

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR, ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARI VE
TÜRKİYE İÇİN GELECEK DÖNEM ELEKTRİKLİ ARAÇ MİKTARI
TAHMİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Batuhan İPEK

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

TEMMUZ 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR, ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARI VE
TÜRKİYE İÇİN GELECEK DÖNEM ELEKTRİKLİ ARAÇ MİKTARI
TAHMİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Batuhan İPEK
301111002**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Önder Güler

TEMMUZ 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 301111002 numaralı Yüksek Lisans Batuhan İPEK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Elektrikli Araçlar, Elektrikli Araç Şarj İstasyonları ve Türkiye Cumhuriyeti İçin Gelecek Dönem Elektrikli Araç Miktarı Tahmini” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Önder Güler**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğretim Üyesi M. Berker Yurtseven**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Bedri Kekezoğlu
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 03.06.2022
Savunma Tarihi : 05.07.2022





Aileme, kızım Güneş'e ve gelecek nesillere...



ÖNSÖZ

Enerjinin, enerji verimliliğinin, yenilenebilir enerji kaynaklarının, sürdürülebilir politikaların hiç olmadığı kadar önem kazandığı çağımız şartlarında daha temiz bir dünya için elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması büyük önem arz etmektedir. Bu motivasyon ile değerli tez danışmanım Prof. Dr. Önder Güler ile birlikte karar vererek bu konu üzerine yazmış olduğum tezimi büyük bir ilgiyle birçok akademik çalışmadan faydalanarak araştırdım ve yazdım.

Gelecek nesillere ve akademik çalışmalara ışık tutabileceğini düşündüğüm Türkiye gelecek dönem elektrikli araç tahmin çalışmasını yaptığım bu tez çalışması için, başta tez danışmanım Prof. Dr. Önder Güler'e, bana bu tezi yazarken hem ilham olan, hem de birçok fedakarlık göstererek bu tezi tamamlamama ortam hazırlayan eşim Pınar'a, varlığıyla gelecek nesillere karşı ne kadar borçlu olduğumuzu hatırlatan sevgili kızım Güneş Mercan'a, motivasyonumun sürekliliği konusunda ellerinden gelen maddi manevi tüm desteği veren aileme teşekkür ederim.

Haziran 2022

Batuhan İpek
Elektrik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	1
1.2. Tezin Aşamaları.....	2
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	3
2.1. Elektrikli Araçların Sınıflandırılması	3
2.1.1. Hibrit elektrikli araçlar (Hybrid Electric Vehicles: HEV).....	4
2.1.2. Şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (Plug-in Hybrid Electric Vehicles: PHEV)	4
2.1.3. Tam elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicles: BEV).....	5
2.2. Elektrikli Araçların Güncel Performans Değerleri	5
2.3. Yıllara Göre Elektrikli Araç Kullanım Oranındaki Değişim.....	5
2.4. Şarj Edilebilir Elektrikli Araçların İç Yapısı	7
3. ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARI	9
3.1. Elektrikli Araç Şarj Teknolojileri	9
3.1.1. AC seviye 1 şarj.....	9
3.1.2. AC seviye 2 şarj.....	9
3.1.3. DC hızlı şarj.....	10
3.2. Şarj Bağlantı Kabloları ve Bağlantı Çeşitleri	10
3.2.1. 3.2.1. Tip 1 konnektör	10
3.2.2. Tip 2 konnektör	10
3.2.3. Kombine şarj sistemi (CCS: Combined charging system)	11
3.2.4. CHAdeMO.....	11
3.2.5. Tesla supercharger	11
3.3. Elektrikli Araç Şarj Usulleri	11
3.3.1. İletken şarj	13
3.3.1.1. Güç faktörü düzeltici AC/DC doğrultucu devreleri	13
3.3.1.2. İzole DC/DC çevirici devreleri	14
3.3.1.3. Araç üzeri iki aşamalı şarj devreleri	14
3.3.1.4. Araç üzeri entegre şarj devreleri	14
3.3.1.5. Araç dışı şarj devreleri	15
3.3.2. Endüktif şarj	15
3.3.2.1. Transformatör temelli endüktif güç iletim sistemleri	16

3.3.2.2. Rezonans çevirici temelli endüktif güç iletim sistemleri	16
3.4. Şarj Kontrol Metodları	16
3.4.1. Kontrolsüz şarj	16
3.4.2. Gecikmeli şarj	17
3.4.3. Akıllı şarj	17
3.4.4. Akıllı Şarj Vaka Çalışması	17
3.5. Çift Yönlü Şarj-Deşarj Konseptleri	20
3.5.1. Araçtan şebekeye konsepti (V2G: Vehicle to Grid)	20
3.5.2. Araçtan yüke konsepti (V2L: Vehicle to Load)	20
3.5.3. Araçtan eve konsepti (V2H: Vehicle to Home)	21
3.5.4. Araçtan binaya konsepti (V2B: Vehicle to building)	21
3.5.5. Araçtan araca konsepti (V2V: Vehicle to vehicle)	22
3.5.6. Araçtan topluma konsepti (V2C: Vehicle to Community)	22
3.5.7. Araçtan her şeye konsepti (V2X: Vehicle to Everything)	23
3.6. Dünyada ve Türkiye'deki Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Miktarı	23
4. 2050 VE 2060 YILLARI İÇİN TÜRKİYE ELEKTRİKLİ ARAÇ PENETRASYONU PROJEKSİYONU	27
4.1. Projeksiyon Metodları	27
4.1.1. Ajan temelli modeller	27
4.1.2. Tüketici tercihi modelleri	28
4.1.3. Dağılım ve zaman serisi modelleri	29
4.2. Elektrikli Araç Miktarı Projeksiyonu Örnek Çalışmalar	30
4.3. Türkiye İçin 2050 ve 2060 Yılları İçin Projeksiyon	33
4.3.1. Metodoloji	33
4.3.2. Projeksiyon Çalışması	35
4.3.2.1. Geçmiş dönem verilerine ilişkin analiz	35
4.3.2.2. Satürasyon noktası C için tahmin	37
4.3.2.3. Çeşitli sigmoid fonksiyonlarının (Lojistik büyüme, Gompertz ve Asimetrik Gompertz) karşılaştırılması	40
4.3.2.4. Lojistik büyüme, Gompertz ve Asimetrik Gompertz eğrilerinin karşılaştırılması	42
4.3.2.5. Lojistik büyüme fonksiyonunun oluşturulması	43
4.3.2.6. İyimser ve kötümser senaryolar	44
4.3.2.7. 2035 yılına kadarki yakın döneme ait tahmin çalışması	46
4.3.2.8. İçten yanmalı motorlu otomobillerin azalış eğilimi	46
4.3.2.9. CO ₂ salımı konusu	47
4.3.2.10. Ortalama kat edilen yol ve CO ₂ salımı ilişkisi	49
5. SONUÇ VE YORUMLAR	53
KAYNAKLAR	55

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Alternative Current
AFLEET	: Alternatif Yakıt Yaşam Döngüsü Çevresel ve Ekonomik Ulaşım
BEV	: Battery Electric Vehicle
BRICS	: Brazil, Russia, India, China and South Africa
CO₂	: Karbondioksit
DC	: Direct Current
EPRI	: Electric Power Research Institute
EV	: Electric Vehicle
EVRO	: Electric Vehicle Regional Optimizer
HEV	: Hybrid Electric Vehicle
ICCT	: International Conference on Communication Technology
ICE	: Internal Combustion Engine
LPG	: Liquefied petroleum gas
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development
PHEV	: Plug-in Hybrid Electric Vehicle
TEHAD	: Türkiye Elektrikli ve Hibrid Araçlar Derneği
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu



SEMBOLLER

A	: Amper
AC	: Alternative Current
CO₂	: Karbondioksit
DC	: Direct Current





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : TÜİK verilerine göre yıllara ve yakıt tipine göre trafiğe kayıtlı otomobil miktarları [47].	35
Çizelge 4.2 : TEHAD verilerine göre 2015-2021 yılları arasında kümülatif olarak tam elektrikli araç miktarı.	37
Çizelge 4.3 : Tahmin, literatür bilgisi ve hesaplamalardan oluşan 2016 yılına ait kayıtlı otomobillerin yakıt tipi dağılımları, 2016 yılı otomobil ortalama CO ₂ salımı, 2062 yılı toplam araç miktarı tahmini ve 2062 yılı toplam otomobil CO ₂ salımı tahmini.	50



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Elektrikli araç tipleri [2].	4
Şekil 2.2 : Dünya Elektrikli Araç Stokları, 2010-2022 [8].	6
Şekil 2.3 : Kullanım amacına göre dünya elektrikli araç stokları, 2010-2020 [8].	6
Şekil 2.4 : Şarj edilebilir hibrit (solda) ve tam elektrikli araçlardaki iç güç aktarım mekanizmaları [11].	8
Şekil 3.1 : Konnektör tipleri [13].	10
Şekil 3.2 : Şarj teknolojilerinin ortalama şarj süreleri [2].	11
Şekil 3.3 : Şarj edilebilir elektrikli bir araç için tipik güç elektroniği arayüzü prensip şeması [14].	13
Şekil 3.4 : Sargı düzenlemesi olmadan entegre şarj çözümleri (a) Diyot köprüsü ve bobin ile yalnızca motor eviricisi kullanımı [14,15]. (b) Motor eviricisi ve sargıları ile diyot köprüsü kullanımı [14,15]. (c) Motor sargılarının nötr noktasına erişim [14,16]. (d) Motor sargılarının ve eviricisinin tek fazlı yükseltici doğrultucu olarak kullanımı [14,16]. (e) Motor sargılarının nötr noktasına erişim [14,17]. (f) Motor sargılarının ve eviricisinin nötr noktası erişimli olarak üç fazlı yükseltici doğrultucu olarak kullanımı [14,18].	15
Şekil 3.5 : Toplu ve dağınık endüktif güç iletim sistemleri [14].	16
Şekil 3.7 : V2G konsepti [2].	20
Şekil 3.8 : V2L konsepti [2].	21
Şekil 3.9 : V2H konsepti [2].	21
Şekil 3.10 : V2B konsepti [2].	22
Şekil 3.11 : V2V konsepti [2].	22
Şekil 3.12 : V2C konsepti [2].	22
Şekil 3.13 : V2X konsepti [2].	23
Şekil 3.14 : Avrupa’da yıllara ve hız kapasitelerine göre elektrikli araç şarj noktası sayısı değişimi (2020 yılı 30 Kasım’a kadar) [21].	24
Şekil 3.15 : Avrupa’da bazı bölgeler için 10.000 araç başına düşen elektrikli araç şarj istasyonu haritası (Şarj istasyonu verisi 2020, elektrikli araç verisi 2018 yılına aittir) [21].	24
Şekil 3.16 : Avrupa ölçeğinde elektrikli araç şarj noktaları (2022 Haziran ayına ait güncel verilere dayanmaktadır) [22].	25
Şekil 3.17 : Avrupa Birliği ülkelerinde toplam şarj noktası sayısı ve hızlı şarj noktası oranı [23].	26
Şekil 3.18 : Türkiye şarj istasyonları yoğunluk haritası [23].	26
Şekil 4. 1 : 2011-2021 yılları arasında TÜİK verilerine [47] göre Türkiye’deki toplam elektrikli-hibrit araç miktarının yıllara göre değişimi.	37
Şekil 4. 2 : 2011-2021 yılları arasında TÜİK verilerine [47] göre Türkiye’deki toplam araç miktarının yıllara göre değişimi.	38
Şekil 4. 3 : 2018-2050 yılları arasında TÜİK projeksiyon tahminine [47] göre Türkiye’nin nüfus-yıl grafiği.	39

Şekil 4.4 : TEHAD verilerine (2015-2021 yılları arası) ve 2062 yılına dair öngörüye göre Matlab ile Lojistik büyüme fonksiyonu ile eğri uydurma işlemi sonucu oluşan eğri	40
Şekil 4.5 : TEHAD verilerine (2015-2021 yılları arası) ve 2062 yılına dair öngörüye göre Matlab ile Gompertz fonksiyonu ile eğri uydurma işlemi sonucu oluşan eğri.....	41
Şekil 4.6 : TEHAD verilerine (2015-2021 yılları arası) ve 2062 yılına dair öngörüye göre Matlab ile Asimetrik Gompertz fonksiyonu ile eğri uydurma işlemi sonucu oluşan eğri	42
Şekil 4.7 : Lojistik büyüme, Gompertz ve Asimetrik Gompertz yaklaşımlarının birlikte gösterimi	43
Şekil 4.8 : Oluşturulan lojistik büyüme fonksiyona göre elektrikli araç miktarının 2015-2062 (yıl numaraları 1-48) yıllarına göre grafiği.....	44
Şekil 4.9 : Oluşturulan lojistik büyüme fonksiyonuna göre elektrikli araç miktarının 2015-2062 (yıl numaraları 1-48) yıllarına göre iyimser senaryoda ($b=0,5$) gerçekleştiği durumdaki grafiği.	45
Şekil 4.10 : Oluşturulan lojistik büyüme fonksiyonuna göre elektrikli araç miktarının 2015-2062 (yıl numaraları 1-48) yıllarına göre kötümser senaryoda ($b=0,4$) gerçekleştiği durumdaki grafiği.	46
Şekil 4.11 : Yıl numaralarına göre elektrikli otomobil, içten yanmalı motorlu otomobil ve toplam otomobil miktarlarının değişimi	47

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR, ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARI VE TÜRKİYE İÇİN GELECEK DÖNEM ELEKTRİKLİ ARAÇ MİKTARI TAHMİNİ

ÖZET

Elektrikli araçların kullanımı günden güne artmaktadır. Ülke bazlı değişmekle birlikte dünyanın her yerinde fosil yakıt kaynaklı ısıtma, soğutma sistemlerinin yerini ısı pompaları, güneş enerjisi destekli sistemler almaktadır; buna paralel olarak da fosil yakıtlı taşıtların yerini de elektrikli ve hibrit araçlar almaktadırlar.

Elektrikli araçlar genel anlamda üç ana grupta incelenmektedirler: tam elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar, şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar. Bu tez çalışmasında tüm elektrikli araç tiplerine genel anlamda değinilerek, ilgili teknik altyapılarına dair detaylar anlatılmıştır. Ayrıca şarj metodlarının ayrıntıları, şarj usullerinin teknik detayları, şarj istasyonu tipleri ve kullanım alanları tanıtılmıştır. Birtakım vaka analizleri ile literatürde yer alan örnekler ile de destekleyerek akıllı şarja yönelik çalışmalar tanıtılmış ve önemi vurgulanmıştır. Kablolu ve kablosuz olarak gerçekleştirilebilen elektrikli araç şarjı, çok komplike elektronik devreler ile verimli, hızlı, güvenli hale getirilebilmektedir. Bu iyileştirme için teknik altyapısı kuvvetli olan güç elektroniği devreleri kullanılmaktadır.

Dünyanın geleceği açısından elektrikli araçlara geçişin çok kıymetli olduğu konusu toplumca kabul görmüş bir gerçektir. Bu sebeple ülkelerin bu enerji geçişi için birtakım öngörüler yaparak geleceğe yönelik tedbir almaları gerekmektedir. Bu sebeple önümüzdeki kısa, orta ve uzun vadede elektrikli araçların miktarının ne olacağı yönünde bir çalışma yapmak ve doğruya yakın bir sonuç tespit etmek karar mekanizmalarının yapacakları çalışmaları destekleyecek nitelikte olacaktır.

Literatürde birçok projeksiyon metodu olmasının yanı sıra, orta ve uzun vade için kabul görmüş olan lojistik büyüme fonksiyonu öne çıkmaktadır. Bu fonksiyon tarihimizde gerçekleşmiş olan teknoloji devrimlerinde toplumun ilgili teknolojileri kabul davranışlarını incelemek için birçok kez kullanılmış ve bu teknolojiler ile bağıntılı olan başka ürün ve hizmetlerin geleceği için de temel teşkil etmiştir. Bu sebeple, elektrikli araçlara geçişin büyük bir devrim olacağı kabul edildiğinde lojistik büyüme fonksiyonunun gelecek yıllardaki, özellikle orta ve uzun vadede, elektrikli araç miktarının belirlenmesi amacıyla kullanılması doğru bir tahmin olacaktır.

Bu tez çalışmasındaki projeksiyon çalışması özellikle elektrikli araç şarj istasyonlarının miktarının, kapasitelerinin, coğrafi noktalarının, sıklıklarının belirlenmesinde önemli bir temel teşkil edeceği açıktır. Yalnızca Türkiye ölçeğinde değil, Avrupa ve hatta dünya ölçeğinde de yararlanılabilecek birtakım projeksiyon çalışması sonuçları bu tez çalışmasında sunulmuştur.



ELECTRIC VEHICLES, ELECTRIC CHARGING STATIONS AND ELECTRIC VEHICLE QUANTITY FUTURE FORECAST FOR TURKEY

SUMMARY

The use of electric vehicles is growing each year especially during the last few years. Depending on countries, fossil fuel-based heating and cooling systems are replaced by heat pumps and solar energy systems all over the world; in parallel with this, electric and hybrid vehicles are taking the place of fossil fuel conventional vehicles.

Electric vehicles are generally divided into three main groups: fully electric vehicles, hybrid electric vehicles, and plug-in hybrid electric vehicles. In this thesis, all electric vehicle types are analyzed in general and the details of their technical infrastructures are explained in related chapters.

In addition, the details of charging methods, technical details of charging methods, electric vehicle charging station types and usage areas are introduced. Some case studies and examples in the literature, studies on smart charging were introduced and its importance was emphasized. It has been highlighted that a smart charge control may be useful for electric vehicle drivers to prevent from extremely high electric bills when they are under different tariffs. In some countries peak hours, day time, night time are under different tariffs. Therefore the users (in our case the drivers) are supposed to be motivated to delay their charging needs to the low demand hours. This will make the electrical utility not to be loaded more than expected which will result in high losses, high heat dissipation and cause many problems.

The countries with relatively high potential of prospective electric vehicle drivers have introduced incentives for electric vehicle users. These incentives might be purchasing improvement and some actions to increase the motivation of the users to purchase electric vehicles. These kind of actions to motivate people to decide to change their cars with electric ones will result in a dramatic increase in electric vehicles, battery production, electric consumption, electric vehicle charging stations. All these are only a part of reasons why a prediction for the future of electric vehicles need to be projected, analyzed and studied.

Wired and wireless electric vehicle charging can be made efficient, fast and safe with very complex electronic circuits. Power electronic circuits with strong technical infrastructure are used for this improvement. Thinking about the users' comfort, wireless charging might give users chance to charge their electric cars without stopping. Imagination of a road with full of wireless primary charging bindings while the secondary bindings are located in the electric vehicles, a user could have chance to drive within a certain velocity range and charge their car without having a break while travelling. Considering that this is not only revolution for electric vehicle charging infrastructure, but also a new era for a vehicle in general. An idea with a photovoltaic

system supported electric vehicle charging points might be a good topic which fulfills the needs of users.

It is a socially accepted fact that the transition to electric vehicles is very valuable for the future of the world. For this reason, countries need to take precautions for the future by making some predictions for this energy transition.

Considering the importance of the fact that the quantity of electric vehicles may affect many other aspects, making a study on the amount of electric vehicles in the short, medium and long term and determining a close result will support the work of the decision mechanisms. Predicting the quantity of electric vehicles might help governments to take precautions for future and upcoming utility loads. This precautions can be public electric vehicle charging stations, photovoltaic supported electric vehicle charging points, on-road charge point route planning, future energy production facility planning and many more.

In order to predict the quantity of electric vehicles there are many projection methods applied in the literature. Some of them rely on the past data while others rely on surveys. All methods have advantages and disadvantages. Some of them are useful for short-term projections while others are not stable for the short term results and focus on the long term results. Some of them are under trending topics of social scientists while the others are mostly used by engineers, scientists and academic people.

In addition to the many projection methods in the literature, the logistic growth function, which has been accepted for the medium and long term, stands out. This function has been used many times in the technology revolutions that have taken place in our history to examine the acceptance behavior of the society's related technologies and has also formed the basis for the future of other products and services associated with these technologies. For this reason, when it is accepted that the transition to electric vehicles will be a great revolution, it will be an accurate estimate to use the logistics growth function to determine the amount of electric vehicles in the coming years, especially in the medium and long term.

It is clear that the projection study in this thesis will constitute an important basis for determining the amount, capacities, geographical points and frequencies of electric vehicle charging stations. The results of some projection studies that can be used not only in Turkey, but also in Europe and even the world are presented in this thesis.

As a result, a projection work has been conducted in this thesis work in order to predict the future quantity of electric vehicles in Turkey. While calculating the results and verifying the methodologies, there are assumptions, calculations, predictions, data usage from other works conducted in the literature. Especially the most recent studies and researches have been considered as much as possible while preparing this thesis.

After the prediction of the quantity of electric vehicles in Turkey, CO₂ emission subject has been studied and projected. In order to do this, literature data, prediction logic and calculations have been used. Comparison between internal combustion motor vehicles and fully electric battery vehicles have been made and the results have been analyzed.

There are many doors to study more regarding the prediction, adoption of electric vehicles, proportion of hybrid electric vehicles, battery electric vehicles, and plug in hybrid electric vehicles, charging infrastructure, travel routes of electric vehicle drivers, CO₂ emission comparisons, best-ideal-worst case scenarios. This topic is going to remain being a trending topic for decades.

Finally, Turkey is a country where curious and motivated inhabitants live. Therefore, no obstacle is foreseen for Turkey in case of fully electric mobility era transition. The details, projection methods, and literature have been transferred in this thesis work.





1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi keşfinden bu güne kadar çok çeşitli alanlarda kullanım alanı bulmuştur. Güvenlik, savunma, aydınlatma, endüstri, üretim, eğlence, ısıtma, soğutma, taşımacılık, ve daha birçok alan bu grupta sayılabilir. Kimi uygulama gelişen teknoloji ile birlikte daha çok hayatımıza entegre olmuştur. Örneğin endüstriyel otomasyon sistemleri çağımızın vazgeçilmez bir uygulama alanıdır. Bunun yanı sıra elektrik enerjisi ile ısıtma ve soğutma sistemleri de çeşitli enerji kaynaklarından uzak olan bölgelerde fotovoltaik sistemler ile birlikte kullanıldığında çok geniş uygulama alanına sahip olmuştur. Bir diğer önemli uygulama alanı da taşımacılıktır. Taşımacılık teriminin kapsamına, hem insan hem de malzeme taşımacılığı girmektedir. Kişilerin ihtiyaçları doğrultusundaki ulaşımı çağımızda giderek yaygınlaşan elektrikli araçlar ile sağlanabilmektedir. Bugüne kadar sıvı yakıtlı ve içten yanmalı motorlar ile donatılmış araçlar hızla yerlerini elektrikli araçlara bırakmaktadır.

Elektrikli araçlara geçişin hızı bilim ve teknolojiyi şarj altyapıları ve elektrik dağıtım şebekesinde oluşacak ilave yükün etkilerini araştırmaya ve bu konuda çözümler üretmeye teşvik etmiştir. Birbiriyle paralel ve mükemmel yakın bir uyum içerisinde ilerlemesi gereken elektrikli araç ve elektrik altyapısı alanları çok uzun yıllar birbirlerini destekleyecek çözümler üretecek sektörler olacaklardır.

Elektrikli araçların gelecek yıllardaki pazarı, ülkeler göre miktarı, elektrik dağıtım altyapısında oluşturacağı yükler, şebekeye olumlu olumsuz etkileri konularında birçok akademik çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışmasında tüm bu konulara ilişkin bilgiler aktarılacak ve Türkiye için 2050, 2060 yıllarına ilişkin elektrikli araç miktarı tahmin çalışması yapılacaktır.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında görece yeni sayılabilecek elektrikli araçlar, şarj istasyonları, ve elektrikli araç teknolojisi hakkında bilgiler işlenecek ve Türkiye için 2050 ve 2060 yılları için elektrikli araç miktarı tahmin çalışması yapılacaktır. Elektrikli araç tipleri,

güncel uygulamaları, performans değerleri hakkında bilgiler dünya literatüründen örnek uygulamalar ile aktarılacaktır. Elektrikli araçlar için tasarlanmış şarj ünitelerinin tipleri, çalışma prensipleri ve uygulama alanları hakkında yapılmış olan çalışmalar derlenerek konu hakkında ayrıntılı bilgi birikimi özetlenecektir. Elektrikli araçların mevcut durumu ve Türkiye için gelecek yıllara ilişkin tahmin çalışması yapılacaktır.

