ve diğerlerinin [19] çalışmasına benzer olarak şebekeye çok fazla bir yük getirmediği sonucu ortaya çıkmıştır.

Gerilim düşümü bakımından da sonuçlar benzerdir, **Şekil 25 – Şekil 30**. Gerilim düşümünün en fazla olduğu fider, TR-2'ye ait bölgede yer almaktadır. Baz modelde maksimum gerilim düşümü %2,6 iken rastgele şarj senaryosunda bu oran %2,8 olmuştur. Her durumda mevzuata uygun olarak maksimum %10 sınırları içindedir.

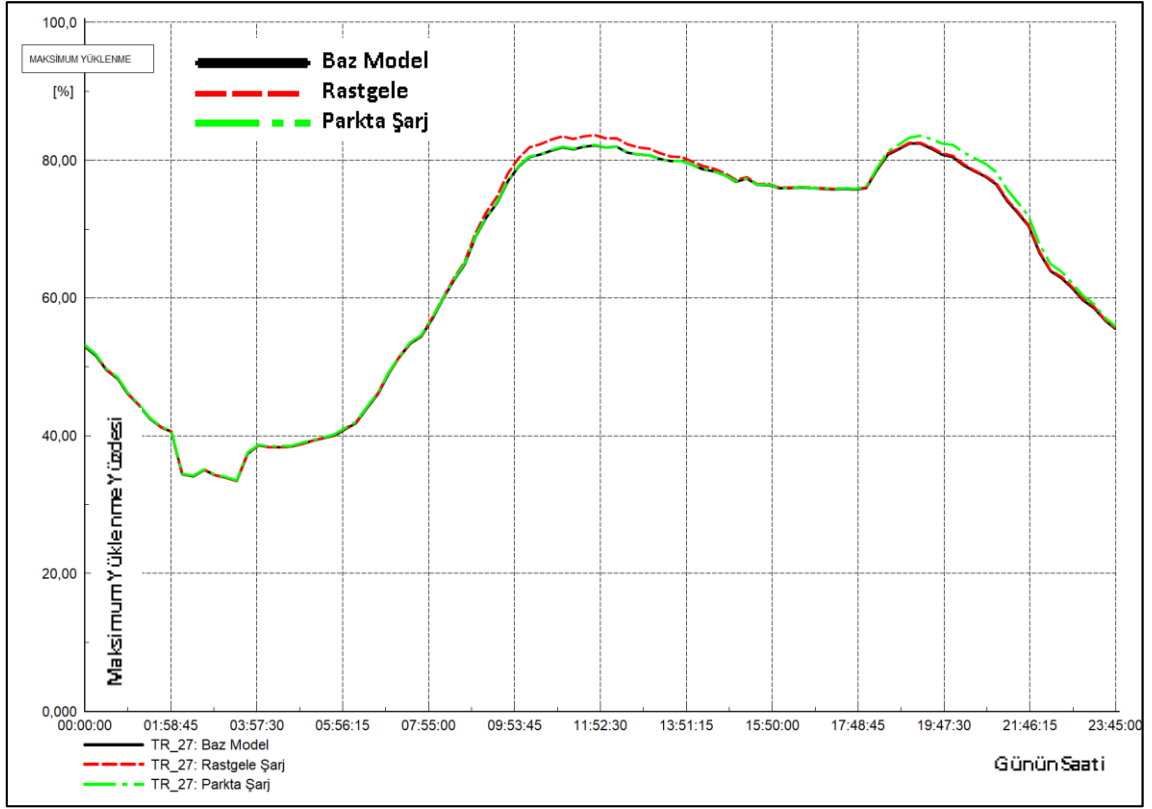
Mevcut politikalarda olağan dışı bir değişim olmadığı müddetçe elektrikli araçların OG şebekesine etkisi gerilim düşümü ve yük artışı bakımından 2025 yılında son derece sınırlı olacaktır.



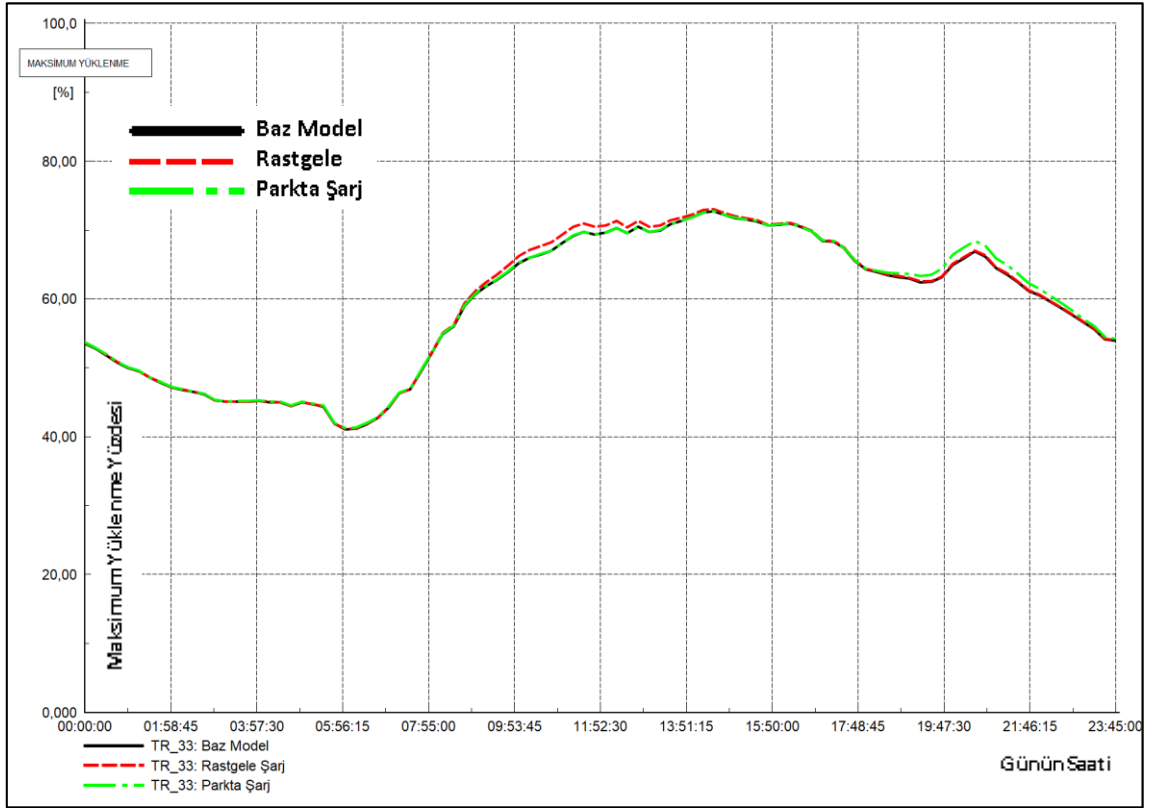
Şekil 19. TR-1 2025 Maksimum Yükleme Grafiği



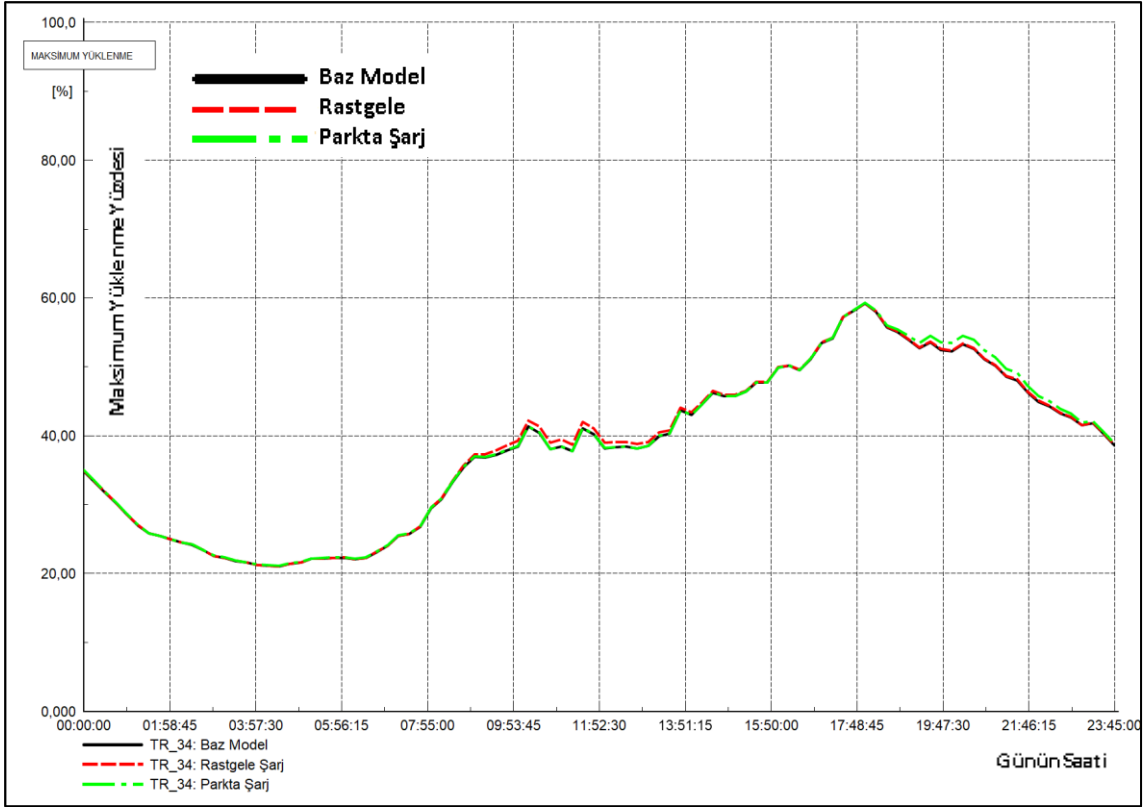
Şekil 20. TR-2 2025 Maksimum Yükleme Grafiği



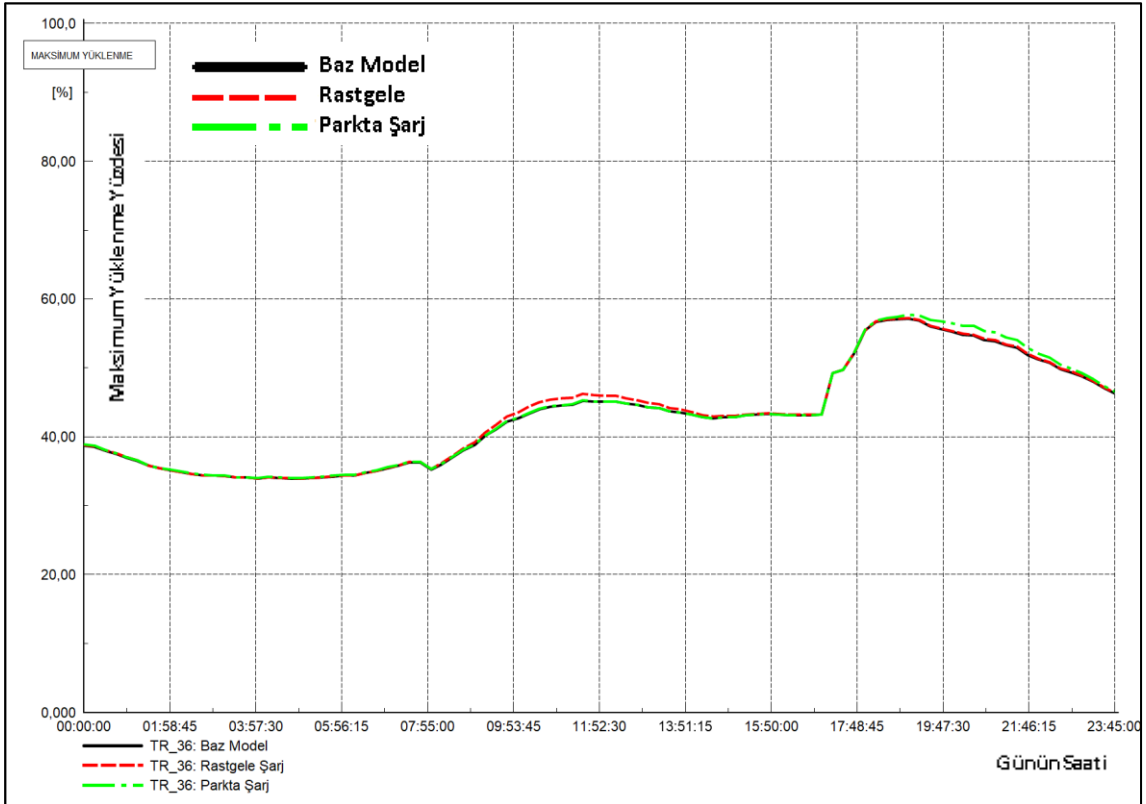
Şekil 21. TR-27 2025 Maksimum Yükleme Grafiği



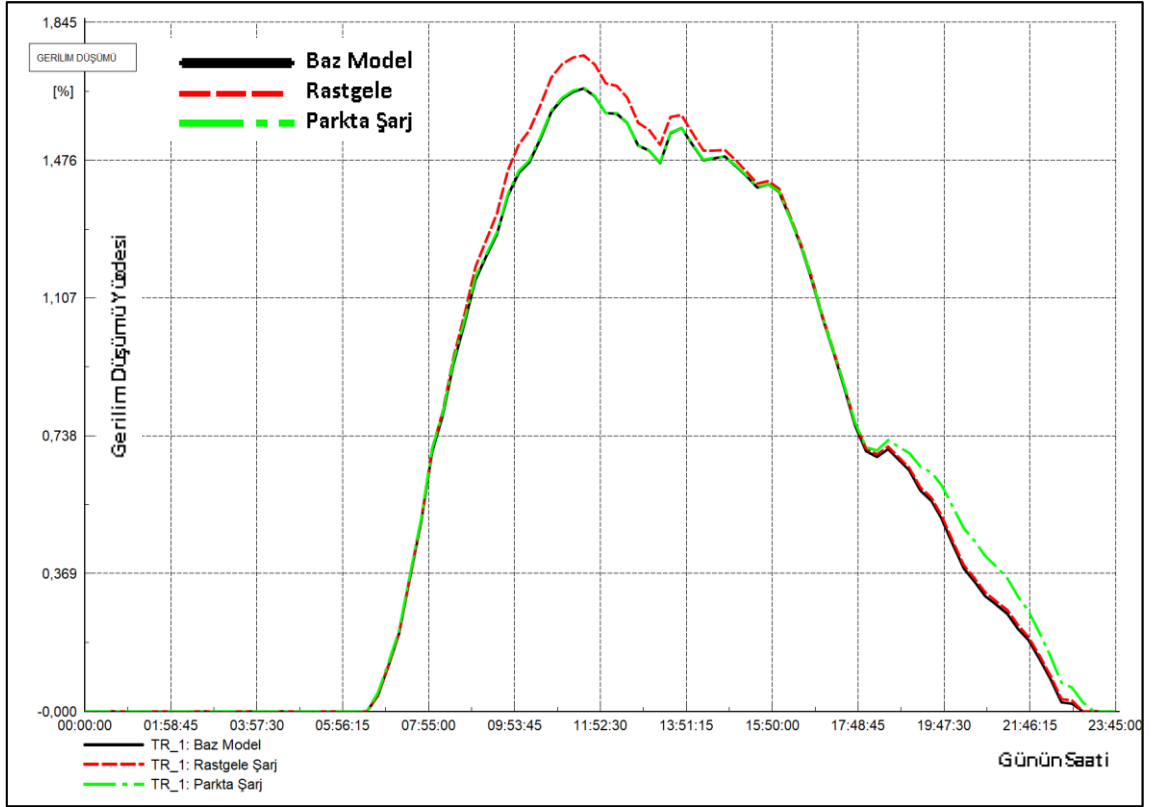
Şekil 22. TR-33 2025 Maksimum Yükleme Grafiği



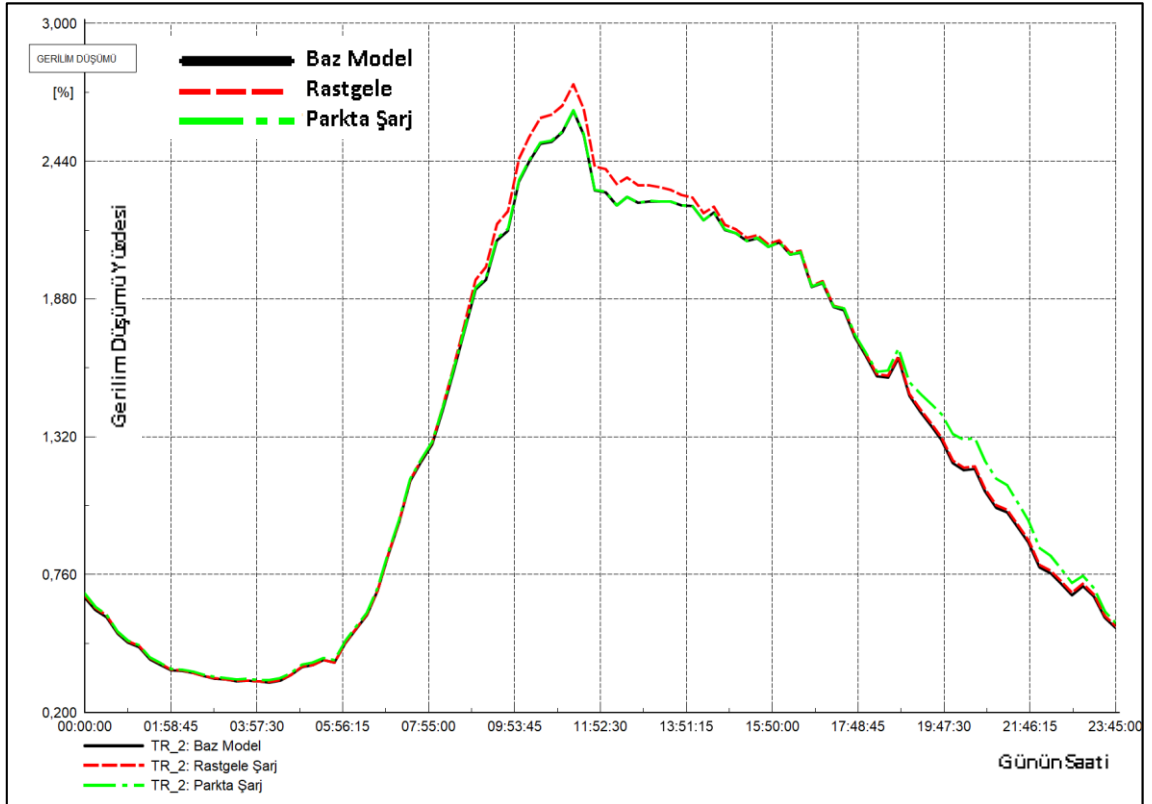
Şekil 23. TR-34 2025 Maksimum Yüklelenme Grafiği



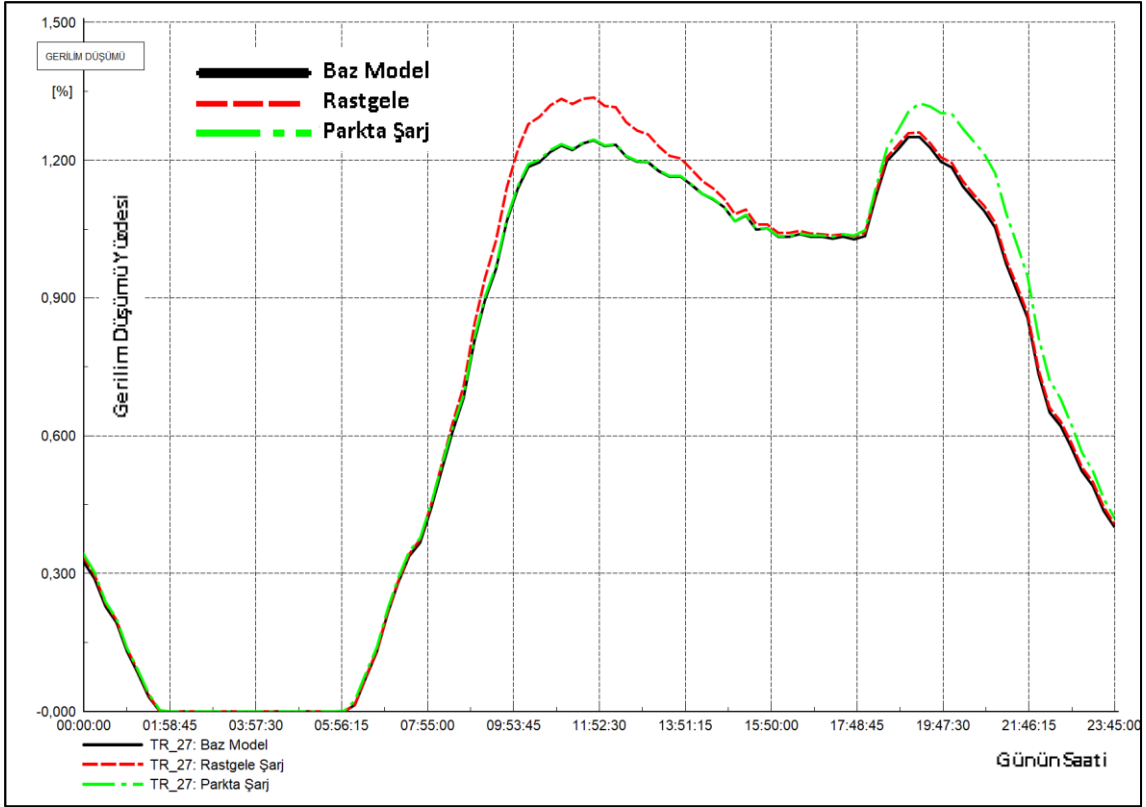
Şekil 24. TR-36 2025 Maksimum Yüklelenme Grafiği



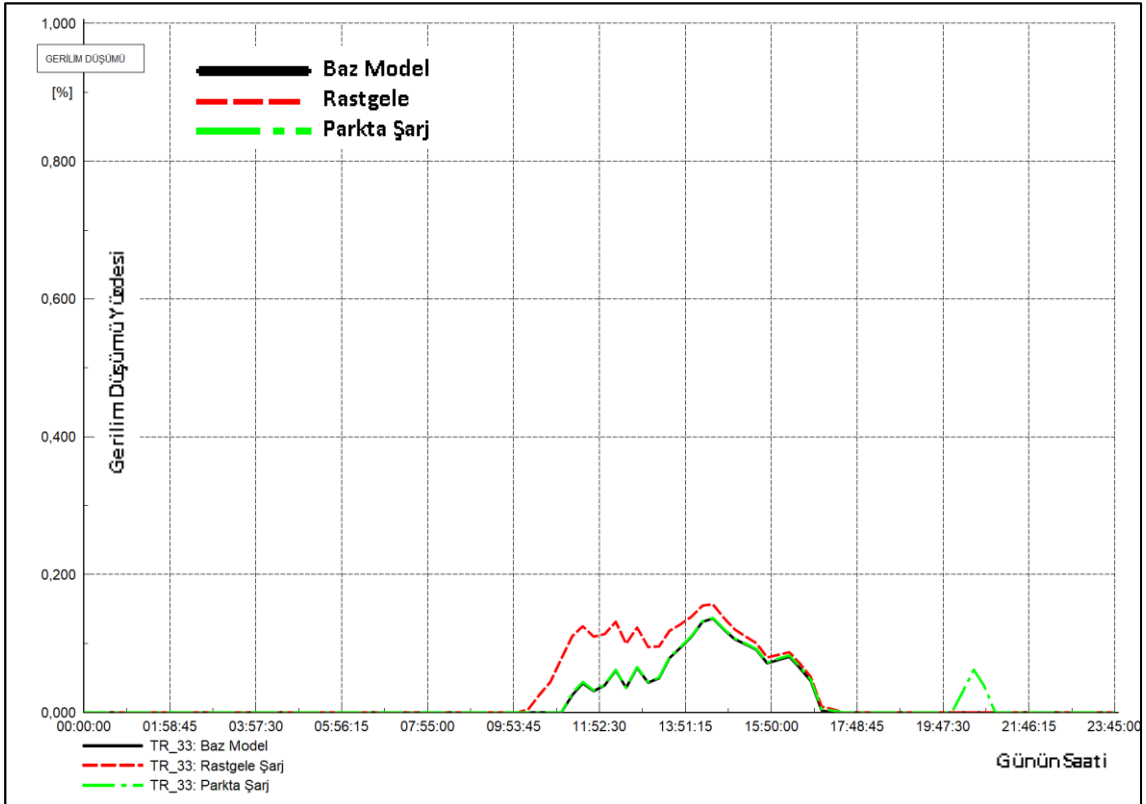
Şekil 25. TR-1 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



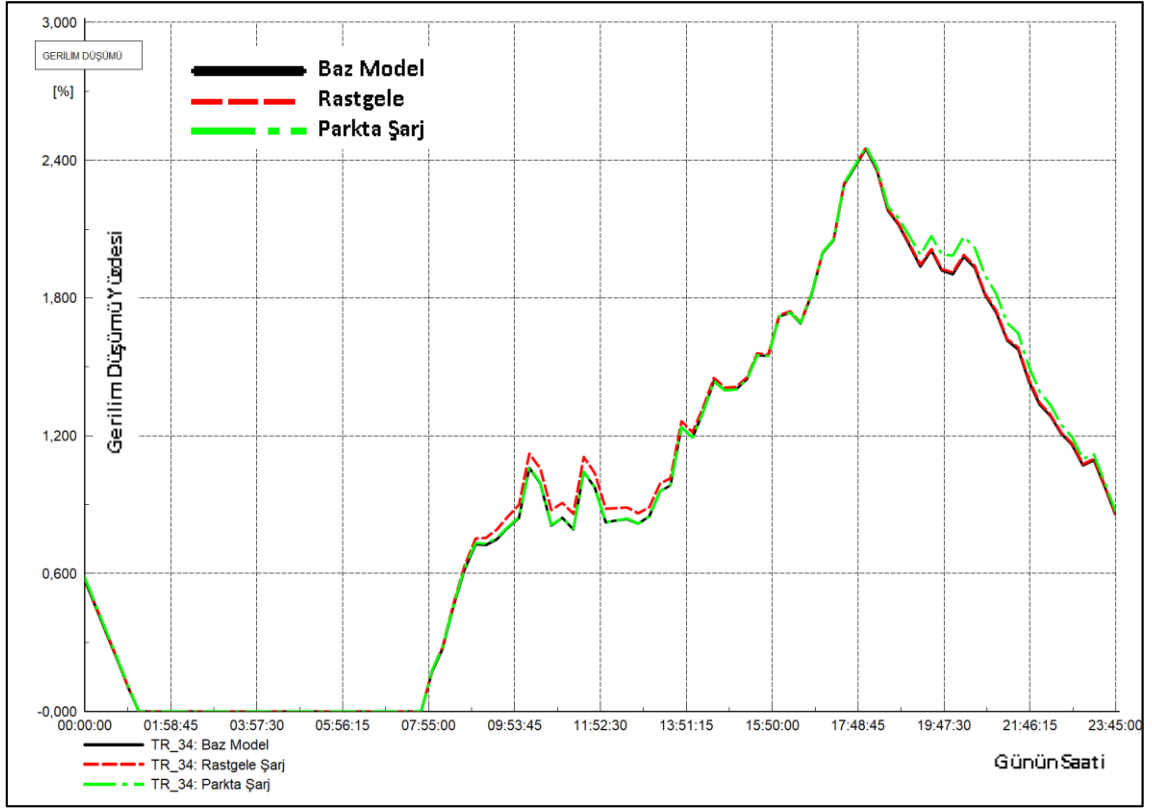
Şekil 26. TR-2 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



