

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FOTOVOLTAİK GÜÇLÜ RAYLI TOPLU TAŞIMA ARAÇLARI
(TRENLER) İÇİN PERFORMANS MODELLEME VE
DENEYSEL ÇALIŞMA**

DARIA PROKOPENKO

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

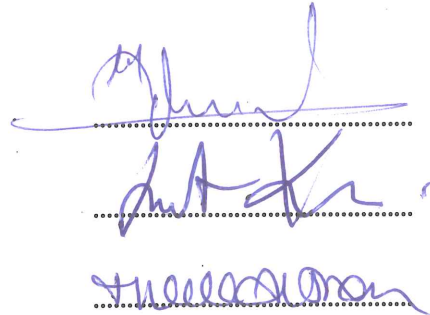
FOTOVOLTAİK GÜÇLÜ RAYLI TOPLU TAŞIMA ARAÇLARI
(TRENLER) İÇİN PERFORMANS MODELLEME VE
DENEYSEL ÇALIŞMA

DARIA PROKOPENKO

Dr. Öğr. Üyesi Özcan ATLAM
Danışman, Kocaeli Üniv.

Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt KARAÇOR
Jüri Üyesi, Manisa Celal Bayar Üniv.

Dr. Öğr. Üyesi Meral ALTINAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 20.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, fotovoltaik güçlü raylı taşıtların farklı ışınım ve yük şartlarında performans davranışını tanımlamak ve tahmin etmek için sistemin performans modellemesi ve deneysel test çalışmalarını kapsar.

Tez çalışmamda günün her saati desteğini esirgemeyen, bana kendi ülkemde yaşıyor gibi rahat bir çalışma ortamı sağlayan değerli danışmanım Dr.Öğr.Üyesi. Özcan ATLAM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca görüşleri ile çalışmalarına değer katan değerli hocam Dr.Öğr.Üyesi Meral ALTINAY'a ve tez çalışmamın tüm aşamalarında samimi destekleriyle çalışmalarımı daha eğlenceli ve verimli hale getiren laboratuvarındaki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Hayatım boyunca bana güç veren en büyük destekçilerim, her aşamada sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan sevgili babam Sergiy PROKOPENKO, annem Olena PROKOPENKO ve kardeşim Oleksandra PROKOPENKO, dedelerim ve büyük annelerim Leonid PROKOPENKO ve Oleksandra PROKOPENKO, Anatoliy GRONT ve Nina GRONT'a yüksek lisans eğitimim boyunca farklı ülkelerde yaşasak da asla yalnız hissettirmedikleri için özel teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs – 2018

Daria PROKOPENKO

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLOLAR DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. GÜNEŞ ENERJİLİ TOPLU TAŞIMANIN DÜNYADAKİ DURUMU	4
2. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELİ (PV) TEMEL KARAKTERİSTİKLERİ VE PERFORMANS MODELİ	12
2.1. Tipik bir PV'nin Yapısı ve Çalışma Mekanizması	13
2.2. PV Modellemesi ve Deneysel Çalışmaları	17
2.2.1. Sabit T, I_{sc} - V_{oc} testi	18
2.2.2. Sabit I_{sc} , T- V_{oc} testi	20
2.2.3. Sabit T ve I_{sc} , I-V çıkış karakteristik testi	22
2.3. Güneş Panelinin Yerleştirilmesi	27
3. TOPLU TAŞIMA TRENLERİNDE KULLANILABİLECEK ELEKTRİK MOTORLARI	30
3.1. Sabit Mıknatıslı DA Motorun Genel Karakteristikleri	30
3.2. Dişli PM DA Motorun Modellemesi	32
3.3. Motor Yerleştirimi	35
4. PV İLE RAYLI TAŞITININ ÇALIŞTIRILMASI VE PERFORMANS MODELİ	37
4.1. Genel PV-Motor-Batarya Teknik ve Dinamik Analizi	37
4.2. PV-Motor Sistemi ve Deneysel Çalışma	38
5. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ	46
5.1. PV-Motor-Batarya Sistemin Genel Çalışma Prensipleri	46
5.2. PV-Motor-Batarya Sistemin Deneysel Çalışma	48
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	52
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	56
ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Güneşle giden Hint treni	5
Şekil 1.2.	Paris-Amsterdam güneş tuneli	5
Şekil 1.3.	Vili güneş treni.....	6
Şekil 1.4.	İsrail'deki "skytrain	7
Şekil 1.5.	Santa Cruz'taki ultrahafif ray.....	7
Şekil 1.6.	Klasik iki ray demiryolu	8
Şekil 1.7.	"Wuppertal suspension railway"	9
Şekil 1.8.	"Aerobus mannheim bundesgartenschau" tren köprüsü	9
Şekil 1.9.	Japon'daki "Vista liner" monoray treni	10
Şekil 1.10.	Fransa'daki "Transler"	10
Şekil 2.1.	Yıllara göre değişen PV fiyatları ve üretimi	12
Şekil 2.2.	Farklı çeşit güneş pillerinin verimliliği gelişim ve karşılaştırması.....	13
Şekil 2.3.	Bir PV'nin çalışma prensibi.....	14
Şekil 2.4.	PV'nin eşdeğer elektrik şeması.....	14
Şekil 2.5.	Tipik bir PV'nin çıkış I-V karakteristiğinin oluşumu.....	15
Şekil 2.6.	Güneş PV sistemin farklı ışınım ve sıcaklıktaki I-V çıkış karakteristiğinin prensip şeması.....	16
Şekil 2.7.	Paralel bağlanan güneş modülleri	16
Şekil 2.8.	Seri bağlanan güneş modülleri.....	17
Şekil 2.9.	Test için kullanılan PV.	18
Şekil 2.10.	I_{sc} - V_{oc} değişimi sabit sıcaklıkta $T=35^{\circ}C$	20
Şekil 2.11.	T - V_{oc} değişimi sabit ışınım şiddetiyle $I_{sc}=0,2A$	21
Şekil 2.12.	MPP tanımlaması	23
Şekil 2.13.	P-V karakteristiğinin genel örneği.....	23
Şekil 2.14.	PV'nin V_{MPP} belirtmesi için P-V karakteristiği.....	24
Şekil 2.15.	Referans ışınım şiddeti $I_{sc}=0,2A$ ve sıcaklık $T= 35^{\circ}C$ için deneysel ve modellemedeki PV'nin I-V çıkış karakteristikleri.....	25
Şekil 2.16.	Farklı I_{sc} ve t örneklerine göre, PV'nin I-V çıkış karakteristikleri	26
Şekil 2.17.	Güneş panelinin çatısındaki yerleşimi	27
Şekil 2.18.	"Heliant" ultra – hafif güneş treni.....	27
Şekil 2.19.	Trenin üstünde - dik ayaklarda güneş panelinin yerleşimi	28
Şekil 2.20.	Güneş tünel örneği, Belçika.....	28
Şekil 2.21.	PV santralinden enerji alan tren	29
Şekil 3.1.	Farklı motorların I-V karakteristikleri	30
Şekil 3.2.	Motorun elektriksel eş değer şeması.....	31
Şekil 3.3.	Farklı yüklere göre örneklenmiş raylı taşıtı sistemin I-V giriş karakteristiği	33
Şekil 3.4.	Motorun I-V giriş karakteristiklerinin $w>0$ kısmı	35
Şekil 3.5.	Motorun trenin altında yerleşimi	35