1.2. Tezin Aşamaları

Tezin ilk kısmında konunun güncelliği ve önemi aktarılmıştır. İlerleyen aşamalarında kısımda elektrikli araçlar, elektrikli araç şarj istasyonları, şarj metodları, ve gelecek dönem elektrikli araç miktarı tahmin çalışması yapılacaktır. Bunun yanısıra CO₂ salımı konusu da işlenecek olup, kat edilen yol ve CO₂ emisyonu bağıntısından yola çıkılarak gelecek döneme ilişkin tahminlerde bulunulacaktır.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

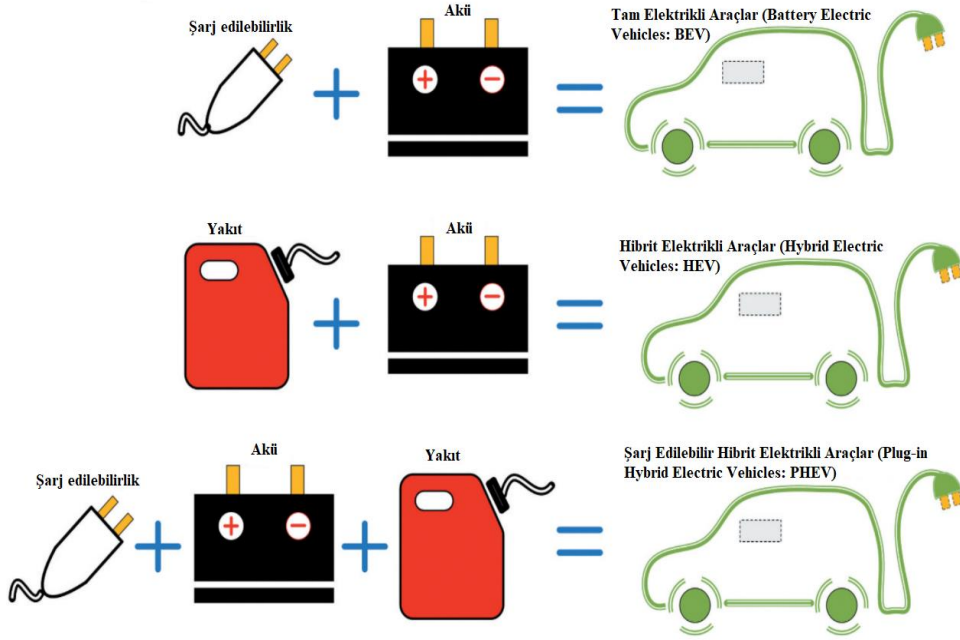
“Elektrikli Araç” terimi elektrik enerjisini kaynak olarak kullanarak hareket enerjisi elde eden araçlara verilen genel tanımlamadır. Elektrik enerjisini birincil enerji kaynağı olarak kullanabildiği gibi, ikincil enerji kaynağı olarak da kullanabilir; bu durum bu aracın “Elektrikli Araç” olarak adlandırılmasına engel değildir. Kullanım amacına, şekline, büyüklüğüne, yapabileceklerine göre birbirinden ayrılan birçok çeşit elektrikli araç bulunur. Yalnızca kara araçları değil, deniz, hava ve hatta uzay araçlarında da birçok elektrikli araç uygulaması mevcuttur. Bu akademik çalışmada tam elektrikli arabalar ve hibrit elektrikli arabalar incelenecek olup, Türkiye için geleceğe yönelik elektrikli araç miktarı tahmini çalışması yapılmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri Enerji Departmanı’na göre, tam elektrikli araçlar içten yanmalı motor yerine elektrik motoru ile çalışırlar [1]. Fakat hibrit, şarj edilebilir hibrit gibi farklı tipte altyapıya sahip elektrikli araçlar da mevcuttur; bu sebeple elektrikli araçların teknik altyapılarına göre sınıflandırılması doğru olacaktır.

2.1. Elektrikli Araçların Sınıflandırılması

Elektrikli araçlar üç ana kategoriye ayrılırlar: Hibrit Elektrikli Araçlar (Hybrid Electric Vehicles: HEV), şarj edilebilir elektrikli araçlar (Plug-in Electric Vehicles: PHEV) ve tam elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicles: BEV). Bu akademik çalışmada şarj istasyonlarının elektrik şebekesi üzerindeki etkileri çalışıldığından şarj edilebilir elektrikli araçlar ve tam elektrikli araçlar incelencektir. Hibrit elektrikli araçlar rejeneratif yöntemler ile kendi kendilerini şarj ettiklerinden şebeke üzerinde bir yük oluşturmaz, dolayısıyla bu çalışmanın kapsamına girmezler.

2021 yılında yayınlanmış olan “Electric vehicles the future of transportation sector: a review” adlı çalışmaya göre elektrikli araç tipleri Şekil 2.1’de görüldüğü gibi özetlenmiştir [2].



Şekil 2.1 : Elektrikli araç tipleri [2].

2.1.1. Hibrit elektrikli araçlar (Hybrid Electric Vehicles: HEV)

“The ICE age is over: Why battery cars will beat hybrids and fuel cells” isimli çalışmada belirtildiği üzere içten yanmalı motor ve akülü elektrik sürüş sistemine birlikte sahip olan araçlar konvansiyonel içten yanmalı motorlu araçlara ve tam elektrikli araçlara göre çok daha komplike bir yapıya sahiptirler. Hibrit araçlar bir elektrikli araç şarj istasyonunda şarj edilemeyeceklerinden fosil yakıtsız araçlar olarak incelenemezler. Bu sebeple, hibrit elektrikli araçlar tam elektrikli araçlara geçişte bir ilk adım olarak öne çıkarlar [3].

2.1.2. Şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (Plug-in Hybrid Electric Vehicles: PHEV)

Bu tip elektrikli araçlar tıpkı hibrit elektrikli araçlar gibi hem içten yanmalı motora, hem de elektrik motoruna sahiptirler. Hibrit araçlardan ayrılan noktası ise bu tip araçların rejeneratif yöntemlerle kendi kendilerine şarj olmalarının yanı sıra şebekede bir şarj istasyonuna bağlanarak da şarj edilebiliyor olmalarıdır. Bu sebeple hibrit elektrikli araçlardan farklı olarak şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar elektrik şebekesi üzerinde etkiye sahiptirler. Bu tip elektrikli araçlar hibrit elektrikli araçlardan, tam elektrikli araçlardan ve içten yanmalı motorlu araçlardan daha karmaşık bir iç

yapıya sahiptirler [3]. PHEV'ler de HEV'ler gibi içten yanmalı motora sahip olduklarından fosil yakıtsız araçlar kategorisinde incelenemezler.

2.1.3. Tam elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicles: BEV)

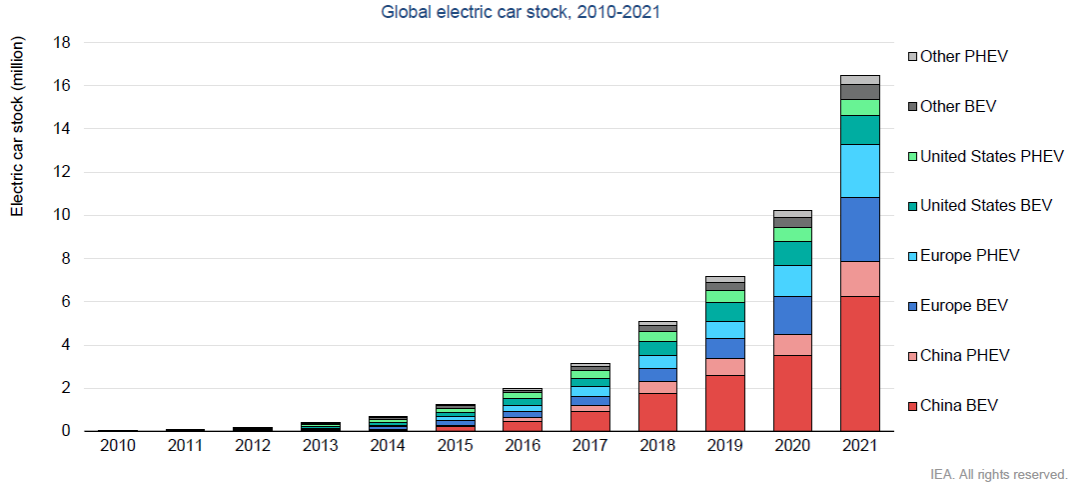
Agnewcars'a göre eğer bir elektrikli aracın tek enerji kaynağı tekrar şarj edilebilir piller ise, bu araç tam elektrikli araçtır. Tam elektrikli araçların sessizliği bu makalede öne çıkarılmış, ve hatta BEV'lere geçişte bir kültür şokunun yaşanmasının kaçınılmaz olduğu vurgulanmıştır. BEV'lerin tek enerji kaynağının elektrik oluşu ve BEV'lerin menzillerinin kısıtlı oluşundan ötürü şarj istasyonlarının BEV kullanıcıları açısından en önemli nokta olduğu vurgulanmıştır [4].

2.2. Elektrikli Araçların Güncel Performans Değerleri

Elektrikli araçlar ve kullanıcıları için en önemli noktalar araç menzili ve şarj istasyonlarına erişimdir. eDF Energy'ye göre 2020 yılında BEV menzili olarak kaydedilmiş en uzun menzil 927 km ile Tesla Roadster modelidir [5]. Bunun yanı sıra, Tesla Roadster 100km/saat hıza 1,9 saniyede ulaşmaktadır [6]. Son olarak da Tesla Roadster modelinin fiyatı 250.000 USD olarak kaydedilmiştir [7].

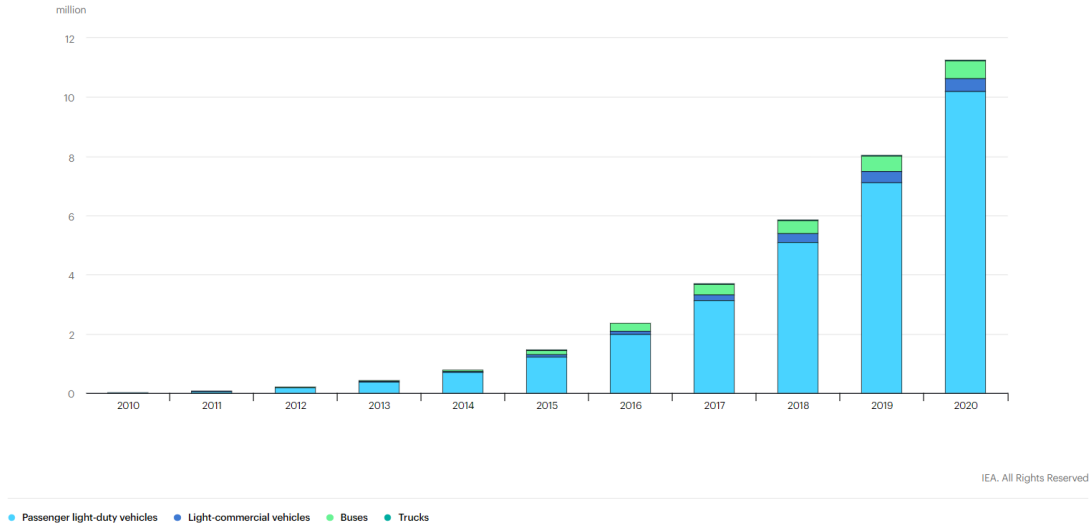
2.3. Yıllara Göre Elektrikli Araç Kullanım Oranındaki Değişim

Açık bir şekilde öngörülmektedir ki her yıl yollarda daha çok elektrikli araç olacaktır. Global EV Outlook 2022 raporuna göre, şu anda yollarda on milyondan fazla elektrikli araç bulunmaktadır. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere, Çin bu konuda birinci ülke olarak öne çıkmaktadır, Avrupa ve ABD Çin'i takip etmektedir [8]. Global EV Outlook raporu her yıl yayınlanan bir rapor olmakla birlikte 2022 yılına kadarki raporlarda Şekil 2.2 bağlamındaki önceki yıllara ilişkin grafikler yalnızca elektrikli araç kategorisi ve başı çeken ülkeler nezdinde yayınlanmaktaydı; fakat 2022 ile birlikte PHEV ve BEV ayrımı ile birlikte bu grafik yayınlanmaya başlamıştır.



Şekil 2.2 : Dünya Elektrikli Araç Stokları, 2010-2022 [8].

Bunun yanı sıra, Şekil 2.3'te görüldüğü gibi elektrikli araç miktarının önemli bir kısmını hafif amaçlı araçlar oluşturmaktadır [8].



Şekil 2.3 : Kullanım amacına göre dünya elektrikli araç stokları, 2010-2020 [8].

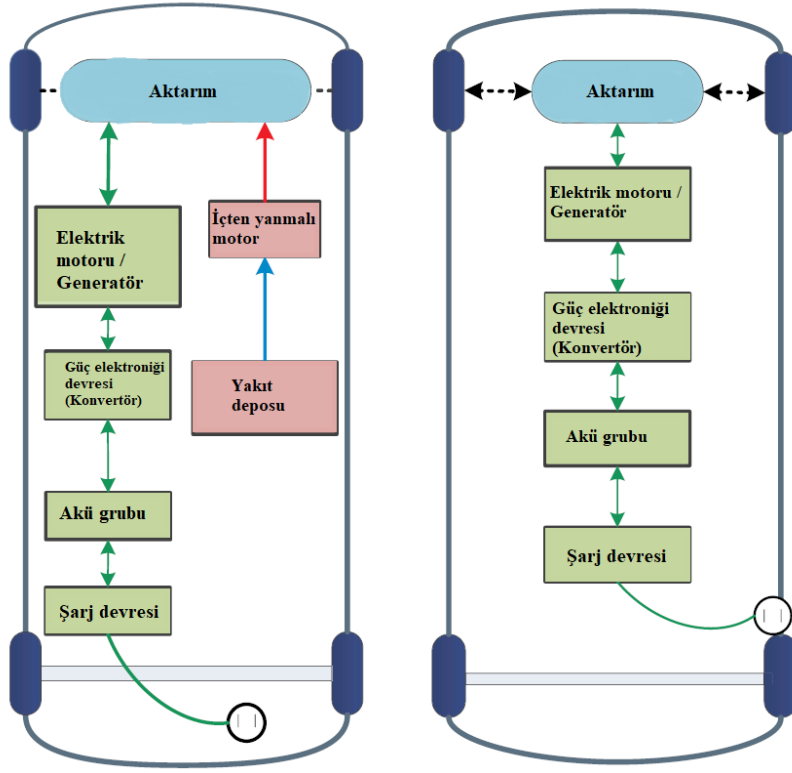
Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency) araştırmalarına göre [9], dünyada 2021 yılı sonunda toplam 11.274.212 adet tam elektrikli araç, 5.224.038 adet şarj edilebilir hibrit araç bulunmaktadır. Türkiye’de ise TEHAD verilerine göre [10], 2021 yılı sonunda 4.310 adet tam elektrikli araç mevcuttur. Türkiye’de kayıtlara geçmiş şarj edilebilir hibrit araç literatürde henüz bulunmamakla birlikte tam elektrikli araç ve hibrit elektrikli araç bulunmaktadır.

2.4. Şarj Edilebilir Elektrikli Araçların İç Yapısı

Genel olarak bir taşıtta enerji depolama, enerji iletimi ve mekanik enerjiye dönüşümü, ve hareketli aksamalar yer almaktadır. “Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review” adlı çalışma şarj edilebilir hibrit ve tam elektrikli araçlardaki iç enerji akışını Şekil 2.4’teki şekilde özetlemiştir [11].

Şarj edilebilir hibrit tip elektrikli araçlarda, şebekeden veya şarj istasyonundan çekilen elektrik enerjisi akü gruplarında depolandıktan sonra elektrik motoruna uygun şekilde işlenmesi için güç elektroniği devresinde işlem gördükten sonra sırasıyla elektrik motoruna, ve sonrasında da aktarım mekanizmasına iletilir. Şarj edilebilir elektrikli araç grubunda frenleme, veya yokuş aşağı işletme durumlarında rejeneratif frenleme sistemi ile elektrik motoru generatör olarak çalışarak akü grubunu şarj etmektedir. Ayrıca şarj edilebilir elektrikli araç grubunda yakıt deposu ve bir içten yanmalı motor sistemi de bulunduğu görülmektedir; bu paralel sistem de aracın tasarım algoritmasındaki akışa bağlı olarak devreye girerek hareket enerjisini sağlamaktadır. Dolayısıyla şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar hem elektrik şebekesine hem de akaryakıt kaynaklarına bağımlıdır.

Tam elektrikli araçlardaki enerji akışı incelendiğinde elektrik şebekesinden veya şarj istasyonundan çekilen elektrik enerjisi bir şarj devresinde işlenerek akü grubuna iletilir; sonrasında işletme esnasında ise akü grubunda depolanan enerji elektrik motoruna uygun şekilde işlenmek üzere güç elektroniği devresine iletilerek elektrik motorunun çalışması sağlanır. Böylelikle aktarım mekanizmasına hareket enerjisi iletilmiş olur ve araç hareket eder. Şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlarda olduğu gibi burada da rejeneratif frenleme ile elektrik motorunun generatör çalışması sağlanarak enerji yeniden depolanabilir.



Şekil 2.4 : Şarj edilebilir hibrit (solda) ve tam elektrikli araçlardaki iç güç aktarım mekanizmaları [11].

3. ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARI

Elektrikli araç kullanımının yaygınlaşma potansiyelinin açıkça görülmesiyle birlikte şarj istasyonu uygulamalarının da her geçen gün yaygınlaştığını açıkça görmekteyiz. Alışveriş merkezlerinin otoparkları, yeni yapılan binaların otoparklarında belirli miktarda şarj ünitesinin bulunması uygulaması ve otobanlarda akaryakıt istasyonlarında elektrikli araç şarj ünitelerine de yer verilmesi bunun açık göstergesidir.

3.1. Elektrikli Araç Şarj Teknolojileri

Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (EPRI) yayınlamış olduğu “Consumer Guide to Electric Vehicle Charging” adlı kılavuzda da belirttiği gibi, şarj teknolojilerini üç ana kategoride tanımlamıştır: AC seviye 1, AC seviye 2 ve DC hızlı şarj. Bu tanımlar elektrik enerjisinin elektrikli araç akü sistemine ne şekilde aktarıldığının standartlarını ve özelliklerini tanımlar [12].

3.1.1. AC seviye 1 şarj

EPRI tarafından hazırlanmış kılavuza göre AC Seviye 1 en yavaş şarj metodudur. Evde şarj için en yaygın olan yöntem olarak belirtilen AC Seviye 1, özellikle düşük akü kapasiteli şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar arasında yaygındır. Elektrikli araçlar ile birlikte tedarik edilen şarj bağlantı kablosu ile birlikte yatırım maliyeti olmaksızın kullanılan AC Seviye 1 tipi şarj teknolojisi yine evlerde, işyerlerinde veya halka açık otoparklarda özel istasyonlarda da kullanılabilir [12].

3.1.2. AC seviye 2 şarj

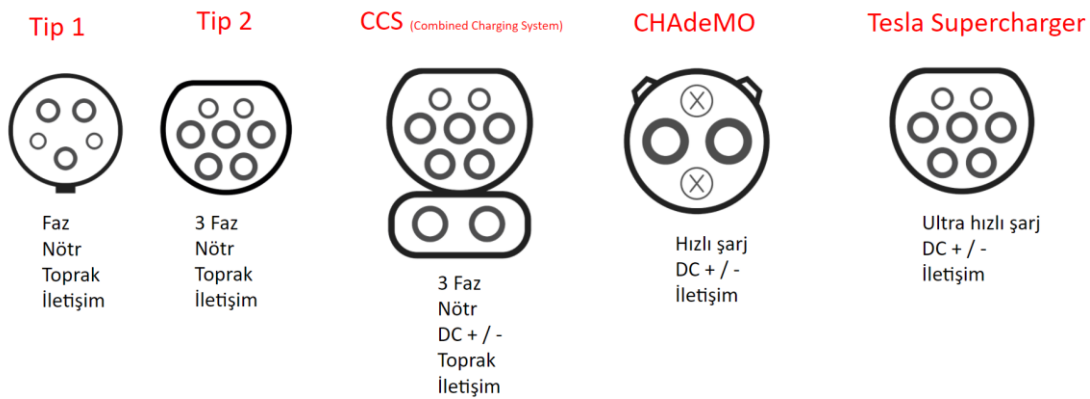
EPRI yine aynı kılavuzda AC Seviye 2 metodunu da AC Seviye 1’den daha hızlı bir şarj teknolojisi olarak tanımlamaktadır. Seviye 1’e göre daha yüksek bir gerilim ve güç gerektiren Seviye 2 teknolojisinde genel olarak standart prizler devre dışı kalmakta, ve kullanıcılar özel şarj ünitelerine ihtiyaç duymaktadır. Ev, iş ve halka açık kullanım alanlarında kullanımı uygundur [12].

3.1.3. DC hızlı şarj

EPRI'ye göre bir diğer şarj teknolojisi ise DC Hızlı Şarj'dır. Bu teknolojiye adından da anlaşılacağı üzere AC-DC dönüşümü araç içerisinde değil, şarj ünitesinde gerçekleştirir. Otoyollarda stratejik noktalarda konumlandırılan bu tip şarj üniteleri kullanıcılara 20-30 dakika içerisinde %80 şarj seviyesi elde etme imkanı verebilmektedir [12].

3.2. Şarj Bağlantı Kabloları ve Bağlantı Çeşitleri

Farklı şarj teknolojileri beraberinde farklı bağlantı kablolarını getirmektedir. Kablolardan çekilecek enerji miktarı, gerilim ve akım değerleri kabloların kesit alanlarını, görünüşlerini, damar sayılarını etkilemektedir. Ayrıca şarj bağlantı kabloları elektrikli araçlar ile şarj üniteleri arasındaki iletişimin de önemli bileşenlerindendir. Şekil 3.1'de konnektör tipleri görülmektedir.



Şekil 3.1 : Konnektör tipleri [13].

3.2.1. Tip 1 konnektör

The Mobility House Tip 1 konnektörleri şu şekilde tanımlamıştır: 7.4 kW (230 V, 32 A) güç seviyesine kadar tek fazlı, Asya ülkelerinde kullanımı yaygın olan, nadiren Avrupa ülkelerinde kullanılan şarj konnektörüdür [13].

3.2.2. Tip 2 konnektör

The Mobility House Tip 2 konnektörleri şu şekilde tanımlamıştır: 43 kW (400 V, 63 A, AC) güç seviyesine kadar üç fazlı, Avrupa ülkelerinde standart olarak kabul edilen ve yaygın olarak kullanılan şarj konnektörüdür [13].

3.2.3. Kombine şarj sistemi (CCS: Combined charging system)

Tip 2 konnektörlerin iki ilave damar ile geliştirilmiş hali olup hem AC hem DC şarj ile uyumlu olan konnektörlerdir. 170 kW güç değerine kadar desteklemek ile birlikte bu değer pratikte genel olarak 50 kW civarındadır [13].

3.2.4. CHAdeMO

Japonya’da geliştirilen bu konnektör tipi DC hızlı şarj için geliştirilmiş bir konnektördür ve 50 kW güç değerine kadar desteklemektedir [13].

3.2.5. Tesla supercharger

Bu şarj tipi yalnızca Tesla marka elektrikli araçlar için geliştirilmiş olup 30 dakika içerisinde %80 şarj sağlayan bir sistemdir [13].