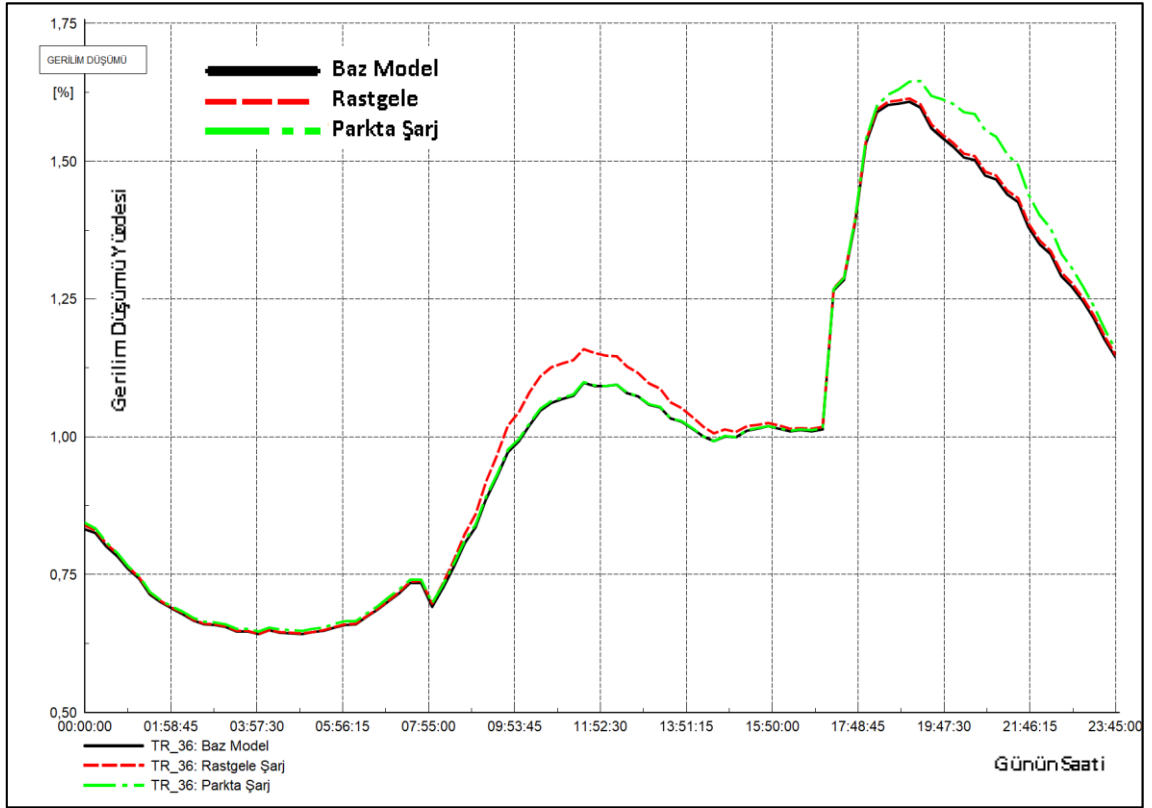
Şekil 27. TR-27 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



Şekil 28. TR-33 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



Şekil 29. TR-34 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



Şekil 30. TR-36 2025 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği

4.2. 2030 Yılı İçin Öngörüler

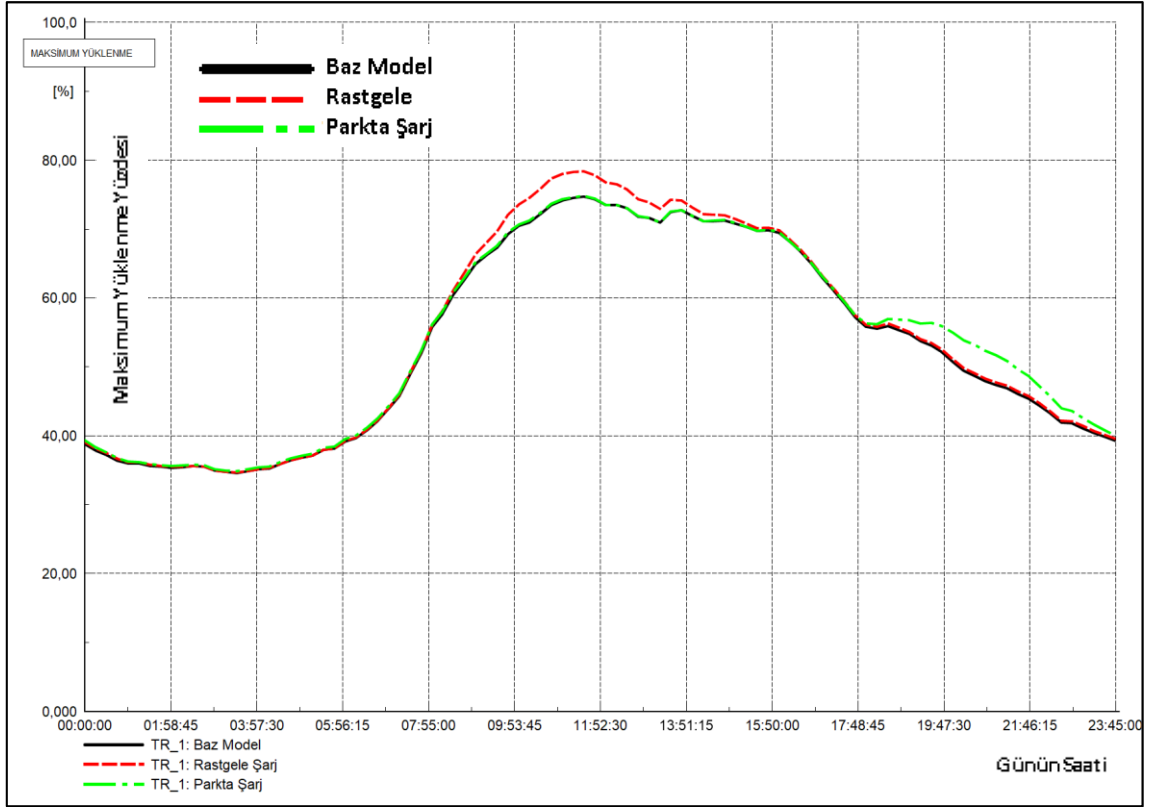
Türkiye'nin 2030 yılında 1 milyon 350 bin elektrikli binek araca sahip olacağı düşünülerek ve bu sayı Yöntem Kesimi'nde bahsedildiği üzere ilgili katsayılarla orantılanarak güç trafosu bölgelerindeki elektrikli binek araç sayıları hesaplanmış ve bu ilgili trafo bölgelerindeki abone sayılarına oranlandığında %15 yaygınlaşma oranına ulaşıldığı anlaşılmıştır.

2030 yılı için öngörülen EA sayılarına göre ilgili güç trafolarına ait OG şebekenin maksimum yüklenme eğrileri **Şekil 31 - Şekil 36** arasında; maksimum gerilim düşümü grafikleri ise **Şekil 37 - Şekil 42** arasında verilmiştir.

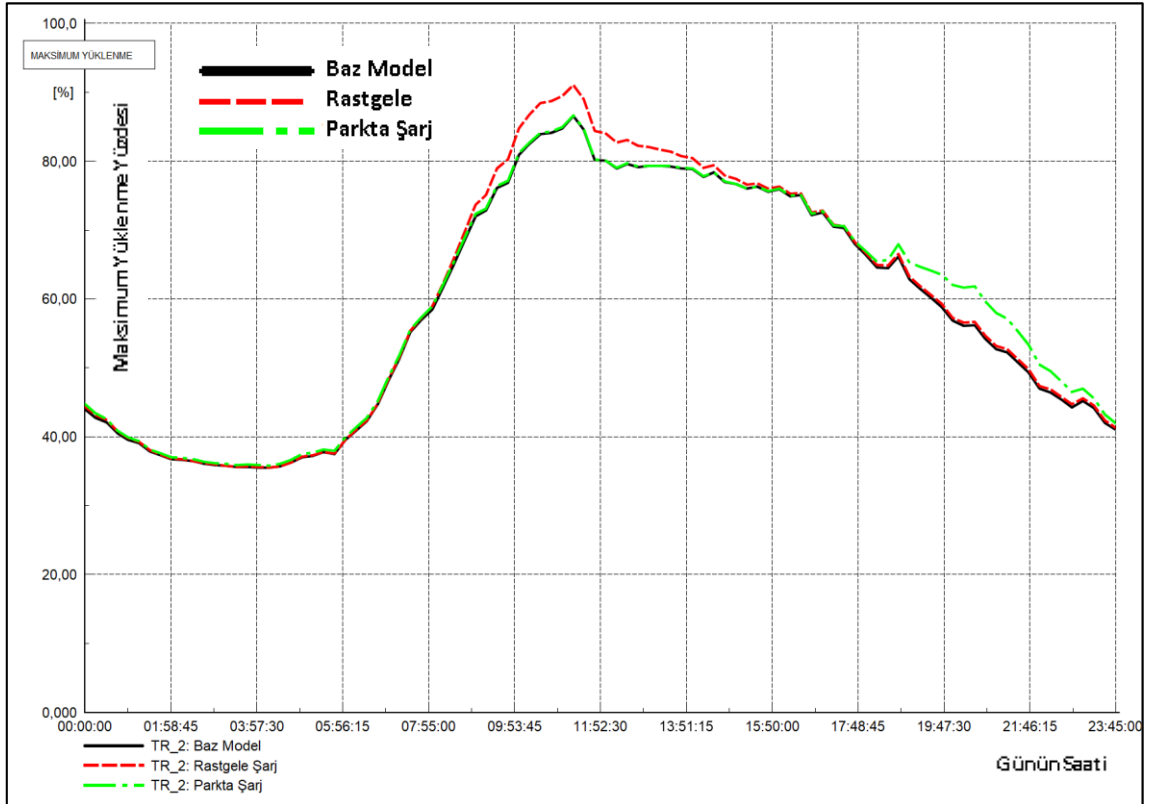
Elektrikli araç etkisinin maksimum yüklenme açısından en fazla görüldüğü trafo bölgelerinden TR-27'yi örnek göstermek gerekirse gündüz puantı %82,2'den rastgele şarj stratejisinde %86,2'ye çıkmış; akşam puantı ise %82,4'ten parkta şarj stratejisinde %85,5'e çıkmıştır. Yani, %15 yaygınlaşma durumunda yük profilinde en fazla %4 puan yükselme olmuştur.

6 güç trafosu bölgesinde baz modeller incelendiğinde maksimum gerilim düşümü TR-2 trafo bölgesindeki fiderlerde meydana gelmektedir. Normalde maksimum %2,6 olan gerilim düşümü %2,9'a çıkmıştır.

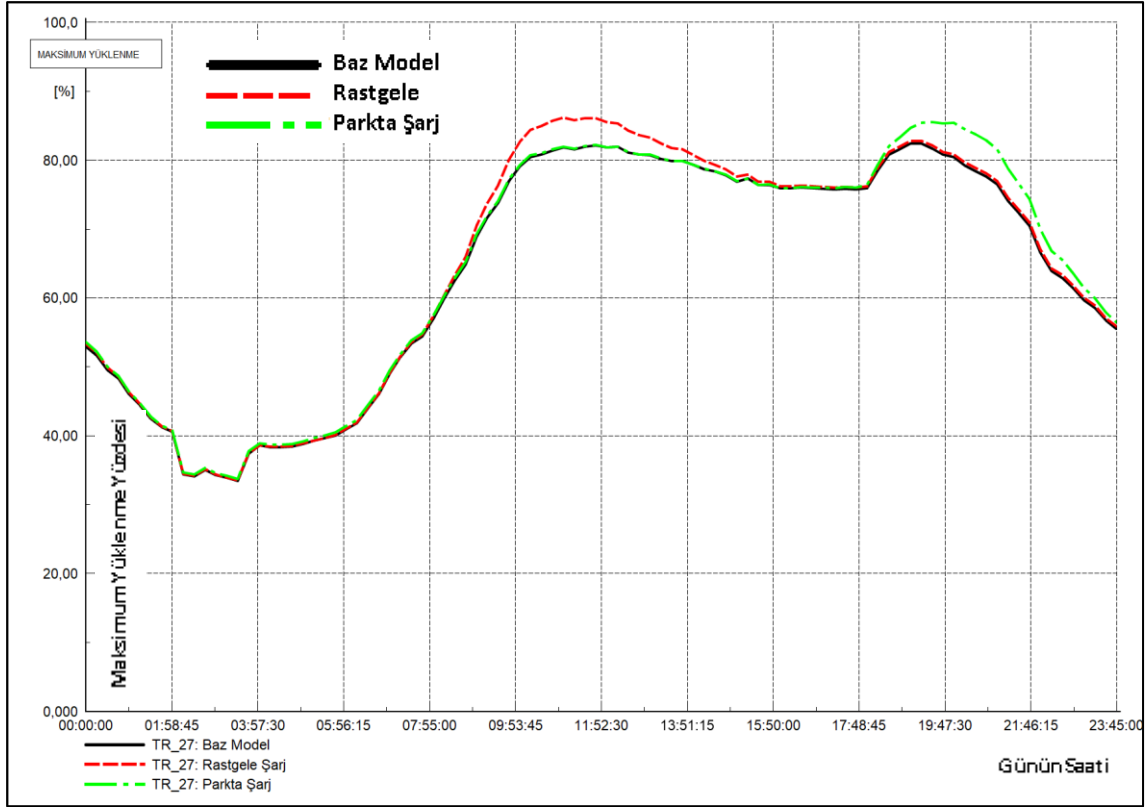
2030 yılında %15 yaygınlaşma oranında 6 farklı dağıtım bölgesi için elektrikli araçların maksimum gerilim düşümü ve maksimum yük bakımından ciddi bir etkisinin görülmemesi literatürdeki Giriş Kesimi'nde bahsedilen bazı çalışmalarla benzerlik göstermektedir [18], [19].



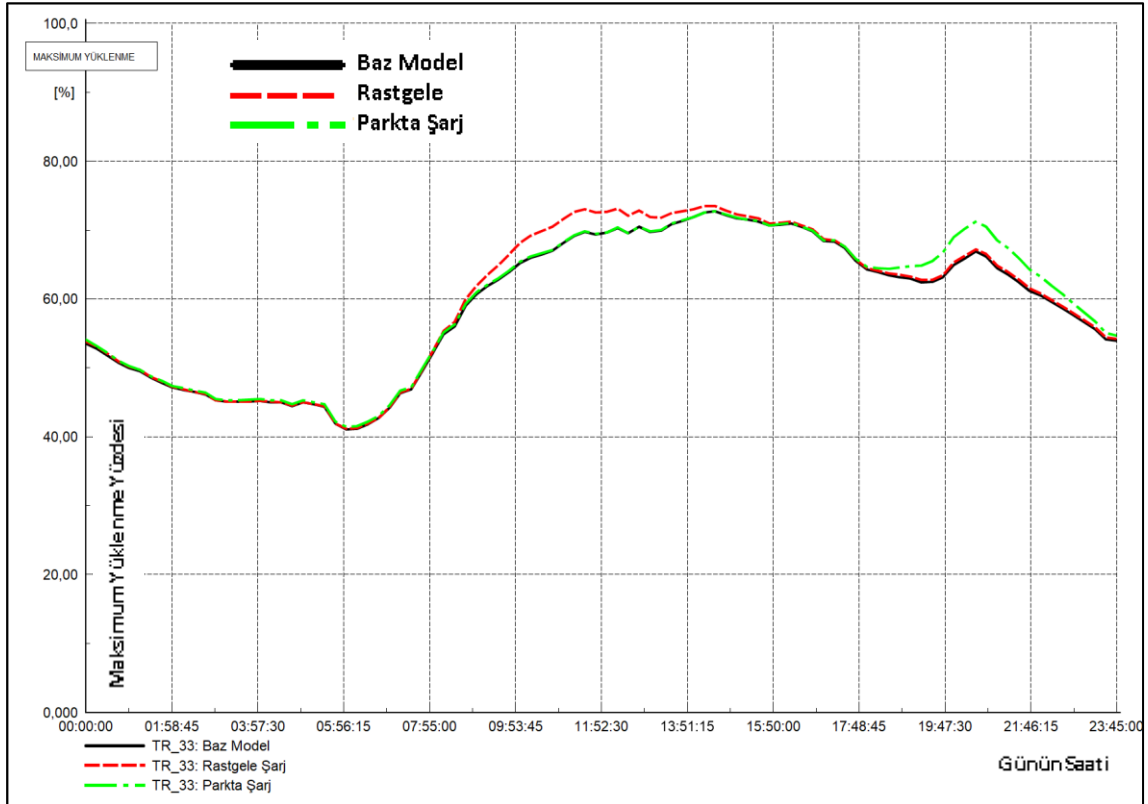
Şekil 31. TR-1 2030 Maksimum Yükleme Grafiği



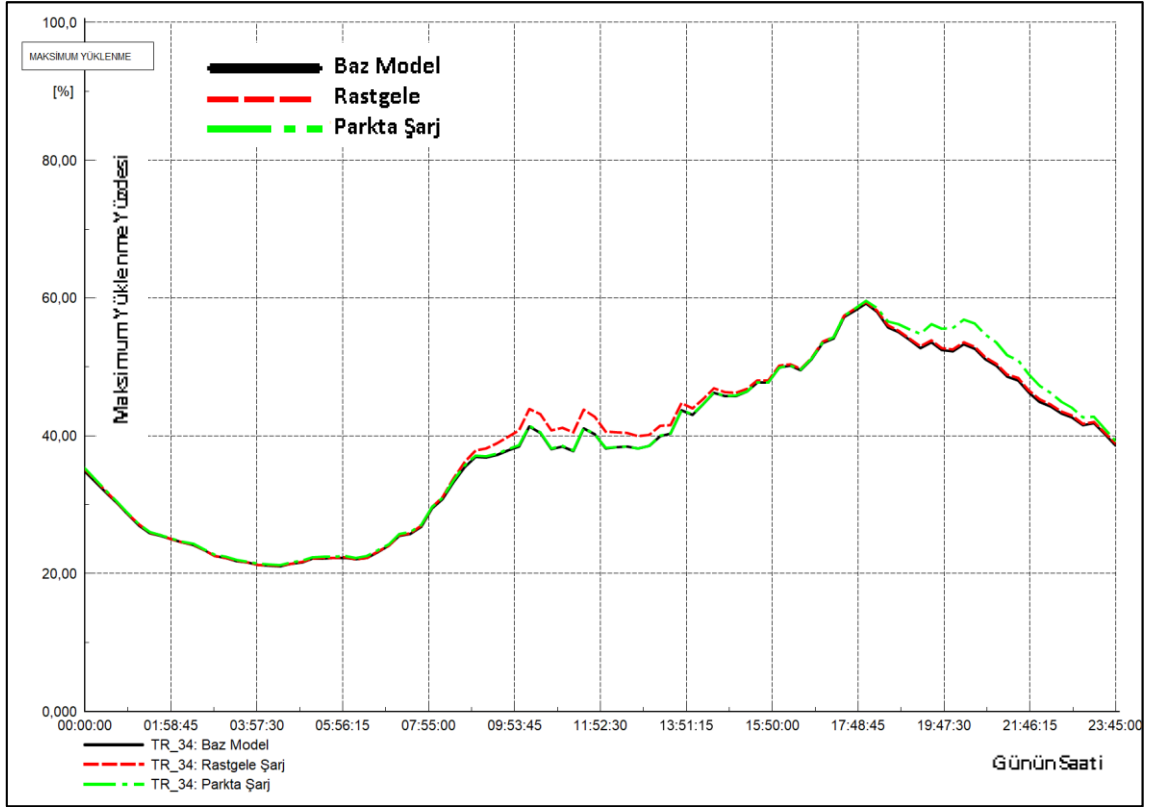
Şekil 32. TR-2 2030 Maksimum Yükleme Grafiği



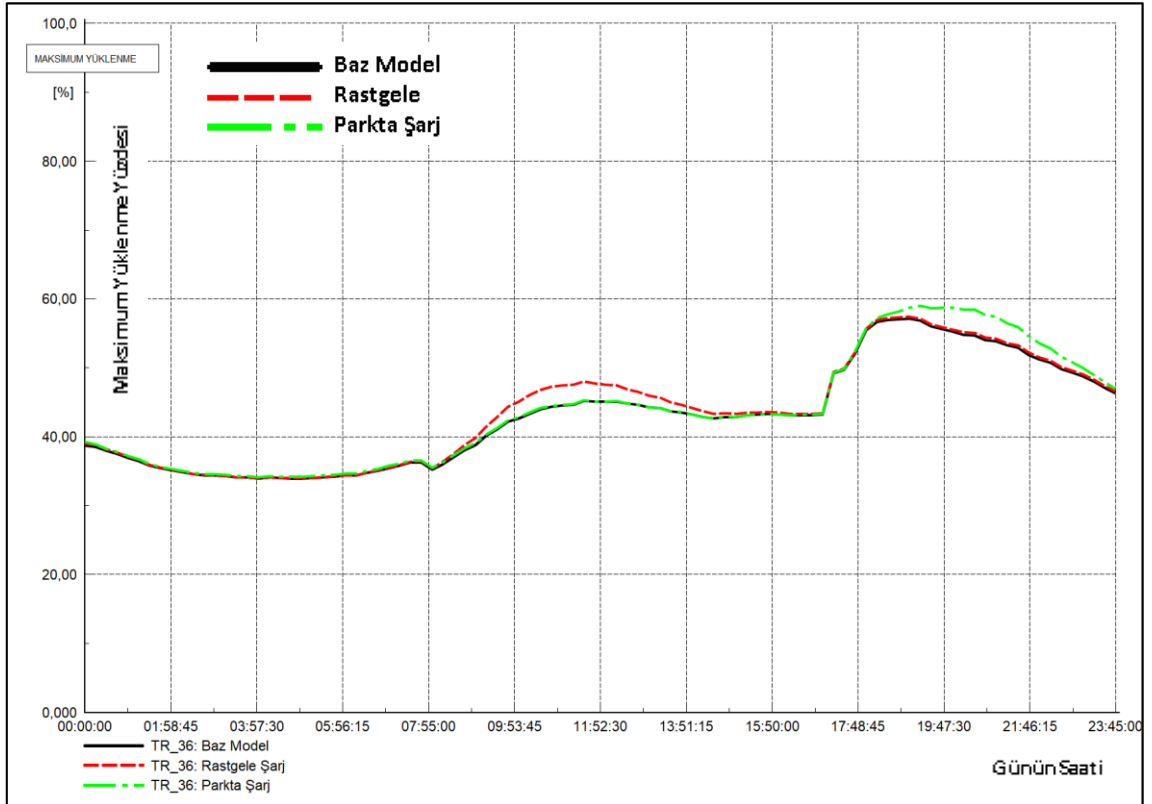
Şekil 33. TR-27 2030 Maksimum Yüklenme Grafiği



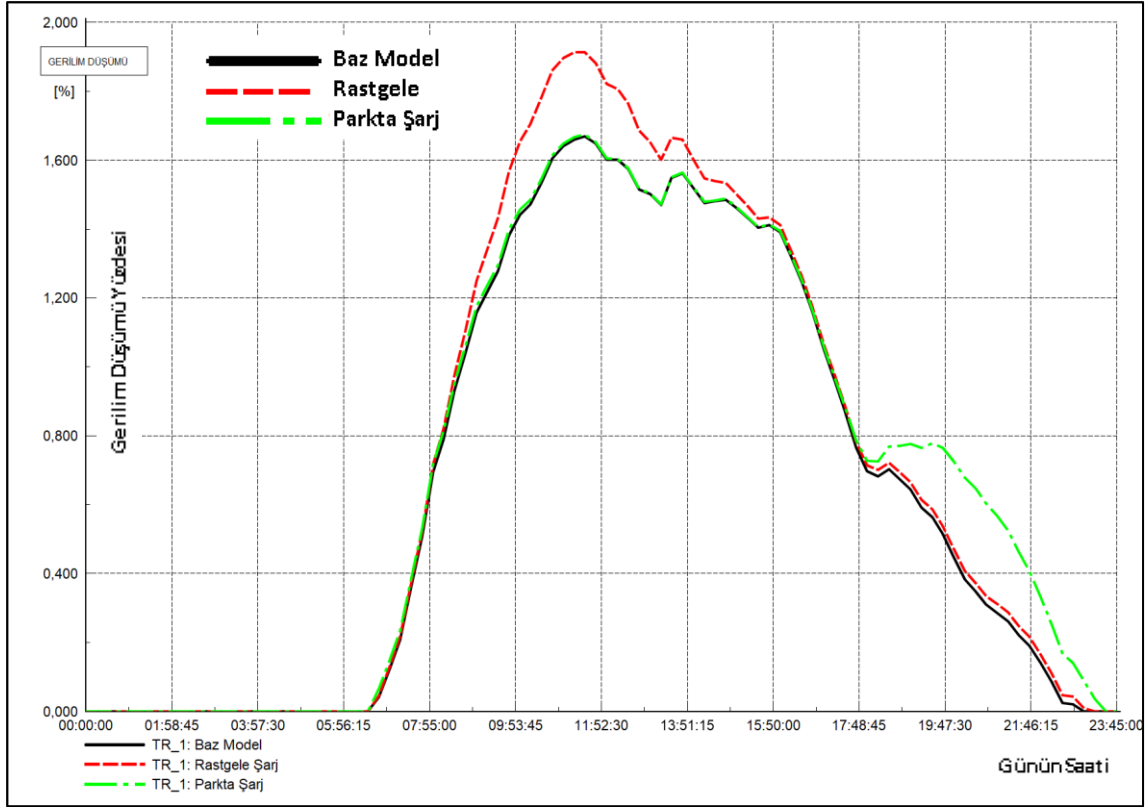
Şekil 34. TR-33 2030 Maksimum Yüklenme Grafiği



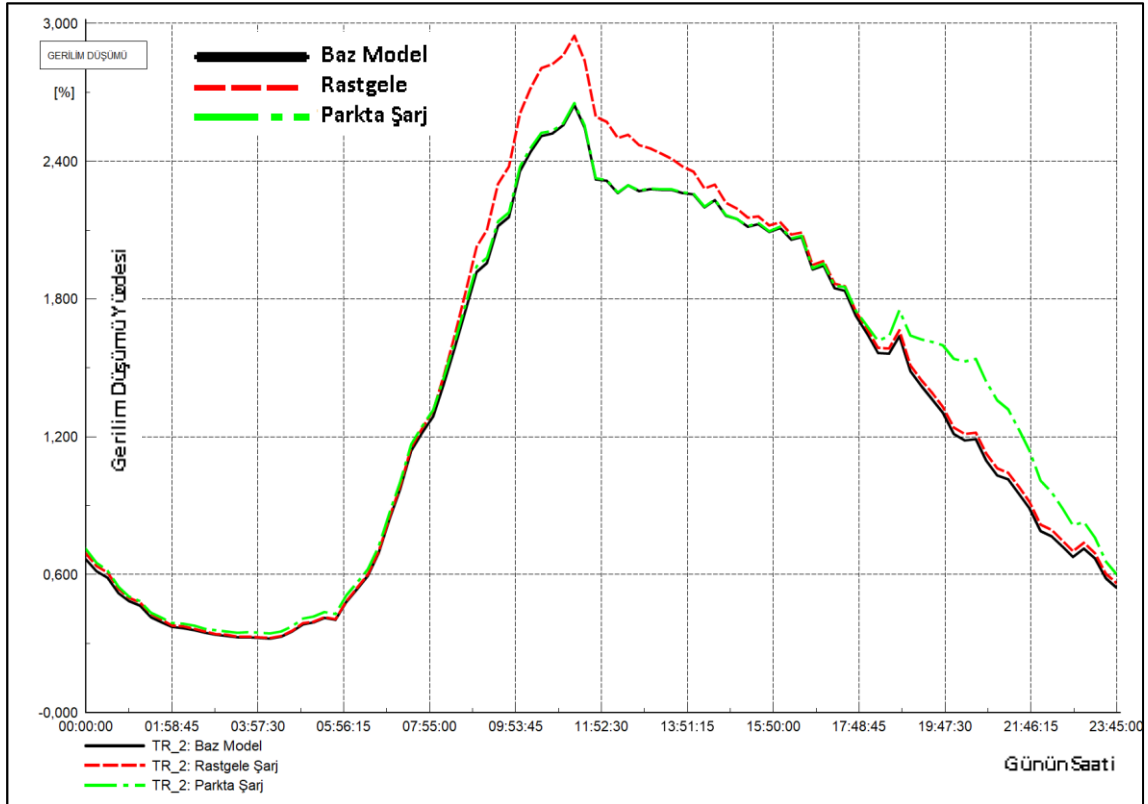
Şekil 35. TR-34 2030 Maksimum Yükleme Grafiği