Şekil 3.6.	Asılı monoray treninin aktarma sistemi.....	36
Şekil 3.7.	Enerji aktarma sistemi	36
Şekil 4.1.	Motorun ve güneş panelinin dinamik analizi.....	38
Şekil 4.2.	Deneyel kurulumun prensip şeması	39
Şekil 4.3.	Model ve deneyel I-V karakteristiğinin çalışma noktaları farklı ışınım ve ağırlık dereğlerde	40
Şekil 4.4.	Farklı mekanik yüklere göre I_{sc} -v eğrileri	44
Şekil 5.1.	PV-motor-batarya elektrik prensip şeması.....	46
Şekil 5.2.	PV – batarya – motor sisteminin çalışması.....	47
Şekil 5.3.	Deneyel PV – motor – batarya sisteminin I-V karakteristiği, $I_{sc}=0,12A$, $T=25^{\circ}C$	48
Şekil 5.4.	PV, motor, bataryanın I_{sc} -I karakteristikleri	49



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. $V_{oc_{deney}}$ ve $V_{oc_{model}}$ arasındaki bağıl hatalar	26
Tablo 3.1. Minimum hareket başlamak için gerekli akım ve gerilim değerleri.....	32
Tablo 3.2. R_a değerleri farklı başlangıç noktalar için	34
Tablo 4.1. Modeldeki ve deneysel I,V değerleri, onların karşılaştırılması ve bağıl hataları	41
Tablo 4.2. Deneysel ve modelleme çizgisel hız değerleri, farklı ışın şiddeti ve mekanik yükler ile	44



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	: dinamik sürtünme dönme momenti katsayısı
dVt	: sıcaklığa bağlı voltaj değişim katsayısı, (V/C°)
I	: akımı, (A)
I _d	: eklemli diyot akımı, (A)
I _{MPP}	: maksimum güç noktasındaki akım, (A)
I _o	: ters sızıntı akımı (A),
I _{sc}	: PV ile üretilen kısa devre akımı, (A)
I _{sc1}	: PV modelinde 1. referans noktadaki kısa devre akımı, (A)
I _{sc2}	: PV modelinde 2. referans noktadaki kısa devre akımı, (A)
I _{sc3}	: PV modelinde 3. referans noktadaki kısa devre akımı, (A)
I _{sc,ref}	: Referans kısa devre akımı, (A)
k	: dönme momenti katsayısı (N.m/A); aynı zamanda açışal hıza bağlı voltaj katsayısı, (V.s/rad)
k _B	: Boltzman sabiti, (1,38·10 ⁻²³ J.K ⁻¹)
k ₁	: eğri donatım katsayıları
k ₂	: eğri donatım katsayıları
K _p	: maksimum güç noktasının modellenmesini sağlayan bir katsayı
L	: raylı taşıtın geçtiği mesafesi, (m)
n	: sabit diyot faktörü
P	: PV'nin gücü, (W)
q	: elektron yükü, (1,6·10 ⁻¹⁹ C),
R _a	: armatür sargısı direnci, (Ohm)
r	: ray taşıtın taker yarı çapısı, (m)
T ₀	: motorun kalkınması için gerekli minimum dönme momenti, (N.m)
T _L	: mekanik yük momenti, (N.m)
T	: PV'nin sıcaklık, (C°)
T _{max}	: PV'nin maksimum sıcaklık, (C°)
T _{min}	: PV'nin minimum sıcaklık, (C°)
t	: raylı taşıtın geçtiği zaman, (s)
V	: gerilim, (V)
V _{oc}	: PV'nin açık devre gerilim, (V)
V _{oc1}	: PV modelinde 1. referans noktadaki açık devre gerilim, (V)
V _{oc2}	: PV modelinde 2. referans noktadaki açık devre gerilim, (V)
V _{oc3}	: PV modelinde 3. referans noktadaki açık devre gerilim, (V)
V _{oc,ref}	: PV'nin referans açık devre gerilim, (V)
V _{oc,max}	: maksimum açık devre gerilim, (V)
V _{oc,min}	: minimum açık devre gerilimi, (V)