3.3. Elektrikli Araç Şarj Usulleri

Elektrikli araçlar ve şarj teknolojilerine ilişkin literatürde temel olarak üç çeşit şarj teknolojisi tanımlanmıştır. Bunlardan ilki akü değişimi, diğeri endüktif şarj, ve sonuncusu da iletken şarj teknolojileridir [2]. Genel olarak elektrikli araç şarj usullerine ilişkin değişim (akü değişimi metodu için geçerli) ve şarj için gereken süre Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Şarj Teknolojileri				
Akü Değişimi	Endüktif Şarj		İletken Şarj	
	Sabit	Değişken	Alternatif Gerilim ile Şarj	Doğru Gerilim ile Şarj
~5 dk.	Yavaş şarj: 3kW, 4-8 saat	Araştırma aşamasında	Yavaş şarj (ev tipi): - Tek fazlı sistem: 16A, 250V AC, 6-8 saat - Üç fazlı sistem: 32A, 480V AC, 6-8 saat	200 A, 400V DC, 15-20 dk.
	Hızlı şarj: 50kW 15-20 dk.		Hızlı Şarj (ev ve ortak kullanım tipi): - Üç fazlı sistem: 63A, 400V AC, 20-40 dk.	

Şekil 3.2 : Şarj teknolojilerinin ortalama şarj süreleri [2].

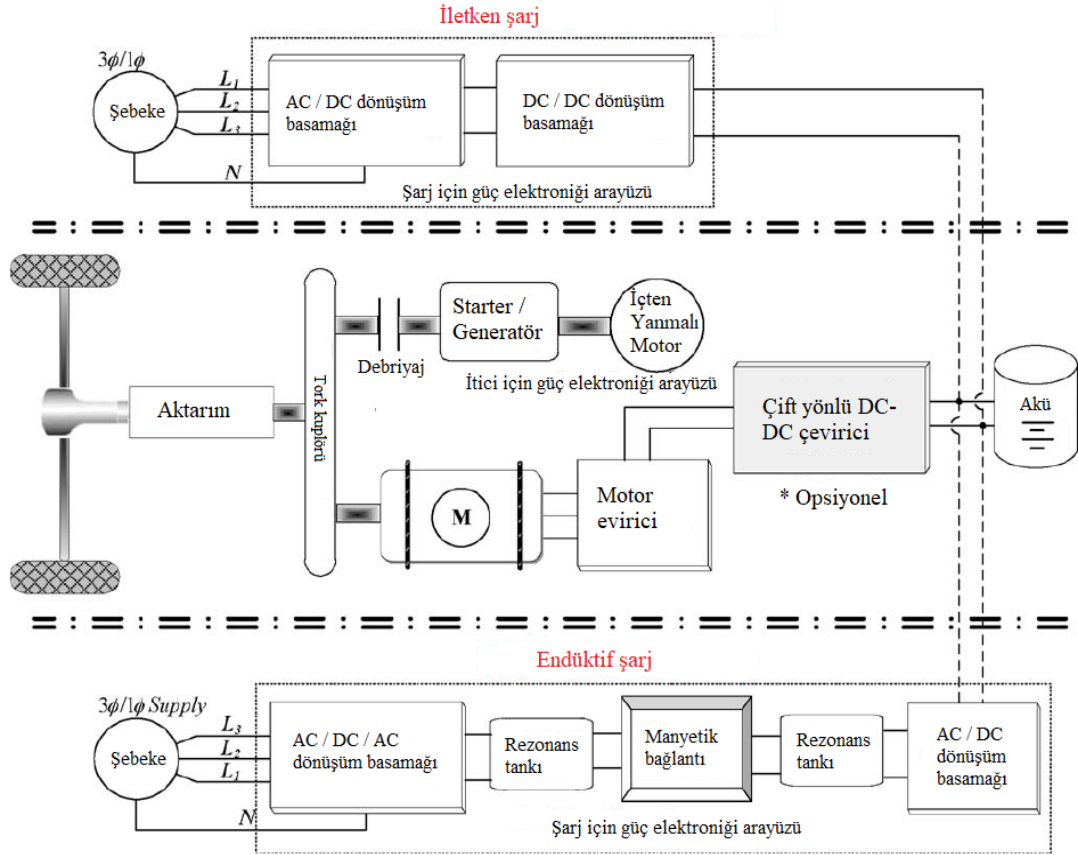
Dünyadaki uygulamalara bakıldığında Şekil 3.2’de görülen şarj teknolojileri kullanılmaktadır. Şarj süreleri karşılaştırıldığında birbirlerine göre farklı üstünlükleri olan bu şarj teknolojileri elektrikli araç şarj işleminin nerede, ne kadar sürede

yapılması ihtiyacı olduğuna göre kullanıcılara farklı şarj süreleri sunmaktadır. Örneğin, akü değişimi temelde en hızlı şarj yöntemidir; daha önceden tamamen şarj edilmiş olan akülerin elektrikli araçta bulunan mevcut aküler ile değiştirilmesi işlemi esas alır ve işlem 5 dakika gibi bir sürede tamamlanır. Bu şarj teknolojisinde kullanıcılar her şarj işleminde farklı akülere sahip olurlar ve bunun avantaj ve dezavantajları tartışmaya açıktır. Bir diğer örnek de gerek endüktif gerek ise de iletken şarj olsun, 15-40 dakika mertebelerinde güce sahip bir şarj istasyonunun ev kullanımında yeri yok denecek kadar azdır. Genel olarak şehir yaşantısında kullanıcılar evlerinde ortalama 8-10 saat geçirdikten sonra araçlarını tekrar kullanacakları şekilde bir hayata sahiptirler. Bu sebeple evsel şarj sistemlerinde 6-8 saat şarj süresi yüksek oranda kullanıcıların şarj ihtiyaçlarını karşılayacaktır. Tüm bunların yanı sıra uzun otoyollarda elektrikli araç kullanıcılarının hızlı şarj ihtiyaçları doğmaktadır. Örnek olarak İstanbul'dan İzmir'e gidecek olan bir elektrikli araç kullanıcısı yaklaşık 500 km yol alacaktır, ve 300-400 km menzile sahip bir elektrikli araca sahip olduğu varsayılırsa bu yolda en az bir kere şarj istasyonuna girmesi kaçınılmaz olacaktır. 4-5 saat kadar sürecek olan bu yolculukta kullanıcının 4-6 saatini şarj istasyonunda geçirmesini beklemek mantık çerçevesinde olmayacağından kullanıcının DC şarj ile hızlı şarj teknolojisinde yararlanması ve 20-40 dk. içerisinde akülerinin %80'ini şarj etmeleri için altyapı sağlamak esas olacaktır.

İletken ve endüktif şarj topolojisine Şekil 3.3'te daha ayrıntılı bir bakış sunulmuştur. Şekil 3.3'teki prensip şemasında da görüleceği gibi temel güç elektroniği devreleri (doğrultucu, evirici ve çeviriciler) içeren iki ana güç elektroniği fonksiyonu bulunmaktadır: itici ve şarj için güç elektroniği arayüzleri. İtici güç elektroniği arayüzü öncelikle motor eviricisini barındırmakla birlikte, opsiyonel olarak akü şarjını kontrol edebilmek için çift yönlü DC-DC çevirici de barındırabilir [14].

Prensip şemasında bulunan iletken şarj fonksiyonu donanımsal olarak kablo bağlantısı ile enerji aktarımını gerçekleştirir; şebeke ile elektrikli araç arasında fiziksel bir bağlantı söz konusudur. Bu tip şarj ünitelerinde genel olarak güç faktörü düzenleyici, AC/DC doğrultucu ve DC/DC çevirici bulunur. Endüktif şarj fonksiyonunda ise

kaynak ile güç elektroniği arayüzü devresi arasında donanımsal olarak bile kablo bağlantısı mevcut değildir [14].



Şekil 3.3 : Şarj edilebilir elektrikli bir araç için tipik güç elektroniği arayüzü prensip şeması [14].

3.3.1. İletken şarj

İletken şarj topolojisi genel olarak doğrultucu ve DC/DC çevirici devreleri ile gerçekleştirilir. Bu kısımda iletken şarj devrelerine ait topolojiler analiz edilmiştir [14].

3.3.1.1. Güç faktörü düzeltici AC/DC doğrultucu devreleri

Öncelikle bir AC/DC doğrultucu devresine sahip olan bu topolojide alternatif gerilim doğru gerilime çevrilir. Devrenin bu kısmı güç faktörü düzeltici ve harmonik azaltıcı için akım şekillendirici görevini üstlenir. Tipik yükseltici doğrultucu devre kullanımı sürekli iletim tekniğindeki kolay kontrol edilebilir ve gerçekleştirilebilir topolojilerdendir. Buradaki ana problem iletim kayıplarının yüksek oluşudur. Yüksek frekanslı işletim sebebiyle devredeki çıkış diyotlarında da kayıplar meydana gelir. Bunun önüne

geçebilmek için Schottky veya SiC diyotların kullanılması gerekir. Bu da potansiyel olarak çevirici devresinin maliyetini arttıracaktır [14].

3.3.1.2. İzole DC/DC çevirici devreleri

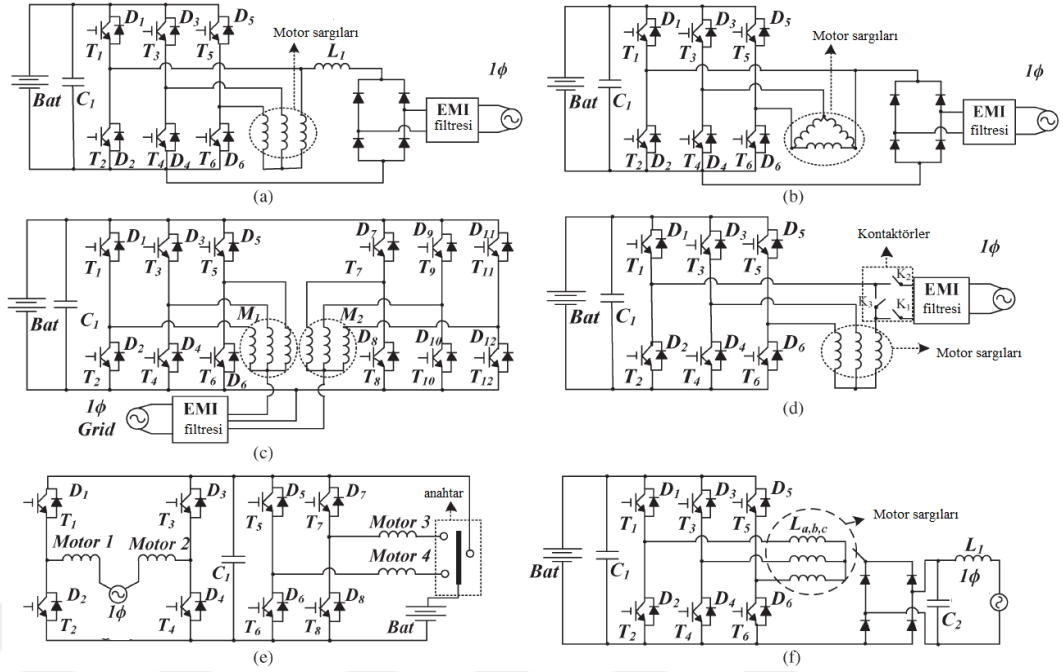
DC/DC çevirici devrelerinin kullanılmasının asıl sebebi akülerin şarjı için gerekli olan gerilimin doğru olarak akülere aktarılmasıdır. Akım veya gerilim beslemeli köprüler veya her iki köprünün uygun kombinasyonu kullanılarak DC/DC çevirici topolojisi gerçekleştirilebilir. Bu noktada diyotların anahtarlama elemanları ile değiştirilmesi ve kontrol algoritmasının yeniden belirlenmesi ile tek yönlü çeviriciler çift yönlü çeviriciye dönüştürülebilir [14].

3.3.1.3. Araç üzeri iki aşamalı şarj devreleri

Bu devre topolojisinde önceki başlıklarda belirtilen doğrultucu ve DC/DC çeviricilerin kombine edilmesi söz konusudur. Şarj üniteleri toplam harmonik gürültüsünü azaltmak ve gereken güç faktörü seviyesini sağlamak amacıyla bir akım şekillendirici ihtiva eder. Bu basamağı takiben akü şarj akımının regülasyonu için bir DC/DC çevirici devresi bulunur [14].

3.3.1.4. Araç üzeri entegre şarj devreleri

Araç üzeri entegre şarj devresi şarj basamağı ile tahrik makinesi eviricisi DC bağlantısı ile enerji depolama ünitesi arasında bulunan güç aktarım ünitesindeki çift yönlü DC/DC çevirisini kombine eder. Bu yapıdaki en önemli handikap akünün salınımlı bir akım çekmesidir. Bunun sebebi çeviricide tek bir endüktans elemanı yer almasıdır. Bu endüktans elemanının devredeki kullanım amacı giriş akımının bir sinüs formunda olmasını zorlamasıdır. Bir takım ilave yarı iletkenlerin kullanılması sebebiyle bu topolojinin verimi kayıplar sebebiyle nispeten düşüktür. Bunun yanı sıra, giriş filtreleri mevcut değil ise, şebekeden çekilen akım süresiz olur ve harmonikleri arttırarak verimi daha da düşürür [14]. Şekil 3.4'te ilgili devre şemaları gösterilmiştir.



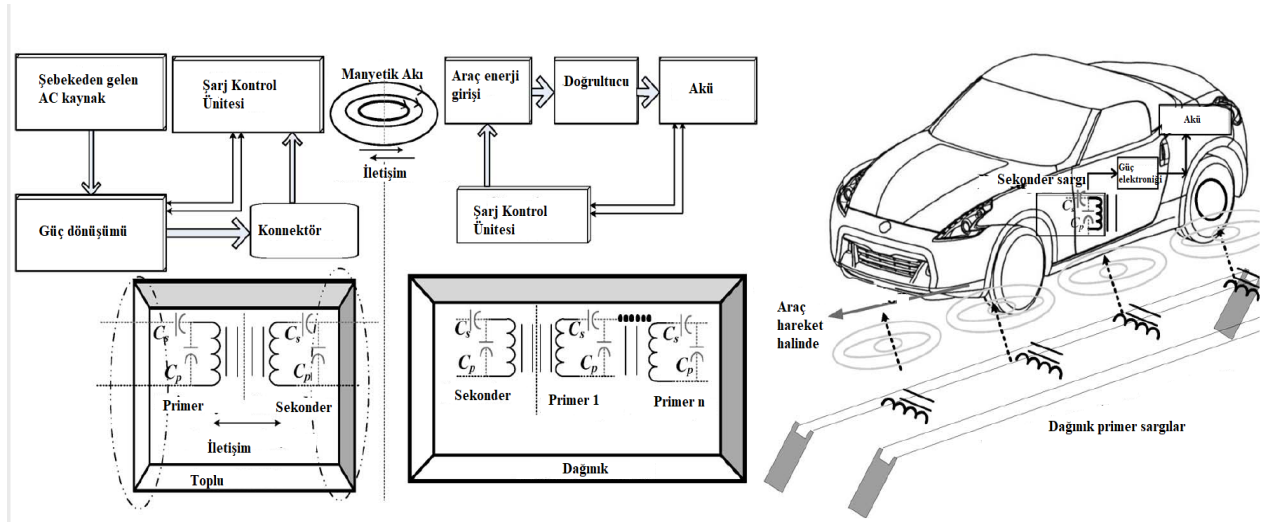
Şekil 3.4 : Sargı düzenlemesi olmadan entegre şarj çözümleri (a) Diyot köprüsü ve bobin ile yalnızca motor eviricisi kullanımı [14,15]. (b) Motor eviricisi ve sargıları ile diyot köprüsü kullanımı [14,15]. (c) Motor sargılarının nötr noktasın erişim [14,16]. (d) Motor sargılarının ve eviricisinin tek fazlı yükseltici doğrultucu olarak kullanımı [14,16]. (e) Motor sargılarının nötr noktasına erişim [14,17]. (f) Motor sargılarının ve eviricisinin nötr noktası erişimli olarak üç fazlı yükseltici doğrultucu olarak kullanımı [14,18].

3.3.1.5. Araç dışı şarj devreleri

20 kW ve üzeri hızlı şarj devrelerinin araç içine konumlandırılması maliyet, hacim, ve ağırlık konuları göz önünde bulundurulduğunda doğru bir yaklaşım olmadığı görülecektir. Bu sebeple bu tip şarj üniteleri araç dışında istasyon olarak tesis edilebilir [14].

3.3.2. Endüktif şarj

Endüktif şarj kablosuz olarak enerjinin iletilmesi ilkesine dayanan şarj metodu olarak öne çıkmaktadır. Şekil 3.5'te toplu ve dağıtık endüktif güç iletimi sistemleri tanımlanmıştır.



Şekil 3.5 : Toplu ve dağınık endüktif güç iletim sistemleri [14].

3.3.2.1. Transformatör temelli endüktif güç iletim sistemleri

Endüktif şarj metodlarından toplu endüktif şarj sistemlerinde araç durağan iken transformatörün primer sargısının araç dışında, sekonder sargısının ise araç içersinde bulunduğu topolojidir. Herhangi bir kablo bağlantısı bulunmadığından sargıların ve manyetik çekirdeğin yeri, şekli, büyüklüğü büyük önem teşkil etmektedir [14].

3.3.2.2. Rezonans çevirici temelli endüktif güç iletim sistemleri

Aracın durağan olmadan da şarj edilebilmesi amaçlanarak transformatörün primer sargılarının araç dışında dağınık olarak yer aldığı ve sekonder sargıların araç içersinde yer aldığı sistem tasarlanmıştır. Bu tip şarj metodlarında yere döşenmiş primer sargıların aralıkları önem teşkil etmektedir [14].

3.4. Şarj Kontrol Metodları

2019 yılında yapılmış olan “Smart Charging of Electric Vehicles According to Electricity Price” adlı akademik araştırmaya göre temel olarak üç çeşit şarj kontrol metodu bulunmaktadır: kontrolsüz şarj, gecikmeli şarj, ve akıllı şarj [19].

3.4.1. Kontrolsüz şarj

Şarj ünitesinde herhangi bir kontrol bulunmamaktadır. Elektrikli araç şarj ünitesine bağlandığında mevcut akü durumuna göre günün saatinden bağımsız olarak şarj işlemi gerçekleşecektir. Şebekeden çekilecek güce ilişkin hiçbir önlem alınmamıştır.

3.4.2. Gecikmeli şarj

Şarj ünitesinde kısmi olarak bir kontrol söz konusudur; kullanıcı şarj işleminin gerçekleşeceği zaman aralığını seçer ve şarj işlemi bu zaman aralığında gerçekleşir. Burada amaç elektrik şebekesinin meşgul olduğu ve dolayısıyla ülkelere göre değişiklik göstermek ile birlikte farklı elektrik enerjisi fiyatlandırma tarifeleri uygulandığı senaryoda hem kullanıcının daha düşük birim enerji maliyeti ile şarj işlemini gerçekleştirmesi, hem de şebekenin yoğun olduğu saatlerde şarj işleminden kaçınarak şebekede oluşacak ilave yüklerin sebep olacağı olumsuz sonuçlardan kaçınmaktır. Burada önemli olan nokta, kullanıcının kendi iradesiyle karar veriyor ve şarj işlemini programlıyor olmasıdır.

3.4.3. Akıllı şarj

Şarj ünitesi üzerinde baştan sona bir otomasyon söz konusudur. Kullanıcı elbette bazı varsayılan değerleri belirlemekte halen söz sahibidir, fakat şarj kontrolü tamamen otomasyon sisteminin kontrolündedir. Bu metod üç ana metod arasındaki en karmaşık şarj metodu olup, güç elektroniği, yazılım altyapısı, karmaşık ve sürekli iletişim sağlayan iletişim altyapısını barındırır. Kontrol ünitesi günün saatlerine göre değişen elektrik enerjisi birim fiyatlarını ve akünün mevcut şarj durumunu girdi verisi olarak aldıktan sonra kullanıcının daha önce belirlemiş olduğu tercihleri de göz önünde bulundurarak algoritmasını çalıştırır ve şarjın gerçekleştirilip gerçekleştirilmeyeceğini, gerçekleştirileceği durumda hangi kapasitede ve hangi hızda gerçekleştirileceğini belirleyerek şarj işlemini gerçekleştirir. Bu sayede hem kullanıcı yüksek elektrik enerjisi birim maliyetlerinden kesin olarak kaçınmış olur, hem de şebeke yoğun saatlerde ilave bir yük almamış olur.

3.4.4. Akıllı Şarj Vaka Çalışması

“Smart Charging of Electric Vehicles According to Electricity Price” adlı çalışmada günün saatlerine göre değişkenlik gösteren elektrik enerji birim fiyatına göre akıllı şarj ünitesi ile kontrol çalışması yapılmış, kontrolsüz şarj metodlarına karşın üstünlükleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada ilk durum, incelenen bölgede hiçbir elektrikli aracın bulunmaması olarak tanımlanmıştır. İkinci durum ise incelenen bölgede bulunan hanelerin yarısının elektrikli araç sahibi olduğu ve kontrolsüz şarj işlemi gerçekleştireceği öngörülmüştür. Üçüncü durumda ise yine %50 elektrikli araç kullanımının yanında akıllı şarj sistemi kullanılması ele alınmıştır. Mısır’da

gerçekleştirilen bu vaka çalışmasında 8 adet bina, ve 96 hane öngörülmüştür [19]. Yapılan bu çalışmada görüldüğü üzere gece saatlerinde bölge sakinlerinin görece olarak daha az enerji talebi olduğu, sabah 08:00 itibariyle görece olarak talebin arttığı görülmektedir. İşten dönüş saatini temsil eden 18:00 itibariyle enerji talebi hızlı bir şekilde artmakta, saat 20:00 civarında tepe noktası yaptıktan sonra azalmaktadır. Bu değişken davranış birçok şehir yaşantısını temsil edebilecek yeterliliktedir. Endüstriyel bölgelerin enerji talepleri bu uygulamalardan farklı olarak incelenmelidir.

Çalışmada vurgulandığı üzere şebekeden çekilmek istenen enerji miktarı arttıkça enerji maliyetleri yükselmektedir. İşten dönüş saatini temsil eden 18:00'da elektrik birim maliyeti artmış, ve şebekenin en yoğun olduğu 20:00 civarında ise tepe noktası yaptıktan sonra azalma eğilimi göstermiştir.

Bu vaka çalışmasında varsayılan %50 elektrikli araç kullanım oranının günün hangi saatinde şarj işlemi için şarj ünitelerine bağlanacağı olasılık kurallarına göre dağıtılmıştır. Burada kişilerin saat 18:00 civarında evlerine ulaşacağı varsayılmış olup, yine bu saat diliminde şarj ünitelerine elektrikli araçlarını bağlayacakları varsayılmıştır.

İlgili çalışmada %50 oranda elektrikli araç kullanımı varsayımına göre günün hangi saatlerinde kaç aracın elektrikli araç şarj ünitesine bağlanacağı Gauss dağılımına göre dağıtılmıştır.

İlgili çalışmada Matlab üzerinden şarj kontrol ünitesinin davranışı modellenmiş ve yukarıda tanımlanan tüm girdi bilgilerine göre simülasyon çalıştırıldığında birtakım önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bölgedeki hanelerin yarısının elektrikli araç kullanmasıyla birlikte 400 kVA olan tepe noktası enerji talebi 100kVA artış ile 500kVA değerine yükselmiştir; kontrolsüz şarj metodunda bu yükseliş dağıtım transformatörlerine ilave bir yük getirecektir. Buna karşın akıllı şarj yönteminde bu artış otomatik olarak şebekenin daha az yoğun olduğu saat dilimlerine ötelenmiştir; böylelikle ilave bir kapasite artışına gerek kalmamış, şebeke zorlanmamış ve kullanıcılar daha düşük maliyetle şarj işlemi gerçekleştirmiştir.