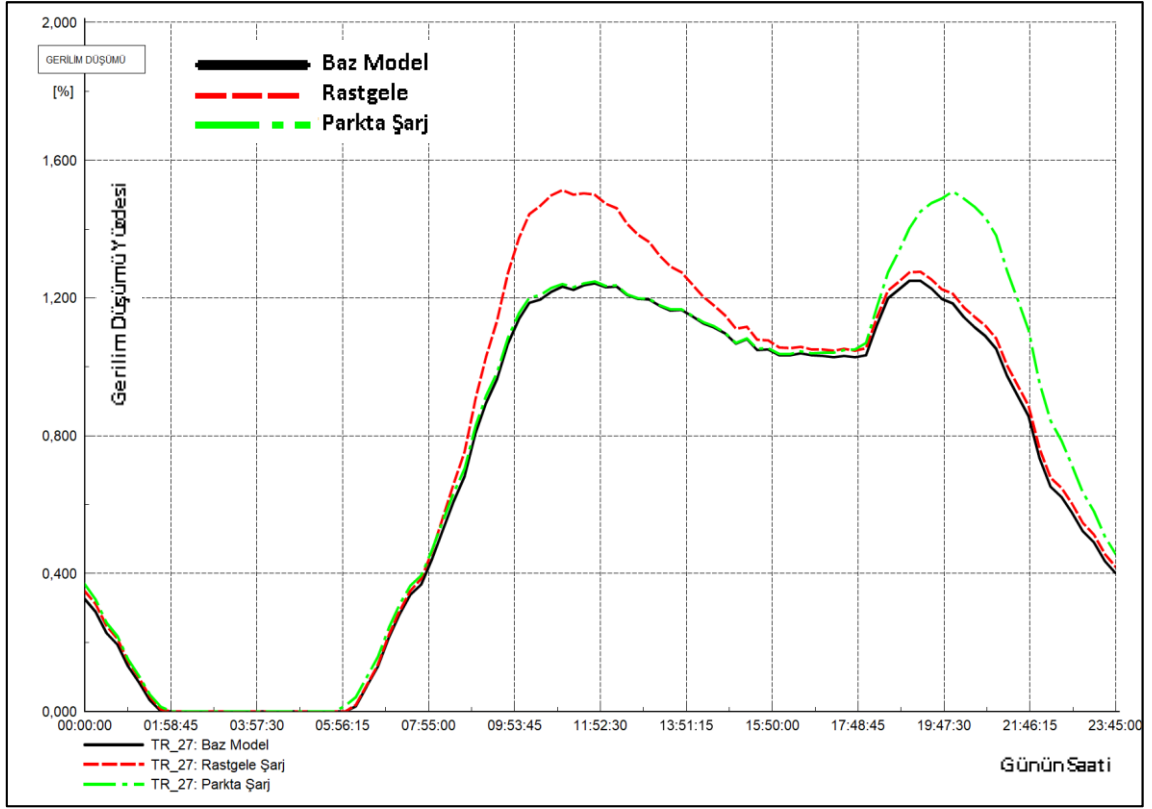
Şekil 36. TR-36 2030 Maksimum Yükleme Grafiği



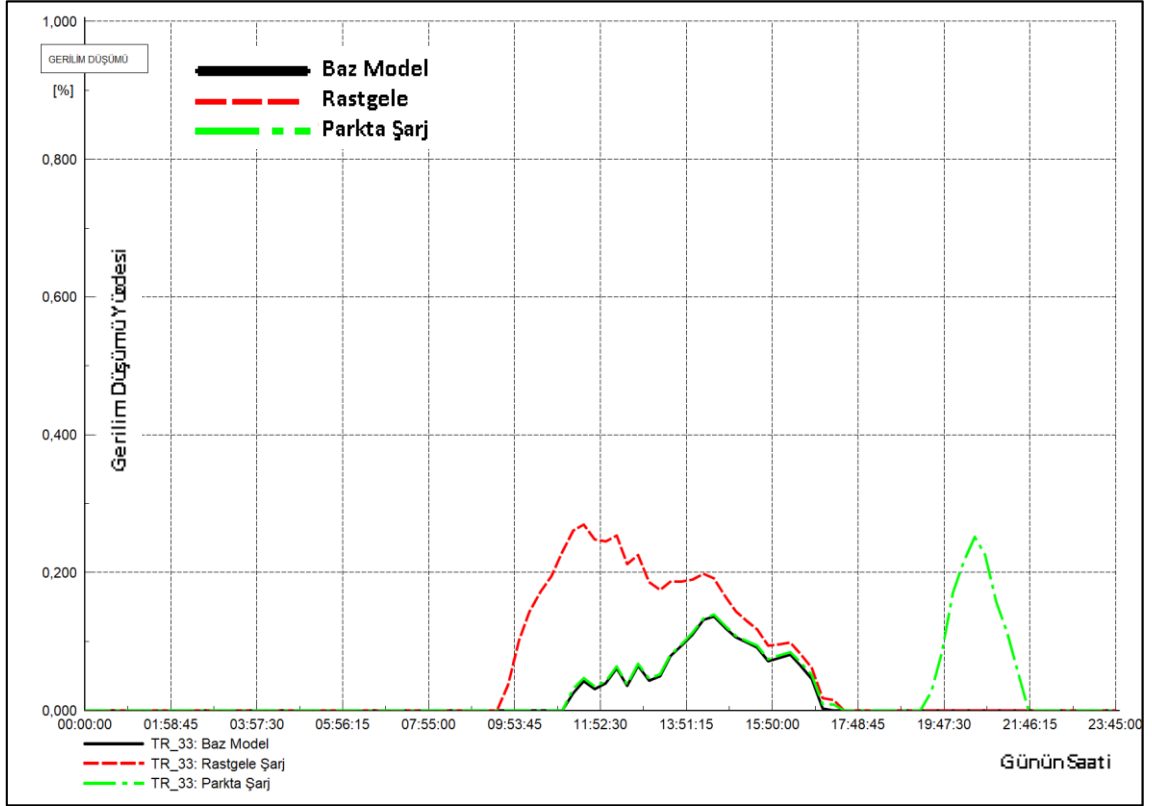
Şekil 37. TR-1 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



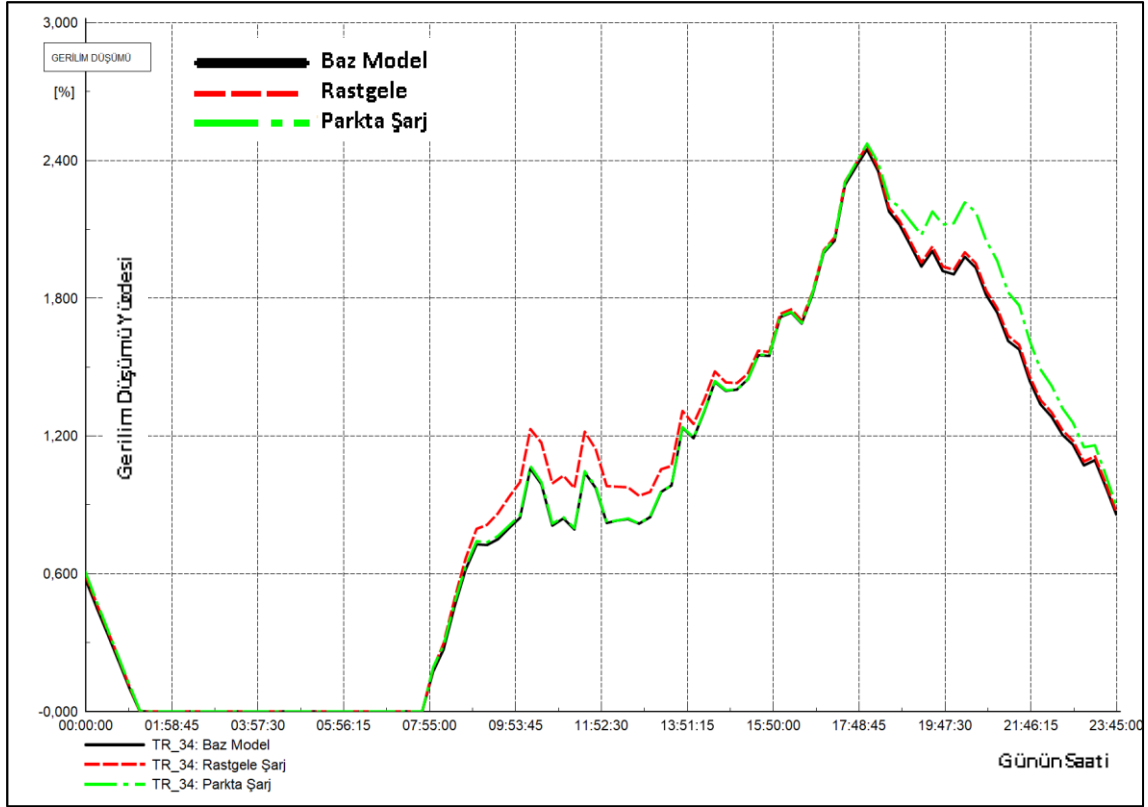
Şekil 38. TR-2 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



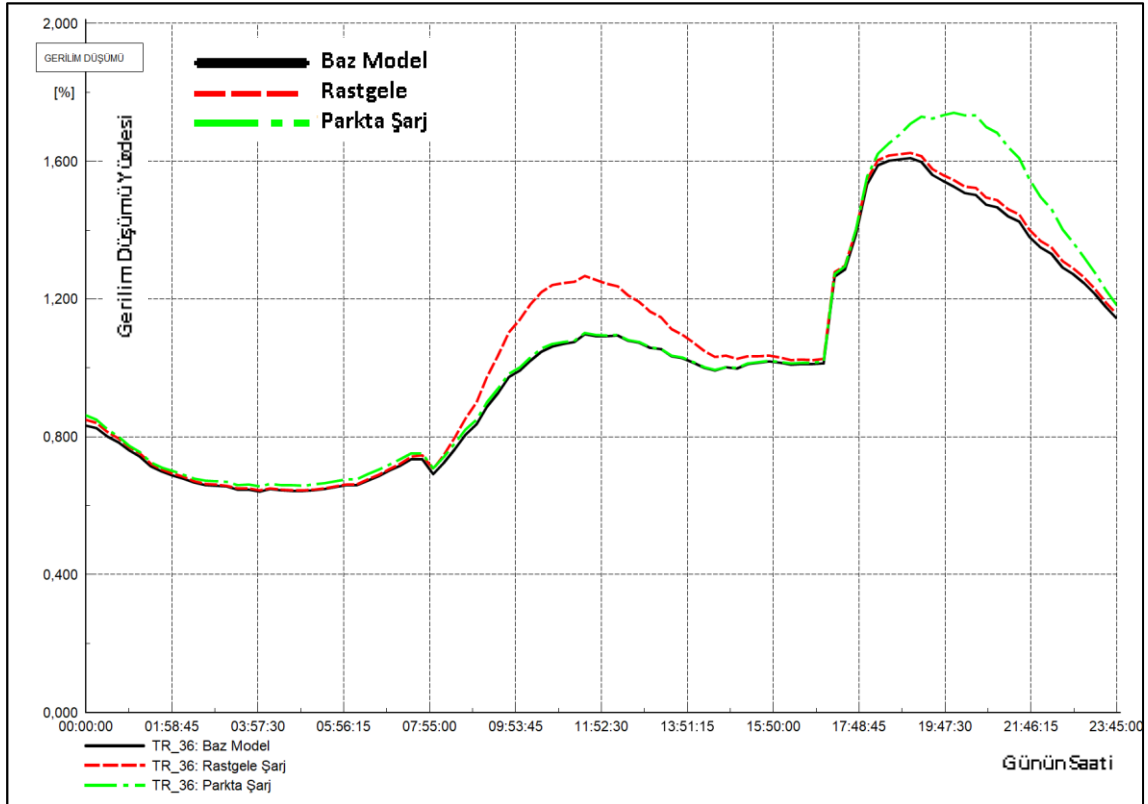
Şekil 39. TR-27 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



Şekil 40. TR-33 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



Şekil 41. TR-34 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



Şekil 42. TR-36 2030 Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği

Kontrolsüz şarj durumunda elektrikli araçların şebekeye etkilerinin incelendiği bu kesimde elde edilen sonuçlar **Çizelge 9**'da özet halinde verilmiştir. Dağıtım ve iletim şebeke operatörleri elektrik talebindeki artış tahminine göre yatırım yaptıkları için analizlerde şebekedeki talep artışı göz önünde bulundurulmamıştır.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde;

- Tüm güç trafo bölgeleri içerisinde maksimum yüklenme oranı %87'den %91'e veya %82'den %86'ya artış göstererek en fazla 4 puan artmıştır, en yüklü güç trafosu %91 oranında yüklenmiştir.
- Gerilim düşümündeki artış, tüm incelenen güç trafosuna ait dağıtım şebekeleri için %1'in altındadır.

Seçilen güç trafolarından mevcut durumda en büyük yüklenme oranına sahip TR-2, hem ticarethane hem de kamu kurumlarının yoğun olduğu ve gündüz puantının belirgin olduğu bir güç trafosudur. Yaklaşık 30.000 elektrik abonesinin olduğu bu trafoda 4.781 adet elektrikli aracın şebekeye bağlanacağı diğer bir deyişle her 100 aboneye karşılık yaklaşık 16 elektrikli aracın şebekeden şarj olması durumunda bile, OG dağıtım şebekesini, yüklenme oranı %100'e varmadığından ve gerilim düşümü %5 sınırının altında kaldığından, yeni yatırımlara gerek duyulmaması ve yönetmelik gerilim limitlerinin dışına çıkılmaması nedeniyle EA'ların OG dağıtım şebekesine önemli bir olumsuz etkisinin olmadığı görülmektedir.

Çizelge 9. Kontrolsüz Şarj Durumunda EA Yaygınlaşması Analiz Sonuçları

Şarj Sınıfı	İncelenen Kriter	Öngörü Yılı	Çalışılan Trafo Bölgesi Sayısı	Senaryolar	Türkiye Elektrikli Araç Sayısı (Milyon)	TR-1	TR-2	TR-27	TR-33	TR-34	TR-36
Kontrolsüz Şarj	Mak. Yükleme (%)	2025	6	Baz Model	0,5	75	87	82	73	59	57
				Rastgele Şarj		76	88	84	73	59	57
				Parkta Şarj		75	87	84	73	59	58
	Gerilim Düşümü (%)		6	Baz Model		1,7	2,6	1,3	0,1	2,5	1,6
				Rastgele Şarj		1,8	2,8	1,3	0,2	2,5	1,6
				Parkta Şarj		1,7	2,7	1,3	0,1	2,5	1,6
	Mak. Yükleme (%)	2030	6	Baz Model	1,3	75	87	82	73	59	57
				Rastgele Şarj		78	91	86	74	59	57
				Parkta Şarj		75	87	86	73	60	59
	Gerilim Düşümü (%)		6	Baz Model		1,7	2,6	1,3	0,1	2,5	1,6
				Rastgele Şarj		1,9	2,9	1,5	0,3	2,5	1,6
				Parkta Şarj		1,7	2,7	1,5	0,3	2,5	1,7

5. KONTROLLÜ ŞARJ DURUMUNDA ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞEBEKEYE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

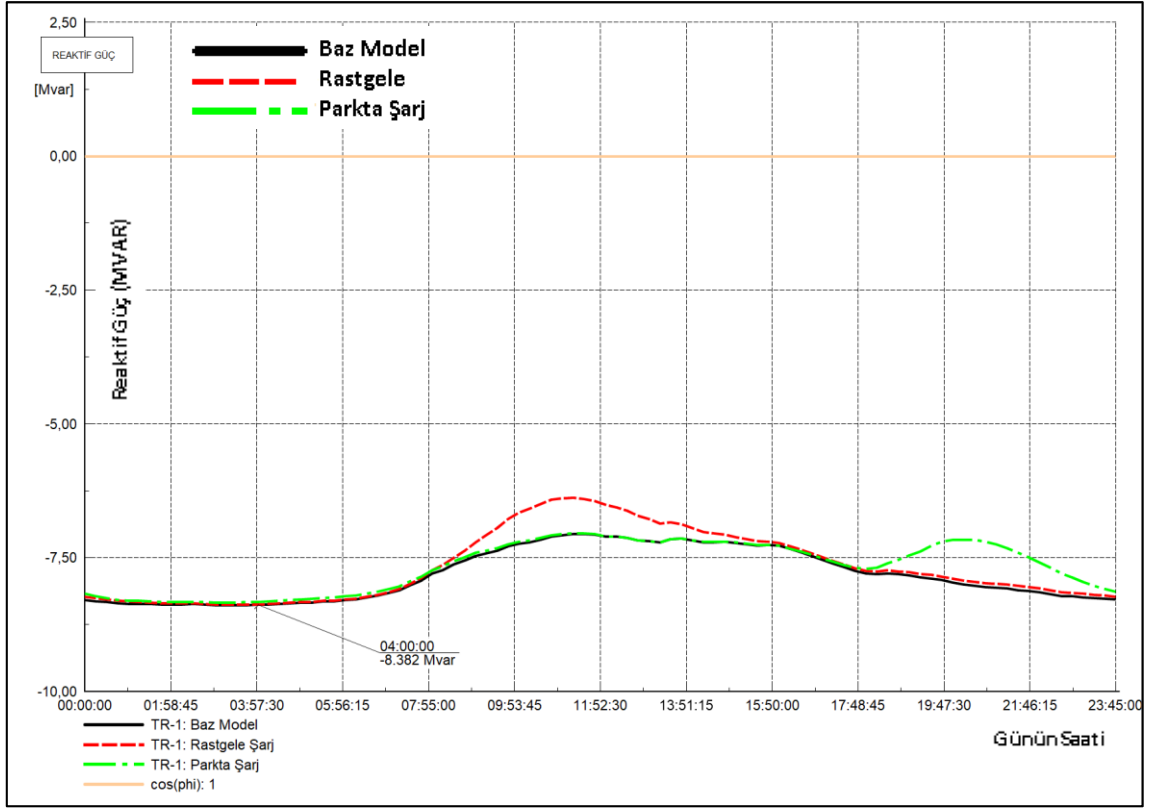
Bu kesimde, genellikle metropol bölgesi şebekelerinin yoğun yer altı kablo yatırımları sonucunda kapasitif yüklenmesi nedeniyle, *elektrikli araçlardan 0,9 endüktif güç faktöründe reaktif katkı alınması durumunda*, farklı şarj stratejisi senaryoları için şebeke güç faktörünün nasıl değiştiği incelenmiştir.

Elektrikli araçların reaktif katkı verebilmesi için buna uygun altyapının olduğu varsayılmıştır. Buja ve diğerlerinin [54] çalışması incelendiğinde elektrikli araçların şarj olurken sabit akım ve sabit gerilim evrelerinde farklı $\cos(\Phi)$ oranlarında reaktif katkı sunabildiği anlaşılmıştır. Giriş Kesimi'nde literatür örnekleri arasında verilen Kesler ve diğerlerinin [25] çalışması da 0,8 endüktif oranında bile EA'ların şebekeye katkı verebildiğini ortaya koymuştur. Aynı zamanda EA kullanıcılarının şarj sürelerini fazla uzatmamak amacıyla ve dağıtım şebekesinin endüktif kompanzasyon ihtiyacı nedeniyle 0,9 endüktif yönde güç faktörü bu tez kapsamında değerlendirilmiştir.

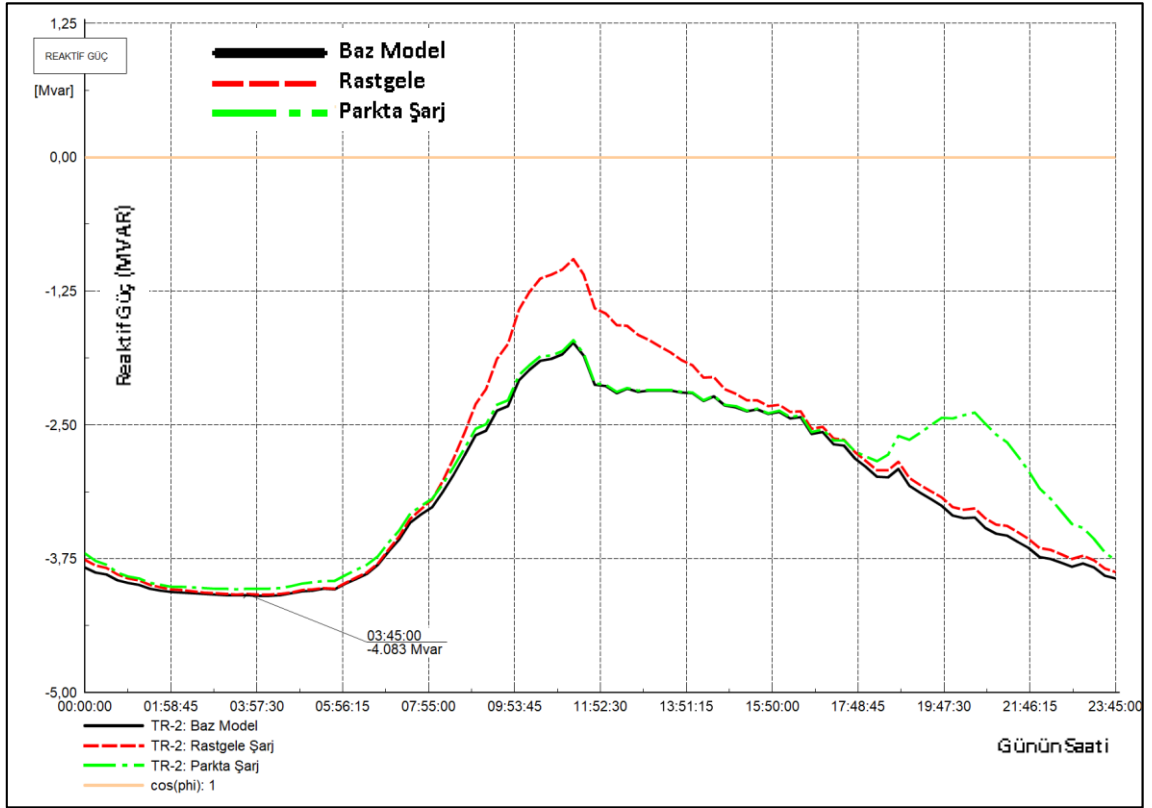
5.1. 2025 Yılı İçin Öngörüler

Seçilen şehir merkezi bölgesindeki 36 güç trafosu için, maksimum yüke sahipken yapılan yük akış analizleri sonucunda, 33 tanesinin kapasitif güç faktörüne sahip olduğu, Kesim 3.5'te açıklanmış ve **Çizelge 8'**de verilmiştir. Güç trafolarının fazla yüklenmediği durumda örneğin gece saatlerinde dağıtım şebekesi daha az aktif yük çekecek, ve dolayısıyla güç faktörü kapasitif yönde daha da bozulacaktır. Türkiye dağıtım şebekesi için $\tan(\Phi)$ limitinin kapasitif yönde %15 olduğu düşünülecek olursa güç üçgenine göre $\cos(\Phi)$ 'nin 0,989'un üzerinde olması gerekmektedir. Bu kesimde, EA sayısı 1,35 milyon alınarak, rastgele şarj ve parkta şarj senaryoları ile, modellenen 6 adet güç trafosu için, mevcut durumda yüklenmenin maksimum olduğu gün için, günün saatine karşılık şebekeyi besleyen reaktif güç grafikleri, **Şekil 43 – Şekil 48** arasında, güç faktörünün değişimi **Şekil 49 - Şekil 54** arasında verilmiştir. TR-27, TR-33 ve TR-34'ün gece saatlerinde reaktif limitlerin dışına çıktığı görülmektedir, **Şekil 51, Şekil 52, Şekil 53**. reaktif güç grafikleri incelendiğinde istenilen güç faktörü düzeltilmesinin rastgele şarj senaryosunda gündüz, parkta şarj senaryosunda ise akşam vakitlerinde olduğu, ancak asıl

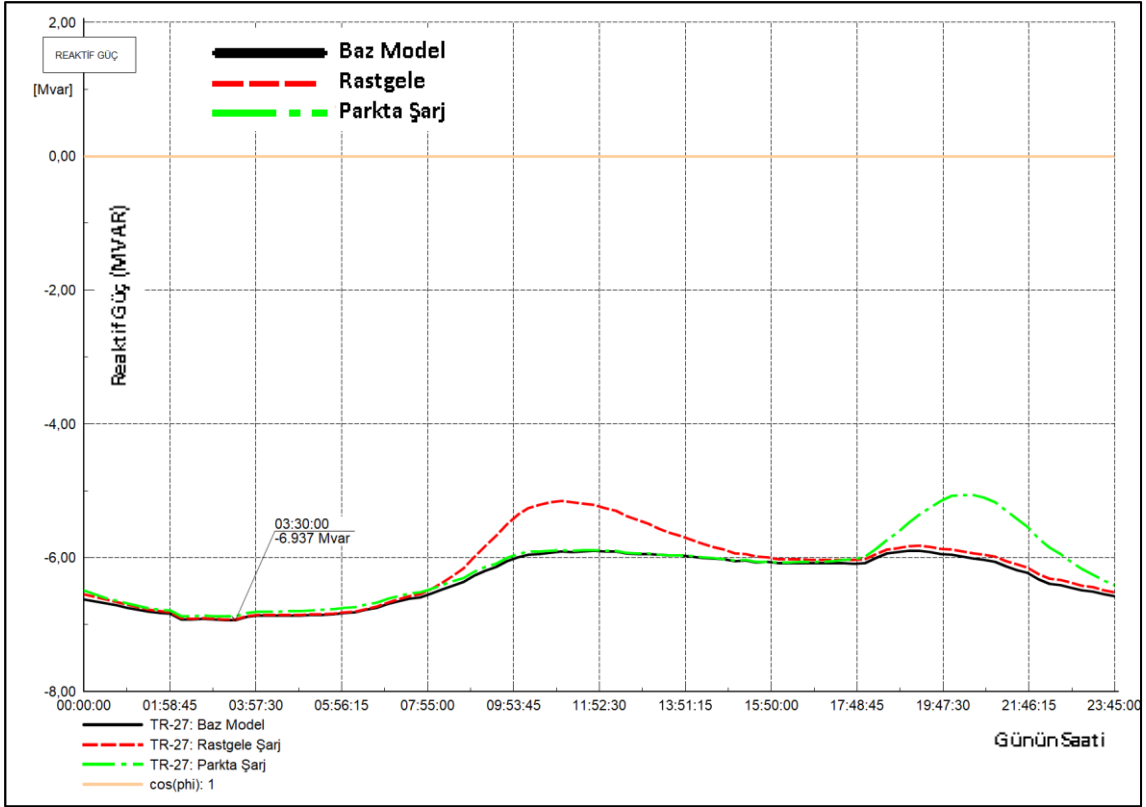
ihitiyaç duyulan gece saatlerinde yeterince elektrikli aracın şarjda olmaması sebebiyle reaktif katkıdan yararlanılamadığı anlaşılmaktadır.