V_{MPP} : maksimum güç noktasındaki gerilim, (V)
 v : ortalama çizgisel hızı, (m/s)
 v_{lim} : limit anlık hızı, (m/s)
 w : açısal hız, (rad/s)

Kısaltmalar

AC : Alternative Current (Alternatif Akım)
DA : Direct Current (Doğru Akım)
MPP : Maximum Power Point (Maksimum Güç Noktası)
PM : Permanent Magnet (Sabit Mıknatıslı)
PV : Photovoltaic (Fotovoltaik)



FOTOVOLTAİK GÜÇLÜ RAYLI TOPLU TAŞIMA ARAÇLARI (TRENLER) İÇİN PERFORMANS MODELLEME VE DENEYSEL ÇALIŞMA

ÖZET

Bu tezde, fotovoltaik güneş panelli (PV) raylı taşıtların güç kısmı için, alternatif performans modelleme yaklaşımı ve bunun deneysel çalışması tanıtılmaktadır. Modelleme çalışmaları PV modülü ve sabit mıknatıslı DA (doğru akımı) redüktör dişli motorun her biri için değişken ışınım şiddeti, PV sıcaklığı ve mekanik yüklere göre ayrı şekilde yapılandırıldıktan sonra, genel PV-motor sisteminin performans modeli tanımlanmaktadır. Modelin test çalışmasında, örneklenmiş ışınım şiddeti %27 – 100 aralığındadır. Mekanik yükler ise raylı taşıtın 4 katına kadar örneklenmiştir. Sistemin çalışma noktaları (akım ve gerilim (I,V)) ve çizgisel hız değerleri bakımından, model tahmini ve deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmaktadır. Alınan test sonuçlarına göre, akım ve gerilim için bağıl hata %1 – 3, çizgisel hız üzerindeki bağıl hata – %1,5 – 3,5 civarındadır. Ayrıca çalışmanın diğer bir sonucu olarak, düşük ya da kesintili güneş ışınım şartlarında, PV-motor sistemine bataryanın desteklemesi için, çalışma noktalarının yerleri düşünülerek göre bir sistem düzeni önerilmektedir. Bu düzenlemede, sistem çalışma noktaları, PV modülünün çıkış I–V eğrilerindeki maksimum güç noktalarının sağ tarafında ve bataryanın emk değeri, PV-motor sistemi çalışma geriliminden daha küçük olması durumunda, motor çalışırken aynı zamanda batarya şarj edilebilir. Diğer yandan PV'den maksimum yararlanma imkanı sağlanabilir. Bu tezdeki model çalışmaları ve sonuçları benzer sistemlere uyarlanabilir.

Anahtar kelimeleri: Elektrikli Tren, Fotovoltaik (PV), PV Modellemesi, PV Raylı Taşıt, Sabit Mıknatıslı DA (Doğru Akımı) Dişli Motor.

PERFORMANCE MODEL AND EXPERIMENTAL STUDY FOR PHOTOVOLTAIC (PV) POWERED PUBLIC TRANSPORTATION WITH RAIL CAR SYSTEM

ABSTRACT

In this paper, an alternative performance modelling approach is presented for photovoltaic (PV) powered railcar systems. The modelling studies are carried out separately for both PV module and permanent magnet DC gear motor according to changing irradiance, temperature and mechanical weights respectively. After combining these models, general system performance model is defined. With the help of an experimental set up, the model test is implemented in terms of system operating points and speed values. The irradiance is sampled between 27 – 100% of the the highest value. For the railcar mechanical loads, the additional weights are sampled about 4 times of the tare weight. The average relative errors are 1 – 3% for current and voltage, 1,5 – 3,5% for railcar speeds in this study. As another result of this case study, a suitable system arrangement is recommended for the battery to assist in intermittent or low irradiance conditions. If the electro-motive force (emf) of the given battery is less than single direct connected PV – motor operating voltage; the working region between maximum power points (MPP) and open circuit voltage of the PV output current-voltage (I–V) characteristics, is suggested to develop instant energy conversion. By this way, at a foreseen irradiance interval, the motor can operate with battery charging and also the system can use the PV module at maximum power. This concept can facilitate relating drive/control strategies. The studies in this paper can be taken as a reference to similar system applications.

Key words: Electric Train, Photovoltaic (PV), PV Modelling, PV Rail Car, Permanent Magnet DC Motor.

GİRİŞ

Her geçen gün değişen ve gelişen dünyamıza daha iyi gelecek hazırlamak ve gündelik hayatımızı daha da kolaylaştıracak çözümler bulmak gerekmektedir. Kirlenmiş olan havayı, toprağı, nehirleri ve denizleri daha temiz tutacak ve temiz kalmasını sağlayacak programlar ile daha sağlıklı yaşam alanları yaratılması gerekmektedir.