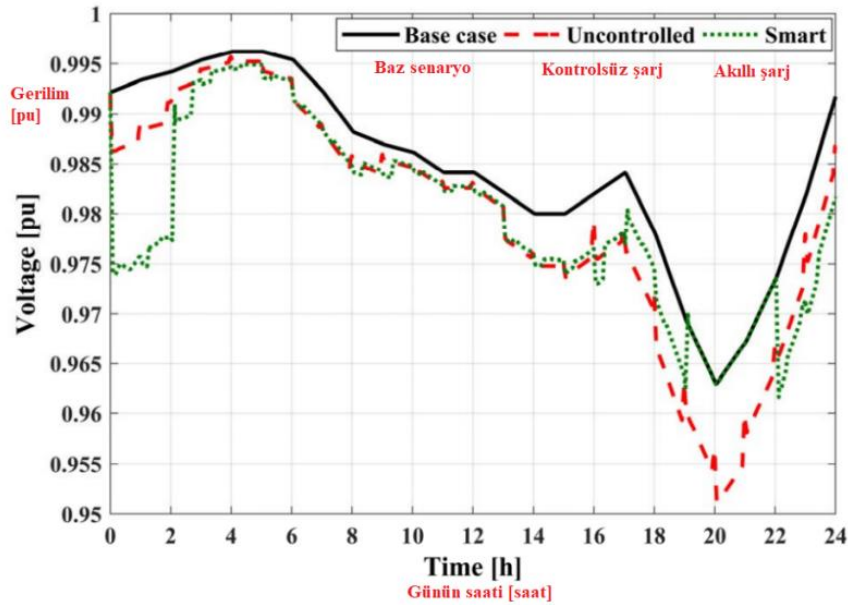
Hiçbir kontrol ünitesi kullanılmadığı durumda kontrolsüz şarj senaryosu gerçekleşmekte ve halihazırda yoğun olan şebekenin tepe yaptığı noktada elektrikli araçların bağlanması ile çok daha fazla bir enerji talebi oluşmakta ve tepe noktası

100kVA artmaktadır. Buna karşın akıllı şarj sisteminin devreye girdiği senaryoda bu tepe noktasındaki artış günün daha az yoğun olan zaman dilimlerine ötelenmiştir.

Ayrıca çalışmada aynı şarj metodlarının dağıtım transformatörü üzerindeki etkisi de incelenmiş olup, beklendiği üzere toplam güç talebindeki etkilere paralel bir etki gözlemlenmiştir.

Transformatörde olduğu gibi dağıtım kabloları üzerindeki yüklenmeler de bu davranışa paralel şekilde seyretmiştir. Beklendiği üzere artan yük ile birlikte kablolarda da zorlanmalar artmıştır; akıllı şarj metodu ile bu zorlanmalar günün diğer saatlerine dağıtılmıştır. Böylelikle hem olası kablo hasarlarının önüne geçilmiş, hem de kablolarda zorlanmalar azalacağından kullanım ömürleri uzatılmıştır.

Son olarak da bu üç senaryonun gerilim üzerindeki etkisi Şekil 3.6’da görülmektedir. Beklendiği gibi artan tüketim ile birlikte gerilim düşümü meydana gelmektedir. Kontrolsüz şarj senaryosunda gerilim düşümü tehlikeli sınırlara ulaşmaktadır. Buna karşın akıllı şarj metodu ile birlikte gerilim düşümünün en yüksek olacağı, şebekenin en yoğun kullanılacağı saat diliminde, şarj talepleri günün diğer saatlerine ötelenmiş ve öngörülmemiş bir gerilim düşümünün önüne geçilmiştir.



Şekil 3.6 : Günün saatlerine göre farklı senaryolarda şebeke gerilim davranışı [20].

Sonuç olarak bu çalışmada akıllı şarj teknolojisinin hem kullanıcı hem de şebekeye sağladığı faydalar vurgulanmıştır. Baz senaryoda 400kVA olan enerji talebi, kontrolsüz şarj senaryosunda 500kVA değerine yükselmiş, transformatörleri kapasitesinden fazla yüklemiş, kabloları öngörülenden fazla zorlamış, gerilim seviyesi

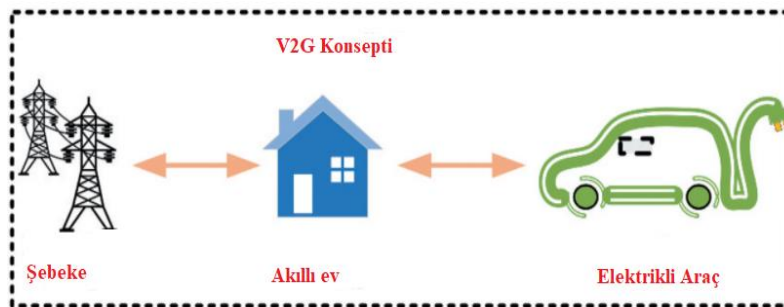
öngörülen değerlerin altına inmiş, ve kullanıcıya daha yüksek bir enerji birim maliyeti ile fatura ödemesine sebep olmuştur. Buna karşın akıllı şarj senaryosunda şebekenin en yoğun olduğu saatlerde gerçekleşecek şarj işlemleri günün daha az yoğun olan diğer saatlerine ötelenmiş, ve böylelikle kullanıcılar daha düşük enerji birim maliyetleri ile fatura ödemiş, dağıtım transformatörleri normal tepe noktası değerlerine yüklenmiş, kablolar kapasitelerine uygun olarak zorlanmış, ve gerilim seviyesi normal seyrinde tutulmuştur.

3.5. Çift Yönlü Şarj-Deşarj Konseptleri

Elektrikli araçlar giderek artan akü kapasitelerine sahiptir. Gelecekte akü teknolojilerinin fizik, kimya, malzeme ve mühendislik alanlarındaki gelişmeler ile birlikte yüksek teknolojinin de desteğiyle daha yüksek kapasiteli bataryaların üretileceği öngörüsüyle birlikte elektrikli araçlar yalnızca şebekeden enerji çeken birimler değil, aynı zamanda tersine de enerji sağlayabilecek elemanlar olarak kullanılabilir. İşte bu çift yönlü şarj-kaynak konseptleri de literatürde tanımlanmıştır.

3.5.1. Araçtan şebekeye konsepti (V2G: Vehicle to Grid)

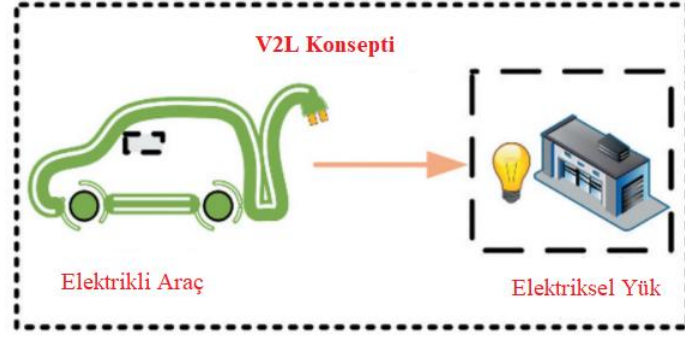
Elektrikli araç akü gruplarında depolanan enerjinin şebekeye yardımcı olarak aktarımını temsil eder. Frekans ve gerilim düzenlemesini sağlar, şebeke stabilitesini artırır. Ekonomik olarak şebekeye ve kullanıcıya sağladığı kazançların yanısıra elektrik sisteminin dekarbonizasyonu için de temel oluşturur [2].



Şekil 3.7 : V2G konsepti [2].

3.5.2. Araçtan yüke konsepti (V2L: Vehicle to Load)

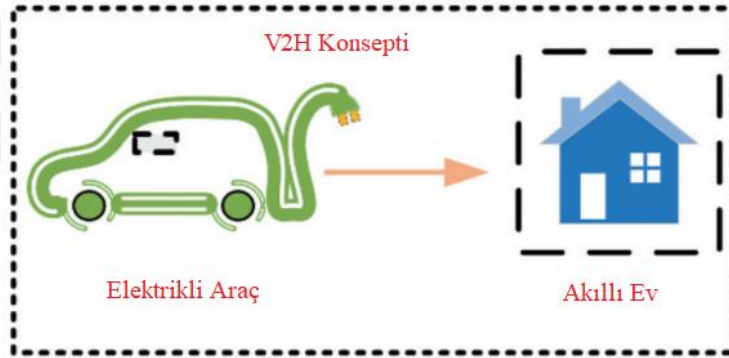
Elektrikli araçların herhangi bir elektriksel yük için gerilim ve güç kaynağı olarak kullanıldığı durumu temsil eder. Şebeke erişiminin olmadığı durumlarda, kamp alanlarında, şehirden uzak sayfiye alanlarında kaynak olarak kullanım imkanı verir [2].



Şekil 3.8 : V2L konsepti [2].

3.5.3. Araçtan eve konsepti (V2H: Vehicle to Home)

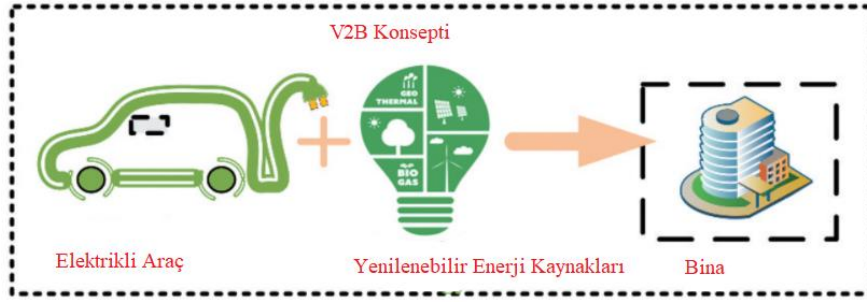
Elektrikli araçta depolanan enerjinin bir akıllı evin enerji ihtiyacını karşılaması amacıyla kullanımını tanımlar. Acil durumda yedek kaynak veya şebeke erişimi olmayan durumlarda ana kaynak olarak kullanılabilir; bunun yanısıra kesintisiz güç kaynağı görevi ile sisteme destek sağlayabilir [2].



Şekil 3.9 : V2H konsepti [2].

3.5.4. Araçtan binaya konsepti (V2B: Vehicle to building)

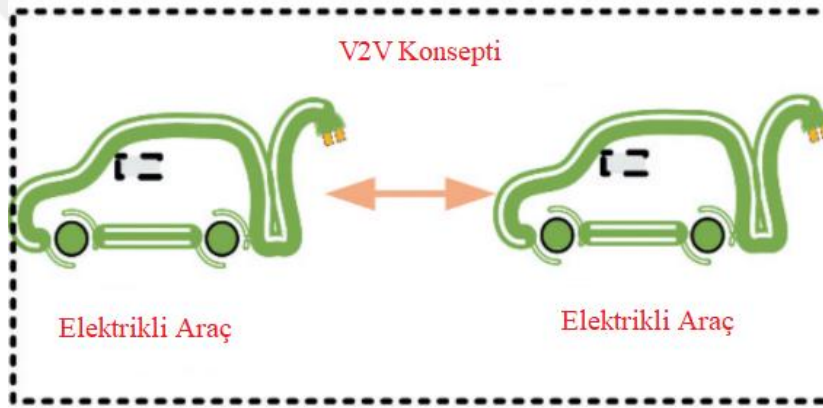
Elektrikli araç filosunun bir binaya enerji sağlamasını temsil eder. Acil durum yedek güç kaynağı olarak kullanılarak asansör, acil durum aydınlatması, veri depolama üniteleri gibi sistemlere kaynak olabilir. Şebekenin yoğun olduğu zaman dilimlerinde dağıtım transformatörlerinin aşırı yüklenmesini engellemek amacıyla kullanılabilir. Yenilenebilir enerji sistemleri ile entegre şekilde çalışarak bağlı olduğu binanın enerji kaynağını çeşitlendirerek şebeke bağımlılığını azaltabilir [2].



Şekil 3.10 : V2B konsepti [2].

3.5.5. Araçtan araca konsepti (V2V: Vehicle to vehicle)

Elektrikli araçta depolanan enerjinin başka bir elektrikli araca aktarımı amacıyla kullanımını temsil eder. Acil durum yedek enerji kaynağı olarak kullanılır ve araçların en yakın şarj istasyonuna kadar güvenli bir şekilde gidebilmesine olanak tanır [2].



Şekil 3.11 : V2V konsepti [2].

3.5.6. Araçtan topluma konsepti (V2C: Vehicle to Community)

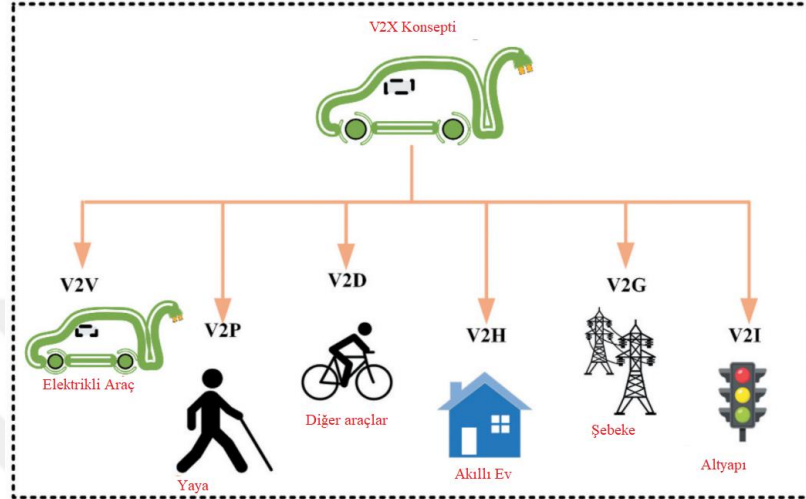
Elektrikli araçta depolanan enerjinin yerel şebekeye aktarımını temsil eder. Böylelikle kendi kendine yetebilen lokal ağlar oluşturmaya olanak sağlar. Yenilenebilir enerji sistemleri ile paralel olarak çalışarak yüksek stabiliteye sahip yerel ağlar oluşmasına katkı sağlar [2].



Şekil 3.12 : V2C konsepti [2].

3.5.7. Araçtan her şeye konsepti (V2X: Vehicle to Everything)

Elektrikli araçta depolanan enerjinin mobil elektrikli yüklerle ve akla gelebilecek tüm elektrikli yüklerle kaynak olarak kullanılabilmesini tanımlar. Daha önce tanımlanmış tüm çift yönlü aktarım mekanizmalarını içerebilir. Kullanıcılara ve topluma büyük esneklik sağlar [2].

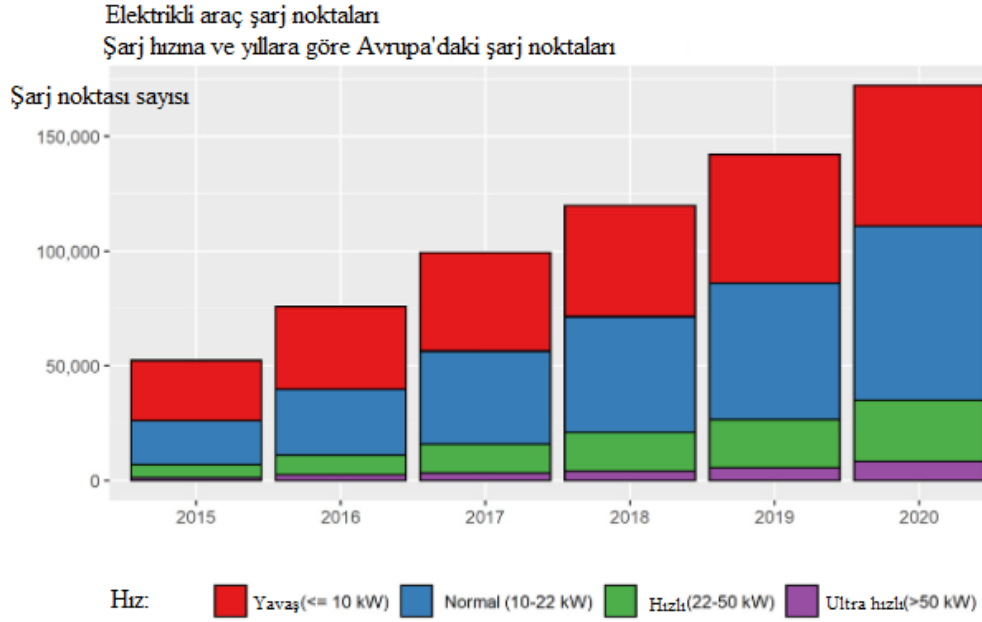


Şekil 3.13 : V2X konsepti [2].

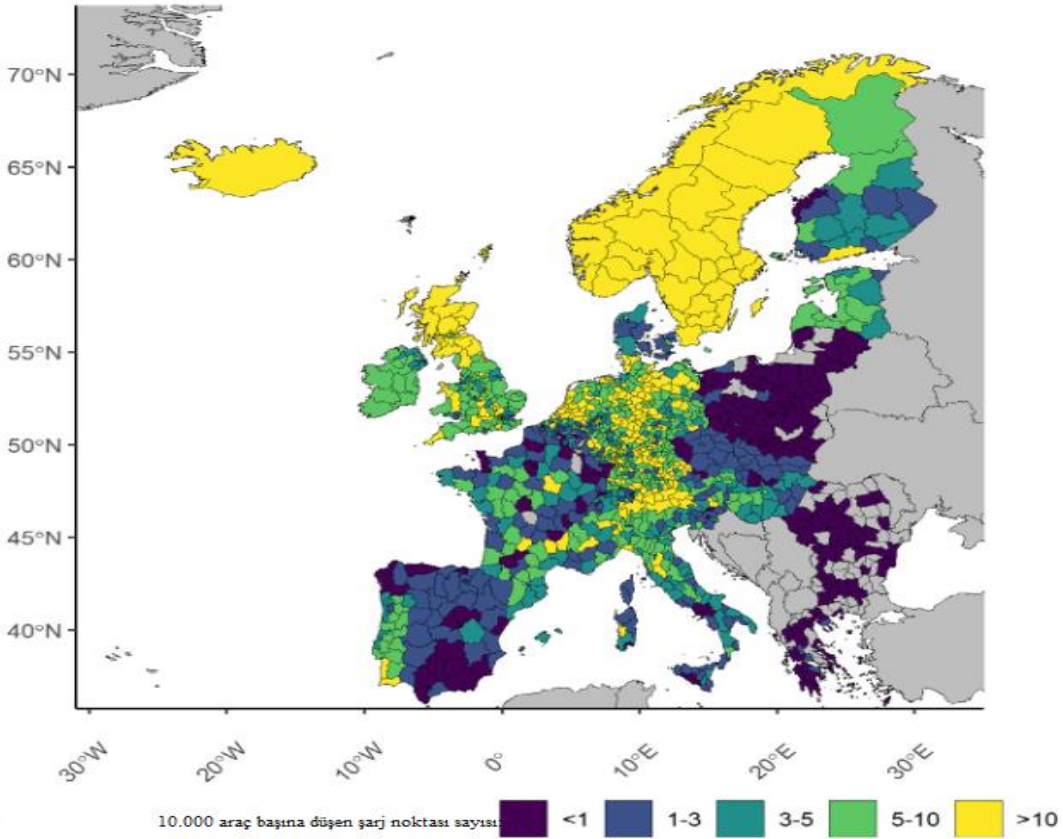
3.6. Dünyada ve Türkiye’deki Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Miktarı

Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre [9], dünyada 2021 yılı sonunda toplam 1.189.980 adet halka açık yavaş şarj istasyonu ve 563.910 adet halka açık hızlı şarj istasyonu mevcuttur. Avrupa Alternatif Yakıtlar Gözlemevi (EAFO: European Alternative Fuel Observatory) verilerine [20] göre 2021 yılı sonunda Türkiye’de toplam 2.276 adet hızlı ve normal şarj istasyonu mevcuttur.

2021 yılında yapılan ve 2020 yıl sonu verilerini içeren akademik çalışmaya [21] göre Avrupa’daki elektrikli araç şarj noktalarının yıllara ve hıza göre gelişimi Şekil 3.14’te verilmiştir. Aynı çalışmada Avrupa’nın bazı bölgeleri için 10.000 elektrikli araç başına düşen elektrikli araç şarj istasyonu verisi de Şekil 3.15’teki gibi verilmiştir.



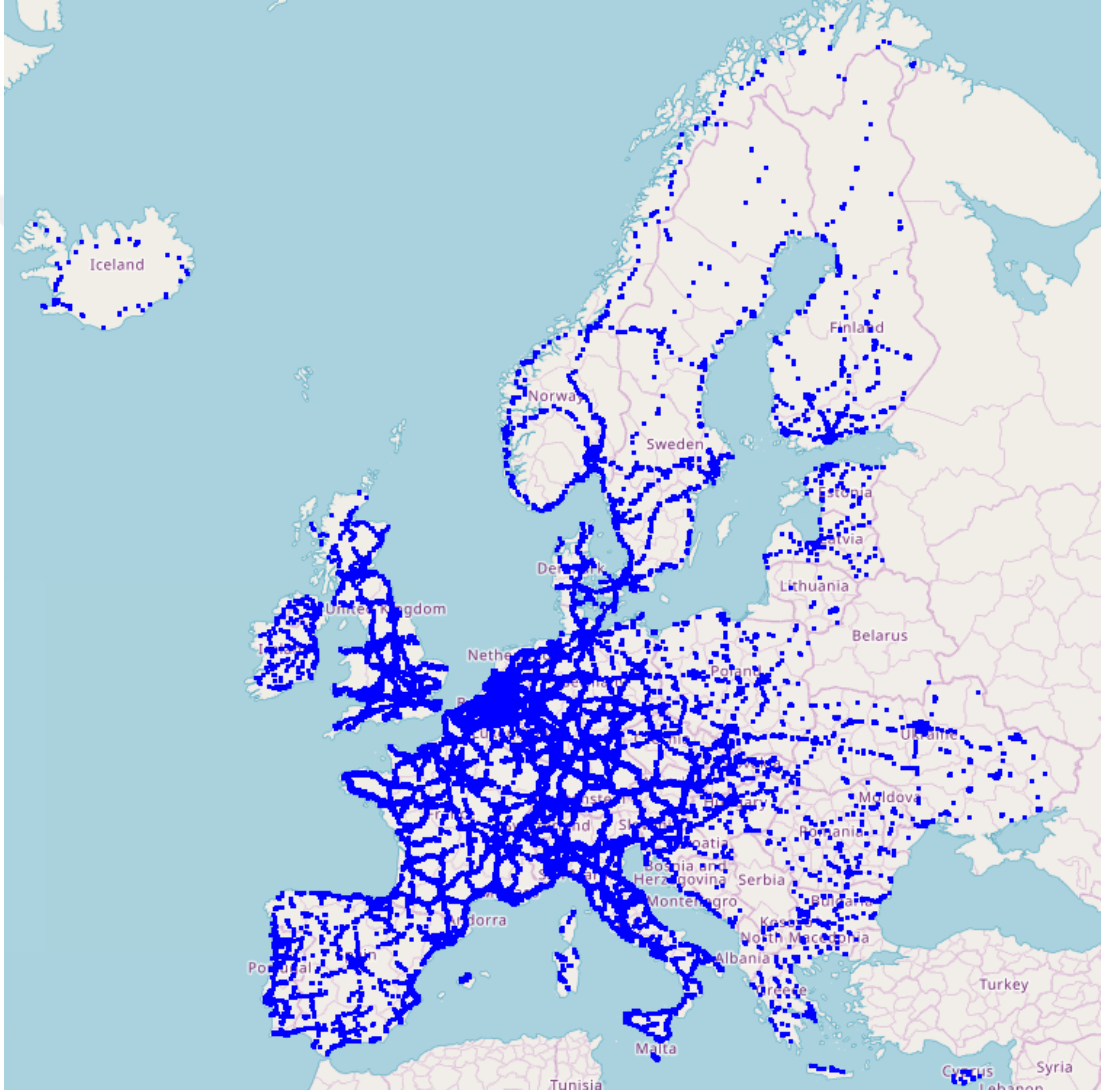
Şekil 3.14 : Avrupa’da yıllara ve hız kapasitelerine göre elektrikli araç şarj noktası sayısı değişimi (2020 yılı 30 Kasım’a kadar) [21].



Şekil 3.15 : Avrupa’da bazı bölgeler için 10.000 araç başına düşen elektrikli araç şarj istasyonu haritası (Şarj istasyonu verisi 2020, elektrikli araç verisi 2018 yılına aittir) [21].