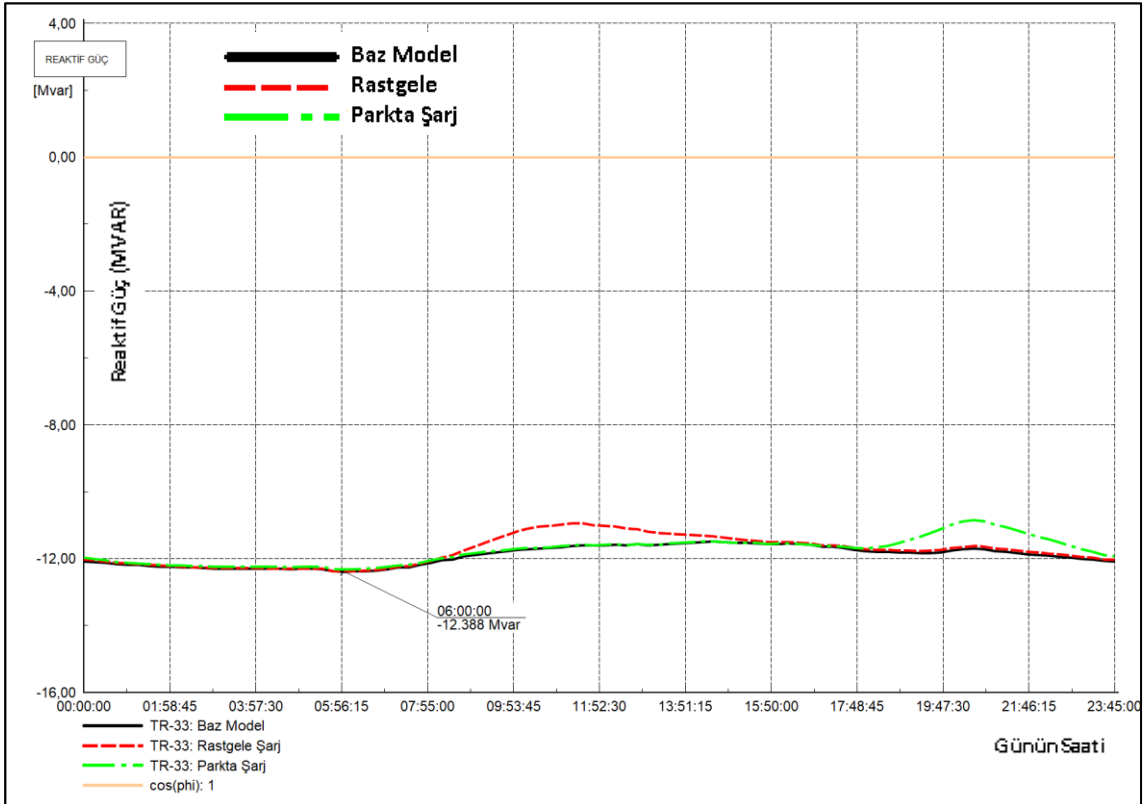
Şekil 43. TR-1 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



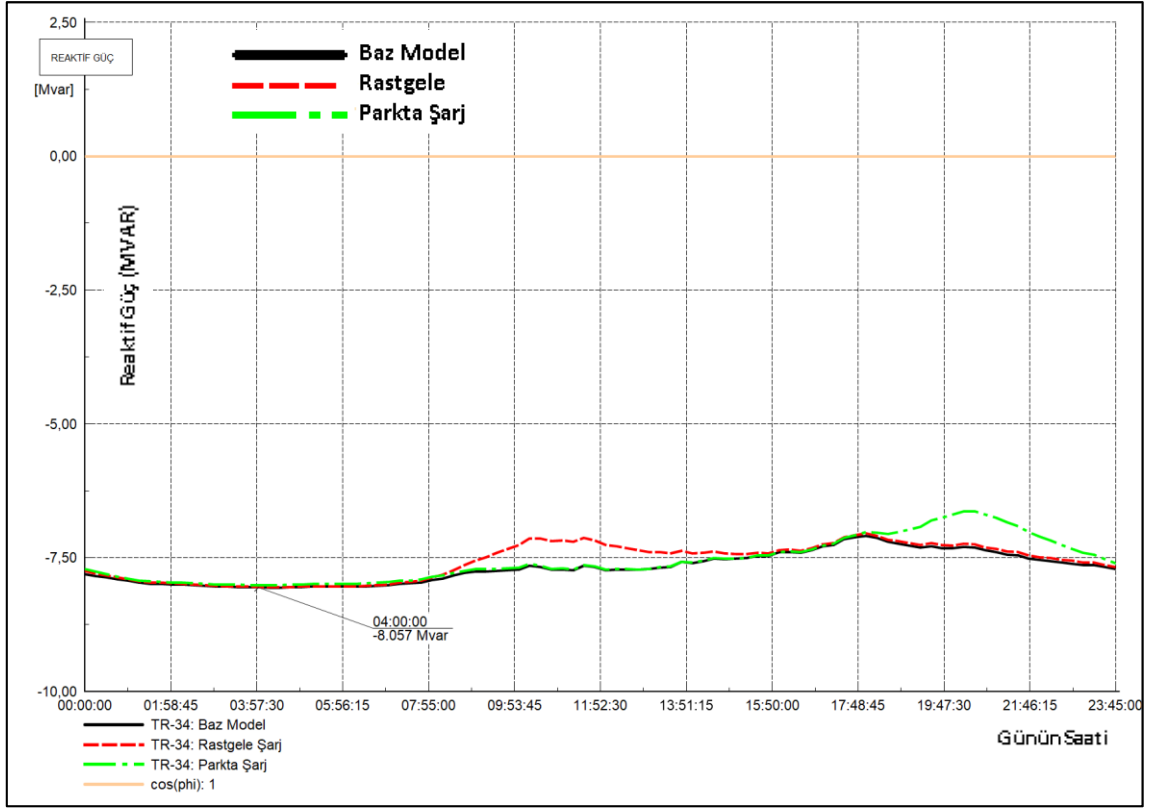
Şekil 44. TR-2 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



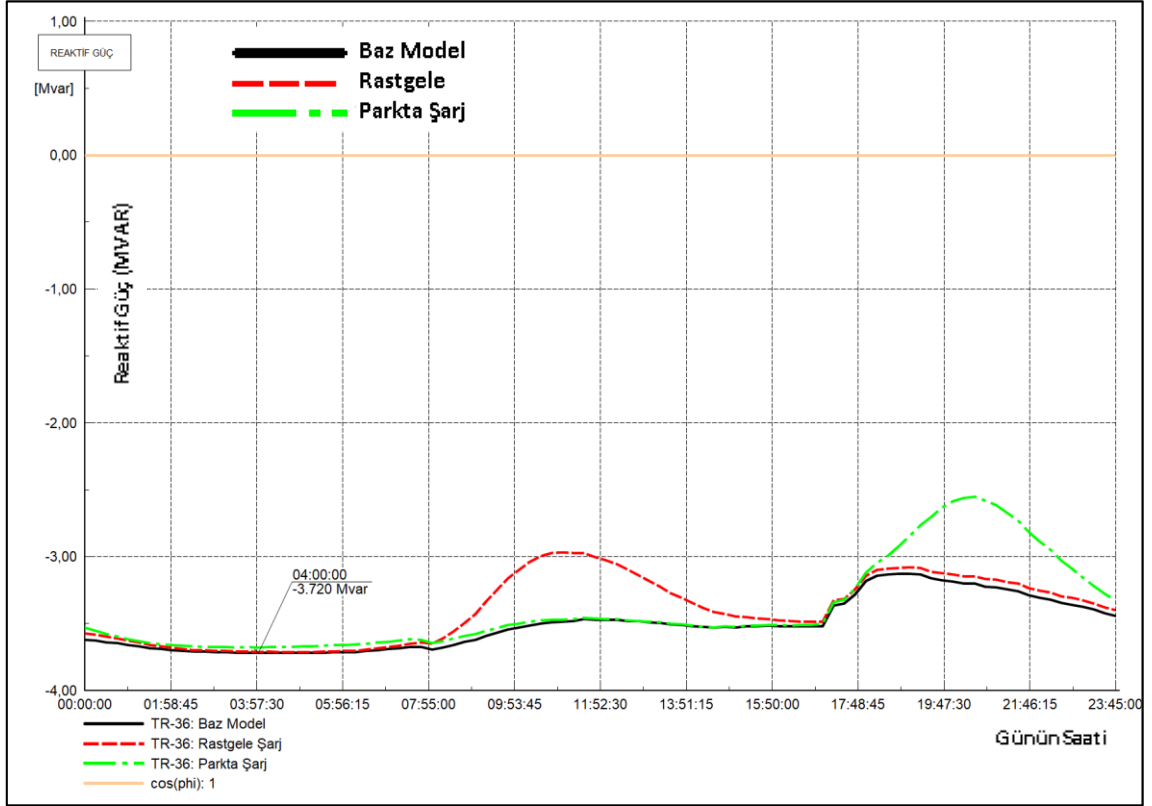
Şekil 45. TR-27 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



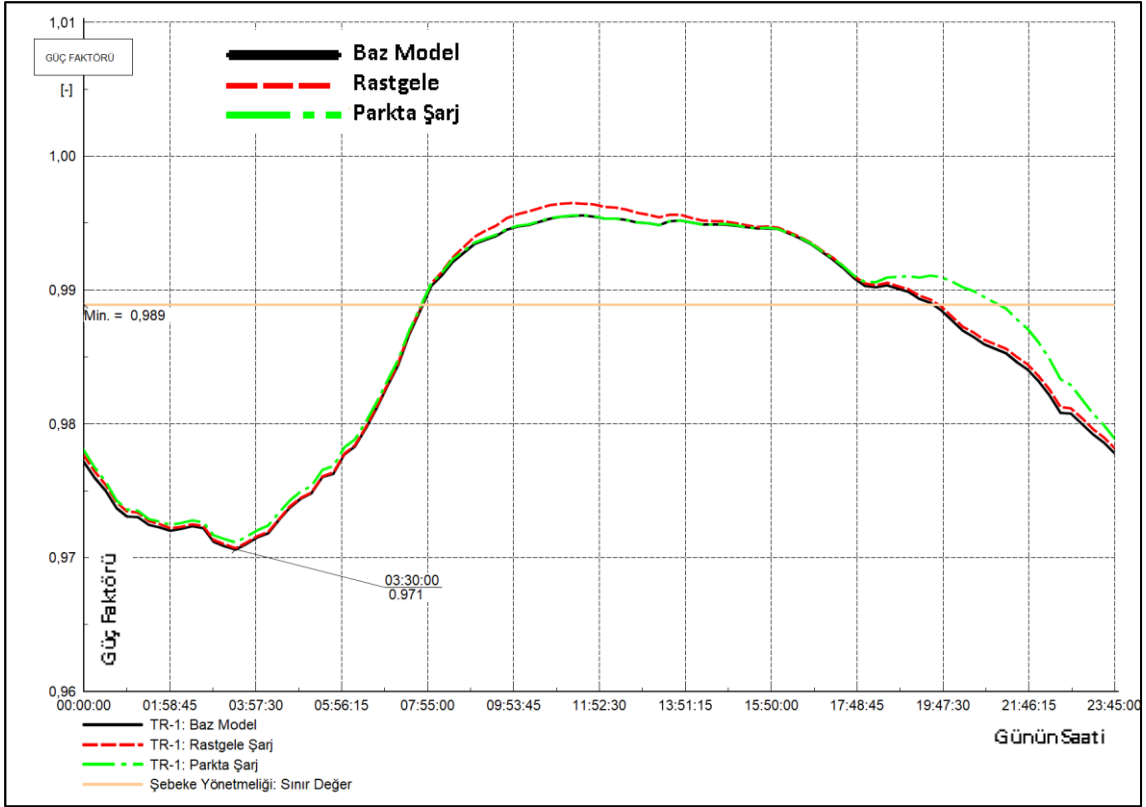
Şekil 46. TR-33 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



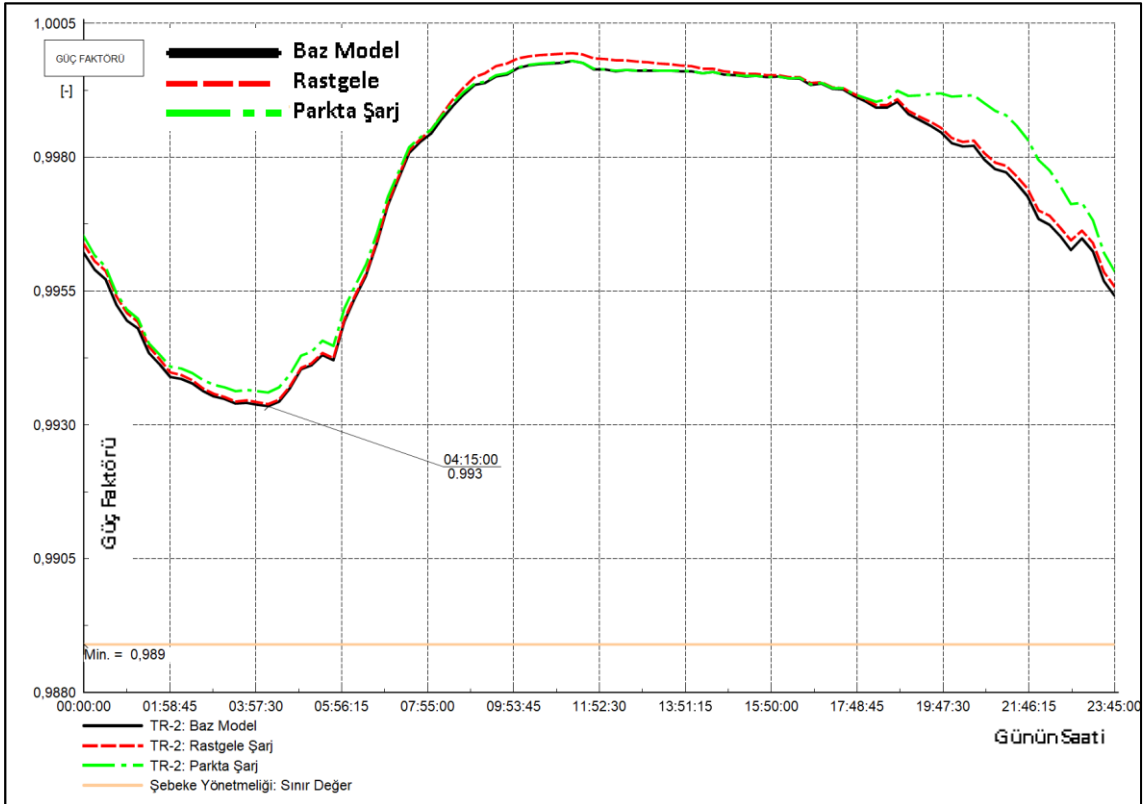
Şekil 47. TR-34 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



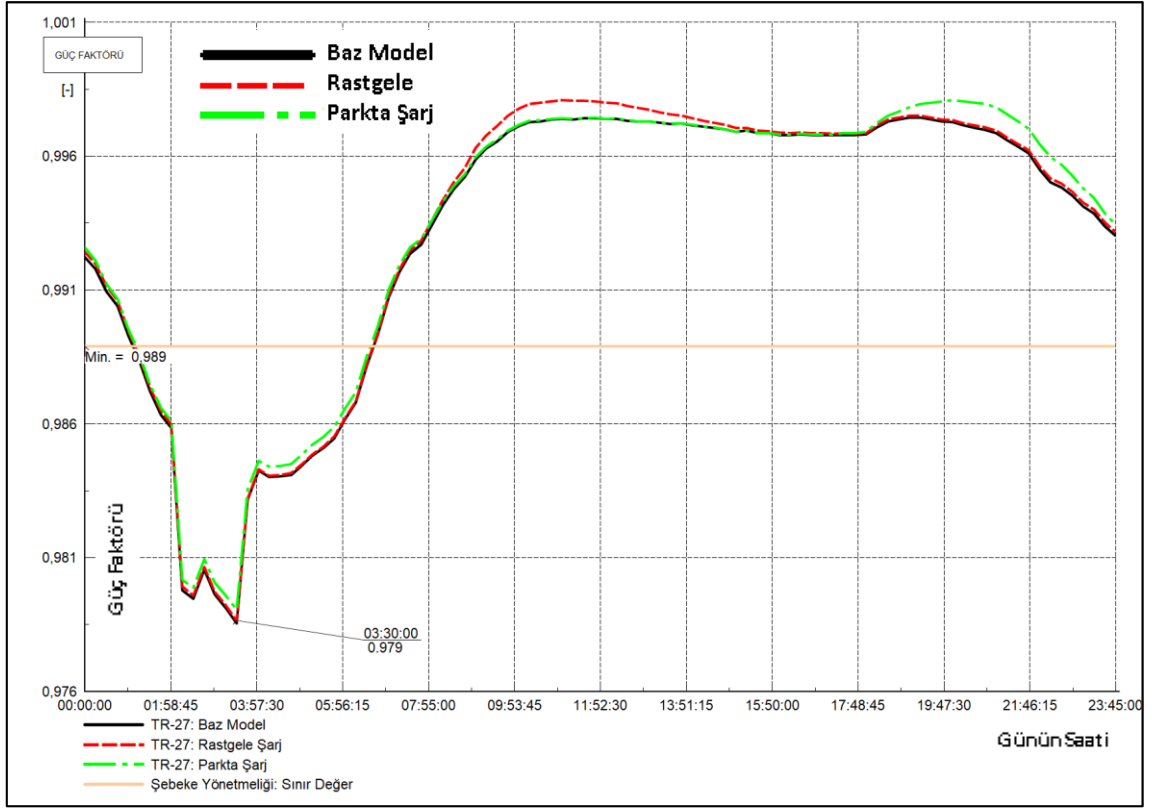
Şekil 48. TR-36 2025 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



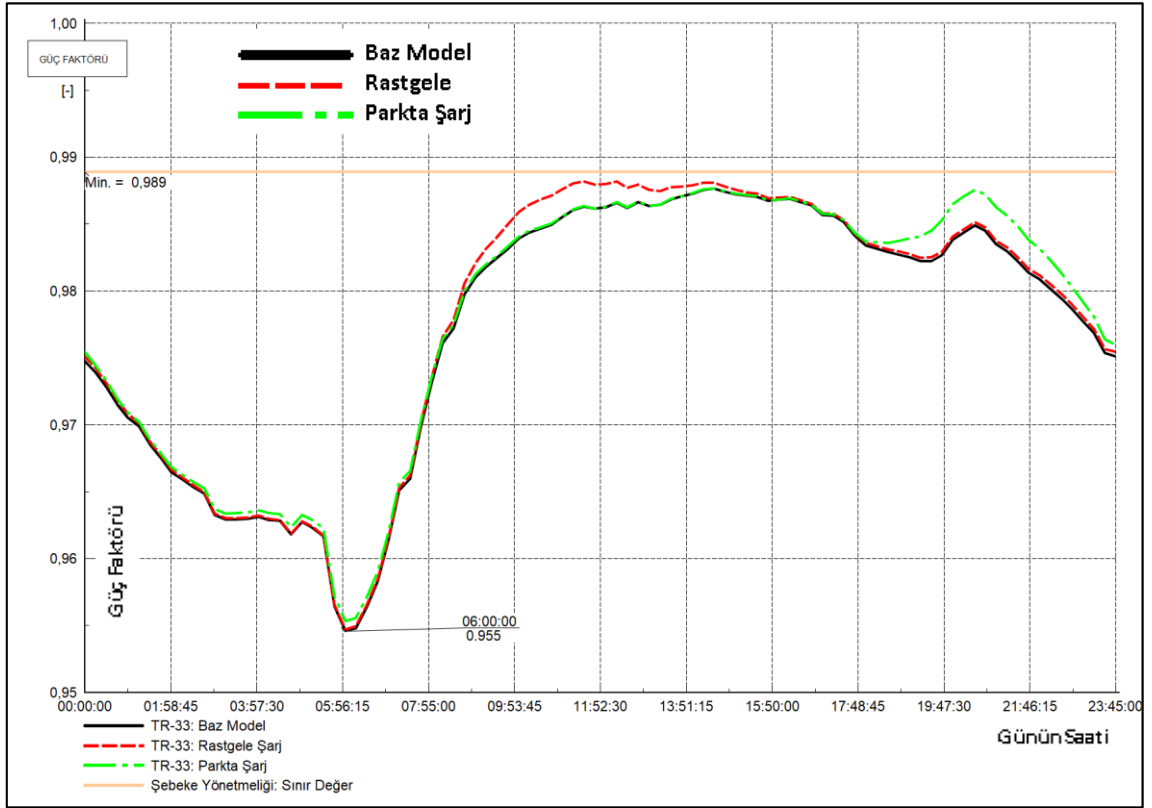
Şekil 49. TR-1 2025 Güç Faktörü Grafiği



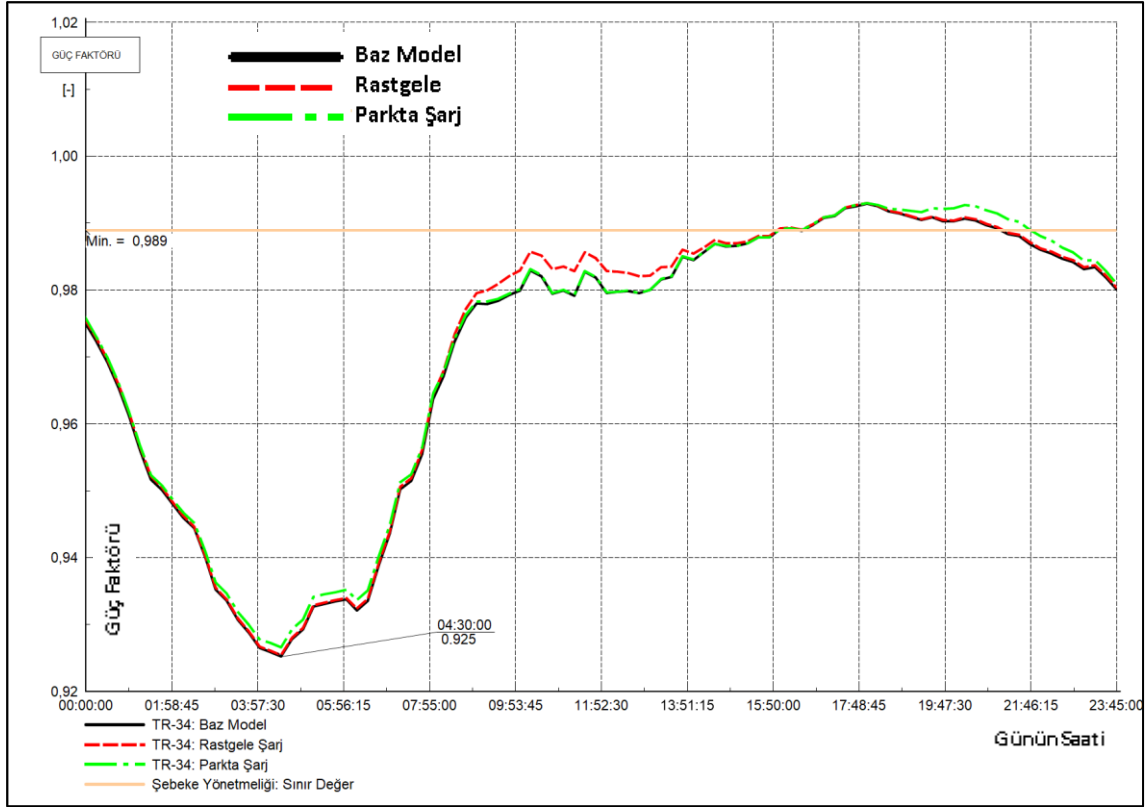
Şekil 50. TR-2 2025 Güç Faktörü Grafiği



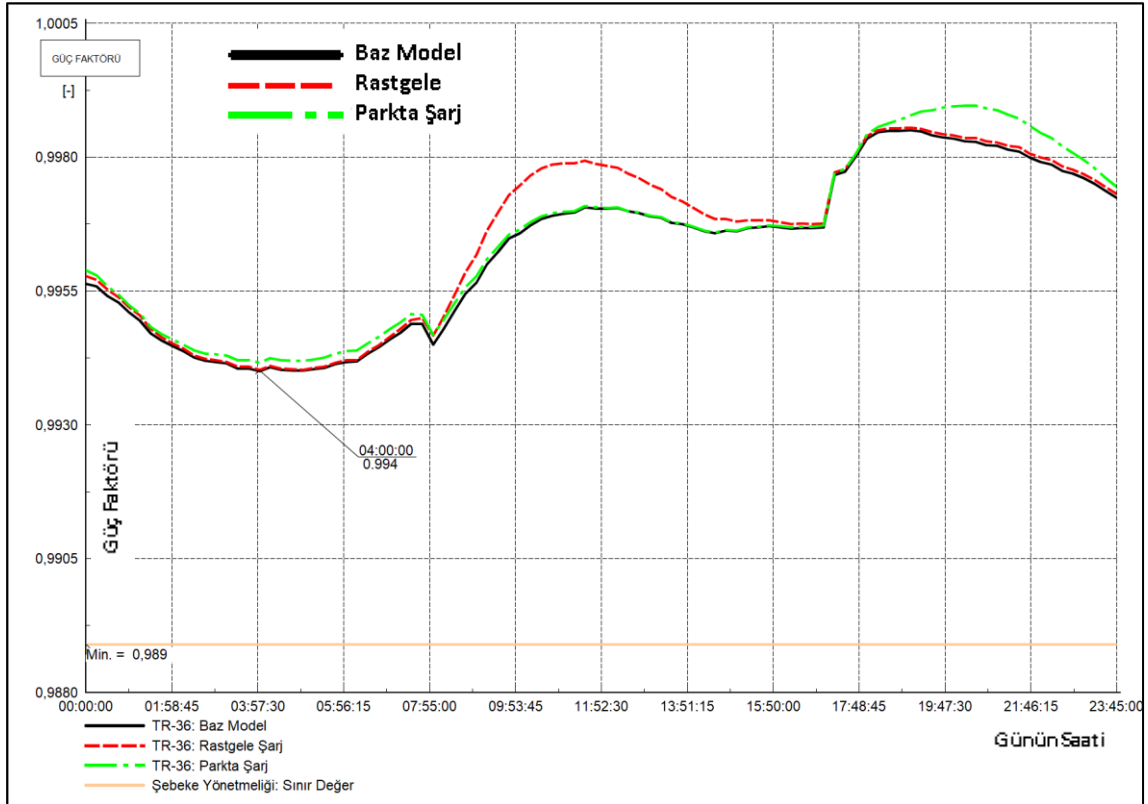
Şekil 51. TR-27 2025 Güç Faktörü Grafiği