Enerji, tartışma götürmez bir gerçek olarak, insanlığın muhtaç olduğu bir kaynaktır. Enerjisiz dünyada, toplum kendi fonksiyonunu yerine getirememektedir. Enerjisiz dünyada, tıp gerçekleştirilememekte, ciddi hastalıklar tedavi edilememekte, yemek pişirilememekte, su arıtılmamakta, ulaşım yapılamamakta ve bilgisayarlar işletilememektedir. Yıllarca yenilenebilir enerji yaklaşımları, yeni modern akım olarak, farklı alanlarda ve çeşitli yöntemler ile kullanılarak huzurlu, temiz ve ekonomik ve daha avantajlı bir çevre yaratmak için bulunmaktadır. Zararsız enerji etkileşimiyle elektrik üretimi her yıl daha büyük ölçülerde meydana gelir, çünkü doğal gaz, petrol ve kömür modası geçmiş ve doğaya zararlı enerji tercihleridir. Elbette, fosillere dayanan ürünler uzun bir süre boyunca insanlar tarafından kullanılacakları için bu endüstriler de çok uzun yıllar boyunca varlıklarını sürdüreceklendir [1]. Maalesef, fosil yakıt atıklarının gezegende entegre edilmesi uzun süre almakta ve bulunan rezervler daha çabuk tükenmektedir. Üstelik, karbondioksit, karbonmonoksit ve diğer tehlikeli maddelerin (azot oksitleri, sulfur dioksit, uçucu organik maddeler ve ağır metaller) havayı kirletmesi fosil yakıtların yanmasına ve kullanılmasına büyük olasılıkla en güçlü argümanlardır. Fosil yakıtların elde edilmesi, işletilmesi ve dağıtılması bol miktarda farklı çevre sorunları yaratmaktadır [2].

Yeni yeşil enerji yolculuğu ile temiz ve güçlü, belli bir merkezden yönetilmeyen (bölgesel) ayrı sistemler kolayca kurulabilir. Artık bol miktarda bulunan enerji dönemine geçilebilir.

Günümüzde toplu taşıma ile ulaşım konusunda bir çok sorun göze çarpmaktadır. Her gün çoğalan araba miktarı, artan çevre kirliliği, çabuk tüketilen ve daha pahalı olan petrolün ve doğal gazın aşırı kullanımı bizi elektrikli araç kullanmaya itmektedir. Bu çözümler farklı çeşit şarj istasyonları da meydana getirmektedir [3 – 6]. İlk bakışta, elektrik ile beslenen araçlar güzel çözüm olarak görünmektedir. İçten yanmalı motorların yerini temiz elektrikli sessiz motorlar almaktadır. Ancak, elektriği üreten kaynağın yenilenebilir veya temiz olmaması durumunda enerji tamamen yeşil sayılmamaktadır. Enerjisini yenilenebilir kaynaklarından alan taşıtlar ihtiyaçlarımızı karşılarken aynı zamanda daha temiz bir dünya sunabilir. Bu nedenle son zamanlarda elektrikli taşıma konusunda çok fazla projeler ve çalışmalar yapılmaktadır. [7]'de yalnızca yeşil elektrikli enerji kullanılmasının neden önemli olduğunu anlatılmaktadır.

Yenilenebilir taşıma için güneş panellerinden rüzgar türbinlerine kadar çeşitli ölçeklerde enerji kaynak olarak depolama sistemi ile desteklenmiş farklı seçenekler olabilir. Herhangi elektrikli ulaşım araçlarına göre uygun depolama sistemi seçilebilmektedir [8]. Lityum bataryasının uygulaması [9]'da gösterilmektedir. Birkaç yenilenebilir enerji kaynağı ile beslenen hibrid sistemler de yaygındır. Hidrojen yakıt pilleri bütün sistemlere eklenebilmektedir, fakat hidrojen yenilenebilir enerji kaynağından elektroliz yöntemi ile üretilmelidir. PV-rüzgar türbini tip hibrid sistemin analizi ve modelleme [10]'da verilmektedir.

Elektrikli araba ve otobüs gibi çoğu taşıtlarda güç kaynağı olarak batarya kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları bu bataryaları şarj etmektedir. Oysa, tren/tramvay/vagon gibi raylı taşıt doğrudan yenilenebilir enerji ile beslemek daha avantajlıdır, çünkü güneş panelinden veya rüzgar türbininden üretilen elektrik enerji direkt olarak raylara verilmektedir. Elektrik beslemesi ray kenarında sabit veya bir vagon üzerinde taşınabilir şekilde düşünülebilir. Bu sistem batarya desteğiyle şebekeye bağlamadan da çalışabilmektedir.

Taşıma sisteminin planlaması ve boyutlaması esnasında PV ile beslenen raylı taşıtın sistemi, performans modeli ve analizi, verimlilik çalışması [11] ile birlikte önemli konu olarak tanımlanmaktadır. Bütün bunların yanında, çeşitli hibrid sistemi

performans yaklaşımları, PV modellemesi kapsamında, örnek olarak [12]'da ve deneysel çalışmalı modeller [13]'te bulunmaktadır.

Diğer bakış açısından, güneş treninin planlaması ve gerçekleştirilmesi, ekonomik ve çevresel değerlendirme bakımından, enerji üretimi ve hesaplaması vurgulayarak, [14]'da incelenmektedir. Bunun yanısına, PV ile beslenen tren projesinin planlaması ve sistemin elektrik enerjisi ihtiyaçları [15]'te bahsedilmektedir.

Bu tezde, en büyük rol raylı taşıtın güç kısmı ve dinamik analizine verilmiştir, çünkü PV ve raylı taşıtın motoru sistem performansının iki esas belirteçidir. Bu çalışmada, alternatif güneş treni modellemesi, deneysel veriler ile karşılaştırılıp, PV-motor-batarya sistemin davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bir tipik PV ile beslenen raylı taşıt sistemi için bol miktarda işletme şartları bulunmaktadır. Güneş ısınım ve güneş panelinin sıcaklık PV çıkış akım – gerilim (I-V) karakteristikleri etkilenmektedir. Ayrıca raylı taşıt doğru akım davranışı ve performansı bireysel parametrelere ve değişik mekanik yüklere bağlıdır.