Avrupa özelinde dikkat çeken başka bir harita da Avrupa Komisyonu’na ait verilere [22] göre Şekil 3.16’te verilmiştir. Bu haritada özellikle ana seyahat rotalarının batı,

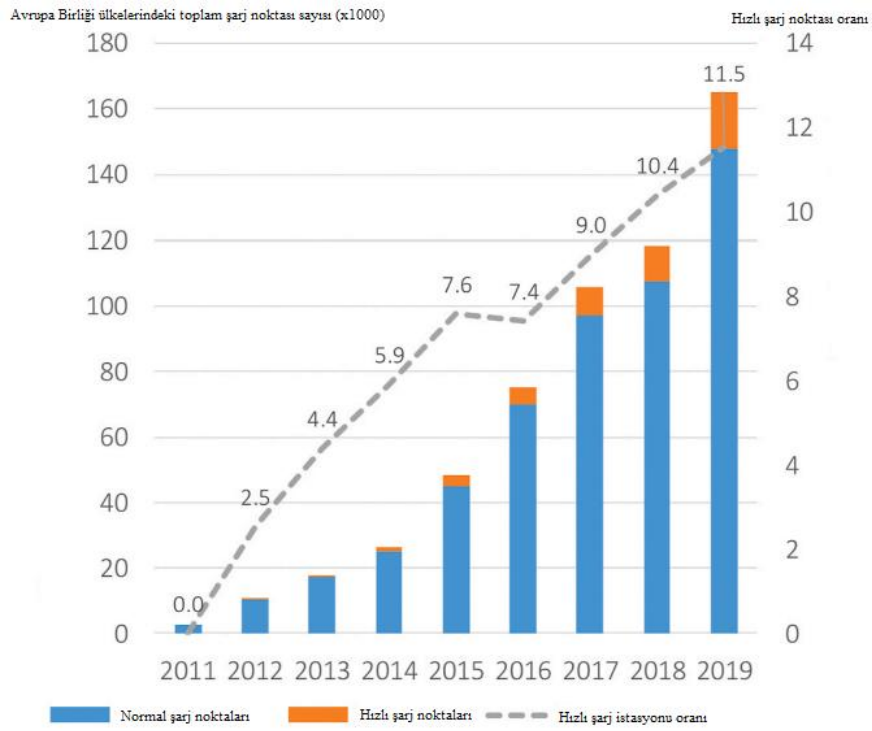
orta ve doğu avrupanın bir kısmında çoğunlukla yeterli miktarda şarj noktası olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, bir elektrikli araç kullanıcısı Avrupa'nın neredeyse tüm ana seyahat rotalarında rahatlıkla şarj ihtiyaçlarını karşılayarak seyahat edebilmektedir. Şarj istasyonu operatörleri arasındaki rekabet de göz önünde bulundurulduğunda hem ana arterlerde hem de şehir içlerinde yeni birçok şarj noktası kurulacağını öngörmek doğru olacaktır.



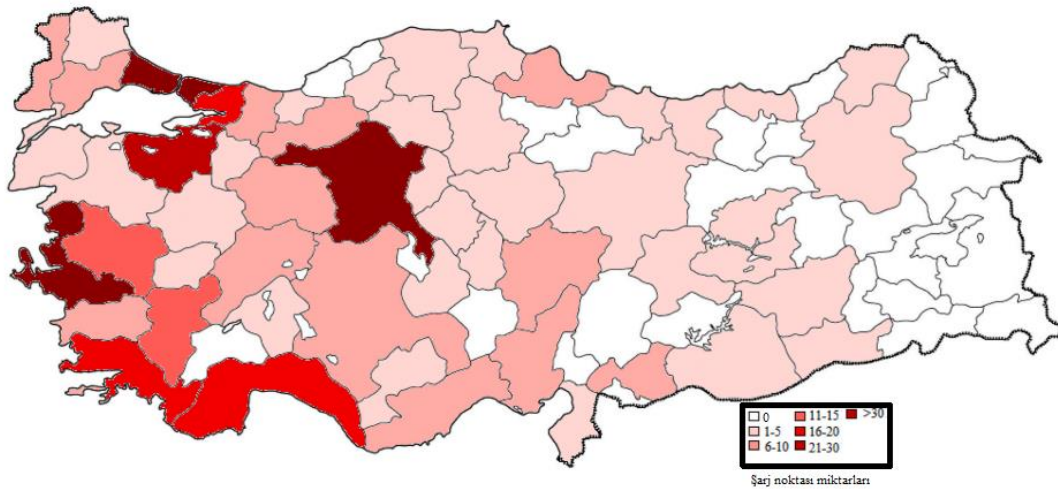
Şekil 3.16 : Avrupa ölçeğinde elektrikli araç şarj noktaları (2022 Haziran ayına ait güncel verilere dayanmaktadır) [22].

Türkiye’de yapılmış olan bir akademik çalışmada [23] Avrupa Birliği ülkelerinde normal ve hızlı şarj istasyonu miktarlarının 2011-2019 yılları arasındaki değişimi Şekil 3.17’deki gibi verilmiştir. Dikkat çeken nokta hızlı şarj istasyonlarının oransal olarak her yıl daha da artıyor oluşudur. Kullanıcıların seyahat rotalarında daha az süreli mola

vermelerine olanak sağlayacak olan bu artış eğilimi ana rotalar bu bağlamda doyuma ulaşana kadar devam edecektir. Aynı akademik çalışmada Türkiye’deki şarj istasyonu yoğunluğu da Şekil 3.18’deki gibi verilmiştir. Büyük şehirlerde otuzun üzerinde şarj istasyonu bulunmakla birlikte Türkiye’nin bu konuda henüz başlangıç aşamasında olduğu görülmektedir. Elektrikli araç kullanımının artış eğiliminde olduğu bu çağda şarj istasyonlarının da hızlı bir şekilde artış göstereceği açık bir şekilde ortadadır.



Şekil 3.17 : Avrupa Birliği ülkelerinde toplam şarj noktası sayısı ve hızlı şarj noktası oranı [23].



Şekil 3.18 : Türkiye şarj istasyonları yoğunluk haritası [23].

4. 2050 VE 2060 YILLARI İÇİN TÜRKİYE ELEKTRİKLİ ARAÇ PENETRASYONU PROJEKSİYONU

4.1. Projeksiyon Metodları

Literatürde elektrikli araç miktarı tahmin çalışmalarında birçok model kullanıldığı görülmektedir. Birbirlerine karşı yakın, orta ve uzun vade araştırmalarda üstünlükleri olan, devletlerin elektrikli araç teşvik programlarını girdi olarak kullanarak projeksiyon çalışması yapan, toplumların devrim niteliğindeki teknolojileri kabul etme eğilimini inceleyen, şarj altyapılarının potansiyel kullanıcıları ne kadar teşvik edeceği konusunda araştırmalar yapan projeksiyon çalışmaları mevcuttur. Genel anlamda elektrikli araç miktarı tahmin çalışmaları üç ana grupta toplanabilir: ajan temelli modeller, tüketici tercihi modelleri, ve dağılım zaman serisi modelleri [24].

4.1.1. Ajan temelli modeller

Ajan temelli modeller bilgisayar tabanlı simülasyona dayanan ve ajanlar arası etki ve tepkiyi işleyen sanal bir ortam simüle eder. Burada ajanlar kurum veya bireylerdir ve bu ajanlar bu modelde yer alan diğer ajanlar ile etkileşimde kontrol sahibidirler. Ajan temelli modeller nüfus tahminlerinde, biyomedikal uygulamalarda, tüketici davranışı çalışmalarında, araç trafiği ve lojistik simülasyonlarında kullanılmıştır. Ayrıca taşıt teknolojilerine ilişkin tüketici, otomobil üreticisi, strateji önderleri, ve yakıt tedarikçilerini de göz önünde bulundurarak çalışma yapılan ajan temelli modeller de mevcuttur [24].

Ajan temelli modellerin avantajı, hem veri temelli bilgiyi kullanarak somut sonuçları hesaba katıyor olması, hem de diğer yandan tüketici davranışlarını da göz önünde bulundurması ile gerçekçi bir sonuç hedefliyor olmasıdır. Bu modelin dezavantajı ise komplike olmasıdır; hesaba katılan girdilerin hassasiyetlerinin doğru katsayılarla belirlenmesi gerekir, ve yapılan küçük ihmaller sonuca büyük etki edebilir [24].

Ajan temelli modellerin temel konsepti bireysel ajanlar için davranış kurallarını tanımlamak, ve sonrasında ajanlar arası ilişkileri incelemektir. Araştırmacılar birçok konuda bu yönteme başvururlar: bir pazar yerindeki satınalma servislerinden bir

organizasyon için bilet satışına, veya teknolojik bir devrimin toplum tarafından kabul görmesi davranışının incelenmesi gibi alanlarda sıkça ajan temelli modellere başvurulur. Ajan temelli modeller yalnızca karmaşık analitik problemlere karşı bir çözüm değildir; aynı zamanda birçok analitik modelde yer bulamamış gerçekçilik değerlerine de sahiptir. Ayrıca bu modeller sıfırdan bir veri oluşturur, dolayısıyla elde pek veri yok iken kullanıldığında da işe yarar sonuçlar elde edilir. Bu yöntem doğruya çok yakın sonuçlar vermekle birlikte karmaşık girdiler sebebiyle de uygulaması zordur [25].

Amerika Birleşik Devletleri için yapılan bölgesel elektrikli araç miktarı tahmin çalışmasında [26], ajan temelli modellemeye iyi bir örnek olarak çalışmanın metodolojisi ayrıntısıyla belirtilmiştir. EVRO (Electric Vehicle Regional Optimizer) adı verilen optimizasyon modeli [27] ile daha önce yapılmış olan projeksiyonlarda kullanılan enerji sistemlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi, çoklu kriter karar verme, belirsizlik altında karar verme, stokastik optimizasyon, ve Argonne Ulusal Laboratuvarı'nın AFLEET (Alternatif Yakıt Yaşam Döngüsü Çevresel ve Ekonomik Ulaşım) modeli, yaşam döngüsü maliyetini tahmin etmek ve incelenen aracın yaşam döngüsü çevresel emisyonları türleri [27-36] metodları ve kaynaklarından da faydalanarak Mehdi Noori ve Omer Tatari tarafından geliştirilmiştir. Sonrasında ajan temelli modelleme yapılan bu akademik çalışmada dört ajan kullanılmıştır: tüketiciler, bölgeler, belediyeler, ve araçlar. Tüketiciler araç satın almak için arayışadırlar, belediyelerin belirleyeceği politikalar tüketicilerin davranışlarını birçok farklı yoldan etkileyebilir, araçların özellikleri de Amerika Birleşik Devletleri için yapılmış olan elektrik şebeke bölgeleri bazlı EVRO optimizasyon modelinden türetilmiştir [26]. Bu çalışmada tüm ajanların (tüketici, belediye, bölge, araçlar) detaylı analizi ayrı ayrı matematik modelleri oluşturularak yapılmış, ve farklı senaryolarda oluşabilecek sonuçlar verilerek yorumlanmıştır.

4.1.2. Tüketici tercihi modelleri

Tüketici tercihi modeli taşıtlara ilişkin tüketici davranışını modellemek amacıyla birçok çalışmada kullanılmış olan metodlardır. Bu model araçların geleceğine yönelik tahminlerde tüketici tercihleri ve araç tiplerine bağlılığı arasındaki ilişkiden yararlanarak yeni araç teknolojilerinin kabul olasılığını öngörmeyi hedefler [24].

Bu yöntemin avantajı ancak geçmiş tüketici tercihlerine ilişkin verilerin çok kapsamlı ve zengin olduğu durumda gelecekteki davranışlara etkisini incelediği durumda ortaya çıkar. Ajan temelli modellere göre çok daha yalındır, çünkü tüketicileri bireyler yerine grup olarak ele alır [24].

Bu yöntemin dezavantajı ise, geçmişe yönelik verilerin kapsamlı ve zengin olması gerektiği noktasında ortaya çıkmaktadır. Geçmişe yönelik verilerin kısıtlı olması durumunda bu modeller doğru sonuçtan uzaklaşırlar [24]. Elektrikli araç teknolojilerinin de görece olarak yeni sayılabilecek teknolojiler kapsamında düşünülmesi durumunda bu metodun doğrudan uzak sonuçlar vereceği öngörülebilmektedir.

Davranışsal finansın araştırma konusu olan tüketici tercihi modelleri tüketicilerin bir ürünü hangi fiyat mertebelerinde satın alma eğiliminde olacağı ile ilgilenir. Elektrikli araçların yaygınlaşması bir teknolojik devrim niteliğinde olduğu için zaman içinde artacak rekabet ortamı ve çeşitlilik ile birlikte arz talep dengesinin kurulması ile birlikte birçok bütçeye hitap edecek modeller var olacaktır. Bu sebeple tüketici tercihi modeli elektrikli araçların geleceğinin tahmini konusunda ancak üretici firmaların hangi ürünlerinin daha çok talep göreceğini analiz etme amaçlı kullanılabilir.

4.1.3. Dağılım ve zaman serisi modelleri

Dağılım ve zaman serisi modelleri pazarın bir ürünü kabul etmesi sürecini tanımlamaktadır. Bu model tüketicinin genel olarak bir pazardaki genel ürün dağılımına ilişkin bir teoriye dayanarak potansiyel sonuca odaklanır [24].

Bu yöntemin avantajı uygulama kolaylığı ve araç teknolojilerinin geçmiş verilerine uyum sağlamasıdır. Dezavantajı ise, satışın tepe yapacağı noktanın önceden biliniyor veya öngörülüyor olması gerekliliğidir [24]. Dağılım ve zaman serisi modelleri arasında teknolojik gelişmelerin toplum tarafından kabulüne ilişkin öngörülerde literatürde lojistik büyüme fonksiyonunun kullanıldığı görülmektedir. Lojistik büyüme fonksiyonunun temel özelliği, fonksiyon oluşturulduğunda ve grafiği incelendiğinde ilk başta parabolik karakterde bir artış, sonrasında artışın hız kaybetmesiyle birlikte logaritmik davranışta bir artış ile doyum noktasına ulaşmasıdır. Televizyon, radyo, internet, mobil telefon, akıllı telefon gibi büyük teknolojik devrimlerde toplumun davranışı genel olarak lojistik büyüme fonksiyonuna göre hareket etmiştir.

Lojistik büyüme fonksiyonu genel olarak formül 4.1'deki gibi bir yapıya sahiptir.

$$I(t) = \frac{L}{1 + \left(\frac{L}{I(0)}\right) \cdot e^{-k \cdot L \cdot t}} \quad (4.1)$$

Burada $I(t)$ zamana bağlı ve kümülatif olarak ilgili ürünün stok miktarını göstermektedir. L fonksiyonun satürasyona gireceği noktayı temsil etmektedir; buna örnek olarak gittikçe artan bina sayısının bir yerde teknik şartların tükenmesi dolayısıyla artışa son verip zaman içerisinde çok az değişiklik gösterecek hale gelmesi verilebilir. $I(0)$ değeri fonksiyonun ilk değeri olan ve geçmiş verilere dayanan başlangıç noktasıdır, t değeri 0'dan başlayarak tahmin edilecek yıla ilişkin numaralandırmayı temsil eder, k ise lojistik büyüme fonksiyonunun formunu belirleyen katsayıdır.

4.2. Elektrikli Araç Miktarı Projeksiyonu Örnek Çalışmalar

Literatürde elektrikli araç tahmini, birçok farklı konuyu direkt ve dolaylı olarak etkilediğinden sıkça rastlanan çalışmalardır. Bir akademik çalışmada Hawaii için elektrikli araç projeksiyonu çalışması yapılmış olup [38], kullanılan metodlar, tahmin çalışmasında göz önünde bulundurulmuş faktörler ve çalışma sonuçları belirtilmiştir. Çalışmada elektrikli araç miktarlarındaki değişimin üç ana faktöre bağlı olduğu vurgulanmıştır: iç faktörler, dış faktörler, politika mekanizmaları. İç faktörler, araç fiyatları, akü maliyetleri, araç menzilleri ve şarj süresi olarak sınıflandırılmıştır; dış faktörler, yakıt fiyatları, tüketici karakteristikleri (eğitim seviyesi, cinsiyet, gelir düzeyi, sahip olduğu araç sayısı, çevrecilik bilinç seviyesi vb.), seyahat edilen yol miktarı, kamusal görünürlük ve araç çeşitliliği alt konularında incelenmiştir; politika mekanizmaları ise sübvansiyonlar, teşvikler, şarj alt yapısı inşaatı destekleri, bilinirlikteki artış olarak işlenmiştir. Aynı çalışmada zamana göre elektrikli araçların toplumdaki kabul ve satın alınma oranını belirlemedeki temel modeller tanımlanmıştır. Bu modeller Temsilci Temelli Modeller, Tüketici Tercihi Modelleri, ve Dağılım modelleri başlıklarında incelenmiştir. Ajan temelli modeller bu çalışmada [38] bireysel karar vericilerin davranışlarını temel alan ve bunu işleyen bir bilgisayar simülasyonu olarak tanımlanmıştır. Araç teknolojilerine ilişkin çalışmalarda sıkça kullanılan bu metod temsilcilerin karakterlerini ve seçimlerini temel alır. Hawaii için yapılmış olan elektrikli araç miktarı gelecek tahmin çalışmasında Al-Alawi ve Bradley (2013) [24] tarafından yapılmış olan çalışmadaki Tüketici Tercihleri Modeli de dikkate

alınmış ve kullanılmıştır. Fakat bu modelde tüketici tercihleri tarihsel veriler üzerinden incelendiğinden, elektrikli araçlar gibi görece yeni sayılabilecek bir konu üzerinde kullanılması önceki verilerin yetersizliği anlamında bazı engeller teşkil edebileceği de vurgulanmıştır. Bir başka konu ise tüketici tercihlerinin ülkelerin alacağı teşvik vb. kararlar ile hem doğrudan hem de direkt olarak ilintili olması sebebiyle bu modellerin kullanımında çok daha hassas davranılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada [38] Dağılım Modelleri metodu hem iç hem dış faktörlerin göz önünde bulundurulması ile yapıldığı vurgulanmaktadır. Dağılım teorilerinde toplumdaki elektrikli araçları ilk kabul eden ve satın alanların ve toplumdaki esinlenme ve örnek alma davranışlarının incelendiği kapsamlı bir modeldir. Otomobil pazarında en yaygın kullanılan dağılım modelleri Bass, Gompertz, ve Logistics modelleri olarak belirtilmiştir [24,38]. Dağılım modellerinin avantajı inceleme yapılan alanın ve yakın teknoloji alanlarının tarihsel verilerine uyum sağlamasıdır; dezavantajı ise, satışın ve tüketimin tepe noktası yaptığı ve üstün pazar potansiyeli durumunda modellerde bu verilerin yeterince yer almamasıdır [24,38].

Bir başka akademik çalışmada [37] da dünya çapındaki elektrikli araç miktarı tahmin çalışması ve karbondioksit salımı konusu işlenmiştir. Bu çalışmada “lojistik büyüme fonksiyonu” temel alınarak gelecek yıllara ait elektrikli araç miktarı tahmini yapılmıştır. 26 ayrı ülkenin verileri işlenerek yapılan tahmin çalışmasında, akademik çalışma için seçilen ülkeler için 5 ayrı kıtayı temsil etmeleri ve OECD ve BRICS ülkeleri arasında olmasına dikkat edilmiştir. Yapılan araştırma 2010-2018 yılları arasındaki gerçek verileri işleyerek 2019-2035 yılları arasında gerçekleşecek elektrikli araç satışları için öngörü sunmaktadır. Aynı çalışmada ayrıca karbondioksit salımı miktarı ve elektrik enerjisi talebi konusunda tahmin çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada metodoloji olarak lojistik büyüme fonksiyonu uygulanmıştır. Buna göre bir doyum noktası tanımlanarak tüm dünyada ulaşılabilecek en yüksek binek araç sayısı öngörülmüştür. Diğer yandan, yakın geçmişteki elektrikli araç satış miktarları da hesaba katılarak çalışma ilerletilmiş ve son olarak da elektrikli araç büyüme eğrisi mevcut yıllık binek araç satış miktarları ile birlikte düşünülerek gelecek tahmini yapılmıştır.

Bir başka akademik çalışmada [39] Türkiye için uzun döneme ilişkin araç yakıt tipi projeksiyonu yapılmıştır. Bu çalışmada Türkiye’deki araçların boyutu, hurda işlemleri, araç yaş dağılımı, yakıt tipleri, motor değişim işlemleri ve kullanım geçmişleri

değerlendirilerek geleceğe yönelik yakıt tipi dağılımı tahmini yapılmıştır. 2019-2030 yılları arasında toplam araç stoğunun 16.7 milyondan 28 milyona çıkacağını öngören bu çalışmada, LPG, hibrit ve elektrikli araçların oranının artacağı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada yeni üretilecek araçlar için hareketli ortalamalar metodu kullanılmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri için eyalet bazlı olarak kapsamlı bir şekilde yapılan bir çalışmada [26] ise ajan temelli metodlar ile keşifsel modelleme ve analiz metodları birlikte kullanılarak detaylı bir çalışma yapılmıştır. Hem geçmiş verilerden yararlanılmış hem de toplumun sosyal durumu yaş, cinsiyet, aile ile birlikte yaşama, yalnız yaşama gibi kriterlere göre incelenmiş ve 2030 yılına kadar elektrikli araç miktarı öngörüsü yapılmıştır. Sonuç olarak 2030 yılı sonunda içten yanmalı motorlu araçların oranının %56, tam elektrikli araç oranının %14, ve hibrit elektrikli araç oranının %13, şarj edilebilir hibrit elektrikli araçların oranının ise %6 olacağı tahmin edilmiştir.

Bir diğer projeksiyon çalışmasında [37] ise 2015-2035 yılları arasında elektrikli araç ve buna bağlı olacak karbondioksit salımı tahmini yapılmıştır. Lojistik büyüme fonksiyonu metodu kullanılan bu çalışmada Avustralya, Avusturya, Belçika, Brezilya, Kanada, Çin, Danimarka, Finlandiya, Fransa, Almanya, Hong Kong, Hindistan, İtalya, Japonya, Kore, Hollanda, Norveç, Portekiz, Rusya, Güney Afrika, İspanya, İsveç, İsviçre, Tayvan, İngiltere, ve Amerika Birleşik Devletleri için elektrikli araç gelecek tahmini yapılmıştır. Sonuç olarak 2035 yılında, projeksiyonu yapılan ülkelerin tamamında ortalama olarak elektrikli araç oranı %42,5 olacağı öngörülmüştür.

Malezya’da yapılan bir çalışmada [40] istatistik yöntemleri kullanılarak kantitatif anket yöntemleri kullanılarak elektrikli araç tahmini yapılmıştır. Sonuç olarak hibrit, tam elektrikli ve şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlara ilişkin 2013-2020 yılları arasında tahmin çalışması yapılmıştır.

Bir başka çalışma [41] ise 2021 yılında Avrupa Birliği ülkeleri için yapılmıştır. 2011-2020 arası verilere göre tam elektrikli ve şarj edilebilir hibrit araçların toplamının tüm araçlara oranı %14’e ulaşmıştır. 2019 ve 2020 yıllarına ait yeni araç satış oranları da paylaşılan çalışmada bu bağlamda yapılan sıralamada ilk beş ülke olarak Norveç (2019: %56, 2020: %75), İsveç (2019: %11, 2020: %32), Hollanda (2019: %15, 2020: %32), Finlandiya (2019: %7, 2020: %18) ve Danimarka (2019: %4, 2020: %16) öne çıkmaktadır. ICCT tarafından yapılmış olan bu çalışmada geleceğe yönelik bir projeksiyon yapılmamıştır; ancak, mevcut veriler ve Avrupa Birliği ülkelerinin

elektrikli araç teknolojisini hayata geçirme konusunda hangi noktada olduğu konusunda anlamlı veriler içermektedir.