Şekil 52. TR-33 2025 Güç Faktörü Grafiği



Şekil 53. TR-34 2025 Güç Faktörü Grafiği



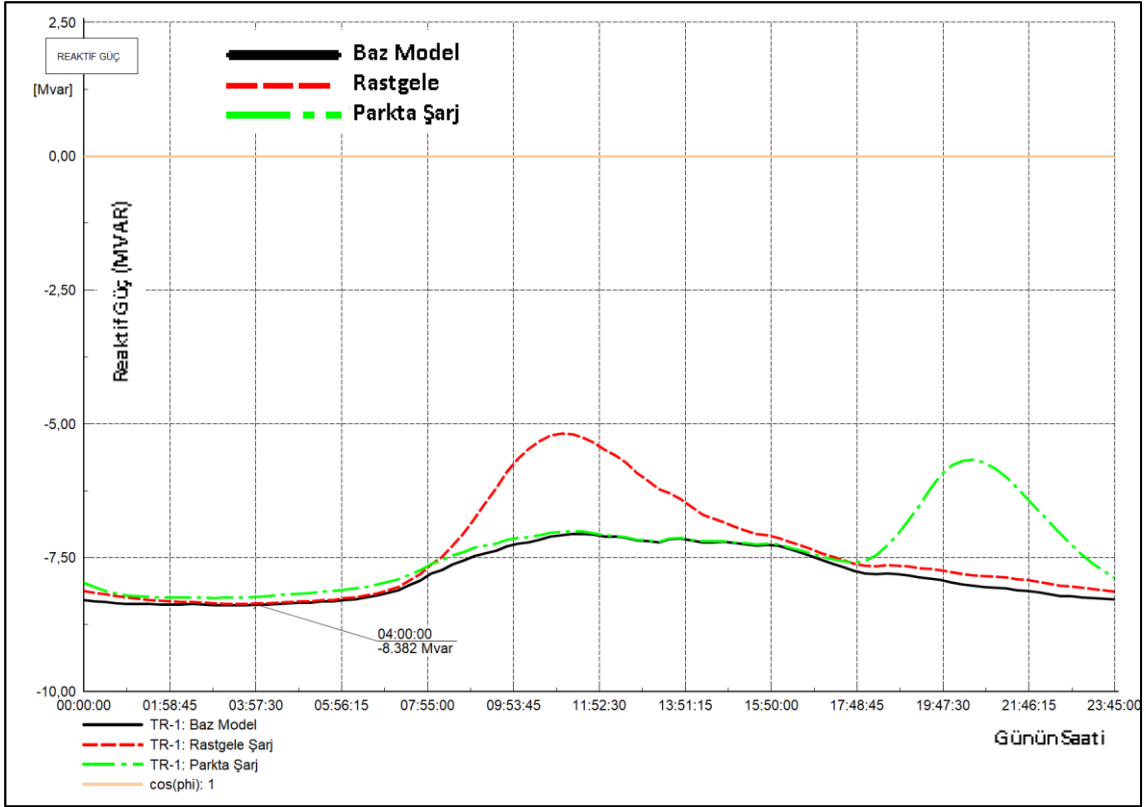
Şekil 54. TR-36 2025 Güç Faktörü Grafiği

5.2. 2030 Yılı İçin Öngörüler

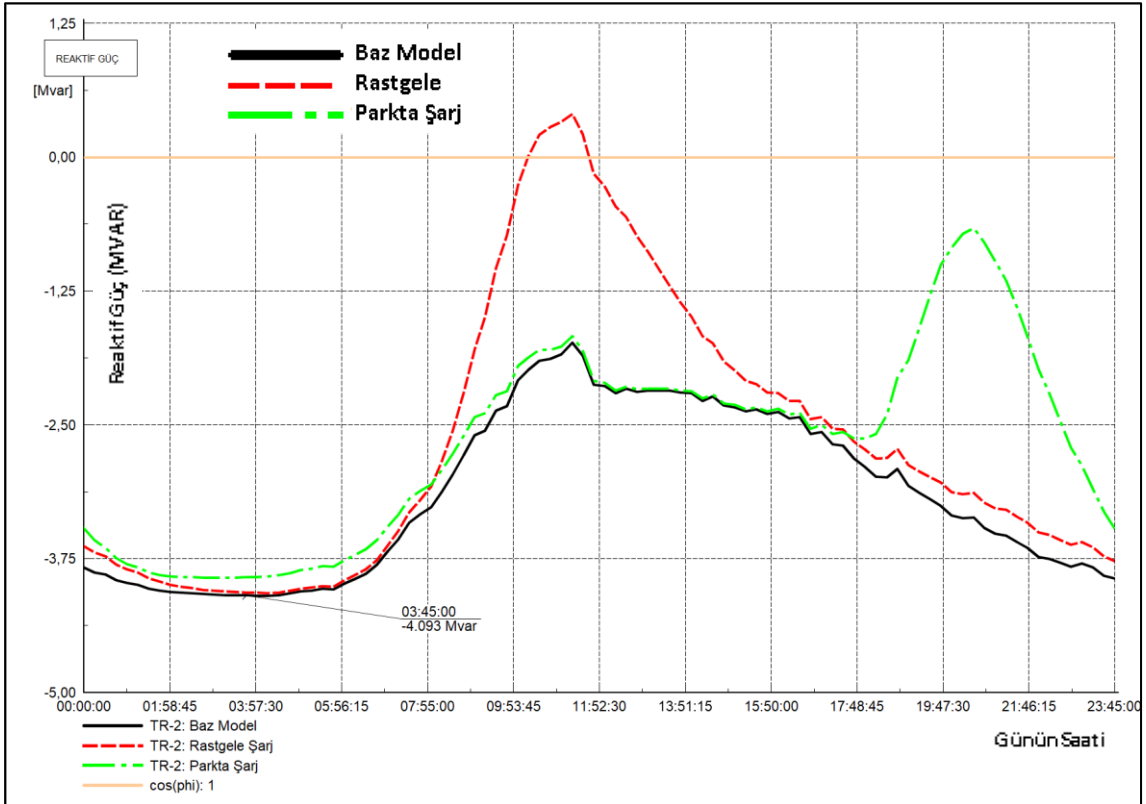
Kontrollü şarj durumunda, 2030 yılı öngörülerini yapilirken, 2030 yılında Türkiye'nin 1 milyon 350 bin elektrikli binek araca sahip olacağı düşünülerek, Kesim 5.1'de yapılan incelemeler tekrarlanmış ve sonuçları, **Şekil 55 – Şekil 66** arasında verilmiştir. Ayrıca, bu kesimde, mevcut maksimum yüklenmesinin fazla olması, hem gündüz hem akşam puantına sahip olması ve gece yüklerinin görece düşük olması sebebiyle seçilen TR-27 bölgesinde, EA'ların gece şarj olmasını öngören gece tarifesi senaryosu (Kesim 5.2.1), elektrikli araç sayısı 1,3 milyondan, 3,4 milyona çıkarılarak, %37,5'e ulaşan yaygınlaşma oranı (Kesim 5.2.2) ve fiderin güç trafosuna en uzak noktada şarj olma durumu (Kesim 5.2.3) için analizler tekrarlanmıştır.

Şekil 55 – Şekil 66'da verilen şebekeyi besleyen reaktif güç ve güç faktörleri grafikleri incelendiğinde, 2025 yılına benzer şekilde, elektrikli araçların şarjı, gece saatlerine kaydırılmadığı sürece güç faktörünün en çok bozulduğu saatlerde elektrikli araçların şebekeye sunabileceği reaktif katkıdan yararlanılamamaktadır. Rastgele şarj ve parkta şarj senaryolarında güç faktörü değişiminin sırasıyla gündüz ve akşam saatlerinde olumlu katkılar yapmasına rağmen şebekenin en düşük aktif yüke sahip olduğu dolayısıyla en fazla kapasitif yüklendiği gece saatlerinde ise EA'ların bir katkısı olmamaktadır.

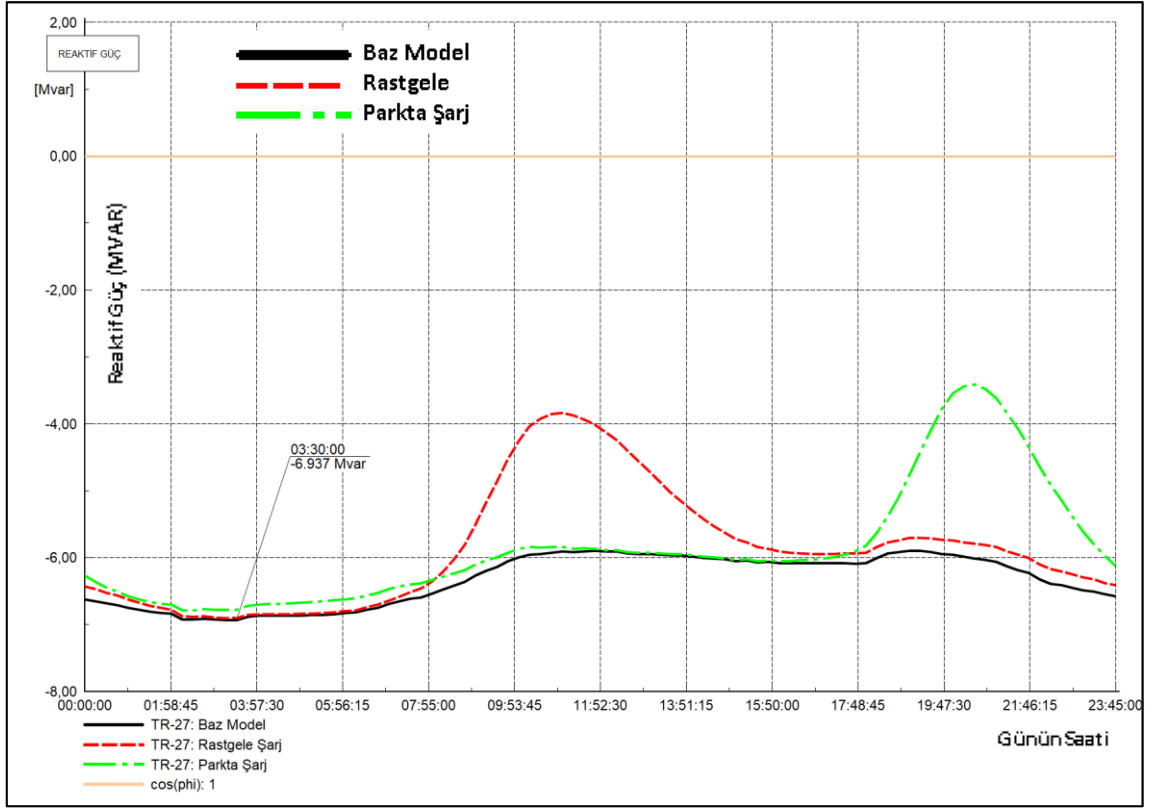
Ayrıca, $\cos(\Phi)$ 'nin kapasitif yönde ancak birim değere yakın olduğu gündüz ve akşam saatlerinde şarjdaki elektrikli araçların sabit olarak 0,9 endüktif güç faktöründe reaktif katkı sunması bu saatlerde, **Şekil 56**'da görüldüğü gibi, şebekenin güç faktörünü kapasitif yönden endüktif yöne taşıyabilmektedir.



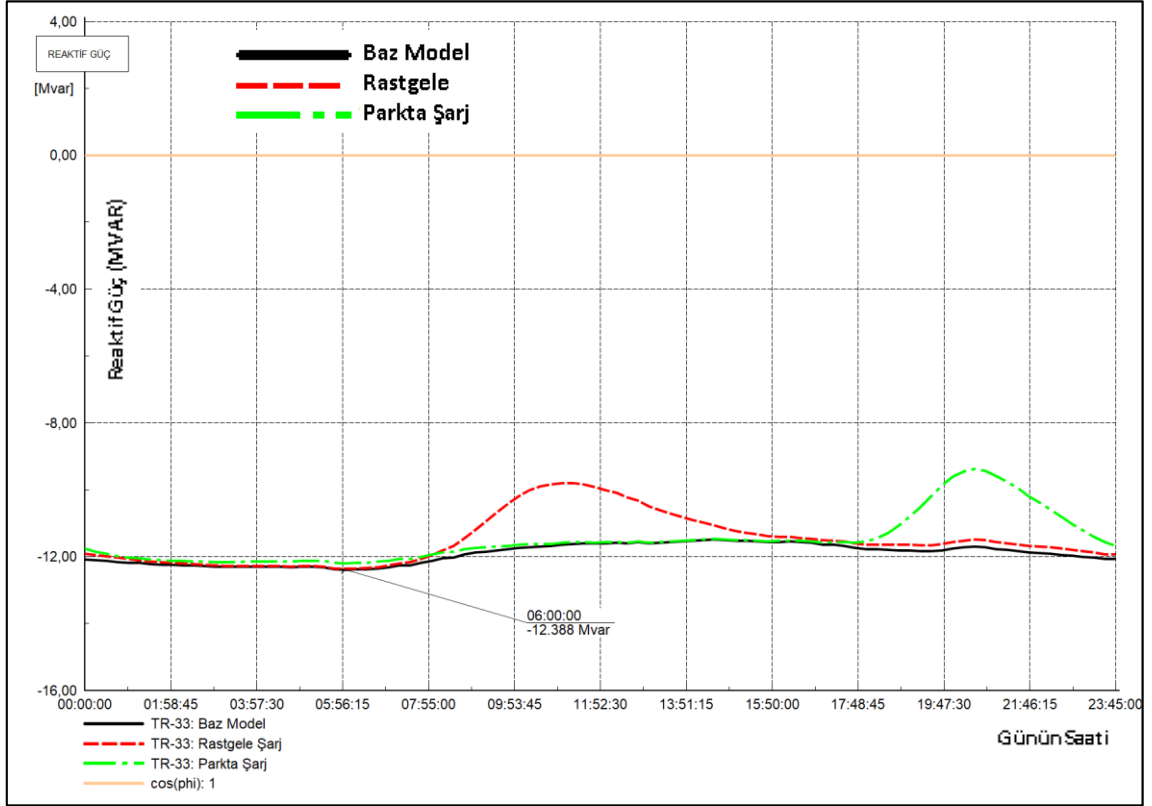
Şekil 55. TR-1 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



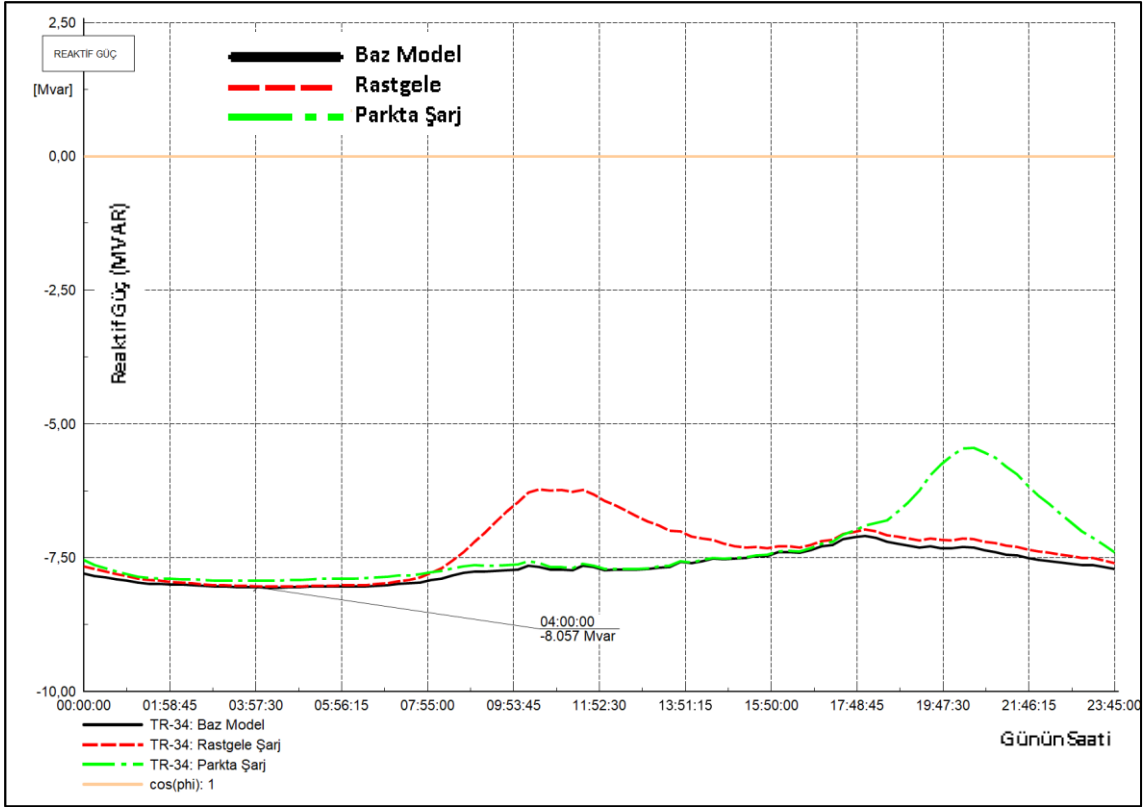
Şekil 56. TR-2 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



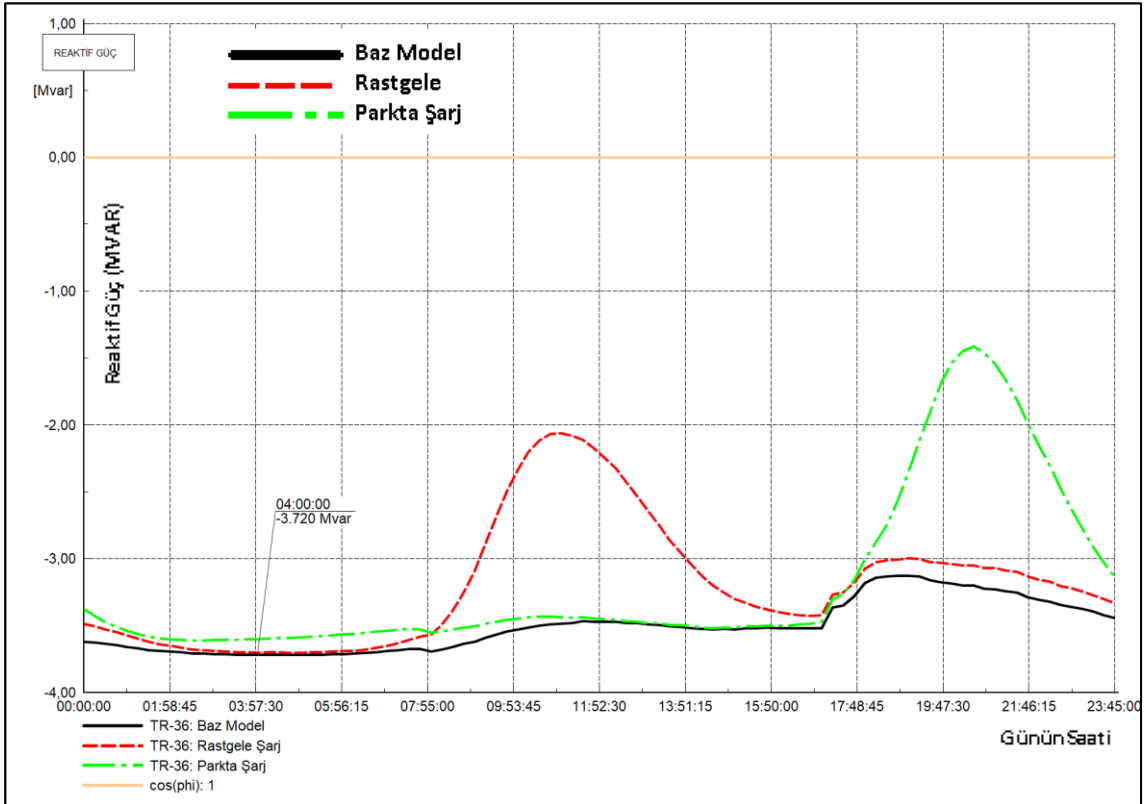
Şekil 57. TR-27 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



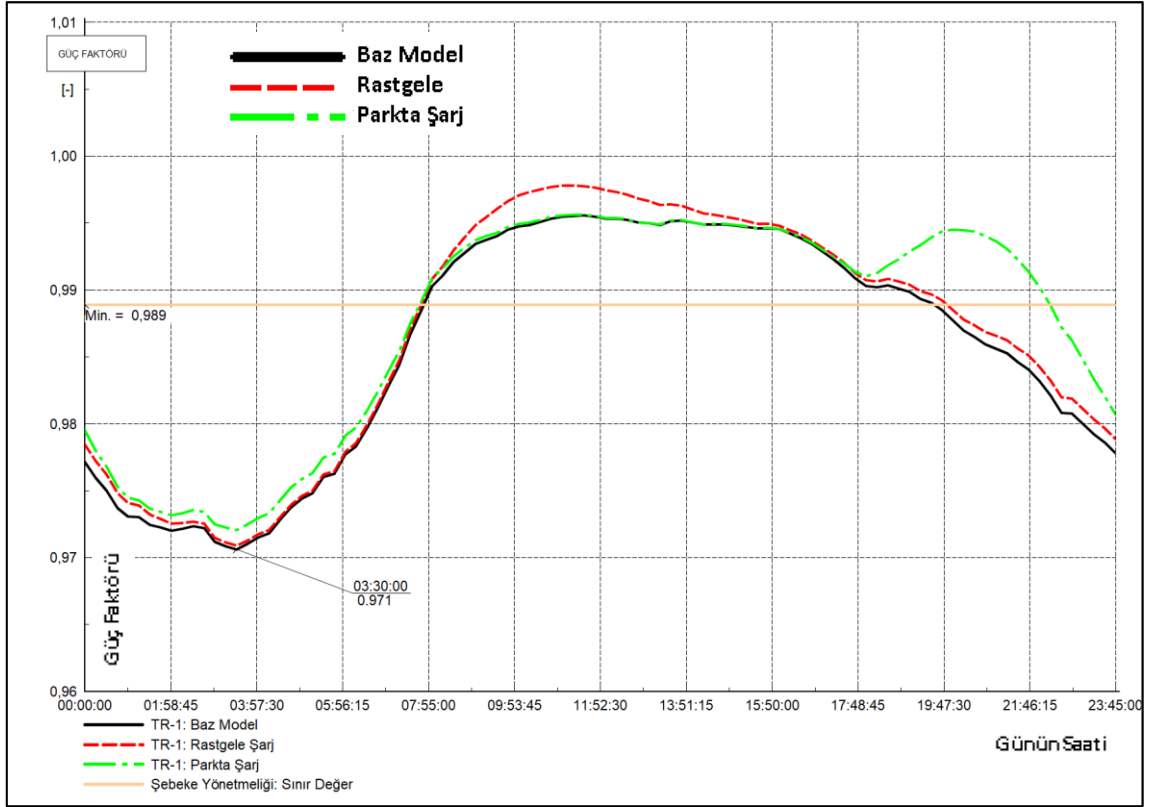
Şekil 58. TR-33 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



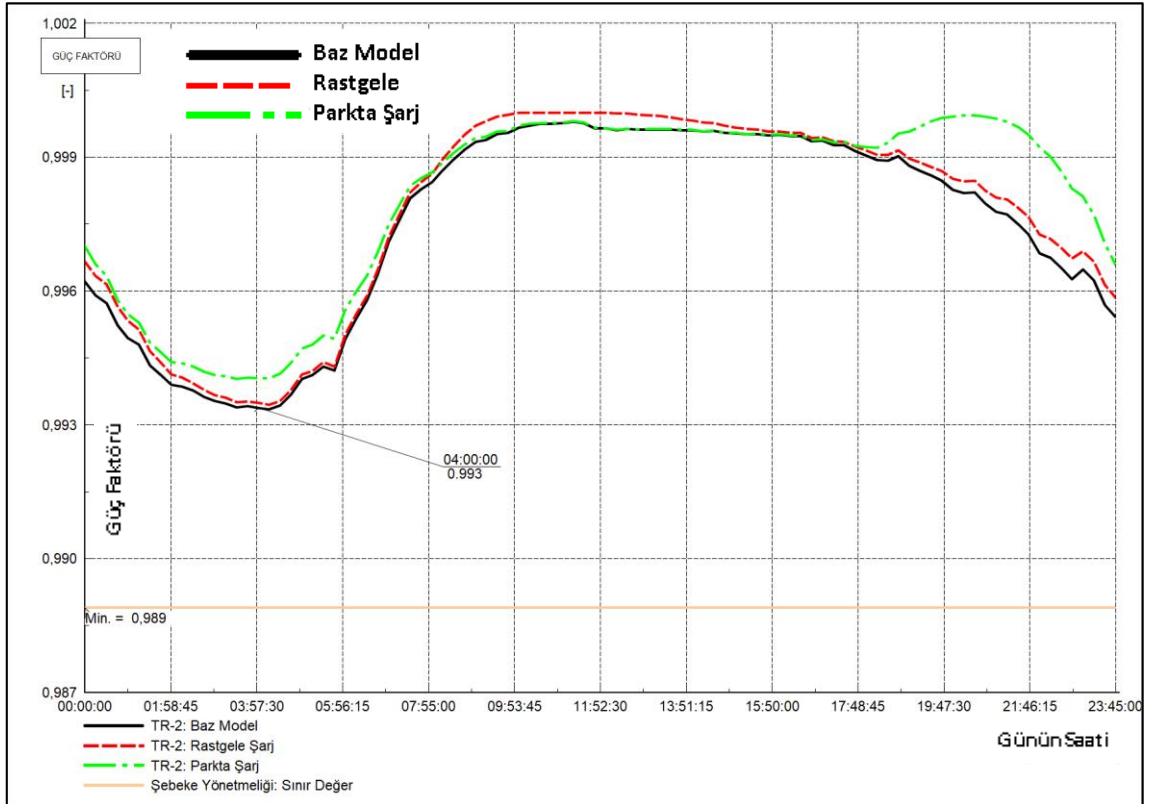
Şekil 59. TR-34 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



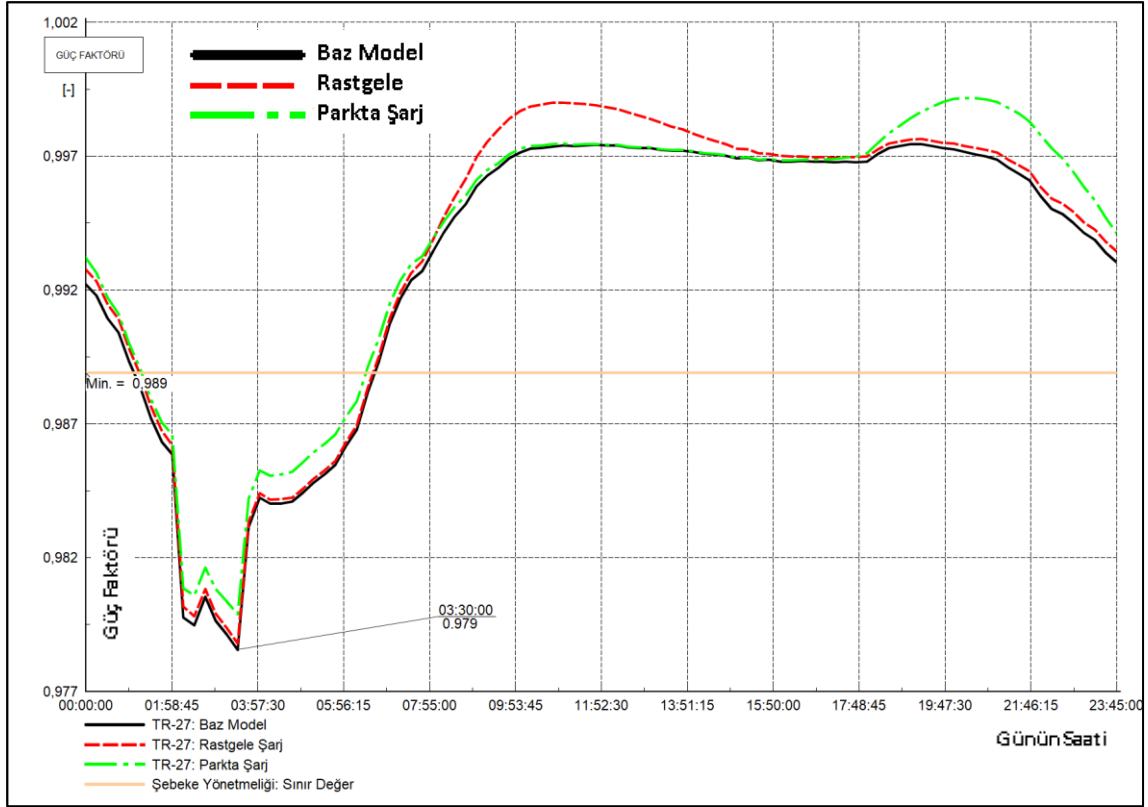
Şekil 60. TR-36 2030 Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