Çalışma dört adımla yapılmıştır: ilk olarak, günümüzde mevcut olan ve güneş enerjisi ile beslenen raylı taşıtlar ve tren çalışmalarının arasında araştırma yapılmıştır, genel bakışta tren yapısı ve güç kısmının bileşkeleri sunulmuştur; ikinci adım olarak PV performans modellemesi ve doğru akım motor modellemesi ayrı uygulanmıştır; en son etapta PV-motor sisteminin modellemesi gerçekleştirilmiştir ve batarya sisteme ek olarak kullanılması denenmiştir. Bütün deneysel çalışmalar laboratuvarda gerçekleştirilmiştir ve modellemedeki veriler ile karşılaştırarak gösterilmiştir.

1. GÜNEŞ ENERJİLİ TOPLU TAŞIMANIN DÜNYADAKİ DURUMU

Toplu taşıma araçlarından biri olarak trenler standart arabadan daha verimli (enerji tüketimi bakımından daha düşük) ve %50 – 75 daha az kirleticidir [16]. Güneş enerjisi kullanan tipik bir tren ile 90 000 litreye kadar daha az dizel yakıt tasarruf edebilir, 200 tondan daha fazla karbon dioksit emisyonunun da önüne geçilebilir [17].

Dünyada mevcut olan ve kullanılan güneş enerjili toplu taşıma tren/ray vagonların bazı örnekleri tanıtılmaktadır.

- “Hindistan Express”

Taşınabilir güneş paneli ile donatılan “Hindistan Express” güzel bir örnektir [18]. 2013-2014 yılları boyunca “Indian Railways” 17,5 milyar kWh elektrik tüketti. Bu miktar Hindistan’ın bütün enerji üretimi kapasitesinin yaklaşık %2’sine karşılık gelmektedir. Bir deneysel proje olarak, “Rewari-Sitapur” yolcu vagonun çatısı güneş panelleri ile donatılmıştır. En iyi ışınım şartları altında her biri 300 W’lık 12 adet güneş paneli sistemde kullanılmıştır. Bu trenin görünümü Şekil 1.1’de verilmektedir. Bu proje geleceğe doğru atılan umut verici bir adımdır.



Şekil 1.1. Güneşle giden Hint treni [19]

Bu sistemde mevcut elektrik miktarı sadece tren içindeki elektrik ve klimanın çalışmasını karşılamaktadır. Fakat trenin hareket etmesi için dizel motoruna ihtiyaç vardır [20]. Ancak, motoru çalıştırmak için güneş paneli kullanılmamaktadır.

- Paris-Amsterdam güneş tuneli

3 km'lik demiryolunun üstündeki güneş tuneli 16 000 panel ile (50 000 m²) yılda bir gün için karşılaştırsak Belçika'daki tüm trenlerin gücü için yeterli enerji üretmektedir. Bir yılda yaklaşık 3,3-3,5 GW üretilmektedir. Kişi başı enerji fiyatı – 3,9 kW/kişi (yıllık taşınan kişi sayısı – 825.630 insandır). Trenin görünümü Şekil 1.2'dedir. Projenin toplam yatırımı \$20,1 milyondur [21].



Şekil 1.2. Paris-Amsterdam güneş tuneli [22]

- Macaristan'daki "Vili" güneş ile çalışan elektrikli tren.

Sadece çatılara yerleştirilen güneş paneli ile beslenen taşıma aracı çok mücadelecedir. Fakat Macaristan'daki parkta bu sistemde çalışan tren yaratılmaktadır. 10 m²'lik güneş panelleri ile donatılan küçük tren yolcu ile dolu bir kabine sahiptir. Genel olarak 1 m² lik panellere gelen güneş enerjisi 1 kW'tır. Yani bu tren 0,15 kW (panelin verimliği yaklaşık %15) üreterek ve 21 insan taşıyarak, kişi başı enerji fiyatı – 7,14 W/kişi oluşturuyor. 15 mil/saat trenin maksimum hızda gezmek için tam uygundur [23]. Şekil 1.3'te turistik güneş "Vili" treni gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Vili güneş treni [24]

Birkaç projeler ve çalışmalar gelişme ve detaylandırma aşamasındadır:

- İsrail'deki "Skytrain"

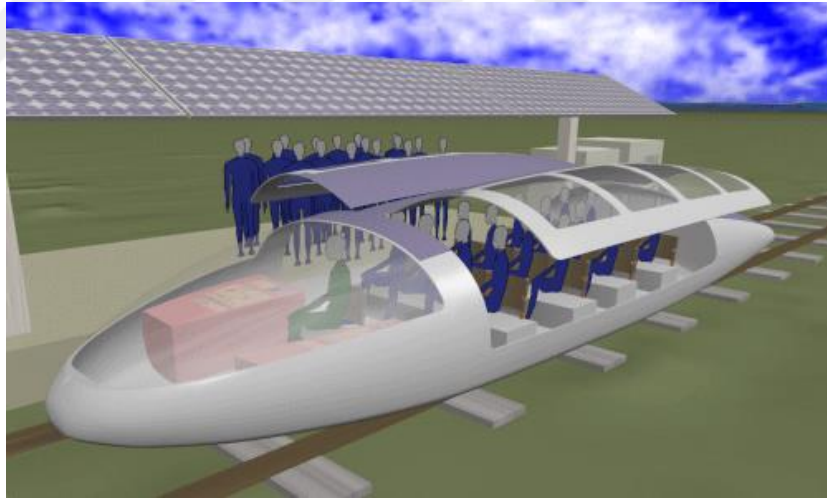
İki kişilik "Skytrain" projesi "İsrail Aircraft Industries" tarafından yapılacaktır. Projedeki araç güneş enerjisi yardımıyla manyetik alanda yükselerek hareket eder. Bu toplu taşıma aracının maliyeti metrodan daha uygun olması planlıyor (metronun maliyeti 1 km'lik alan için 2 milyar dolar iken, bu projedeki için yalnızca 8 – 10 milyon dolar olarak hesaplanmıştır [25]. Bu fantastik taşıma sistemi Şekil 1.4'te gösterilmektedir.