Portekiz için yapılmış olan 2020-2030 yılları arası elektrikli araç projeksiyonu çalışmasında [42] elektrikli araç pazarının mevcut durumu, nüfus artış eğilimi, ve elektrikli araç satış tahminleri göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan çalışmada Portekiz’de Nissan Leaf, Tesla Model 3, Renault Zoe modellerinin satış miktarları bağlamında ilk üçü oluşturduğu görünmektedir [42,43]. Bu çalışmada yazar, ACAP [42,44] ve UVE [42,45] verilerinden yararlanarak geçmişe yönelik (çalışmanın yapıldığı tarihte 2015-2019 verileri) verileri kullanarak 2030 yılı için yapılacak projeksiyon çalışmasının temellerini oluşturmuştur. 2019 yılında yayınlanmış olan Ulusal Enerji ve İklim Planı [42,46] içeriğinde yer alan projeksiyon çalışmasında iki ayrı sonuç öne çıkmaktadır: ilki 2030 yılında Portekiz’de araç satışlarının $\frac{1}{3}$ ’ünün elektrikli araçlardan oluşacağı, ikincisi ise toplam araç filosu içerisinde elektrikli araçların oranının %20 olacağıdır. Mevcut elektrikli araç miktarı ve yıllara göre davranışı, Ulusal Enerji ve İklim Planı’ndan çıkan sonuçlar birbirini destekleyerek bu akademik araştırmanın temeli oluşturulmuştur. Bu çalışma görece olarak kısa bir süreye ilişkin projeksiyon çalışması olduğundan, verilerin gelecek tahmininde geçmişteki verilerin davranışına uygun bir gelişim içerisinde olacağı varsayılarak tahminde bulunulmuştur. Bu sebeple üç senaryo için de (iyimser, normal, kötümser) neredeyse lineer bir davranış söz konusu olmuştur. Ayrıca, bu çalışmada elektrikli araçların alçak gerilim enerji dağıtım şebekesine getireceği ilave yüklere değinilmiş ve yakın gelecek için elektrikli araç miktarlarının hızla artacağı vurgulanarak ilgili makamların bu konuda önlem almasının önemi vurgulanmıştır.

4.3. Türkiye İçin 2050 ve 2060 Yılları İçin Projeksiyon

4.3.1. Metodoloji

Literatür incelendiğinde istatistik temelli birçok tahmin yöntemi kullanıldığı görülmektedir. Bu tahmin yöntemleri geçmiş yıllardaki verileri işleyerek gelecek tahmin çalışması amaçlayan yöntemlerin yanı sıra toplum davranışlarını inceleyerek, anket çalışmaları düzenleyerek mevcut durumun analizi ile gelecek tahmin yöntemlerini içermektedir. Literatürde bazı hibrit çalışmaların da olduğu görülmektedir; hibrit tahmin yöntemleri çok komplike olan tahmin çalışmasını geçmiş, mevcut durum, gelecek dönem anketleri, devletlerin teşvik mekanizmaları, şirketlerin

araç üretim miktarı beyanları, toplumun seyahat alışkanlıkları gibi çok yönlü araştırma sonuçlarını birlikte inceleyerek gelecek tahmini yapmaktadır. Son dönemde yapılmış olan elektrikli araç ve benzer teknolojilere ilişkin gelecek tahmini çalışmalarında büyüme eğrilerinin genel olarak lojistik büyüme eğrisi (S-eğrisi) karakteristiği ile doğru bir şekilde temsil edildiği görülmektedir. Lojistik büyüme eğrisi metodu orta ve uzun vade elektrikli araç miktarı tahmini için hassasiyeti düşük ama gerçekçi sonuçlar vermektedir. Bu metod kısa vadede hassas ve anlamlı veriler sağlamamaktadır. Bu nedenle, lojistik büyüme modeli ile yapılan elektrikli araç tahmini ülkelerin uzun yıllar sonraki hedefleri, şarj altyapıları, dağıtım şebekelerine ilişkin büyüme ve kapasite belirleme çalışmaları konularında yol gösterici olabilmekle birlikte, önümüzdeki birkaç seneye ilişkin hassas kararlar verme noktasında hassas ve kılavuzluk edici bir veri sağlamamaktadır.

Bu çalışmada orta ve uzun vadede yapılacak altyapı çalışmalarına destek olabilecek, şarj alt yapılarının ve orta-uzun vadedeki elektrik enerji talebinin belirlenmesi gibi çalışmalarda altyapı oluşturabilecek şekilde lojistik büyüme fonksiyonu modeli kullanılacaktır.

Lojistik büyüme fonksiyonu belirli bir zaman noktasına kadar yavaş artış gösteren ve bu kırılım noktası itibarıyla parabolik bir artış sergileyen, sonrasında satürasyona ulaşan bir eğridir. Literatürde devrim niteliğindeki teknolojik değişimlerin bu fonksiyona uyum sağladığı görülmüştür.

2020 yılında yapılmış olan “Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and the consequences for worldwide CO₂ emissions” adlı çalışmada 1960 yılından bu yana birçok teknoloji kabullenme ve gelecek tahmini konularında lojistik büyüme fonksiyonu kullanıldığı belirtilmiştir. Televizyon, bilgisayar, mobil telefon miktarlarının tahminini için kullanılmış olan bu model teknik altyapısı ve daha önce yapılmış olan teknoloji içerikli tahmin çalışmaları da göz önünde bulundurulduğunda elektrikli araçların gelecekteki durumunu tahmin etmek konusunda doğru sonuçlar vereceği düşünülmektedir [37].

Lojistik büyüme fonksiyonu formül 4.2’de verilmektedir. Burada $y(x)$, bir x anındaki toplam miktarını temsil etmektedir. C fonksiyonun ulaşabileceği, satürasyona gireceği noktayı temsil etmektedir. a ve b değerleri fonksiyonun karakteristiğini belirleyecek olan katsayılardır.

$$y = \frac{C}{a \cdot e^{-b \cdot x}} \quad (4.2)$$

Bu noktada fonksiyonun oluşturulması C saturasyon değerinin, a ve b katsayılarının belirlenmesi ile tamamlanır.

Doğru bir fonksiyon tanımlanabilmesi için geçmiş verilerin de iyi incelenmesi büyük önem teşkil etmektedir. Bu sebeple TÜİK'in verileri Tablo 5.1'de verilmiş olup, Türkiye'nin 2050 ve 2060 yıllarına ilişkin yapılacak elektrikli araç miktarı tahmin çalışması için oluşturulacak lojistik büyüme fonksiyonuna temel oluşturacaktır.

Özetle bu projeksiyon çalışmasının adımları aşağıdaki gibi olacaktır:

- Geçmiş dönem verilerinin incelenmesi, geçmiş döneme ilişkin verilerin grafiğinin çizilerek artış trendinin belirlenmesi
- Lojistik büyüme fonksiyonunun oluşturulması, katsayılarının belirlenmesi, saturasyon noktasının belirlenmesi
- Son halini alan lojistik büyüme fonksiyonunun 2050 ve 2060 yıllarına ilişkin çıktılarının belirlenerek yorumlarının yapılması
- CO₂ salımı bağlamında inceleme, hesaplama ve yorumların yapılması
- Alternatif sigmoid fonksiyonların uygulanarak birbiriyle karşılaştırılması
 - o Gompertz fonksiyonu
 - o Asimetrik Gompertz fonksiyonu

4.3.2. Projeksiyon çalışması

4.3.2.1. Geçmiş dönem verilerine ilişkin analiz

Aralık 2021'de yayınlanmış olan TÜİK verilerine göre toplamda 13.706.065 adet motorlu kara taşıtı bulunmaktadır. TÜİK verilerine yıllara göre otomobil miktarlarının değişimi ve yakıt tiplerine göre miktarları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : TÜİK verilerine göre yıllara ve yakıt tipine göre trafiğe kayıtlı otomobil miktarları [47].

Yıl	Toplam	Benzin	Oran (%)	Dizel	Oran (%)	LPG	Oran (%)	Elektrikli - Hibrit (2)	Oran (%)	Bilinmeyen	Oran (%)
2011	8 113 111	3 036 129	37.4	1 756 034	21.6	3 259 288	40.2	47	0.0	61 613	0.8
2012	8 648 875	2 929 216	33.9	2 101 206	24.3	3 569 143	41.3	228	0.0	49 082	0.6
2013	9 283 923	2 888 610	31.1	2 497 209	26.9	3 852 336	41.5	436	0.0	45 332	0.5

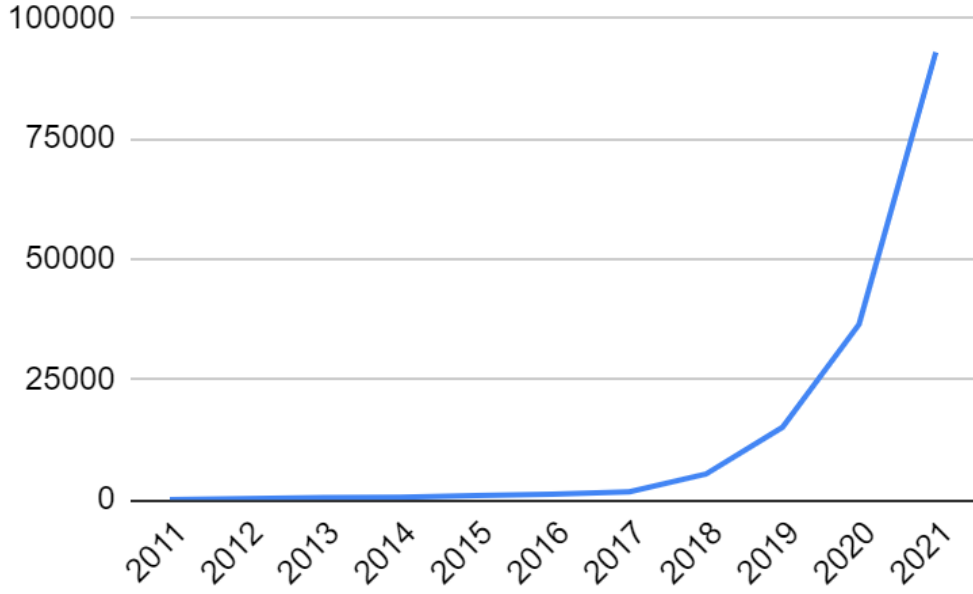
Çizelge 4.1 (devam) : TÜİK verilerine göre yıllara ve yakıt tipine göre trafiğe kayıtlı otomobil miktarları [47].

Yıl	Toplam	Benzin	Oran (%)	Dizel	Oran (%)	LPG	Oran (%)	Elektrikli - Hibrit (2)	Oran (%)	Bilinmeyen	Oran (%)
2014	9 857 915	2 855 078	29.0	2 882 885	29.2	4 076 730	41.4	525	0.0	42 697	0.4
2015	10 589 337	2 927 720	27.6	3 345 951	31.6	4 272 044	40.3	889	0.0	42 733	0.4
2016	11 317 998	3 031 744	26.8	3 803 772	33.6	4 439 631	39.2	1 160	0.0	41 691	0.4
2017	12 035 978	3 120 407	25.9	4 256 305	35.4	4 616 842	38.4	1 685	0.0	40 739	0.3
2018	12 398 190	3 089 626	24.9	4 568 665	36.8	4 695 717	37.9	5 367	0.0	38 815	0.3
2019	12 503 049	3 020 017	24.2	4 769 714	38.1	4 661 707	37.3	15 053	0.1	36 558	0.3
2020	13 099 041	3 201 894	24.4	5 014 356	38.3	4 810 018	36.7	36 487	0.3	36 286	0.3
2021	13 706 065	3 495 172	25.5	5 158 803	37.6	4 923 275	35.9	92 949	0.7	35 866	0.3

Tablodan görüldüğü üzere, benzinli otomobil oranında 2012 yılı başlangıcından 2019 Aralık ayı sonuna kadar sürekli bir düşüş, sonrasında ise yönünü yükseliş yönünde değiştirmiş bir eğilim mevcuttur. Dizel yakıtlı otomobil oranında ise bunun tam tersi olarak 2012 yılı başlangıcından 2020 yılı sonuna kadar sürekli bir artış ve sonrasında ise yönünü düşüş yönünde değiştirmiş bir eğilim görülmektedir. 2019 yılına kadar en yüksek orana sahip olan LPG yakıtlı otomobil miktarı, 2019 Aralık ayı itibariyle dizel yakıtlı araç miktarı oranının arkasında kalmıştır. Günümüzde dizel yakıtlı araçlar en yüksek orana sahiptir.

Çizelge 4.1'deki önemli bir diğer veri de elektrikli-hibrit otomobil oranıdır. İstatistiksel olarak %0'a tekabül eden elektrikli-hibrit otomobil oranı, günümüzde neredeyse %1 seviyesine ulaşmıştır. Son dönemdeki tüm dünyada görülen fosil yakıtlardan uzaklaşma ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme eğilimi paralelinde elektrikli araçlara yönelimi getirmiştir.

TÜİK verilerine göre 2011-2021 yılları arasında elektrikli-hibrit araç miktarları verisine (Çizelge 4.1) göre grafik çizildiğinde Şekil 4.1'de görüldüğü gibi elektrikli-hibrit araç miktarının 2017 yılına kadar yavaş bir artış gerçekleştirdiği ve sonrasında kayda değer şekilde hızlı bir artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.1 : 2011-2021 yılları arasında TÜİK verilerine [47] göre Türkiye'deki toplam elektrikli-hibrit araç miktarının yıllara göre değişimi.

TÜİK verilerinde elektrikli ve hibrit araçlar birlikte yer almaktadır. Bu, yapılacak olan projeksiyon çalışmasında çelişkili sonuçlar doğurabileceğinden, Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği (TEHAD) verilerine göre [10], 2015-2021 yılları arasında sırasıyla 119, 44, 77, 155, 222, 844, 2849 adet tam elektrikli araç, sırasıyla 106, 950, 4451, 3876, 11015, 16941, 20915 adet hibrit araç satılmıştır. Lojistik fonksiyon oluştururken TEHAD'ın tam elektrikli araç miktar verileri işlenecektir. TEHAD'ın verileri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

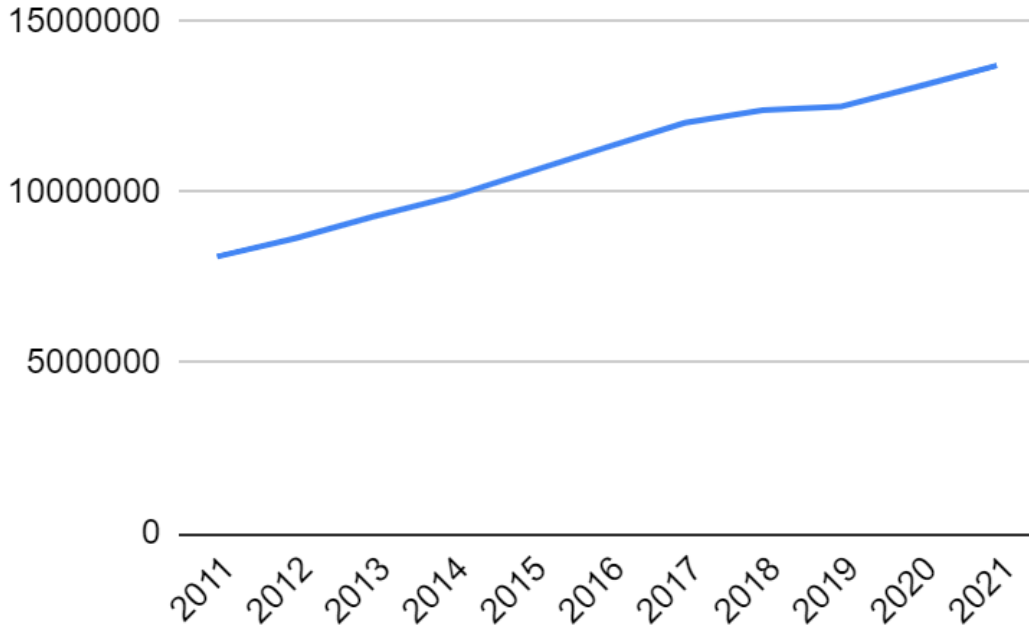
Çizelge 4.2 : TEHAD verilerine göre 2015-2021 yılları arasında kümülatif olarak tam elektrikli araç miktarı.

Yıl	Yıl Numarası	Kümülatif elektrikli araç miktarı
2015	1	119
2016	2	163
2017	3	240
2018	4	395
2019	5	617
2020	6	1461
2021	7	4310

4.3.2.2. Satürasyon noktası C için tahmin

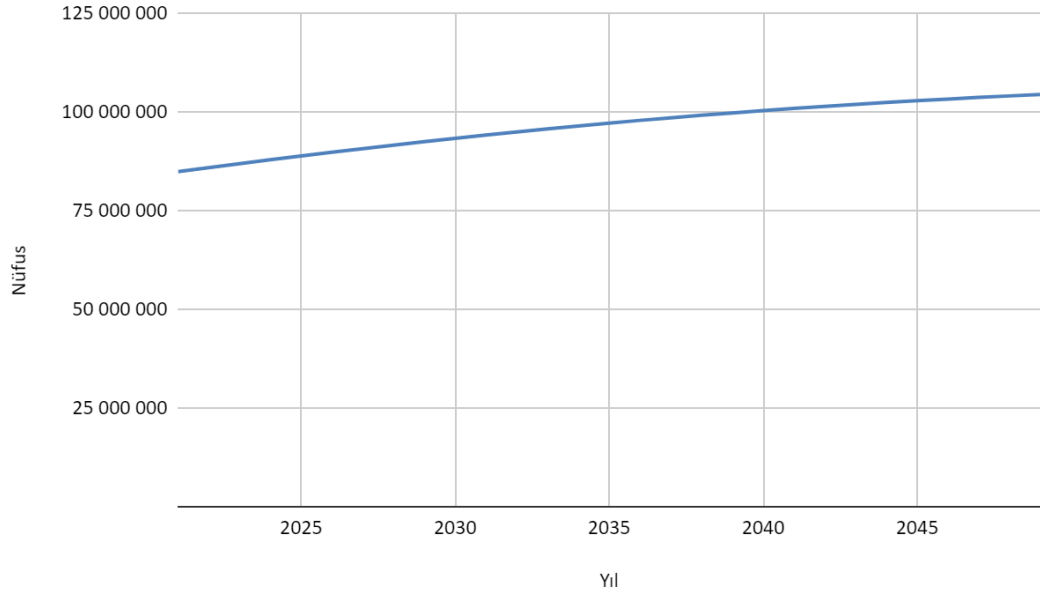
Dünyadaki elektrikli araçlara, şarj alt yapılarına ve akü sistemlerine yapılan yatırımlar göz önünde bulundurulduğunda Türkiye için elektrikli araç miktarına ilişkin satürasyon noktasının elektrikli araç dönüşümü tamamlandığında mevcut araç sayısına

eşit olacağı aşıkardır. Başka bir deyişle, C satürasyon noktası Türkiye için belirli bir zaman sonra toplam binek araç sayısına eşit olacaktır. Bunun için TÜİK verilerindeki toplam araç miktarının grafiğine göz atmak doğru olacaktır. Bu grafik Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 2 : 2011-2021 yılları arasında TÜİK verilerine [47] göre Türkiye’deki toplam araç miktarının yıllara göre değişimi.

Toplam araç miktarı verilerinin yanı sıra TÜİK’in 2018-2080 yılları için yapmış olduğu nüfus projeksiyonu da yapılacak elektrikli araç miktarı tahmin çalışması için önem arz etmektedir. TÜİK verilerine göre oluşturulmuş nüfus-yıl grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir. Ayrıca veriler incelendiğinde 2062 yılı itibariyle Türkiye’nin nüfusunun yaklaşık olarak 107.500.000 kişi civarında satürasyona gireceği öngörülmektedir. Bu durumda C satürasyon noktasını sağlayacak olan yıl 2062 yılı olacaktır.



Şekil 4.3 : 2018-2050 yılları arasında TÜİK projeksiyon tahminine [47] göre Türkiye'nin nüfus-yıl grafiği.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 birlikte incelendiğinde hem toplam araç miktarı hem de nüfus artışının belirli yıllar çerçevesinde lineer karakteristikte olduğu açıkça görülmektedir. Dolayısıyla, bu perspektif ile C satürasyon noktası tahmini için Şekil 4.2'de grafiği verilmiş olan veriye lineer bir ekstrapolasyon uygulanması doğru bir tahmin metodu olacaktır.

TÜİK verilerine göre 2011-2018 yılları arasındaki toplam araç miktarının yıllara göre değişimi için Google E-Tablolar üzerinden bir lineer eğri uydurma işlemi yapıldığında formül 4.3 elde edilmektedir. Burada x yıl numarasını (2011, 2012, 2013, ... için sırasıyla 1, 2, 3, ...) ve y ise toplam araç miktarını temsil etmektedir.

$$y = 563.182 \cdot x + 7,67E + 6 \quad (4.3)$$

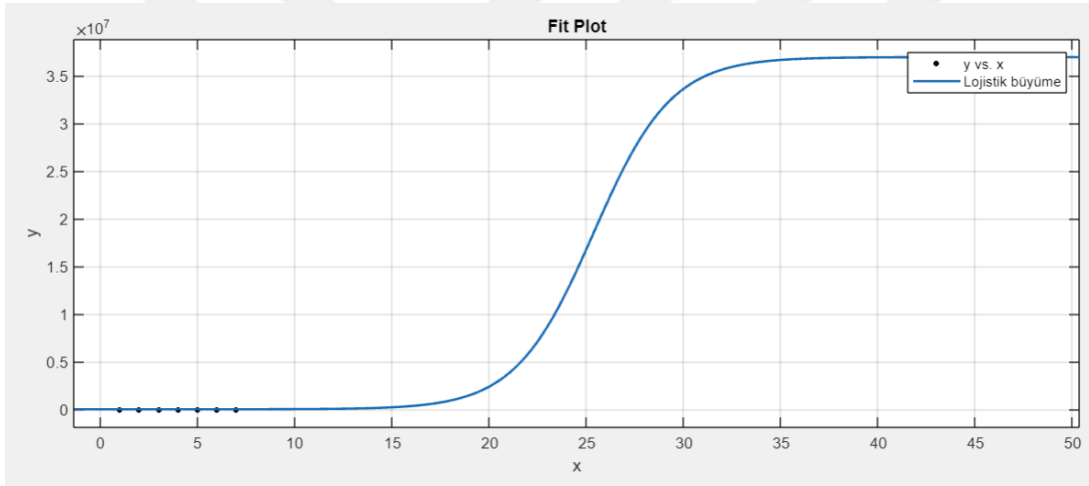
formül 4.3'te TÜİK'in nüfus projeksiyonu çalışmasına göre nüfusun satürasyona gireceği öngörülen 2062 yılına ilişkin hesaplama yapıldığında yıl numarasını temsilen (yıl numarası 2011-2062 yılları listelenerek 1-52 arası sayma sayıları ile numaralandırılmasıdır) 2062'ye denk gelen 52 üzerinden işlem yapıldığında, 2062 yılında toplamda 36.955.464 adet otomobilin kayıtlı olarak var olacağı tahmin edilebilir. Sonuç olarak, oluşturulacak lojistik büyüme fonksiyonundaki L satürasyon değerini, 2062 yılında tüm araçların elektrikli araç olacağını öngörerek 36.955.464 olarak seçmek uygun olacaktır.

4.3.2.3. Çeşitli sigmoid fonksiyonlarının (Lojistik büyüme, Gompertz ve Asimetrik Gompertz) karşılaştırılması

Literatürde birden çok sigmoid fonksiyon bulunmaktadır. Kimisi eğrinin kırılma noktasına kadar yavaş bir artış gösterirken, kimisi ise daha agresif bir yükseliş eğilimi ile hızlı bir şekilde doyuma ulaşır. Türkiye için hangi eğrinin daha doğru olduğuna karar verebilmek için Matlab ile Lojistik büyüme, Gompertz ve Asimetrik Gompertz fonksiyonlarının eldeki TEHAD verilerine göre eğri uydurma metodları ile çizilmesi, birbiri ile karşılaştırılması, yorumlanması doğru olacaktır.

I. Lojistik büyüme fonksiyonunun davranışının incelenmesi

Matlab ile eğri uydurma modülü kullanılarak lojistik büyüme fonksiyonu oluşturulduğunda Şekil 4.4'deki eğri elde edilir.