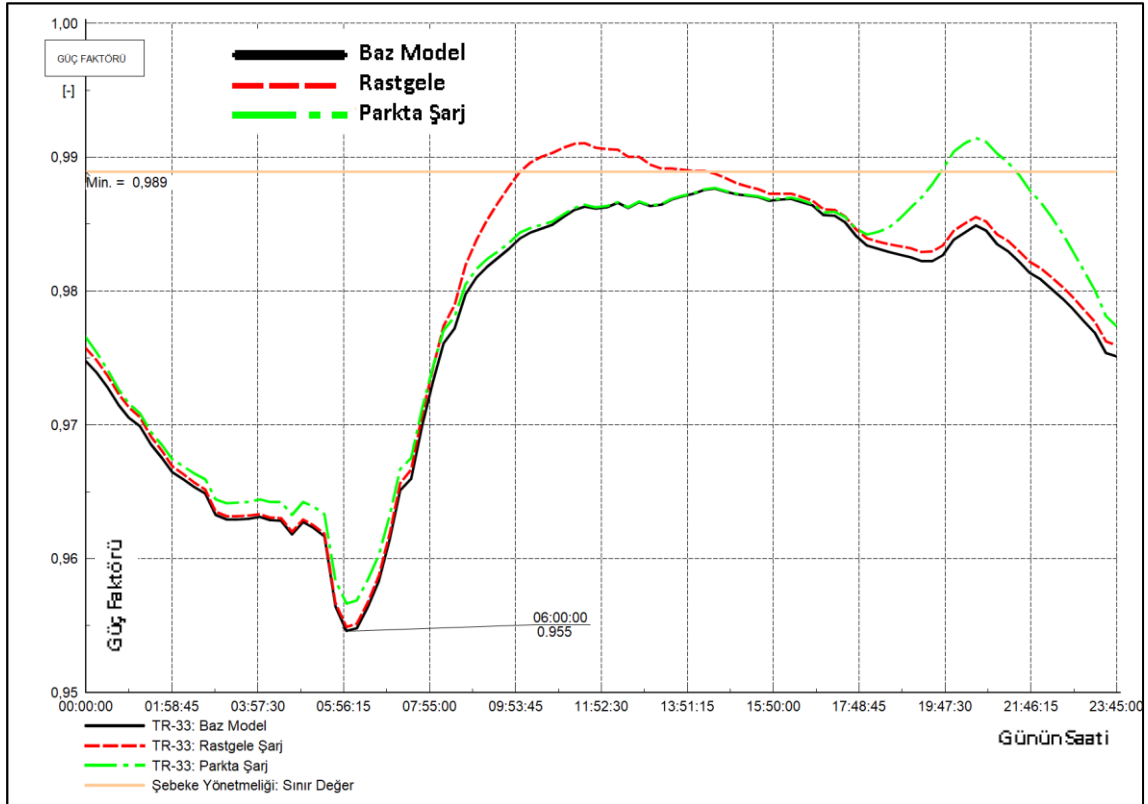
Şekil 61. TR-1 2030 Güç Faktörü Grafiği



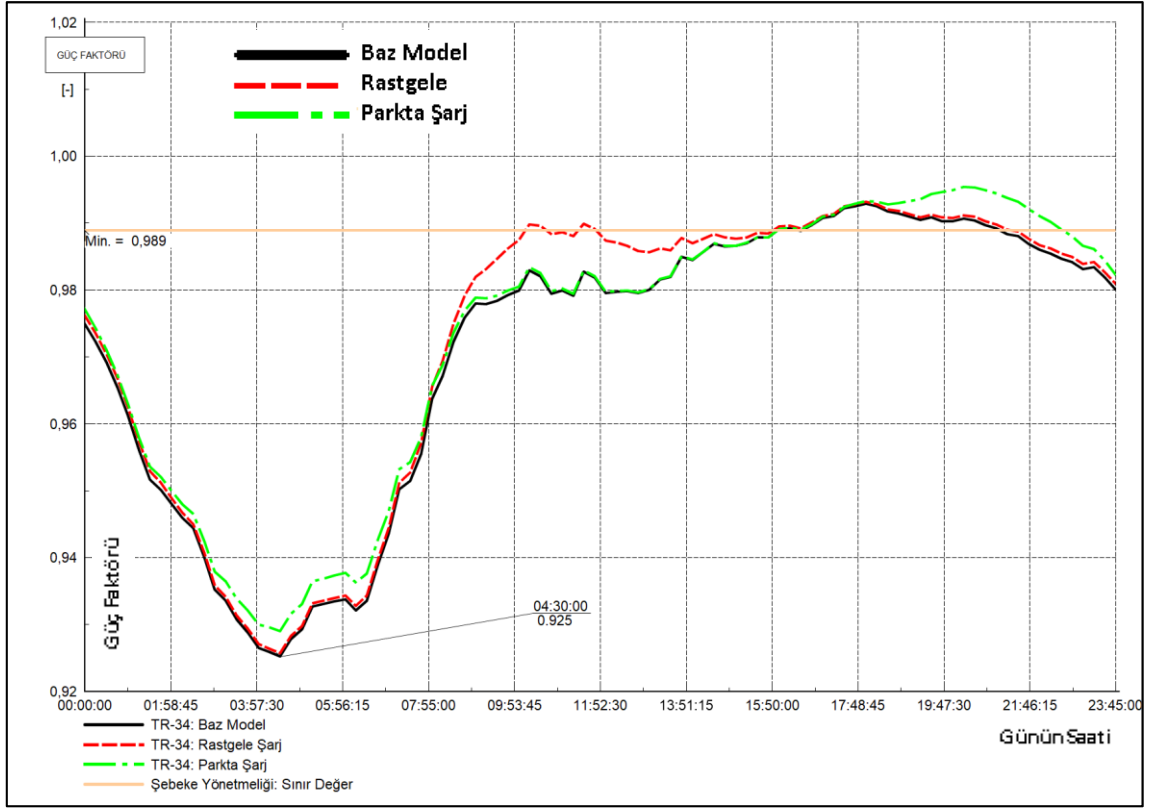
Şekil 62. TR-2 2030 Güç Faktörü Grafiği



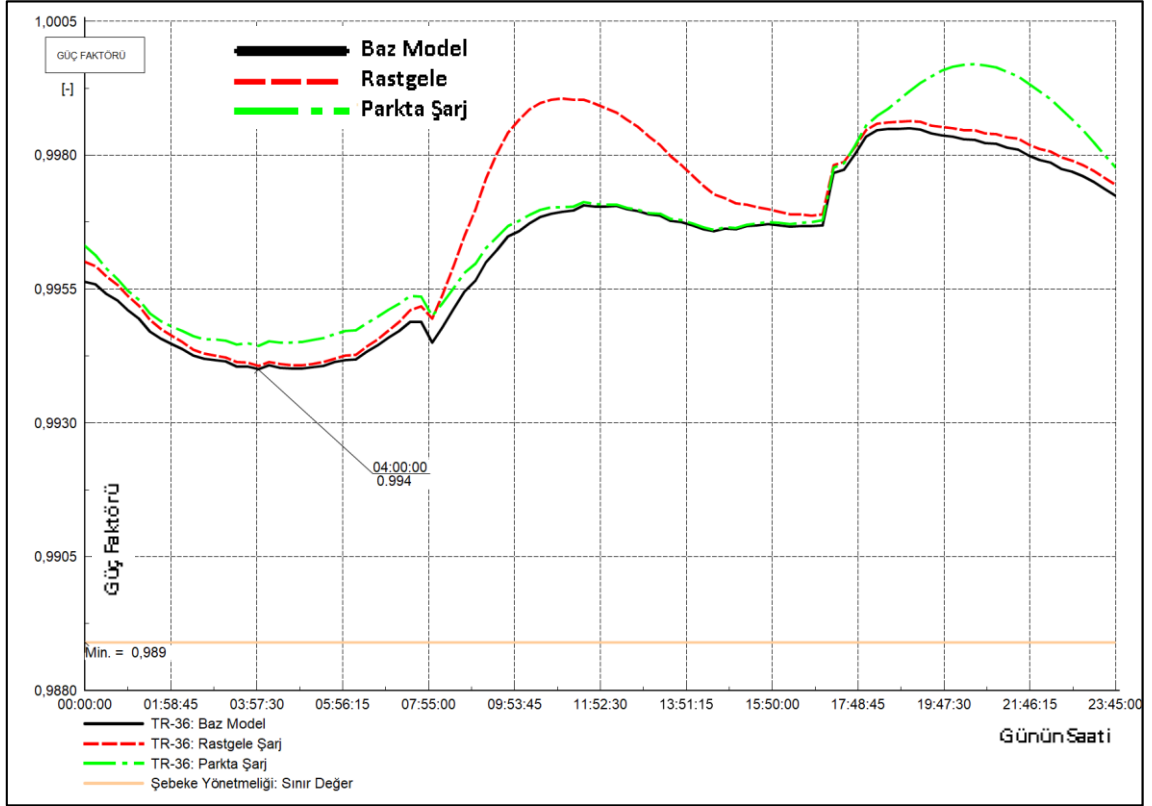
Şekil 63. TR-27 2030 Güç Faktörü Grafiği



Şekil 64. TR-33 2030 Güç Faktörü Grafiği



Şekil 65. TR-34 2030 Güç Faktörü Grafiği



Şekil 66. TR-36 2030 Güç Faktörü Grafiği

Kontrollü şarj durumunda elektrikli araçların şebekeye reaktif anlamda verebileceği katkının incelenmesi için, **Şekil 61 - Şekil 66**'da verilen grafiklerde en kötü duruma karşılık gelen diğer bir deyişle güç faktörünün en düşük değerinin gözleendiği durumlar **Çizelge 10**'da gösterilmiştir. Bu çizelgede gece saatlerinde gözlenen en düşük güç faktörü değerlerinin fazla değişmemesinin nedeni, bu saatlerde EA'ların bir katkısının olmamasıdır.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde;

- Limitler dahilinde olan güç trafoları durumunu korurken limit dışına çıkan güç trafolarında hemen hemen değişim olmamıştır.
- Gece şebeke yükünün az olmasından ötürü kapasitif yüklenme artmakta ve mevcut senaryolarda EA'lar gece dışında (gündüz veya akşam) şebekeyi kompanze edebildikleri için şebekenin kapasitif yüklenmesine sadece gündüz ve akşam saatlerinde bir çözüm üretilebilmekte; kapasitif yüklenmenin fazla olduğu gece saatlerinde bir iyileşme olmamaktadır.

Çizelge 10. Mevcut Senaryolarla EA'lardan Reaktif Katkı Alınması Analiz Sonuçları

Şarj Sınıfı	İncelenen Kriter	Öngörü Yılı	Çalışılan Trafo Bölgesi Sayısı	Senaryolar	Türkiye Elektrikli Araç Sayısı (Milyon)	TR-1	TR-2	TR-27	TR-33	TR-34	TR-36
Kontrollü Şarj	cos(phi) (en düşük)	2025	6	Baz Model	0,5	0,971	0,993	0,979	0,955	0,925	0,994
				Rastgele		0,971	0,993	0,979	0,955	0,925	0,994
				Parkta Şarj		0,971	0,994	0,979	0,955	0,927	0,994
	cos(phi) (en düşük)	2030	6	Baz Model	1,3	0,971	0,993	0,979	0,955	0,925	0,994
				Rastgele		0,971	0,993	0,979	0,955	0,926	0,994
				Parkta Şarj		0,972	0,994	0,980	0,957	0,929	0,994

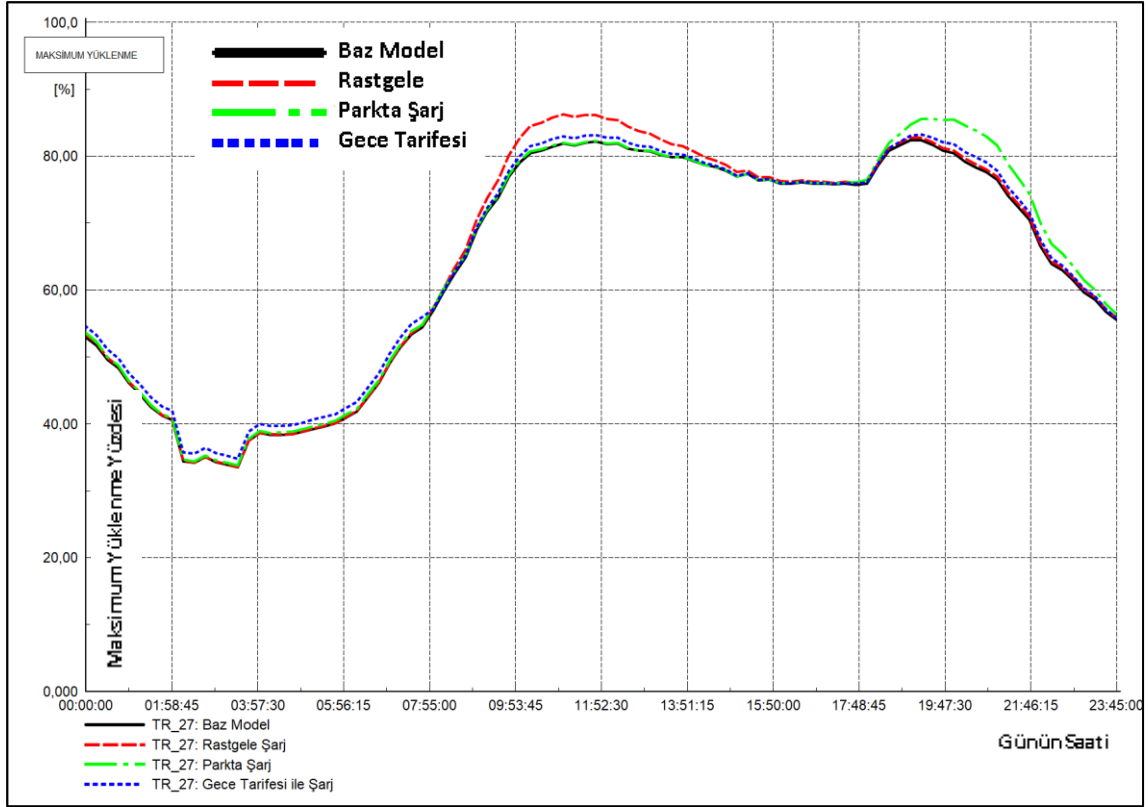
5.2.1. Gece Tarifesi Stratejisi ile Reaktif Katkı

Kesim 4.1’de açıklanan gece tarifesinin mevcut durumda yüksek oranda yüklü bir güç trafosu üzerindeki etkisini görmek amacıyla, TR-27 için, EA sayısı 1,3 milyon alınarak, her üç senaryo için yapılan analiz sonucu elde edilen, maksimum yüklenme grafiği **Şekil 67**’de, maksimum gerilim düşümü grafiği **Şekil 68**’de, EA’lardan şebekeye verilen reaktif güç grafiği **Şekil 69**’da, güç faktörü grafiği ise **Şekil 70**’te; maksimum yüklenme ile gerilim düşümü için en yüksek sonuçlar ile $\cos(\Phi)$ için en düşük sonuçlar ise **Çizelge 11**’de verilmiştir.

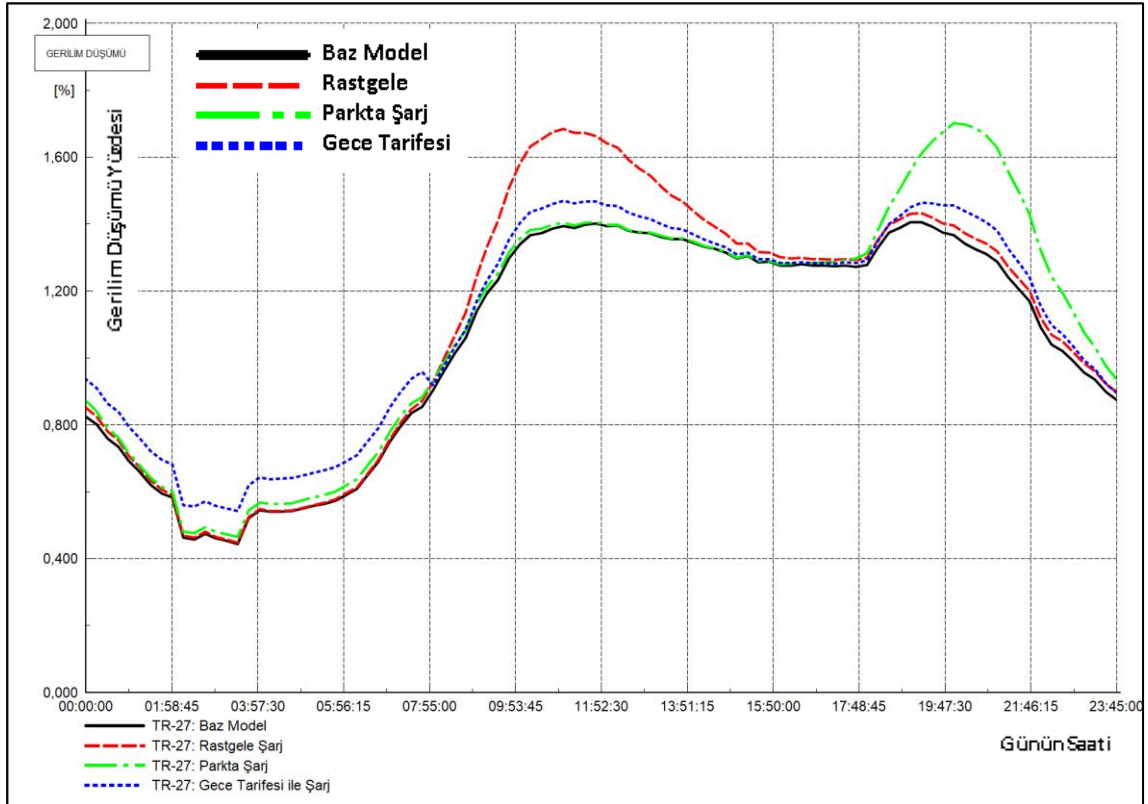
Çizelge 11. Gece Tarifesi Senaryosu Eklendiği Durum İçin Analiz Sonuçları

İncelenen Kriter	Öngörü Yılı	Çalışılan Trafo Bölgesi Sayısı	Senaryolar	Türkiye Elektrikli Araç Sayısı (Milyon)	TR-27
Mak. Yüklenme (%)	2030	1	Baz Model	1,3	82
			Rastgele		86
			Parkta Şarj		86
			Gece Tarifesi		83
Gerilim Düşümü (%)			Baz Model		1,4
			Rastgele		1,7
			Parkta Şarj		1,7
			Gece Tarifesi		1,5
$\cos(\Phi)$ (en düşük)			Baz Model		0,979
			Rastgele		0,979
			Parkta Şarj		0,980
			Gece Tarifesi		0,984

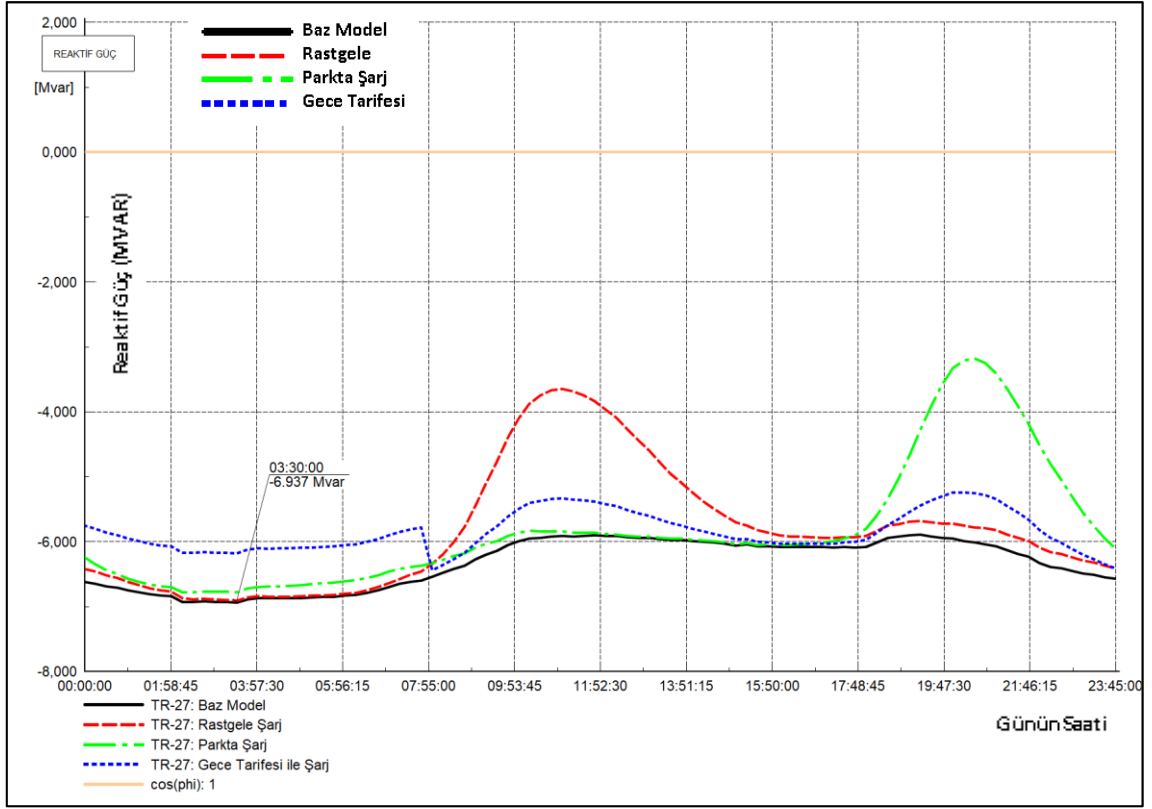
Elektrikli araçların gece şarj olması ve şebeke yöneticisi tarafından şarj saatlerinin yönetilmesi durumu; hem gündüz ve akşam için puant yükü daha az artırmakta, dolayısıyla gerilim düşümü azalmakta ve gece saatlerinde daha çok bozulan güç faktörünü düzeltme imkânı sağlamaktadır. **Şekil 70**’ten ve **Çizelge 11**’den görüldüğü gibi gece tarifesi şarj stratejisinde güç faktörünün limit dışında kaldığı süre azalmış (02.00-05.15) ve $\cos(\Phi)$ değeri artmıştır. Gece aktif yükün düşmesi ile kapasitif yükün çok artması sebebiyle EA’lar gece tarifesi stratejisi ile şarj edilse bile güç faktörü, gece 02.00 – 05.15 arasında limit değerler dışında kalmaktadır.