Şekil 1.4. İsrail’deki “Skytrain” [26]

- Ultrahafif ray (Santa Cruz)

Bu elektrikli tren dumansız, egzozsuz ve sessiz ray taşıma sistemidir. Temel olarak modern güneş fotovoltaik hibrid sistem kullanılır. Bu küçük güneş treni Şekil 1.5’te görülebilir.



Şekil 1.5. Santa Cruz’taki ultrahafif ray [27]

Ray sisteminin seçimi önemli bir rol oynamaktadır. Ray çeşitlerinden monoray ve klasik ray yolu olarak tanımlanmaktadır.

En yaygın iki raylı demiryolu neredeyse her şehirde bulunmaktadır. Örnek olarak İstanbul’da Taksim’deki tren Şekil 1.6’da verilmektedir.



Şekil 1.6. Klasik iki ray demiryolu [28]

Monoray yol sadece tek raydan oluşur. Neredeyse günümüzdeki çoğu monoray elektrikli motorlarla üçüncü kontak ray yardımıyla beslenir. Monorayın kullanıldığı alanlar: lunaparklar, havalimanları, toplu taşıma araçları.

Monorayın birkaç çeşiti vardır, mesela asılı monoray Şekil 1.7, 1.8, yerli monoray Şekil 1.9, “Transler” tipli monoray Şekil 1.10’dadır.

Asılı monoray örnek olarak, Şekil 1.7’de verilen, “Wuppertal Suspension Railway” dünyada ilk inşaat edilen büyük asılı tren tesisatıdır. Monorayın parametreleri: 600V DA, azami eğim – 40 derece, azami hız – 60 km/saat (orta hız 28 km/saat), mesafe – 13,3 km, tam zaman – 28 dakika, 48 – 130 yolcu, kapasitesine sahiptir.



Şekil 1.7. “Wuppertal Suspension Railway” [29]

Diğer bir örnek olarak, “Aerobus Mannheim Bundesgartenschau” tren köprüsü, Şekil 1.8’de bulunmaktadır. Bu asılı monorayın yapısı daha kolay ve basit şekilde yapıldı.



Şekil 1.8. “Aerobus Mannheim Bundesgartenschau” tren köprüsü [30]

Japonya’da çoğunlukla monoray demiryolu kullanılmaktadır. Mesela, “Vista Liner” Şekil 1.9’da verilmektedir. Dayanak (şase) mekanizması trenin altındadır.



Şekil 1.9. Japonya’daki “Vista Liner” monoray treni [31]

“Transler” tipli monoray Fransa’da, İtalya’da ve Çin’de çoğunla kullanılıyor. Diğer monoraylara göre maliyeti düşük, maddi masrafları az ve yapısı kolaydır. İşletilen monoray treni Şekil 1.10’da gösterilmektedir.



Şekil 1.10. Fransa’daki “Transler” [32]

Monorayın avantajları:

- boyutunun küçük olması,
- görünüşünün etkileyici, modern ve temiz olması,

- turistler için daha cazip ve eğlenceli olabilir,
- tepeler ve bayırları kolayca aşabilir,
- raydan çıkma tehlikesi yoktur.

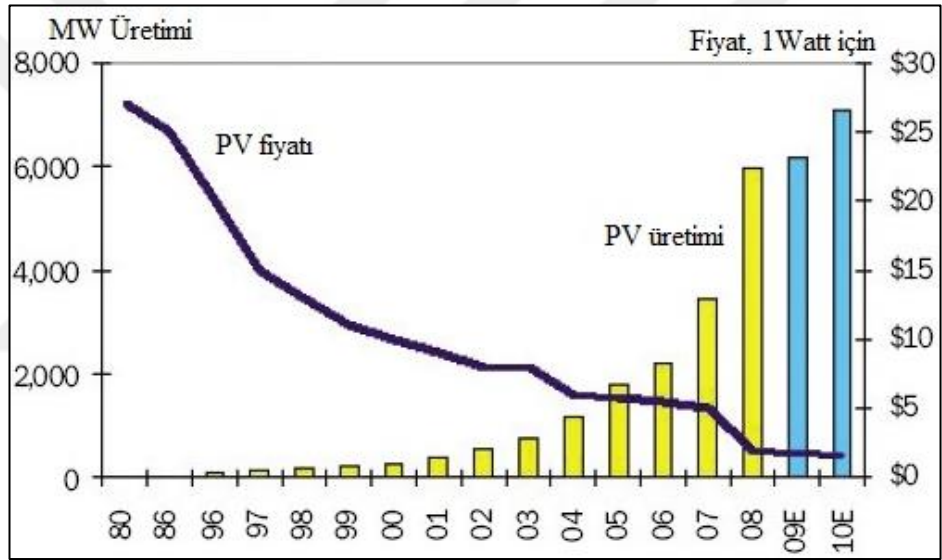
Bu tarz sistemleri günlük hayatta özellikle toplu taşıma araçlarında kullanmaya ihtiyaç vardır. Sonuç olarak tüm bunlar düşünüldüğünde bu tezin odak noktasının güneş enerjisi ile çalışan raylı taşıtın toplu taşıma aracı olarak kullanılması en uygunu olarak görülmüştür.



2. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELİ (PV) TEMEL KARAKTERİSTİKLERİ VE PERFORMAS MODELİ

Sistem modellemesinin uygulaması için ilk önce PV modellemesinin ayrı şekilde gerçekleştirilmesi gerekir.

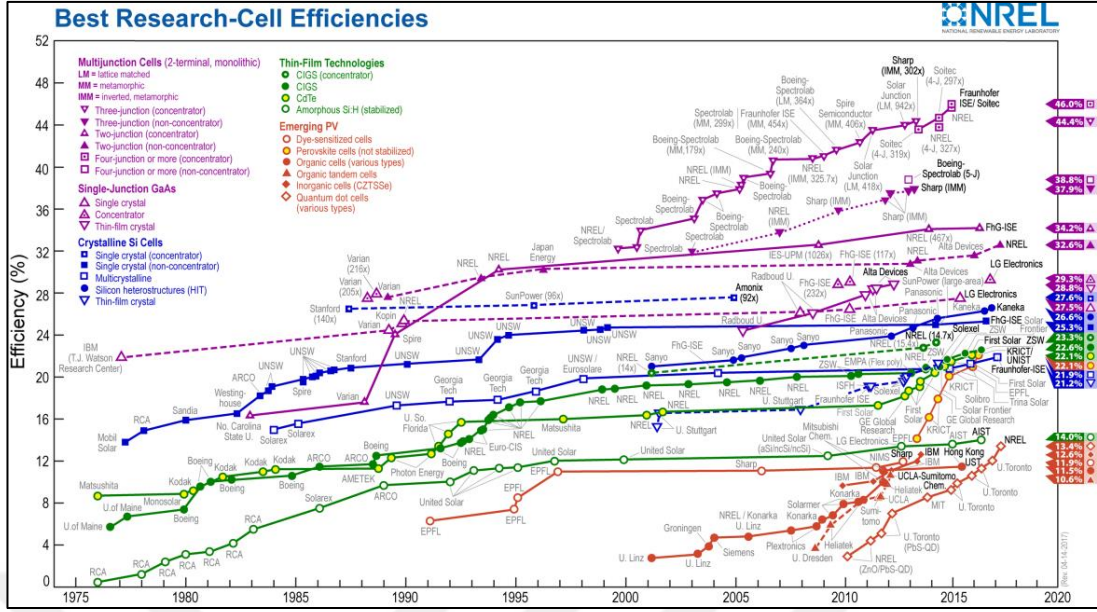
Son yıllarda Şekil 2.1’de gösterildiği gibi hem PV’ye ait çalışmalar ve projelerin artmasına karşılık fiyatların azaltması görülmektedir.



Şekil 2.1. Yıllara göre değişen PV fiyatları ve üretimi [33]

Yine de güneş paneli en ucuz enerji üreten sistemler değildir, ama büyük gelişmeler kapıdadır.

Bugüne kadar güneş panelinin çok farklı çeşitleri geliştirilmiştir. Şekil 2.2’de PV verimliliği tarafından karşılaştırılan çok eklemlili, galyum arsenit (mor olan çizgiler), kristal silikonlu (mavi olan çizgiler), ince film (yeşil olan çizgiler) ve yeni geliştirilen (kırmızı olan çizgiler) güneş pilleri gösterilmektedir.



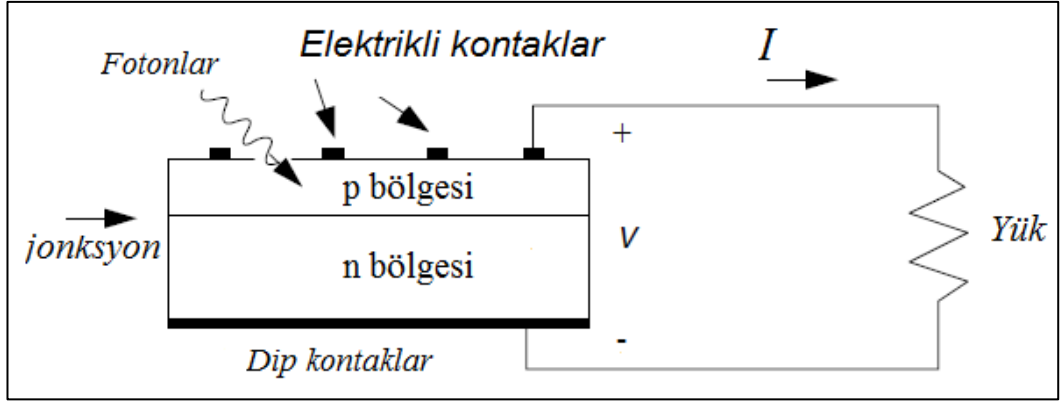
Şekil 2.2. Farklı çeşit güneş pillerinin verimliliği gelişim ve karşılaştırması [34]

2.1. Tipik bir PV'nin Yapısı ve Çalışma Mekanizması

Güneşten gelen ışınım, muazzam ve bol miktarda mevcut bir kaynaktır. Bu yüzden güneşten gelen ışınımı enerji kaynağı olarak kullanmak çok mantıklıdır. Fizikteki bir benzetişim olarak bir PV için, güneşteki ışınım şiddeti (W/m^2) kuvvet gibidir.