Şekil 4.4 : TEHAD verilerine (2015-2021 yılları arası) ve 2062 yılına dair öngörüye göre Matlab ile Lojistik büyüme fonksiyonu ile eğri uydurma işlemi sonucu oluşan eğri

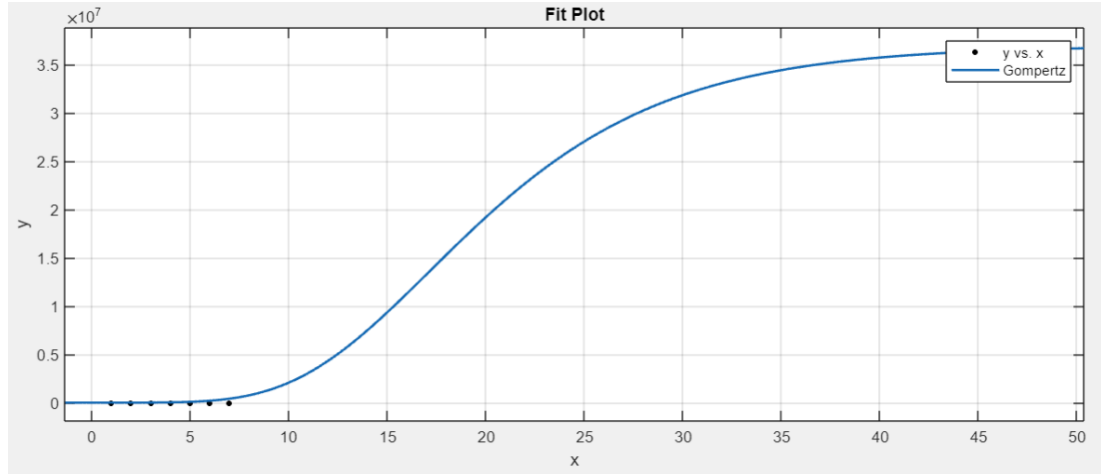
II. Gompertz fonksiyonunun davranışının incelenmesi

Gompertz fonksiyonu formül 4.4'teki gibi tanımlanır.

$$y = y_{max} \cdot \left(\frac{y_0}{y_{max}}\right)^{e^{-K \cdot x}} \quad (4.4)$$

Burada x yıl numaralarını (1-48 arası), y fonksiyonun x'e bağlı herhangi bir değerde alacağı değeri, y_{max} fonksiyonun alacağı maksimum değeri, y₀ x=0'daki değeri, K ise fonksiyonun formunu belirleyecek olan katsayıyı temsil eder. Eldeki veriler (2015-2021 yıllarına ait TEHAD elektrikli araç miktarı verileri ve 2062 yılında ulaşılabilecek tahmin edilen doyum noktası) Matlab programına aktarılarak Gompertz

fonksiyonunu eğri uydurma metodu ile lojistik büyüme fonksiyonuna şekil olarak benzer, fakat bazı farklılıkları olan bir eğri elde edilir, bu eğri Şekil 4.5’de verilmiştir.



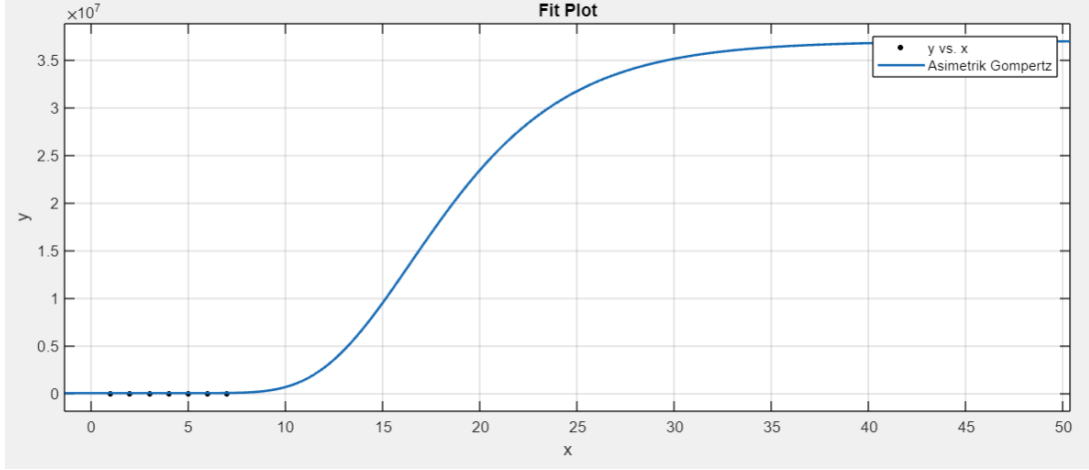
Şekil 4.5 : TEHAD verilerine (2015-2021 yılları arası) ve 2062 yılına dair öngörüye göre Matlab ile Gompertz fonksiyonu ile eğri uydurma işlemi sonucu oluşan eğri

III. Asimetrik Gompertz fonksiyonunun davranışının incelenmesi

Asimetrik Gompertz fonksiyonu formül 4.5’teki gibi tanımlanır.

$$y = y_{max} \cdot e^{-e^{-(b-c \cdot (x-d))}} \quad (4.5)$$

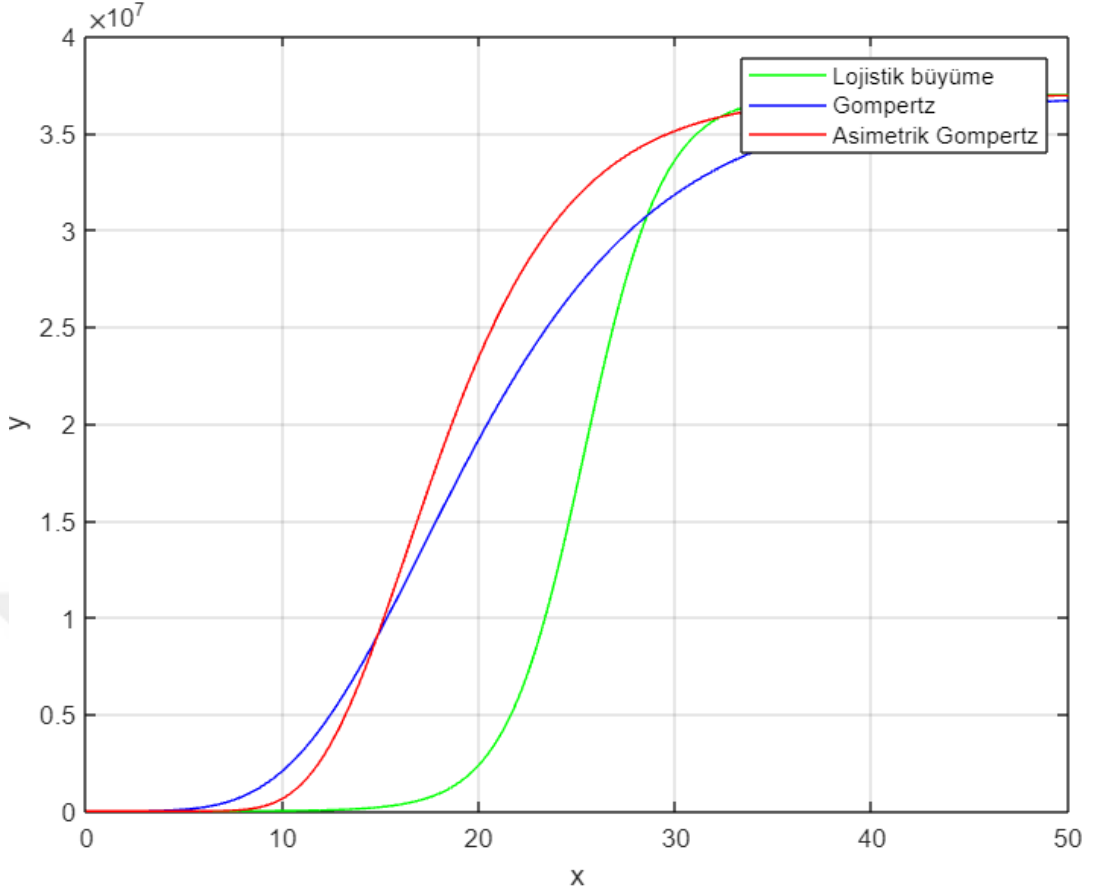
Burada x yıl numaralarını (1-48 arası), y fonksiyonun x’e bağlı herhangi bir değerde alacağı değeri, y_{max} fonksiyonun alacağı maksimum değeri, b,c, ve d katsayıları ise fonksiyonun formunu belirleyecek olan katsayıları temsil eder. Eldeki veriler (2015-2021 yıllarına ait TEHAD elektrikli araç miktarı verileri ve 2062 yılında ulaşılabilecek tahmin edilen doyum noktası) Matlab programına aktarılarak Asimetrik Gompertz fonksiyonunu eğri uydurma metodu ile uyguladığımızda yine daha önceki kısımlarda uygulanmış olan lojistik büyüme fonksiyonuna şekil olarak benzer, fakat bazı farklılıkları olan bir eğri elde edilir, bu eğri Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 : TEHAD verilerine (2015-2021 yılları arası) ve 2062 yılına dair öngörüye göre Matlab ile Asimetrik Gompertz fonksiyonu ile eğri uydurma işlemi sonucu oluşan eğri

4.3.2.4. Lojistik büyüme, Gompertz ve Asimetrik Gompertz eğrilerinin karşılaştırılması

Gompertz ve Asimetrik Gompertz yaklaşımları Lojistik büyüme yaklaşımına göre daha iyimser senaryoları göstermektedirler. Türkiye'nin elektrikli araç teknolojilerine benzer diğer teknolojik devrimleri kabul, alışma ve uygulama geçmişleri de düşünüldüğünde gerçek sonuç Lojistik büyüme, Gompertz ve Asimetrik Gompertz yaklaşımları çerçevesinde ülke koşullarına göre şekillenecektir. Şekil 4,7'de açıkça görüldüğü gibi Lojistik büyüme fonksiyonu yıl numarası 20 olan 2035 yılı sonrasında hızlı ve devrimsel bir artış karakteristiği göstermektedir. Türkiye'deki mevcut gelir dağılımı ve satınalma gücü düşünüldüğünde elektrikli araç teknolojik devrimini Avrupa ülkelerine nazaran 5-10 sene geriden takip edeceği varsayımıyla lojistik büyüme fonksiyonunun diğer yaklaşımlara doğru sonuca daha yakın olduğu çıkarımında bulunulabilir. Diğer yandan Gompertz yaklaşımı ile uydurulan eğrideki davranış hızlı bir kabullenme, elektrikli araç satınalmaya yüksek bir yatkınlık ve alım gücünün de buna paralel olarak yeni teknolojik ürünleri satınalmaya uygun olduğu durumu temsil etmektedir. Avrupa Birliği'nin ekonomik olarak öncü ülkelerinde Gompertz eğrisine benzer bir gelecek olacağı düşünülmektedir. Son olarak da Asimetrik Gompertz eğrisi yaklaşımına bakıldığında görece olarak erken evrelerde kırılganlığın gerçekleşip çok hızlı bir kabullenme ve satınalma eğilimi gözlenmektedir. Bu tip bir eğri yaklaşımı teknolojinin hızlıca yaygınlaştığı ve toplumun satınalma gücünün çok yüksek olduğu ülkelerde gözlemlenebilecektir.



Şekil 4.7 : Lojistik büyüme, Gompertz ve Asimetrik Gompertz yaklaşımlarının birlikte gösterimi

4.3.2.5. Lojistik büyüme fonksiyonunun oluşturulması

Lojistik büyüme fonksiyonu oluşturmak için C satürasyon noktası, a ve b katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. C değerinin 36.955.464 adet olacağı öngörülmüştür.

Lojistik büyüme fonksiyonuna göre i başlangıç değeri formül 4.6'daki gibidir;

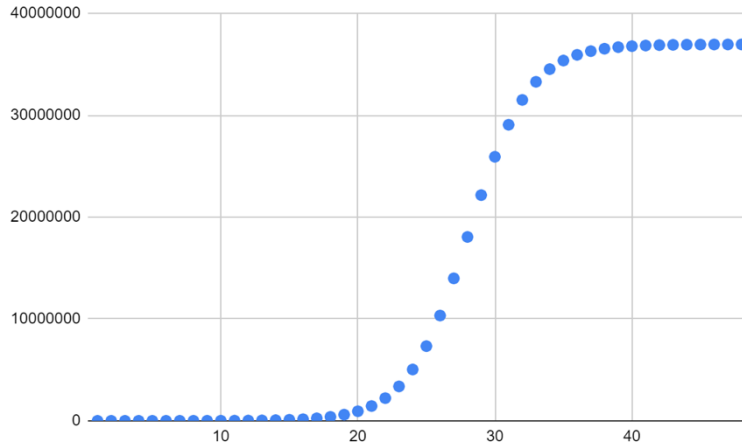
$$i = \frac{C}{(1+a)} \quad (4.6)$$

Bu durumda TEHAD verilerindeki ilk yıl 2015 yılı 1 numaralı yıl olarak kabul edilirse, i=119 adettir. Denklemden a katsayısı hesaplanır: a=310.549

Anlamlı ve güncel veriler incelendiğinde, ve bu temel üzerine lojistik büyüme fonksiyonu oluşturulduğunda b katsayısı için deneme yanılma metodu kullanılacaktır. Burada b öyle bir değer olmalıdır ki, onunla oluşturulan lojistik büyüme fonksiyonu hem TEHAD verilerinin ilk yıllarındaki elektrikli araç miktarlarına yakın seyretmeli, hem de C satürasyon noktasına yaklaştıkça formül 4.2 ile hesaplanan toplam araç

miktarına yakın bir sonuç vermesi gerekir. Bu bağlamda deneme yanılma yöntemi ile grafiksel inceleme yapıldığında $b=0,425$ değerinin uygun olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak C, a ve b değerleri tahmin, hesaplama ve deneme yanılma yöntemleri ile bulunarak lojistik büyüme fonksiyonu formül 4.2 formunda oluşturulmuştur. Oluşturulan bu lojistik büyüme fonksiyonu Şekil 4.8’te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Oluşturulan lojistik büyüme fonksiyona göre elektrikli araç miktarının 2015-2062 (yıl numaraları 1-48) yıllarına göre grafiği.

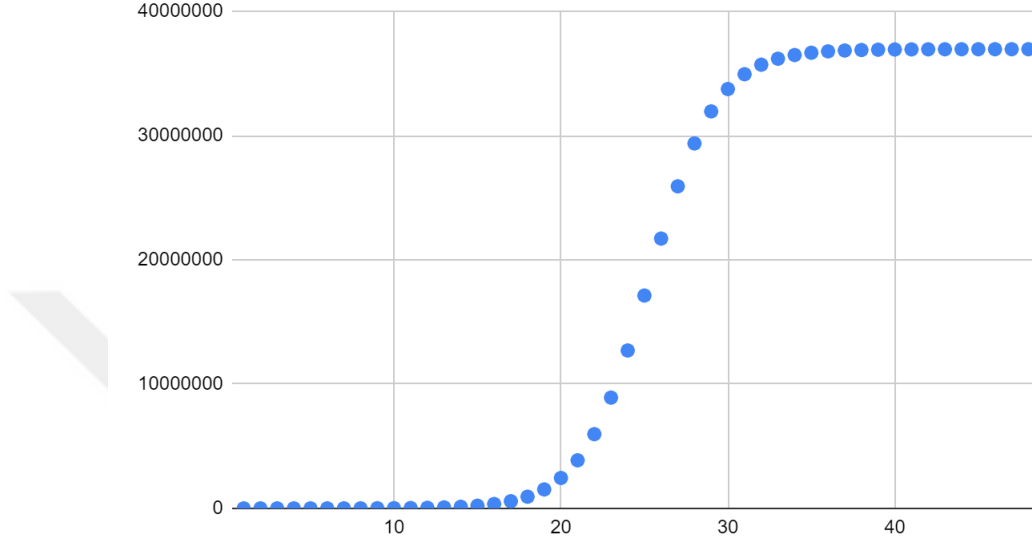
4.3.2.6. İyimser ve kötümser senaryolar

$b=0,425$ katsayısı için yapılmış olan projeksiyon çalışması ideal durumu temsil etmektedir. İdeal durum tanımını aşağıdaki şartlar altında kabul edebiliriz:

- Nüfus TÜİK’in projeksiyon çalışmalarına uygun şekilde artacaktır,
- Toplam araç miktarı TÜİK’in projeksiyon çalışmasına uygun olarak artacaktır.
- Otomobil teknolojisi trendlerini kökünden değiştirecek bir buluş, icat, veya bilimsel paradigma değişimi yaşanmayacak olması.

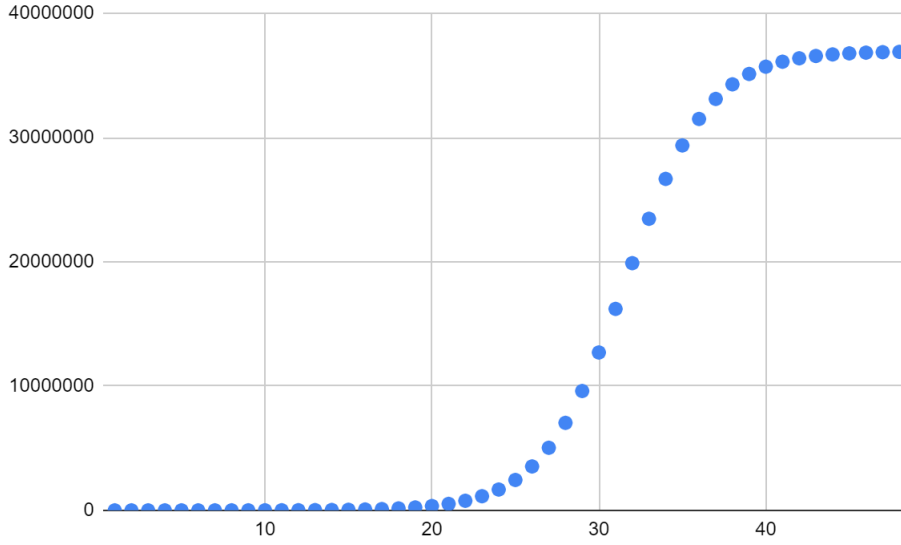
Bu bağlamda kötümser senaryoyu ele aldığımızda ise b katsayısının ideal değer olan $b=0,425$ noktasından negatif yönde uzaklaşması düşünülecektir. Dolayısıyla daha ileri yıllarda saturasyona girecek bir davranış akla gelecektir. İyimser senaryoda ise b katsayısının $b=0,425$ noktasından pozitif yönde uzaklaşması düşünülecek ve elektrikli araç geçişinin daha erken yıllarda tamamlanması söz konusu olacaktır.

İyimser senaryo incelendiğinde, devletin karar mekanizmalarının elektrikli araç satın alımını destekleyici teşvik paketleri devreye alması, toplumun alım gücünün beklenenden daha iyi seyretmesi, global ham madde, ara malzeme ve bitmiş ürün tedarik süreçlerinde beklenenden daha iyi gelişmelerin yaşanması durumunda $b=0,5$ değeri gerçekleştirilebilir ve Şekil 4.9'teki gibi bir davranış sergiler.



Şekil 4.9 : Oluşturulan lojistik büyüme fonksiyonuna göre elektrikli araç miktarının 2015-2062 (yıl numaraları 1-48) yıllarına göre iyimser senaryoda ($b=0,5$) gerçekleştiği durumdaki grafiği.

Kötümser senaryo gerçekleşmesi durumunda, alım gücünün beklenenin altında seyretmesi, pandemi, global dünyada tedarik sıkıntısı, teknoloji üretiminde yaşanabilecek sıkıntılar meydana gelebilir. Bu durumda b değeri $b=0,4$ değerini alabilir ve Şekil 4.10'daki davranış gerçekleşir.



Şekil 4.10 : Oluşturulan lojistik büyüme fonksiyonuna göre elektrikli araç miktarının 2015-2062 (yıl numaraları 1-48) yıllarına göre kötümser senaryoda ($b=0,4$) gerçekleştiği durumdaki grafiği.

4.3.2.7. 2035 yılına kadarki yakın döneme ait tahmin çalışması

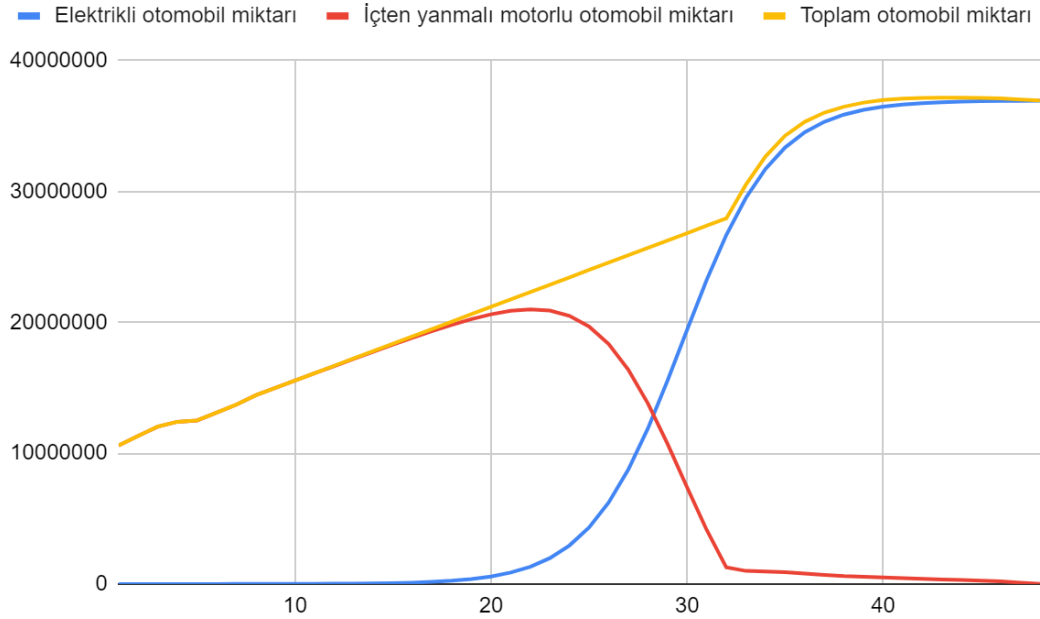
Türkiye için yapılmış olan lojistik büyüme fonksiyonu bazlı projeksiyon çalışması daha öncce bahsedilmiş olan sebeplerden ötürü yakın geleceğe değil, 2050 - 2060 yılları için doğruya yakın sonuç vermektedir. Fakat yakın dönem için uygulanabilecek başka tahmin metodları da bulunmak ile birlikte bazı Avrupa ülkeleri ile Türkiye'nin benzerlik göstereceği açıkça ortadadır.

Çeşitli ülkeler için yapılmış olan projeksiyon çalışması [37] kapsamında bazı Avrupa ülkelerine ilişkin gelecek tahminlerinde bulunulmuştur. 2035 yılı sonu itibariyle toplam elektrikli araç miktarının toplam araç miktarına oranının, Avustralya'da %40, Avusturya'da %60,9, Belçika'da %82,8, Brezilya'da %14,9, Almanya'da %66,3, İtalya'da %39,3, Hollanda'da %55,1, İspanya'da %47,1 olacağı öngörülmektedir [37]. Türkiye'nin de ekonomik durumu, satın alma gücü, teknoloji ilgisi düşünüldüğünde 2035 yılı için toplam elektrikli araç miktarının %30 ile %50 arasında bir miktarının elektrikli-hibrit araç olacağı tahmin edilebilir.

4.3.2.8. İçten yanmalı motorlu otomobillerin azalış eğilimi

Elektrikli araçların yaygınlaşması, ve artık ana otomobil tipi oluşu ile birlikte içten yanmalı motora sahip otomobillerde de aynı şekilde bir düşüş eğilimi beklenmektedir. Bu azalış eğiliminin, yapılan projeksiyon çalışması bağlamında Şekil 4.11'deki gibi olacağı öngörülmektedir. Bu grafikte lojistik büyüme fonksiyonu metodu ile $b=0,425$

katsayısının seçilmiş olduğu duruma göre elektrikli ve içten yanmalı motorlu otomobil miktarları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.11 : Yıl numaralarına göre elektrikli otomobil, içten yanmalı motorlu otomobil ve toplam otomobil miktarlarının değişimi

4.3.2.9. CO₂ salımı konusu

İçten yanmalı araçların fosil yakıt temeli ile çalışma prensibi düşünüldüğünde yüksek miktarda CO₂ salımı sağladığı açıkça görülmektedir. Bir içten yanmalı motora sahip aracın üretiminden, kullanıma sunulmasına ve kullanım ömrünü tamamlamasına kadar uzanan süreçte sürekli olarak fosil yakıt tükettiği düşünüldüğünde bu tip araçların sürekli olarak CO₂ emisyonu sağladığı görülmektedir. Diğer yandan elektrikli araçların üretimi tamamlandıktan itibaren kullanım ömrünün tamamı karbon-nötr olacaktır açıkça ortadadır. İklim değişikliğinin ve sürdürülebilir çevresel koşulların oluşturulmasının giderek önem kazandığı 21. Yüzyılda elektrikli araçlara geçişin büyük fayda sağlayacağı açıkça ortadadır. Bu yönde yapılan konferanslardan yakın geçmişteki en önemlilerinden biri Paris İklim Sözleşmesi (2015) olarak öne çıkmaktadır. Türkiye de bu sözleşmenin bir tarafıdır ve belirlenmiş karbon salımı hedeflerine yönelik yasalar üretmekte ve hedefler belirlemektedir.