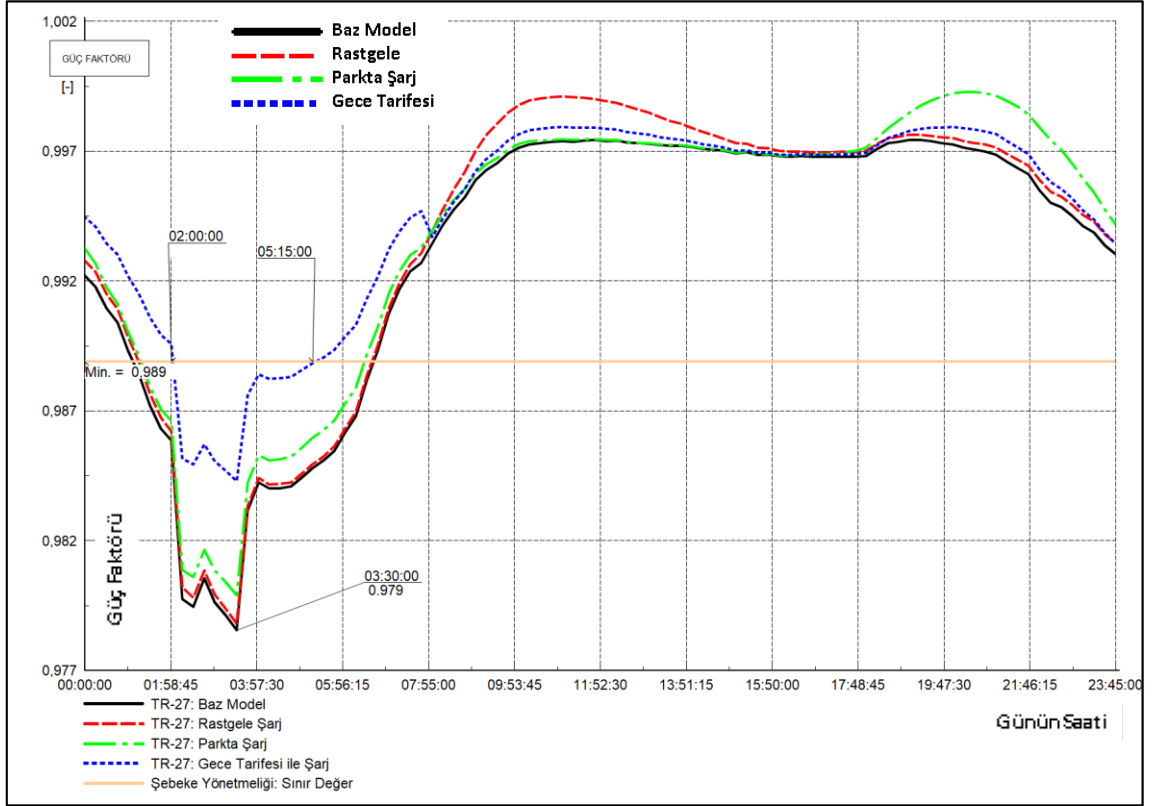
Şekil 67. TR-27 2030 Gece Tarifesi ile Maksimum Yüklenme Grafiği



Şekil 68. TR-27 2030 Gece Tarifesi ile Maksimum Gerilim Düşümü Grafiği



Şekil 69. TR-27 2030 Gece Tarifesi ile Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



Şekil 70. TR-27 2030 Gece Tarifesi ile Güç Faktörü Grafiği

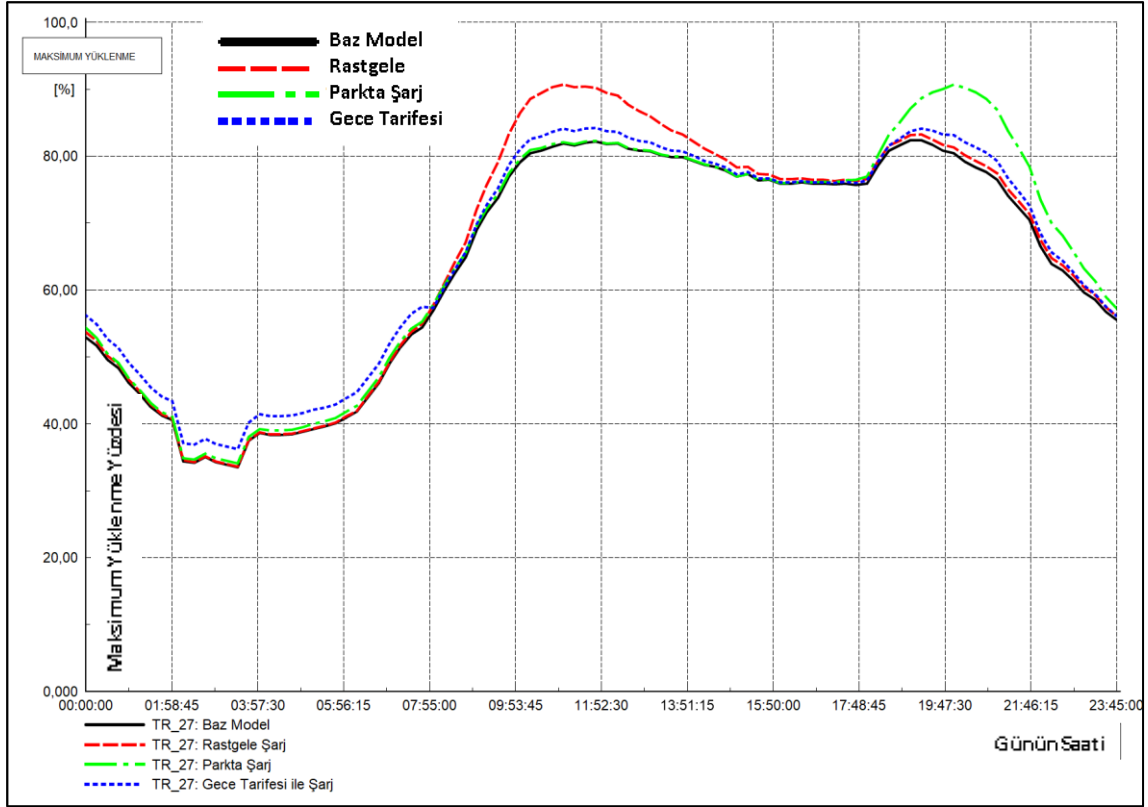
5.2.2. Elektrikli Araç Sayısının Etkisi

Yöntem Kesimi'nde bahsedildiği üzere Türkiye karayollarındaki otomobil sayısının Avrupa karayollarındaki otomobil sayısına oranı %4,63'tür. Bu oranın elektrikli araçlar yaygınlaşmasında da korunacağı düşüncesi üzerinden Türkiye karayollarında 2025 ve 2030 yıllarında sırasıyla 0,5 ve 1,35 milyon elektrikli aracın olacağı öngörülmüştür. Bu da seçilen pilot şebeke bölgesinde sırasıyla %5 ve %15 yaygınlaşmaya denk gelmektedir. Bu yaygınlaşmanın beklenenden daha fazla olması durumunda %30 ve %37,5 yaygınlaşma oranları (Türkiye elektrikli binek araç sayısının sırasıyla 2,7 milyon ve 3,4 milyon olması durumları) için analizler TR-27 bölgesinde tekrarlanmıştır, **Şekil 71 - Şekil 78**. EA sayısı artışına bağlı olarak değişen maksimum yüklenme ve gerilim düşümü kriterlerlerinde en yüksek değerler; $\cos(\Phi)$ kriteri için ise *en düşük* değerler **Çizelge 12**'de verilmiştir.

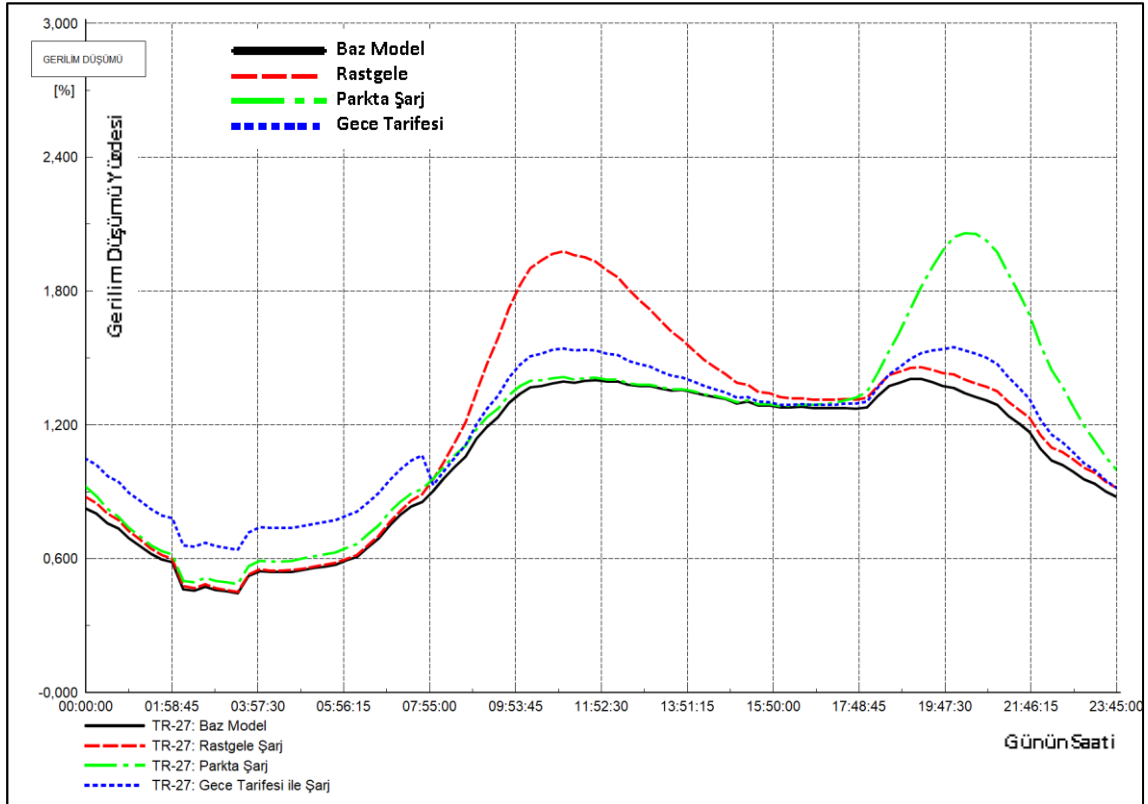
Çizelge 12. EA Sayısı Artışına Bağlı Analiz Sonuçları

İncelenen Kriter	Öngörü Yılı	Çalışılan Trafo Bölgesi Sayısı	Senaryolar	Türkiye Elektrikli Araç Sayısı (Milyon)	TR-27
Maksimum Yüklenme (%)	2030	1	Baz Model	2,7	82
			Rastgele		91
			Parkta Şarj		91
			Gece Tarifesi		84
Gerilim Düşümü (%)			Baz Model		1,4
			Rastgele		2,0
			Parkta Şarj		2,1
			Gece Tarifesi		1,6
cos(Φ) (en düşük)		Baz Model	0,979		
		Rastgele	0,979		
		Parkta Şarj	0,981		
		Gece Tarifesi	0,989		
Maksimum Yüklenme (%)		Baz Model	3,4	82	
		Rastgele		93	
		Parkta Şarj		93	
		Gece Tarifesi		85	
Gerilim Düşümü (%)	Baz Model	1,4			
	Rastgele	2,1			
	Parkta Şarj	2,2			
	Gece Tarifesi	1,6			
cos(Φ) (en düşük)	Baz Model	0,979			
	Rastgele	0,979			
	Parkta Şarj	0,982			
	Gece Tarifesi	0,991			

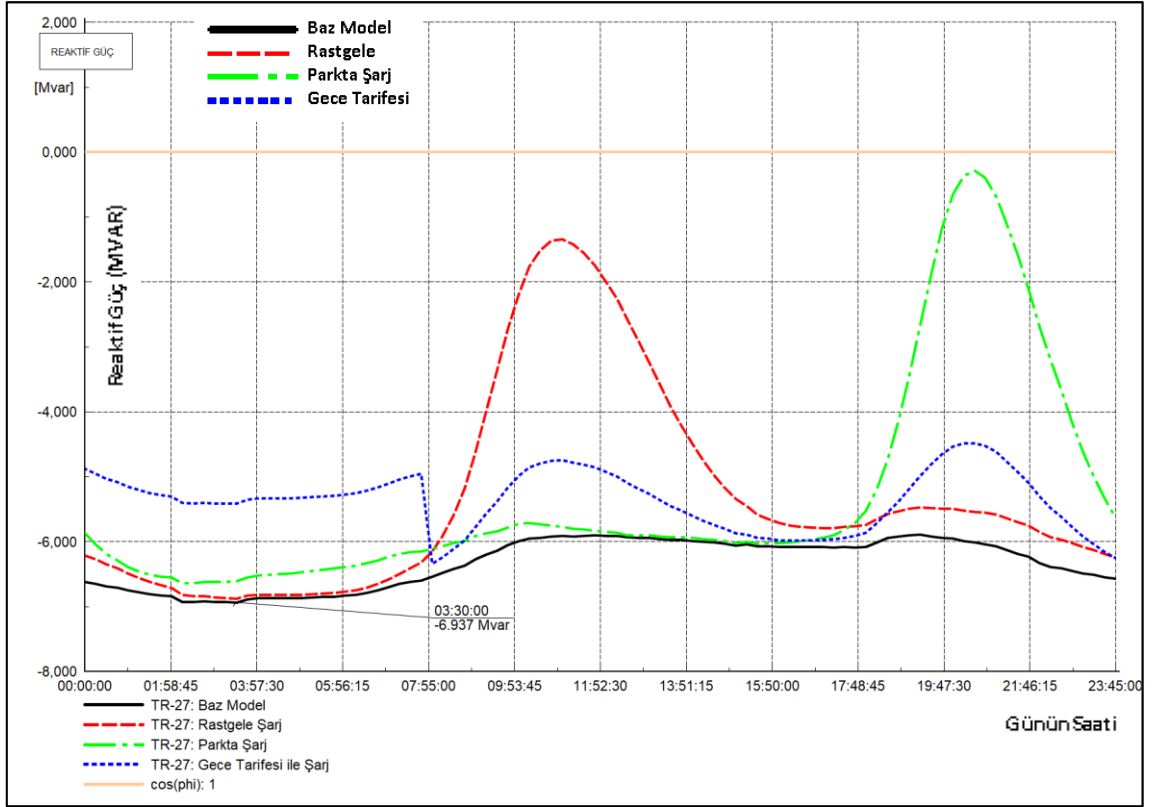
Türkiye'deki elektrikli binek araç sayısının 3,4 milyon adet olması durumunda bile gündüz puantı da akşam puantı da en fazla %93 oranına ulaşmaktadır. Maksimum gerilim düşümü %1,4'ten %2,2'ye çıkmaktadır. Güç faktörü düzeltilmesi yine gece tarifesinde anlamlı iken diğer senaryoların, araç sayısı yüksek oranda artmış olduğu halde, güç faktörüne katkısı sınırlı olmaktadır.



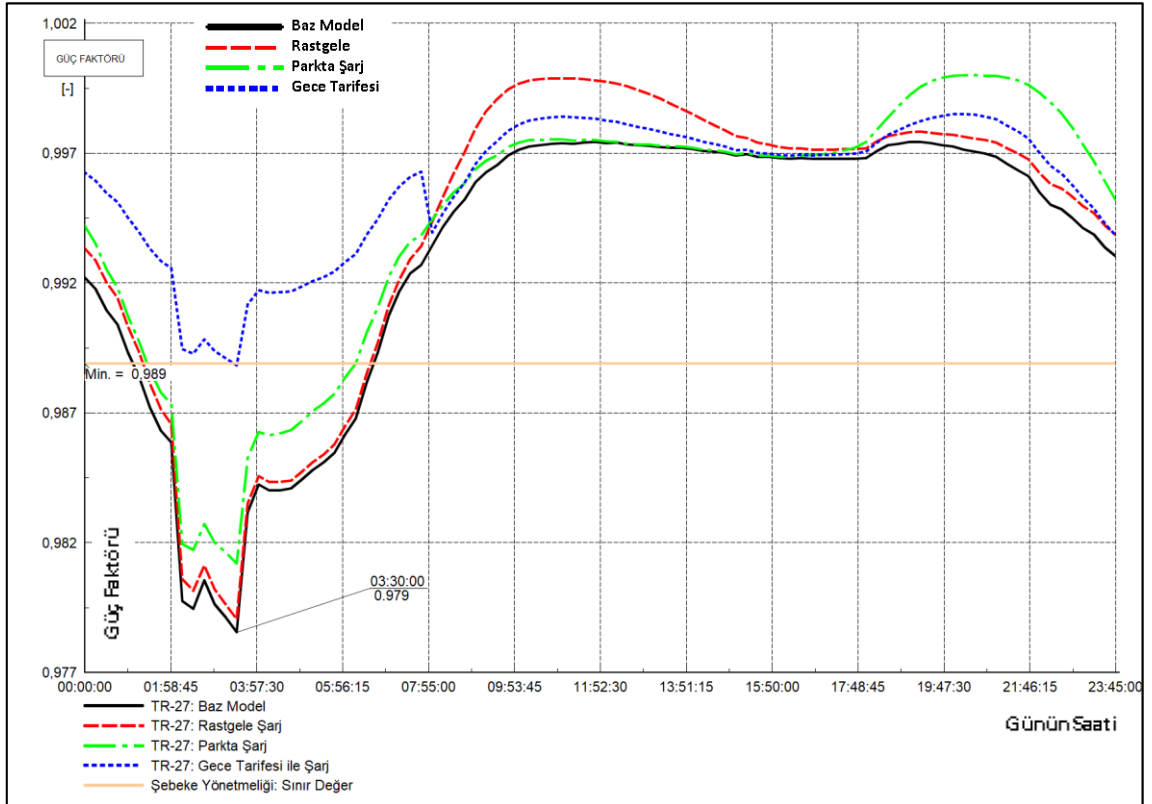
Şekil 71. TR-27 2030 EA Sayısı 2,7M'a Çıktığında Maksimum Yüklenme Grafiği



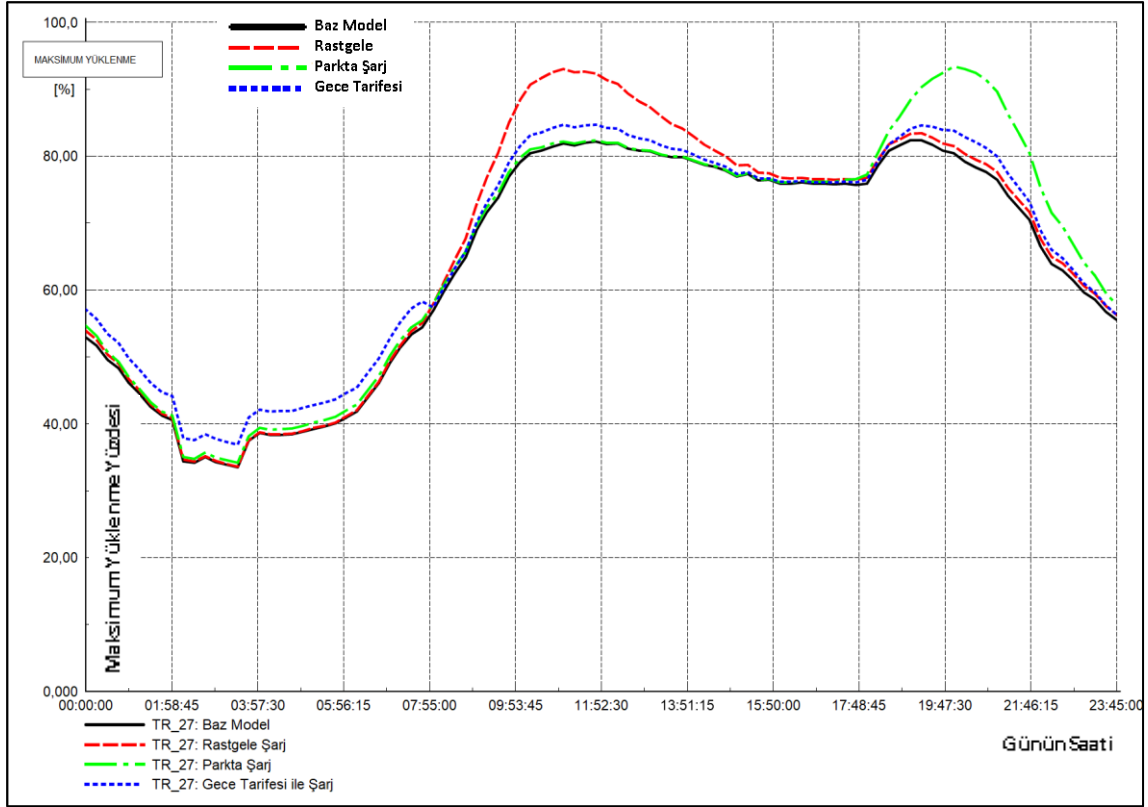
Şekil 72. TR-27 2030 EA Sayısı 2,7M'a Çıktığında Gerilim Düşümü Grafiği



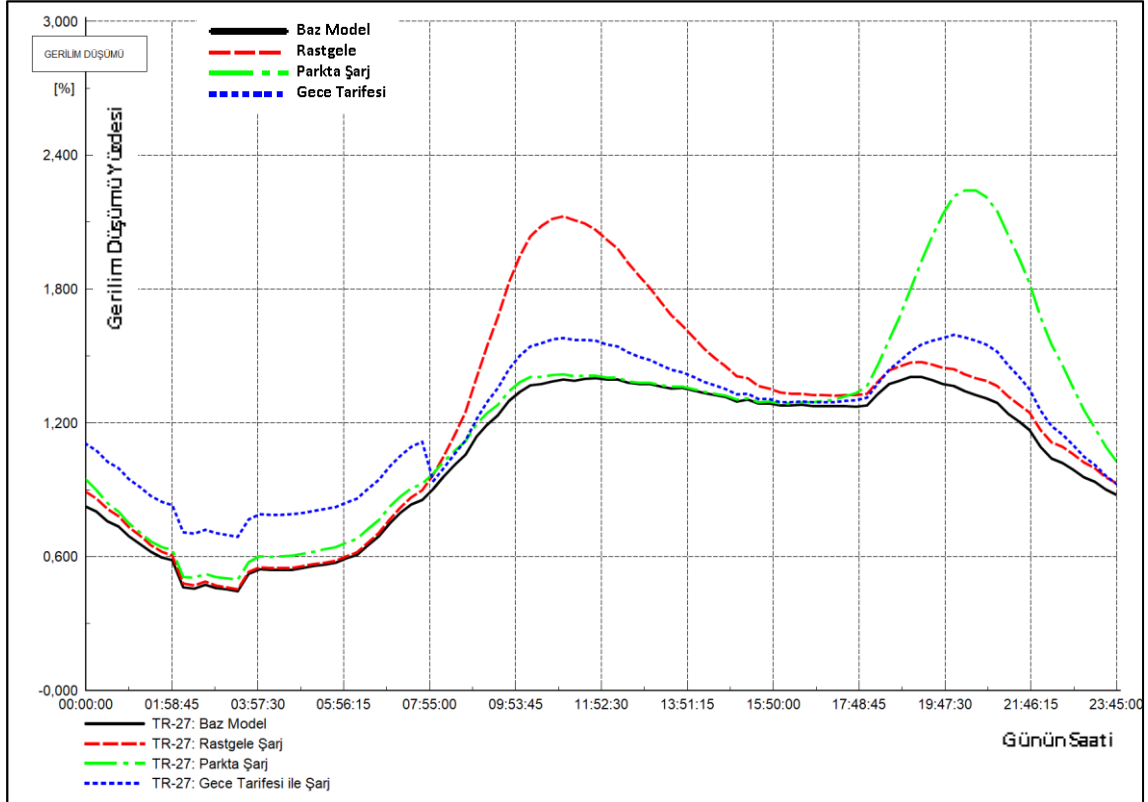
Şekil 73. TR-27 2030 EA Sayısı 2,7M Olduğunda Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği



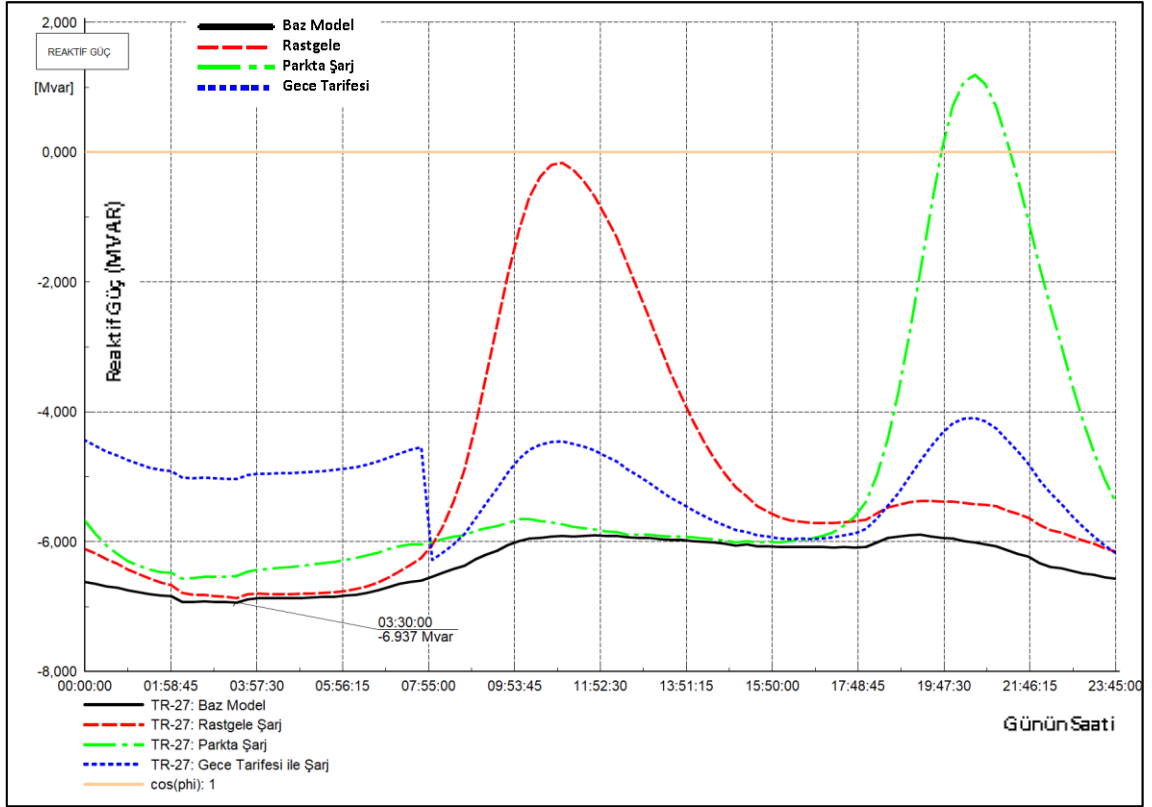
Şekil 74. TR-27 2030 EA Sayısı 2,7M'a Çıktığında Güç Faktörü Grafiği



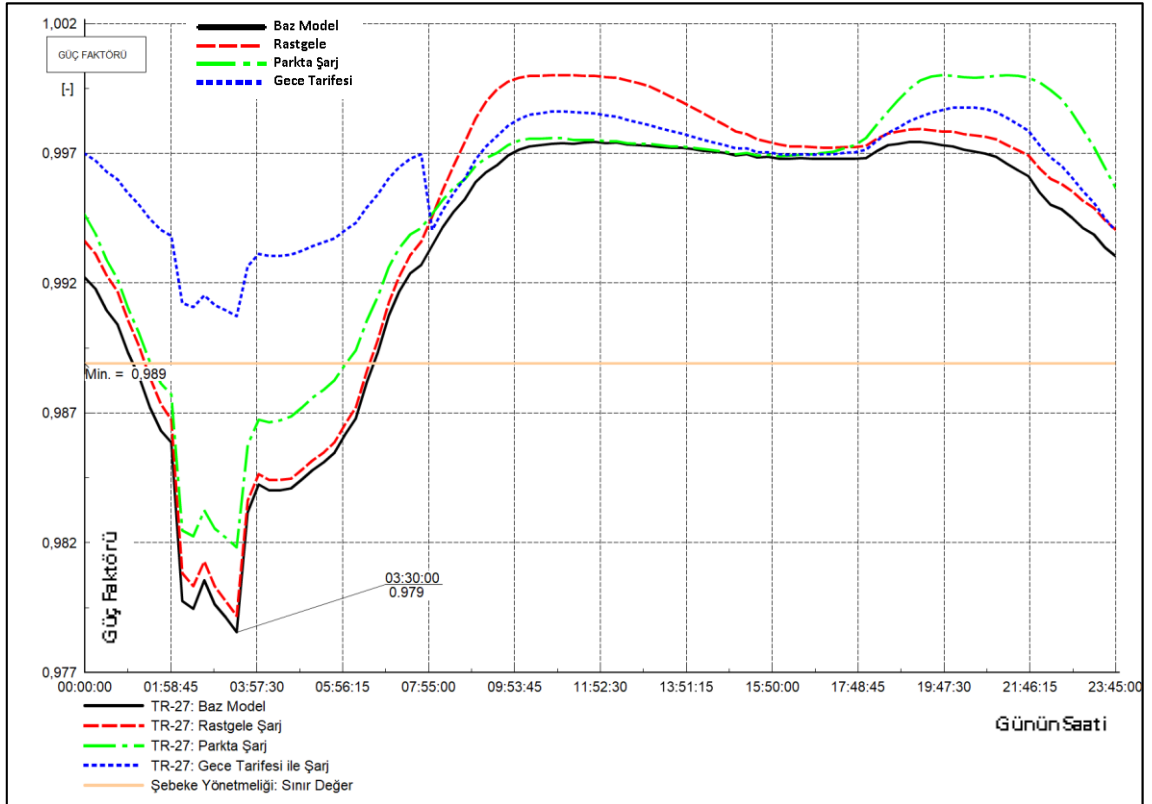
Şekil 75. TR-27 2030 EA Sayısı 3,4M'a Çıktığında Maksimum Yüklenme Grafiği



Şekil 76. TR-27 2030 EA Sayısı 3,4M'a Çıktığında Gerilim Düşümü Grafiği



Şekil 77. TR-27 2030 EA Sayısı 3,4M Olduğunda Şebekeyi Besleyen Reaktif Güç Grafiği

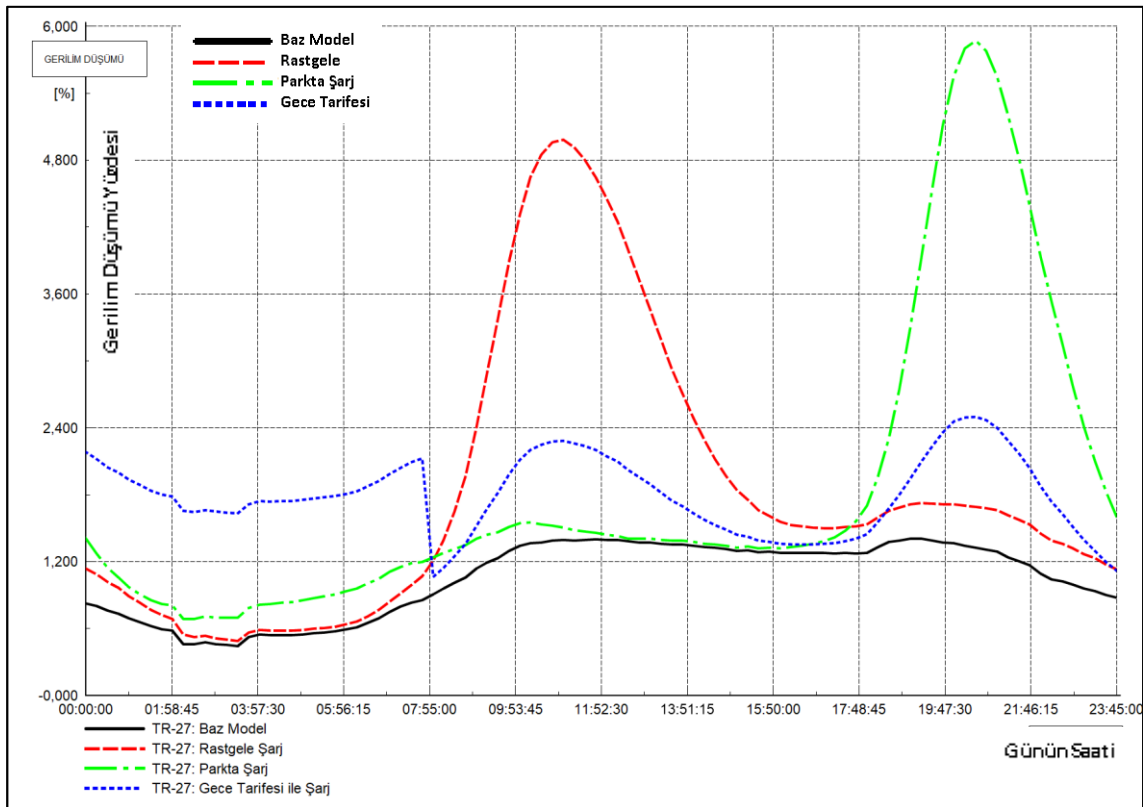


Şekil 78. TR-27 2030 EA Sayısı 3,4M'a Çıktığında Güç Faktörü Grafiği

5.2.3. Şarj Noktası Uzaklığının Etkisi

Şarj noktası uzaklığının etkisini değerlendirmek için, aynı trafo bölgesinde tüm elektrikli araç şarj istasyonları aynı fiderin en uzak noktasında (bu modelde yaklaşık 20 km'ye denk gelmektedir) olduğu durumda, elektrik araç sayısını, bu çalışmada alınan en yüksek değer olan, 3,4 milyon seçerek, her üç senaryo için, gerilim değişimlerine olan etkisi incelenmiş ve Şekil 79 ile Çizelge 13'te verilmiştir.

Maksimum gerilim düşümü; rastgele şarj senaryosunda %5,0 oranında, parkta şarj senaryosunda %5,9 oranında, gece tarifesi senaryosunda ise %2,5 oranında olmuştur. En kötü olası (3,4 milyon EA, güç trafosu bölgesindeki tek bir fiderde ve en uzak noktada EA şarj istasyonlarının konumlanması) durumda bile, maksimum gerilim düşümü, Türkiye'deki mevzuat [55] bakımından %10 limitleri içerisinde, literatürde kabul edilebilir limit olarak görülen %5 limitine göre parkta şarj senaryosu için limit dışında ve rastgele şarj senaryosunda ise tam limit sınır değerinde yer almıştır.



Şekil 79. TR-27 için 2030 3,4M EA Yaygınlaşmasında EA'lar Fider Sonundan Bağlanırsa Gerilim Düşümü Grafiği

Çizelge 13. EA'ların Fider Sonunda Şarj Olduğu (En Kötü Durum İçin) Gerilim Düşümü

EA Şarj İstasyonlarının Konumu	İncelenen Kriter	Öngörü Yılı	Çalışılan Trafo Bölgesi Sayısı	Senaryolar	Türkiye Elektrikli Araç Sayısı (Milyon)	TR-27
Fider Sonunda	Gerilim Düşümü (%)	2030	1	Baz Model	3,4	1,4
				Rastgele		5,0
				Parkta Şarj		5,9
				Gece Tarifesi		2,5

Kontrollü şarj durumunda elektrikli araçların şebekeye etkilerinin incelendiği bu kesimde elde edilen sonuçlar **Çizelge 10**, **Çizelge 11**, **Çizelge 12** ve **Çizelge 13**'te özet halinde verilmiştir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde;

- Elektrikli araç sayısının artmasıyla, yaygınlaşma oranı %37,5 olduğu durum için yüklenme oranı parkta şarj senaryosunda %93'e ulaşırken, gece tarifesinde %85 olması, EA şarjının geceye yönlendirilmesinin
- Elektrikli araçların şebekeye reaktif katkı verebilmesi için EA şarj işleminin mümkün olduğunca geceye kaydırılması ve böylece mevcut gece yüklerinin düşük olması ve yer altı kablo uzunluğunun fazla olması nedeniyle şebekelerdeki kapasitif yüklenmenin, elektrikli araçların sağlayacağı endüktif kompanzasyon ile üstesinden gelinebilmesinin
- EA'ların şarj için fider sonundan şebekeye bağlanması, yönetmelikte yer alan [55] sınırlar içerisinde kalınmasına karşın, gerilim düşümünde artışa neden olduğundan şarj istasyonlarının fider boyunca dağıtılmasının,

elektrik şebekesi açısından olumlu bir etki yaratacağı sonucu çıkarılmıştır. Bulunan bu sonuçlar literatür ile uyum içerisindedir [16], [17], [22], [23], [24], [25].

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Türkiye'nin metropollerinden birinde elektrikli araçların %5, 15 ve 30 oranlarında kontrolsüz şarj senaryolarında yaygınlaşmasının orta gerilim dağıtım şebekesi açısından etkileri ortaya konulmuştur. Ayrıca, kullanıcıların gece şarj etmeye yönlendirildiği veya elektrikli araçlardan endüktif yönde reaktif destek alındığı kontrollü şarj senaryolarının da sonuçları gösterilmiştir.

Bu amaçla, dağıtım şebekesi güç trafolarından dağıtım trafolarına kadar OG gerilim seviyesinde modellenmiş, uygun şebeke yükleri ilgili sistemlerden edinilip modele aktarılmış ve 36 güç trafosu bölgesinde yük akış analizleri yapılmıştır. Literatür incelenerek küresel ölçekte uluslar ve uluslararası mevcut politikaların devamı durumunda 2025 ve 2030 yılları için öngörülen elektrikli araç sayıları Türkiye özelinde hesaplanmıştır. Monte Carlo simülasyonlarından faydalanan MATLAB açık kaynak kodlu literatür çalışmasından faydalanarak elektrikli araç yükleri şebekeye tanımlanmıştır.

Üç farklı şarj senaryosu için, şebekelerin maksimum yüklenme durumları, maksimum gerilim düşümü ve EA'lardan reaktif destek alındığı durumda reaktif güç ve güç faktörü değişimi incelenerek, elektrikli araçların mevcut dağıtım şebekesine etkileri gösterilmiştir.

Buna göre;

2025 yılında %5 yaygınlaşma ve 2030 yılında %15 yaygınlaşma oranlarında 6 farklı dağıtım bölgesi için elektrikli araçların maksimum gerilim düşümü ve maksimum yük bakımından ciddi bir etkisinin görülmemesi literatürdeki bazı çalışmalarla benzerlik göstermektedir [18], [19], [56], [57], [58].

Elektrikli araçların yaygınlaşmasının, maksimum gerilim düşümü ve maksimum yüklenme konularında elektrik şebekesinde yarattığı değişimler birçok farklı kritere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Eğer mevcut şebeke, zaten fazlaca alternatif elektriksiz güzergahlara sahipse, yüklenme oranları zaten düşük ve havai hat ile yer altı kablo kesitleri zaten fazla akım taşımaya müsait şekilde seçildiyse, yük profilinde ve gerilim düşümündeki değişimler, elektrikli araçların hepsi aynı noktadan ve şebekeye

fiderin en sonundan bağlanmadığı müddetçe çok fazla olmamaktadır. Türkiye metropollerini yöneten şebeke işletmecileri genel olarak sistem güvenilirliğini ön planda tuttıkları için ve şebekelerinde ekipman seçimini ileride şebekenin genişleme ihtimaline karşılık olarak maksimum yüklenecek seviyede seçtikleri için bu şekilde bir sonuç çıkması normaldir.

Metropol bölgesinde yapılan 36 güç trafosunun yük akış analizleri, bu bölgenin tamamında yer altı kablosunun fazlalığından kaynaklı olarak kapasitif yüklerin fazla olduğunu, buna bağlı olarak güç trafolarının orta gerilim barasında gerilim yükselmesi oluştuğunu göstermektedir, **Çizelge 8**. Bu durumda elektrikli araçların reaktif katkı vermesi hem gerilimi düzenleyici bir rol oynamakta hem de güç faktörünü düzenleyerek şebekedeki kayıpları ve fazladan yüklenmeleri ortadan kaldırmaktadır.

Bu tezin sonuçları göstermektedir ki; reaktif oran limitlerinin dışına çıkan pek çok güç trafosu şebekesi, elektrikli araçların şarj olma süresi boyunca 0,9 endüktif güç faktöründe reaktif yük çekmesi durumunda özellikle gece saatlerinde şarjın teşvik edildiği durumda güç faktörü açısından iyileşme göstermekte ve limitler içerisine girmektedir. Şebeke yöneticisinin güç faktörünü anlık olarak otomasyon sistemleri ile takip edip şarj olan araçların şarj istasyonlarına sinyal göndererek sürekli olarak araçlardan farklı seviyelerde endüktif veya kapasitif güç faktörü talep etmesi bir hayli işletilmesi zor ve ek olarak işletme ve bakım maliyeti getiren bir senaryo olduğu için zaten kapasitif özellikte olan şebekeye sabit olarak 0,9 endüktif güç faktöründe elektrikli araç yüklerinin bağlanması daha mantıklı bulunmuştur.

Türkiye 36 kV orta gerilim seviyesinde hem elektrikli araçların negatif etkisini minimize etmek hem de onlardan reaktif katkı sağlayarak EA yaygınlaşmasını avantaja çevirmek için önerilen sistem, belirlenecek tarifelerle araçların en azından yarısını gece 00:00 – 08:00 aralığına kaydırmak ve EA'ları 0,9 endüktif güç faktöründe şarj etmek olarak belirtilebilir.

Bu çalışmada kazanılan deneyim ve araştırmalar sonucunda;

- Her bir güç trafosundaki yüklenme durumu göz önüne alınıp, o trafo bölgesindeki abonelerin sürüş alışkanlıkları ve sosyoekonomik durumlarını içeren senaryolarla çeşitlendirileceği

- Elektrik şebekesinin mikroşebekelere evrileceği önümüzdeki orta ve uzun vadeli gelecek için elektrikli araçların V2G özelliklerinden daha fazla faydalanacak seçeneklerin sunulacağı
- Şarj istasyonlarının yerleşiminin (AVM'ler, konutlar, iş yerleri, sanayi bölgeleri, kırsal bölgeler, otobanlar için), sayısının ve şarj seviyesinin ayrıntılı incelendiği
- EA'ların V2G kapsamında avantajlarından faydalanılabilecek dağıtık üretim üniteleri ile beraber elektrik şebekesine etkisinin incelendiği

çalışmalar, bu tezin devamında yapılması için önerilebilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] A. Emadi, Advanced electric drive vehicles, CRC Press 2014.
- [2] J.Y. Yong, V.K. Ramachandaramurthy, K.M. Tan, N. Mithulananthan, A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49 (2015) 365-385.
- [3] M. Guarnieri, When Cars Went Electric, Part One [Historical], IEEE Industrial Electronics Magazine, 5 (2011) 61-62.
- [4] M. Guarnieri, When Cars Went Electric, Part 2 [Historical], IEEE Industrial Electronics Magazine, 5 (2011) 46-53.
- [5] I.E. Agency, Global EV outlook: Understanding the electric vehicle landscape to 2020, Author Paris, France, 2013.
- [6] ev-database.org, Tesla Model S Performance, 2021.
- [7] Z. Darabi, M. Ferdowsi, Aggregated Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Electricity Demand Profile, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2 (2011) 501-508.
- [8] M. Prussi, M. Yugo, L.D. Prada, M. Padella, JEC Well-To-Wheels report v5, Joint Research Centre, Luxembourg, 2020, pp. 13.
- [9] P. Bauer, G.R.C. Mouli, Charging EVs From Renewables, in: P. Bauer (Ed.) Electric cars: Technology, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2019.
- [10] A. Hoekstra, A. Vijayashankar, V.L. Sundrani, Modelling the total cost of ownership of electric vehicles in the Netherlands, Conference: EVS30, 2017.
- [11] A. Hoekstra,
https://delftxdownloads.tudelft.nl/ECARS2x_Electric_Cars_Technology/Module_1/eCARS2x_2018_T1-2_Comparing_drivetrains-slides.pdf, TU Delft, 2018.
- [12] I.G.E. Outlook, Entering the Decade of Electric Drive, 2020.
- [13] C.H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, T.K. Saha, Overview of the impacts of plug-in electric vehicles on the power grid, 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2011, pp. 1-8.

- [14] R.C. Green, L. Wang, M. Alam, The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: a review and outlook, IEEE PES General Meeting, 2010, pp. 1-8.
- [15] H. Wang, Q. Song, L. Zhang, F. Wen, J. Huang, Load characteristics of electric vehicles in charging and discharging states and impacts on distribution systems, International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012), 2012, pp. 1-7.
- [16] H. Li, X. Bai, W. Tan, Impacts of plug-in hybrid electric vehicles charging on distribution grid and smart charging, 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2012, pp. 1-5.
- [17] E. Akhavan-Rezai, M.F. Shaaban, E.F. El-Saadany, A. Zidan, Uncoordinated charging impacts of electric vehicles on electric distribution grids: Normal and fast charging comparison, 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012, pp. 1-7.
- [18] C. Farkas, G. Szűcs, L. Prikler, Grid impacts of twin EV fast charging stations placed alongside a motorway, 2013 4th International Youth Conference on Energy (IYCE), 2013, pp. 1-6.
- [19] A. Rautiainen, A. Mutanen, S. Repo, P. Järventausta, A. Tammi, R. Ryymin, J. Helin, A. Unkuri, M. Pekkinen, Case studies on impacts of plug-in vehicle charging load on the planning of urban electricity distribution networks, 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2013, pp. 1-7.
- [20] C. Silvestre, D.M. Sousa, A. Roque, Reactive power compensation using on board stored energy in Electric Vehicles, IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, pp. 5227-5232.
- [21] S. Bolognani, S. Zampieri, A Distributed Control Strategy for Reactive Power Compensation in Smart Microgrids, IEEE Transactions on Automatic Control, 58 (2013) 2818-2833.
- [22] P.N. Vovos, A.E. Kiprakis, A.R. Wallace, G.P. Harrison, Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation Penetration, IEEE Transactions on Power Systems, 22 (2007) 476-483.

- [23] M.C. Kisacikoglu, B. Ozpineci, L.M. Tolbert, Examination of a PHEV bidirectional charger system for V2G reactive power compensation, 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010, pp. 458-465.
- [24] M.C. Kisacikoglu, B. Ozpineci, L.M. Tolbert, Reactive power operation analysis of a single-phase EV/PHEV bidirectional battery charger, 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, 2011, pp. 585-592.
- [25] M. Kesler, M.C. Kisacikoglu, L.M. Tolbert, Vehicle-to-Grid Reactive Power Operation Using Plug-In Electric Vehicle Bidirectional Offboard Charger, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61 (2014) 6778-6784.
- [26] A. Temiz, Assessment Of Impacts Of Electric Vehicles On Low Voltage Distribution Networks In Turkey, Electrical and Electronics Engineering Department, Middle East Technical University, Middle East Technical University, Ankara, 2015.
- [27] Y.R. Şen, The Model Of The Distribution Network Of Electric Vehicle Charging Stations, Power Electronics and Clean Energy Systems, Istanbul Okan University, İstanbul, 2019.
- [28] A.B. Ünsal, Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Şebekeye Entegrasyonu, Modellemesi ve Güç Akış Analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2018.
- [29] Ö. Polat, Elektrikli Araç Şarj Yüklerinin Raslantısal Benzetimi ve Alçak Gerilim Dağıtım Şebekesine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.
- [30] D.S.O.B.T.S.T.M.K.J.H.C. Kolokathis, Türkiye Ulaştırma Sektörünün Dönüşümü: Elektrikli Araçların Türkiye Dağıtım Şebekesine Etkileri, in: SHURA (Ed.) İstanbul, 2019.
- [31] O. Erdinc, Economic impacts of small-scale own generating and storage units, and electric vehicles under different demand response strategies for smart households, Applied Energy, 126 (2014) 142-150.
- [32] A. Von Meier, Electric power systems, A Conceptual Introduction, Wiley Online Library 2006.
- [33] U.B. Baloglu, Y. Demir, Economic analysis of hybrid renewable energy systems with V2G integration considering battery life, Energy Procedia, 107 (2017) 242-247.

- [34] M. Shafie-Khah, N. Neyestani, M. Damavandi, F. Gil, J. Catalão, Economic and technical aspects of plug-in electric vehicles in electricity markets, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53 (2016) 1168-1177.
- [35] S. Habib, M. Kamran, U. Rashid, Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks—a review, *Journal of Power Sources*, 277 (2015) 205-214.
- [36] A.A. Almhizia, J. Snodgrass, Investigation of V2G economical viability, 2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), IEEE, 2018, pp. 1-6.
- [37] S. Han, S. Han, Economic feasibility of V2G frequency regulation in consideration of battery wear, *Energies*, 6 (2013) 748-765.
- [38] S. Sarabi, A. Bouallaga, A. Davigny, B. Robyns, V. Courtecuisse, Y. Riffonneau, M. Régner, The feasibility of the ancillary services for vehicle-to-grid technology, 11th International Conference on the European Energy Market (EEM14), IEEE, 2014, pp. 1-5.
- [39] O. Arslan, O.E. Karasan, Cost and emission impacts of virtual power plant formation in plug-in hybrid electric vehicle penetrated networks, *Energy*, 60 (2013) 116-124.
- [40] M. Yilmaz, P.T. Krein, Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles, *IEEE transactions on Power Electronics*, 28 (2012) 2151-2169.
- [41] IEC, Electric vehicle conductive charging system - Part 1, IEC, 2010, pp. 99.
- [42] M.C. Falvo, D. Sbordone, I.S. Bayram, M. Devetsikiotis, EV charging stations and modes: International standards, 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2014, pp. 1134-1139.
- [43] Ş. Ağalar, Güç Sistemleri Analizi, 3 ed., Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2012.
- [44] L.L. Grigsby, Electric Power Generation, Transmission, And Distribution, 3 ed.
- [45] T.A. Short, Electric power distribution handbook, CRC press 2014.
- [46] S.M. Kaplan, Electric power transmission: background and policy issues, Library of Congress, Congressional Research Service, 2009.
- [47] L. Powell, Power system load flow analysis, McGraw Hill professional 2004.

- [48] M. Yeşilbudak, S. Ermiş, R. BAYINDIR, Farklı Baralara Sahip Güç Sistemlerinde Yük Akışı Analiz Metotlarının Karşılaştırılması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5 (2017) 237-246.
- [49] TEİAŞ, <https://www.teias.gov.tr/tr/yayinlar-raporlar/piyasa-raporlari>, 2019.
- [50] EPDK, Elektrik Şebeke Yönetmeliği, EPDK, Ankara, 2020.
- [51] Ş.E. Tekeli, Ulaşım sektörünün düşük karbon ekonomisine geçişteki rolünün analizi, Temiz Tükenmez Enerjiler, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2020.
- [52] Y. Zhou, Z. Li, X. Wu, The multiobjective based large-scale electric vehicle charging behaviours analysis, Complexity, 2018 (2018).
- [53] H. Wang, X. Zhang, L. Wu, C. Hou, H. Gong, Q. Zhang, M. Ouyang, Beijing passenger car travel survey: implications for alternative fuel vehicle deployment, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 20 (2015) 817-835.
- [54] G. Buja, M. Bertoluzzo, C. Fontana, Reactive power compensation capabilities of V2G-enabled electric vehicles, IEEE transactions on power electronics, 32 (2017) 9447-9459.
- [55] EPDK, Elektrik Piyasasında Dağıtım Ve Perakende Satış Faaliyetlerine İlişkin Kalite Yönetmeliği, Ankara, 2020.
- [56] N. Hartmann, E. Özdemir, Impact of different utilization scenarios of electric vehicles on the German grid in 2030, Journal of power sources, 196 (2011) 2311-2318.
- [57] J. Mullan, D. Harries, T. Bräunl, S. Whitely, Modelling the impacts of electric vehicle recharging on the Western Australian electricity supply system, Energy policy, 39 (2011) 4349-4359.
- [58] I. Drovtar, A. Rosin, M. Landsberg, J. Kilter, Large scale electric vehicle integration and its impact on the Estonian power system, 2013 IEEE Grenoble Conference, 2013, pp. 1-6.
- [59] EPIAŞ, <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/piyasalar/dgp/sistem-yonu.xhtml>, 2019.

EKLER

EK 1 – Gün Öncesi Piyasası

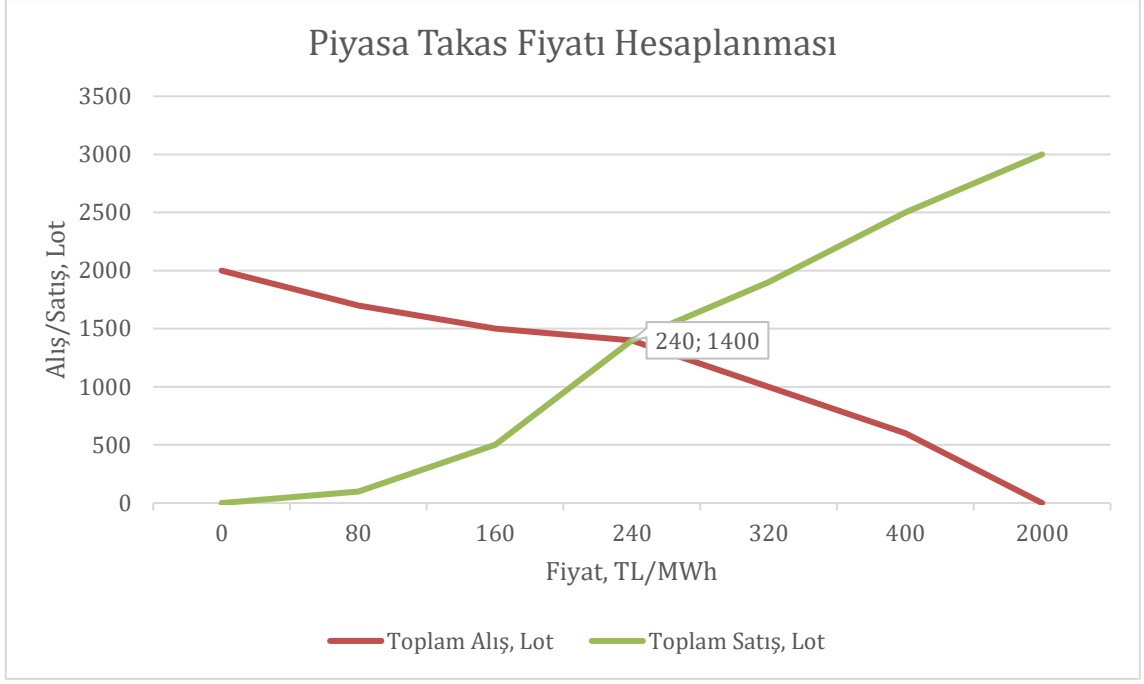
Piyasa takas fiyatının (PTF) bir saat aralığı için hesaplanmasına dair örnek bir hesap yöntemi **Çizelge 14**'de verilmiştir.

Bu çizelgeye ait arz-talep eğrisi ise **Şekil 80**'de belirtilmiştir.

Gerçek bir güne ait Piyasa Takas Fiyatı değerleri **Şekil 81**'de verilmiştir.

Çizelge 14. Örnek Piyasa Takas Fiyatı Hesabı

<i>Fiyat, TL/MWh</i>	<i>0</i>	<i>80</i>	<i>160</i>	<i>240</i>	<i>320</i>	<i>400</i>	<i>2000</i>
<i>Katılımcı-1, Lot</i>	1000	800	800	800	600	400	0
<i>Katılımcı-2, Lot</i>	800	800	700	600	400	200	0
<i>Katılımcı-3, Lot</i>	0	-100	-500	-700	-900	-1000	-1000
<i>Katılımcı-4, Lot</i>	200	100	0	-700	-1000	-1500	-2000
<i>Toplam Alış, Lot</i>	2000	1700	1500	1400	1000	600	0
<i>Toplam Satış, Lot</i>	0	100	500	1400	1900	2500	3000



Şekil 80. Piyasa Takas Fiyatı Arz-Talep Eğrisi

Dengeleme Güç Piyasası ile ilgili olarak Sistem Marjinal Fiyatının hesaplanmasına dair örnek bir tablo **Çizelge 15**'te; YAL ve YAT tekliflerine ait örnek bir tablo ise **Çizelge 16**'da verilmiştir.

Çizelge 15. Sistem Marjinal Fiyatının Hesaplanması Örneği

	00:00		01:00		02:00		...	21:00		22:00		23:00	
Enerji Açığı / Fazlası	-250		300		150			-50		-300		-200	
Talimat	YAL		YAT		YAT			YAL		YAL		YAL	
	Teklifler		Teklifler		Teklifler		...	Teklifler		Teklifler		Teklifler	
	Fiyat	Güç	Fiyat	Güç	Fiyat	Güç	...	Fiyat	Güç	Fiyat	Güç	Fiyat	Güç
Üretim Santrali-A	150	50	150	50	150	50		150	50	150	50	150	50
Üretim Santrali-B	200	100	200	100	200	100		200	100	200	100	200	100
Üretim Santrali-C	210	50	210	50	210	50		210	50	210	50	210	50
Üretim Santrali-D	270	50	270	50	270	50		270	50	270	50	270	50
Üretim Santrali-E	300	50	300	50	300	50		300	50	300	50	300	50
Üretim Santrali-F	350	100	350	50	350	50		350	100	350	100	350	100
SMF (TL/MWh)	270		200		270		...	150		300		210	

Çizelge 16. YAL ve YAT Teklifleri Örneği [59]

	SİSTEM YÖNÜ	Enerji Açığı
	Net Talimat (MWh)	800 MWh
	Fiyat (TL/MWh)	Miktar(MWh)
YAL TEKLİFLERİ	500,00	130
	440,00	30
	320,00	25
	300,00	60
	210,00	50
	207,99	150
	198,01	350
	180,00	250
	170,00	150
	153,00	100
	147,00	100
	140,00	200
	140,00	300
	YAT TEKLİFLERİ	140,00
138,00		150
135,00		100
133,00		50
130,01		100
130,00		100
130,00		150
60,00		80
58,00		100
50,00		60
0,01		40
0,00		500
0,00		20



Şekil 81. 08.11.2019 PTF Değerleri [59]