2016 yılının verilerine göre [48] ilk beşi Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan, Rusya ve Japonya'nın oluşturduğu CO₂ salımına göre yapılmış olan sıralandırmada Türkiye yaklaşık olarak 368 milyon ton CO₂ salımı ile onyedinci sıradadır. Paris Antlaşması'na taraf olması ile birlikte Türkiye'nin de taahhüt etmiş olduğu karbon nötr olma yol haritası bulunmaktadır.

Çin'de yakın dönemde yapılmış olan bir araştırmaya [49] göre, elektrikli araçların, yakıt hücreli araçların ve içten yanmalı motorlu araçların üretimden, kullanım ve kullanım ömrünün sonlanmasına kadarki dönemdeki karbon salımı incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre araç yaşam döngüsü ölçeğinde analiz yapıldığında elektrikli araçların sera gazı etkilerinin yakıt hücreli araçlara kıyasla %40, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla ise %20 daha yüksek olacağı vurgulanmıştır. Bu çalışmada araçların fiziksel yaşam döngüsü, motor gibi önemli parçaların zaman içindeki durumu, bakım onarım ihtiyacı, yakıt ve enerji kaynağı bağlamında tüm ürün yaşam döngüsü boyunca alınması gereken önlemler, elektrikli araç bataryalarının şarj verimliliği ve pillerin yaşam döngüsü, bakım, onarım, değişim işlemleri, araçların kat edeceği yollar da hesaba katılarak çok girdili karmaşık bir problem analiz edilmiştir.

Çin'in 2025 hedeflerinde yer alan elektrikli araçlara ilişkin planlarının ekonomik ve karbon emisyonu açısından değerlendirildiği bir akademik çalışmada [50] hesaplanabilir genel denge (CGE: Computational General Equilibrium) ve girdi çıktı (IO: Input Output) metodları kullanılarak analiz yapılmıştır. CGE modeli beklenmeyen çevresel sonuçlara sebep verebilecek ekonomik aktivitelerin modellenmesi için kullanılmış, IO modeli ise Kyoto protokolüne göre CO₂ emisyonu hesaplaması için kullanılmıştır. İki yöntemi entegre ederek CO₂ salımını hesaplamayı araştıran çalışmada 2025 yılında Çin'de satışı gerçekleşecek araçların %25'inin elektrikli araçlardan oluşacağı varsayımı yapılmıştır. Sonuç olarak içten yanmalı motorlu araç üretim tesislerinin elektrikli araç üretim tesislerine dönüştürülmesinin ihmal edilebilir seviyelerde gayrisafi milli hasıla etkisi olacaktır. Öte yandan bu dönüşüm esnasında içten yanmalı motorlu araç üretiminin azalacağı ve elektrikli araç üretiminin artacağı düşünülürse, CO₂ salımındaki artış görece az olacaktır.

Genel olarak literatüre bakıldığında, hem üretim tesislerine ilişkin teknik altyapının kurulmasında, hem bataryaların üretimi ve kullanım ömürleri düşünüldüğünde, hem de son ürün olan araçların üretimi ve yaşam döngüsü düşünüldüğünde elektrikli

araçların günümüz teknolojisinde, içten yanmalı motorlu araçlara göre karbon salımı bağlamında çevreye daha zararlı olduğu görülmektedir. Fakat bu noktada salımın yapıldığı bölgelerin önemi göz ardı edilemez. Elektrikli araçlara geçiş ile birlikte, karbon emisyonu tamamen üretim tesisi ve endüstriyel bölgelere geçmiş olmaktadır; bu durumda şehir merkezlerine ve yaşam alanlarına oranla çok daha katı kuralları ile yönetilen bu bölgelerin kontrolü, filtrasyonu, ve öngörülecek önlemlerine hızlıca uygulanabilirliği çok daha yüksektir. Açıkça ortadadır ki, endüstriyel bir bölgede, organize sanayi bölgeleri yönetimlerinin de hızlı karar mekanizmalarıyla birlikte karbon salımına karşı önlemlerini hayata geçirmek, bir şehir merkezine, kasabaya, tatil bölgelerine, ve yaşam alanlarına kıyasla daha uygulanabilir olacaktır. Böylelikle, karbon salımının yaşam alanlarında var oluşunu, bu sorumluluğu endüstri bölgelerine yükleyerek yeni bir döngü tasarlanmış olacaktır. Elektrikli araçlar, fotovoltaik sistemler, rüzgar enerji sistemleri, ısı pompaları birlikte düşünüldüğünde hem birbirini enerji üretimi ve tüketimi noktasında destekleyen, hem de karbon salımını yaşam bölgelerinden uzaklaştırma noktasında birbirine paralel çalışan sistemler olarak öne çıkmaktadır.

4.3.2.10. Ortalama kat edilen yol ve CO₂ salımı ilişkisi

TÜİK verilerine göre [51] Türkiye’de 2019 yılında bir araç ortalama 14.236 kilometre, 2020 yılında ise toplam 22.115.821 adet araç ortalama 15.593 kilometre yol katetmiştir TÜİK’e ait geçmiş yıl verileri de incelendiğinde ortalama katedilen yol her geçen yıl yavaş bir artış eğilimindedir. Katedilen yol kullanıcıların alım güçlerine göre toplu taşıma ve bireysel araçlar arasında seçim yapmaları, yakıt fiyatlarındaki değişim, şahısların şehir dışında yaşayarak işe gidiş geliş mesafelerindeki değişim de düşünüldüğünde temelde karmaşık bir problemdir. Fakat aynı verilere ait detaylar incelendiğinde otomobil kategorisinde ortalama katedilen yol geçmiş yıllar da incelendiğinde ortalama yaklaşık olarak yıllık 13.200 kilometre olduğu görülmektedir ve yine otomobil özelinde yıllar arasında çok büyük farklar görülmemektedir. Bu sebeple otomobil kategorisi özelinde ortalama katedilen yol bağlamında geleceğe yönelik bir tahminde bulunmak için 13.200 kilometre olan yıllık ortalama katedilen mesafenin baz alınması doğru bir tercih olacaktır.

Lojistik büyüme fonksiyonu temelli tahmin çalışmasının sonucuna göre Türkiye’deki toplam araç sayısının saturasyona gireceği 2062 yılında toplam 36.955.464 adet otomobil olacağı öngörülmüştür.

2020 yılında İzmir Demokrasi Üniversitesi bünyesinde yapılmış olan akademik çalışmada [52], 2016 yılındaki gözlemlere dayanarak hesaplanan verilere göre yine 2016 yılındaki otomobil yakıt tipi dağılımına göre Türkiye’deki otomobiller kilometre başına 187,15 g CO₂ salımı yapmıştır. Yakıt dağılımının, 2016 yılında yapılmış olan bu çalışma ile paralel devam etmesi durumunda 2062 yılında 36.955.464 adet otomobilin 69.162,15 ton CO₂ salımı yapacağı hesaplanabilir. Tahmin, literatür bilgisi ve hesaplamalardan oluşan bu veriler Çizelge 4.3’te verilmiştir.

I. Senaryo 1: 2016 yılındaki otomobil yakıt tipi dağılımının varlığını koruması durumu

2016 yılındaki otomobil yakıt tipi dağılımının 2062 yılında varlığını koruması durumunda araçların ulaşım amaçlı kullanımında yakıt tüketimleri sonucunda oluşacak CO₂ salımı 69.162,2 ton/km olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3 : Tahmin, literatür bilgisi ve hesaplamalardan oluşan 2016 yılına ait kayıtlı otomobillerin yakıt tipi dağılımları, 2016 yılı otomobil ortalama CO₂ salımı, 2062 yılı toplam araç miktarı tahmini ve 2062 yılı toplam otomobil CO₂ salımı tahmini.

2016 yılında kayıtlı otomobillerin yakıt tipi dağılımları [53]	2016 yılı otomobil ortalama CO ₂ salımı (g) [52]	2062 yılı toplam araç miktarı tahmini	2062 yılı toplam otomobil CO ₂ salımı tahmini (ton)
Benzin: %26,8 Dizel: %33,6 LPG: %39,2 Elektrikli-hibrit: ~%0	187,15	36.955.464	69.162,15

II. Senaryo 2: 2062 yılında otomobillerin tamamının tam elektrikli araçlardan oluşması durumu

2062 yılında Türkiye’deki otomobillerin tamamının tam elektrikli araç olması durumunda toplamda 36.955.464 adet aracın kullanımı esnasında herhangi bir emisyon olmayacağından otomobillerin kullanımı esnasında CO₂ salımı sıfır olacaktır. Ancak tüm bu otomobillerin şarj olurken tüketeceği elektrik enerjisinin Türkiye’deki elektrik enerjisi üretim tesislerinden konvansiyonel ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edileceği düşünüldüğünde incelenmesi gereken farklı olgular ortaya çıkmaktadır: Türkiye’deki elektrik enerji üretiminin 2020 yılındakine yakın enerji üretim kaynağı dağılımına ve dolayısıyla 2020 yılına ait elektrik enerjisi üretimi kaynaklı CO₂ salımı değerine (0,555 kg CO₂ / kWh [54]) sahip olması, tamamı tam elektrikli araç olacağı öngörülen otomobillerin şarj operasyonunun %50’sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması, tamamı tam elektrikli araç olacağı

öngörülen otomobillerin şarj operasyonunun %75'inin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması, tamamı tam elektrikli araç olacağı öngörülen otomobillerin şarj operasyonunun %100'ünün yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması.

Cumhurbaşkanlığı yıllık programı verilerine göre [55], 2020 yılında yenilenebilir kaynakların elektrik tüketimindeki payı %42,8 olarak verilmiştir. Dolayısıyla CO₂ salımına sahip elektrik tüketimi %57,2 olarak hesaplanabilir. Bir elektrikli aracın 100 kilometrede 20 kWh [56] elektrik enerjisi tüketimi olduğu ve Türkiye'de bir aracın yılda ortalama yaklaşık 13.000 kilometre yol katettiği düşünülürse [57], bir elektrikli otomobilin şarjı için gereken elektrik enerjisi miktarının yıllık toplam 260 kWh olarak hesaplanmasının yanı sıra CO₂ salımı da yıllık yaklaşık 0,144 ton olarak hesaplanır. Bu durumda 2062 yılında 36.955.464 adet elektrikli otomobilin toplam CO₂ salımı 5,32 Mt olarak hesaplanmaktadır. Başka bir deyişle, 2062 yılında elektrikli otomobil şarj operasyonu için kullanılacak elektrik enerjisinin, 2020 yılındaki kaynak dağılımına eşdeğer bir durumda olması durumunda elektrikli otomobil şarjı kaynaklı CO₂ salımı yıllık toplam 5,32 Mt CO₂ olarak hesaplanmaktadır. Eğer elektrikli araçların şarj işlemi için gereken elektrik enerjisinin tamamı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanırsa bu değer sıfır olacaktır. Cumhurbaşkanlığı yıllık programına [55] göre, 2020 yılında tüketilen elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanma oranı %42,8, ve dolayısıyla CO₂ salımına sahip kaynaklardan elektrik enerjisi üretimi ise %57,2 olarak kayda geçmiştir. Bu durumda 2062 yılında, yenilenebilir enerji kaynağı oranı %50 olursa 4,65 Mt, %75 olursa 2,325 Mt, %100 olduğunda ise sıfır CO₂ salımı olacaktır.



5. SONUÇ VE YORUMLAR

Devrimsel nitelik taşıyan teknolojik gelişmelerin toplumda kabul görme ve uygulanma eğilimleri incelendiğinde elektrikli otomobillerin miktarlarının da bu çerçevede sigmoid fonksiyonlarının davranışına uygun olarak gelişeceği öngörülmüştür. Sigmoid fonksiyonlardan Lojistik büyüme, Gompertz ve Asimetrik Gompertz metodları eldeki TEHAD verilerine uygulanarak davranışları incelenmiştir. Karşılaştırılan bu fonksiyonlar arasında Lojistik büyüme fonksiyonunun Türkiye'ye daha uygun olduğu görülmüştür. Lojistik büyüme fonksiyonu TÜİK ve TEHAD'a ait gerek geçmiş gerçek veriler, gerekse de toplam araç miktarına yönelik projeksiyon çalışmalarına göre ilgili katsayıların seçilmesi ile oluşturulmaktadır. Sonuç olarak, ilgili fonksiyon formül 5.1'deki gibi oluşturulmuştur. Burada x, 1-48 (2015-2062 yılları) arasında yıl numaralarını, ve y ise ilgili yıl numarasına karşılık gelen toplam elektrikli araç miktarını temsil etmektedir.

$$y = \frac{36.955.464}{1+310.549 \cdot e^{-0,425 \cdot x}} \quad (5.1)$$

Bu bağlamda sırasıyla 2050 ve 2060 yılları için lojistik büyüme fonksiyonu formülü işletildiğinde sırasıyla 34.525.684 ve 36.918.403 adet elektrikli aracın Türkiye kayıtlarında bulunacağı öngörülmektedir. 2062 yılında, yenilenebilir enerji kaynağı oranı %50 olursa 4,65 Mt, %75 olursa 2,325 Mt, %100 olduğunda ise sıfır CO₂ salımı olacaktır.

Projeksiyon çalışmasının başlangıç ve planlama evresinde sigmoid fonksiyonlardan lojistik büyüme fonksiyonunun satürasyon noktasına yaklaştıkça daha doğru sonuçlar vereceği öngörülerek kabul edilmiştir. Bu bağlamda 2050 ve 2060 yıllarında Türkiye'de araçların kayda değer çoğunluğunun elektrikli araçlardan oluşacağı tahmin edilmektedir. Lojistik büyüme fonksiyonunun karakteristiğini belirleyen b katsayısı dünyada gerçekleşen ekonomik, toplumsal ve davranışsal esaslara göre değişkenlik gösterebilir. Savaş, pandemi, iklim değişikliği gibi çağımızın büyük problemleri ele alındığında b katsayısının önümüzdeki yıllarda dinamik bir seyir sergileyeceği aşıkardır. Bu nedenle bu projeksiyon çalışmasında görece orta ve uzun

vade tahmin çalışması yapılarak doğruya daha yakın bir çalışma yapmak hedeflenmiştir. Bu verilerin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi orta ve uzun vadede yapılacak şarj altyapı çalışmalarına destek olabilecek, elektrik enerji talebinin belirlenmesi çalışmalarına yol gösterecek ve elektrik dağıtım şebekesine yapılacak bakım ve yatırım çalışmalarına yön verecektir.



KAYNAKLAR

- [1] **How do all-electric cars work?** (2021). Erişim: 8 Mart 2022, <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
- [2] **Aggarwal, S. ve Singh, A. K.** (2021). Electric vehicles the future of transportation sector: A review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*.
- [3] **Gaton, B.** (2018). The ICE age is over: Why battery cars will beat hybrids and fuel cells. *The Driven*. Erişim: 8 Mayıs 2022, <https://thedriven.io/2018/11/14/the-ice-age-is-over-why-battery-cars-will-beat-hybrids-and-fuel-cells>
- [4] **Types of electric vehicles.** (t.y.). Erişim: 8 Mayıs 2022, <https://www.agnewcars.com/pages/electric/types-of-electric-vehicles/>
- [5] **Electric cars with the longest range.** Erişim: 16 Mart 2022, <https://www.edfenergy.com/electric-cars/longest-range>
- [6] **Url-1** <<https://twitter.com/elonmusk/status/931407490889084928>>, erişim tarihi 12.05.2022.
- [7] **Tesla roadster.** Erişim: 21 Nisan 2022, <https://www.tesla.com/roadster>
- [8] **IEA, Global electric passenger car stock, 2010-2022.** Erişim: 5 Temmuz 2022, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>
- [9] **Url-2** <<https://www.iea.org/articles/global-ev-data-explorer>> erişim tarihi 12.05.2022.
- [10] **2021 yılı elektrikli ve hibrid satış rakamları belli oldu.** TEHAD Türkiye Elektrikli ve Hibrid Araçlar Derneği.
- [11] **Das, H. S., Rahman, M. M., Li, S. ve Tan, C. W.** (2020). Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109618.
- [12] **Electric Power Research Institute** (2019). *Consumer Guide to Electric Vehicle Charging*. (Rapor No: 3002016961).California: EPRI, Electric Power Research Institute.
- [13] **Url-3** <https://www.mobilityhouse.com/int_en/knowledge-center/charging-cable-and-plug-types>, erişim tarihi 12.06.2022.
- [14] **Khaligh, A. ve Dusmez, S.** (2012). Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(8), 3475-3489.

- [15] **Rippel, W. E.** (1990). *U.S. Patent No. 4,920,475*. Integrated Traction Inverter and Battery Charger Apparatus.
- [16] **Rippel, W. E. ve Cocconi, A. G.** (1992). *U.S. Patent 5,099,186*. Integrated Motor Drive and Recharge System.
- [17] **Sul, S. ve Lee, S.** (1995). An integral battery charger for four-wheel drive electric vehicle. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(5), 1096-1099.
- [18] **Solero, L.** (2001). Nonconventional on-board charger for electric vehicle propulsion batteries. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 50 (1), 144-149.
- [19] **Morsy Nour Said, S. M., Ali, A. ve Farkas, C.** (2019). Smart charging of electric vehicles according to electricity price. *2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*. (s. 432-437) Aswan, Egypt: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [20] **Url-4** <<https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/turkey>> erişim tarihi 12.02.2022.
- [21] **Electric vehicle charging network in Europe: An accessibility and deployment trends analysis.** Giacomo Falchetta Michel Noussan.
- [22] **Url-5** <<https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/map/maps.html?layer=11,12,13,14,15>> erişim tarihi 18.02.2022.
- [23] **Electric vehicles and charging infrastructure in Turkey.** An overview Omer "Gonül" a,b , A. Can Duman a,b , Onder "Güler.
- [24] **Al-Alawi, B. M. ve Bradley, T. H.** (2013). Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 190-203.
- [25] **Agent-based modeling in marketing.** Guidelines for rigor.
- [26] **Development of an agent-based model for regional market penetration projections of electric vehicles in the United States.**
- [27] **Electric vehicle cost, emissions, and water footprint in the United States.** Development of a regional optimization model Mehdi Noori a, Stephanie Gardner b, Omer Tatari a,
- [28] **Noori, M., Kucukvar, M. ve Tatari, O.** (2015). Economic input-output based sustainability analysis of onshore and offshore wind energy systems. *Int J Green Energy*, 12(9): 939.
- [29] **Noori, M., Kucukvar, M. ve Tatari, O.** (2012). Environmental footprint analysis of on-shore and off-shore wind energy technologies. *2012 IEEE ISSST int. Symp. Sus- Tain. Syst. Technol. Co-organized with IEEE Soc. Soc. Implic. Technol.*, Boston, MA.
- [30] **Noori, M., Kucukvar, M. ve Tatari, O.** (2013). A macro-level decision analysis of wind power as a solution for sustainable energy in the USA. *Int J Sustain Energy*, 1-16.

- [31] **Nam, B., Golestani, B., Noori, M., Tatari, O. ve An, J.** (2014). Investigation of reflective cracking mitigation techniques- final report.
- [32] **Noori, M.** (2013). Sustainability assessment of wind energy for buildings.
- [33] **Al-Deek, H., Consoli, F., Rogers, J., Tatari, O., Alomari, A., Sandt, A., et al.** (2014). Applications of transit signal priority for transit service. Final Report. National Center for Transportation Systems Productivity and Management.
- [34] **Noori, M., Tatari, O., Nam, B., Golestani, B. ve Greene, J.** (2014). A stochastic optimization approach for the selection of reflective cracking mitigation techniques. *Transp Res Part A Policy Pract*, 69, 367-378. doi:10.1016/j.tra.2014.09.006 .
- [35] **Kucukvar, M., Noori, M., Egilmez, G. ve Tatari, O.** (2014). Stochastic decision modeling for sustainable pavement designs. *Int J Life Cycle Assess*, 1-15 .
- [36] **AFLEET** (2013). Alternative fuel life-cycle environmental and economic transportation: 2013.
- [37] **Rietmann, N., Hügler, B. ve Lieven, T.** (2020). Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and the consequences for worldwide CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121038.
- [38] **Coffman, M., Bernstein, P. ve Wee, S.** (2015). Factors affecting EV adoption: A literature review and EV forecast for Hawaii. *Electric Vehicle Transportation Center*, 1-36.
- [39] **Long term characterization of the vehicle stock in Turkey.**
- [40] **A new era of sustainable transport: An experimental examination on forecasting adoption behavior of EVs among Malaysian consumer.**
- [41] **Update on electric vehicle uptake in European cities.**
- [42] **Nogueiraa, T., Sousaa, E. ve Alvesa, G. R.** (t.y.). Electric vehicles growth until 2030: Impact on the distribution network power.
- [43] **Bacelar, R.** (2020). Os 10 carros elétricos mais vendidos em Portugal em 2019-4gnews. *4gnews*. Erişim: 10 Mayıs 2022, <https://4gnews.pt/carros-eletricos-maisvendidos-portugal/>
- [44] **ACAP** (2021). Estatísticas. Associação automóvel de Portugal. ACAP. Erişim: 12 Nisan 2022, <https://acap.pt/pt/estatisticas>
- [45] **UVE** (2021). Vendas arquivos - UVE. Vendas de veículos elétricos. Erişim: 10 Mart 2022, <https://www.uve.pt/page/category/veiculo-eletrico/vendas/>
- [46] **Url- 5** <<https://dre.pt/dre/detalhe/resolucao-conselho-ministros/53-2020-137618093>> erişim tarihi 10.02.2022.
- [47] **Url-6** <<https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=2021&dil=1>>, erişim tarihi 08.01.2022.
- [48] **Url-7** <<https://www.worldometers.info/co2-emissions/co2-emissions-by-country/>> erişim tarihi 08.01.2022.

- [49] **Yang, Z., Wang, B. ve Jiao, K.** (t.y.). Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China.
- [50] **Guo, Z., Li, T., Shi, B. ve Zhang, H.** (2022). Economic impacts and carbon emissions of electric vehicles roll-out towards 2025 goal of China: An integrated input-output and computable general equilibrium study.
- [51] **Url-8** <<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tasit-kilometre-Istatistikleri-2020-45784#:~:text=T%C3%9C%C4%B0K%20Kurumsal&text=T%C3%B Crkiye'de%202020%20y%C4%B1l%C4%B1nda%20trafi%C4%9Fe,9'u%20otob%C3%BCsler%20taraf%C4%B1ndan%20yap%C4%B1ld%C4%B1>> erişim tarihi 08.01.2022.
- [52] **Coşkun, C. ve Oktay, Z.** (t.y.). Carbon footprint prediction of vehicle usage in Turkey, Izmir Democracy University, Izmir, Turkey.
- [53] **Url-9** <<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2016-21601>> erişim tarihi 18.02.2022.
- [54] **Url-10** <<https://meslekihizmetler.csb.gov.tr/elektrik-enerjisinin-birincil-enerji-ve-sera-gazi-salimi-katsayilari-2021-yilindan-itibaren-kullanilmak-uzere-guncellenmistir-duyuru-411795>> erişim tarihi 08.06.2022.
- [55] **Url-11** <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2020/11/2021_Yili_Cumhurbaskanligi_Yillik_Programi.pdf> erişim tarihi: 20.04.2022.
- [56] **Url-12** <<https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car>> erişim tarihi: 10.05.2022.
- [57] **Url-12** <<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tasit-kilometre-Istatistikleri-2020-45784>> erişim tarihi: 11.05.2022

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Batuhan İpek

--

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 2010