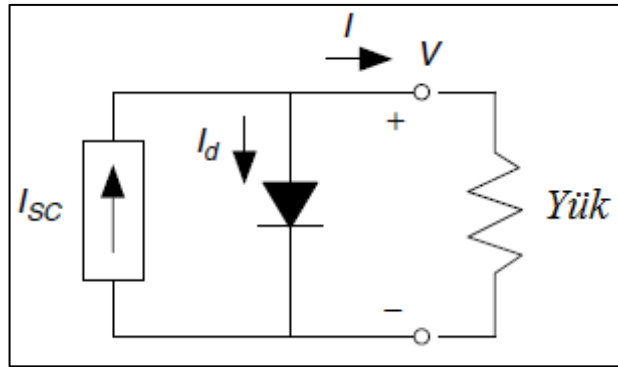
Bir PV hücresinde, fotonlar halinde gelen ışınım enerjisi, fotovoltajik olay ile doğrudan gerilim ve akım halinde bir elektrik enerjisine dönüşür. Sistem (silisyum gibi) fotovoltajik etki özelliklerine sahip malzemelerden yapılır. Yeterli enerjiye sahip (kısa dalga boylu veya yüksek frekanslı) bir foton, PV malzemesi içindeki elektronu atomdan serbest hale getirir. İç bölgede bir elektrik alanı sağlanmış ise, serbest olan elektronlar metalik kontaklara süpürülmektedir [35].

İç elektrik alanlar ışığa duyarlı, farklı elektriksel özellikli malzemeler arasında (yalıtkan-yarıiletken, yarıiletken-yarıiletken, iletken-yarıiletken) kurulabilir. Örnek olarak, yaygın olduğu için, p-n yarıiletken (silisyum (Si) temelli) jonksiyonlu güneş pillerinin çalışma prensibi Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Bir PV'nin çalışma prensibi [35]

İki ayrı kat aynı malzemeden (Si) oluşturulmaktadır, ince olan kata (p bölge) Bor malzemesi (Bor silisyum ile bağlandığı zaman bir tane boşluk kalır), kalın olan kata Fosfor eklenmektedir (Fosfor silisyum ile bağlandığı zaman bir tane serbest elektron kalır). Böylece p bölgesinde elektron için boşluklar, n bölgesinde serbest elektronlar oluşmaktadır. Işınım PV'ye geldiğinde, serbest elektronlar n bölgesinde, pozitif yükler ise (elektronların bıraktığı boşluklar) p bölgesinde çoğunlukta oldukları bölgelerde toplanmış olur, bu yük kutuplanması bir potansyel fark (gerilim) oluşturur. Işık fotonlarıyla oluşan yükler böylece iç elektrik alan ile ayrılmış ve kutuplara sürülmüştür. Fotonların soğrulması ile oluşan akımın bir kısmı, oluşan potansyelin üstel bir fonksiyonu olarak sistemin jonksiyonu diyot akımı için (I_d), diğer kısmı ise dış devre akımı (I) halinde kullanılacaktır [36]. Şekil 2.4'de PV'nin eşdeğer elektrik şeması verilmektedir.



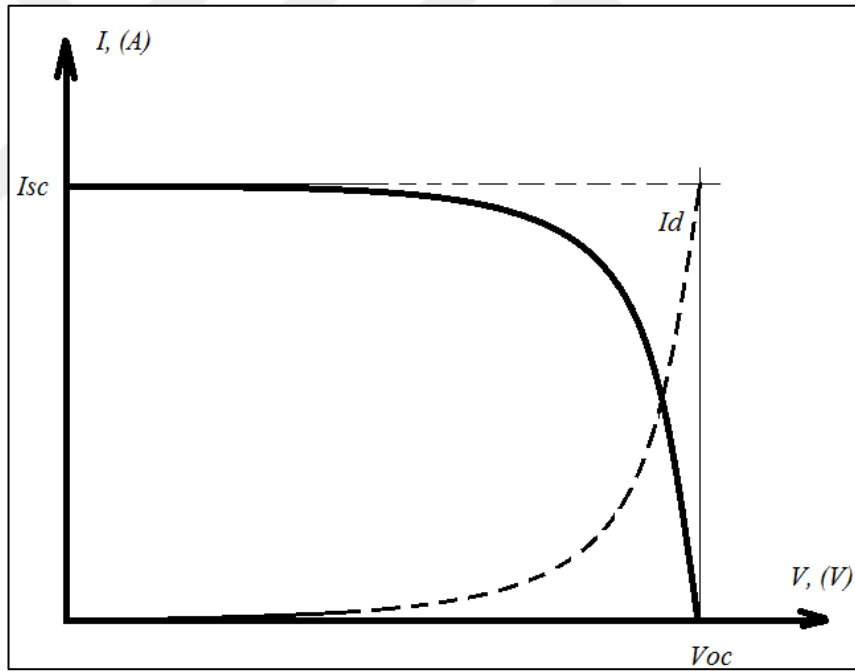
Şekil 2.4. PV'nin eşdeğer elektrik şeması [35]

Şekil 2.4'ye göre dış devre akımı I Denklem (2.1)'de tanımlanmaktadır. Bu denklem aynı zamanda PV'nin herhangi bir ışınım şartlarında çıkış akım – gerilim (I-V) karakteristiğini tanımlar.

$$I = I_{sc} - I_d = I_{sc} - I_0 \cdot e^{\left(\frac{qV}{nkT} - 1\right)} \quad (2.1)$$

Burada I_{sc} – PV ile üretilen kısa devre akımı, I_d – eklemli diyot akımı (A), I_0 – ters sızıntı akımı (A), q – elektron yükü ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$), V – gerilim, n – sabit diyot faktörü, k – Boltzman sabiti ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$), T – mutlak sıcaklıktır (K°) [37].

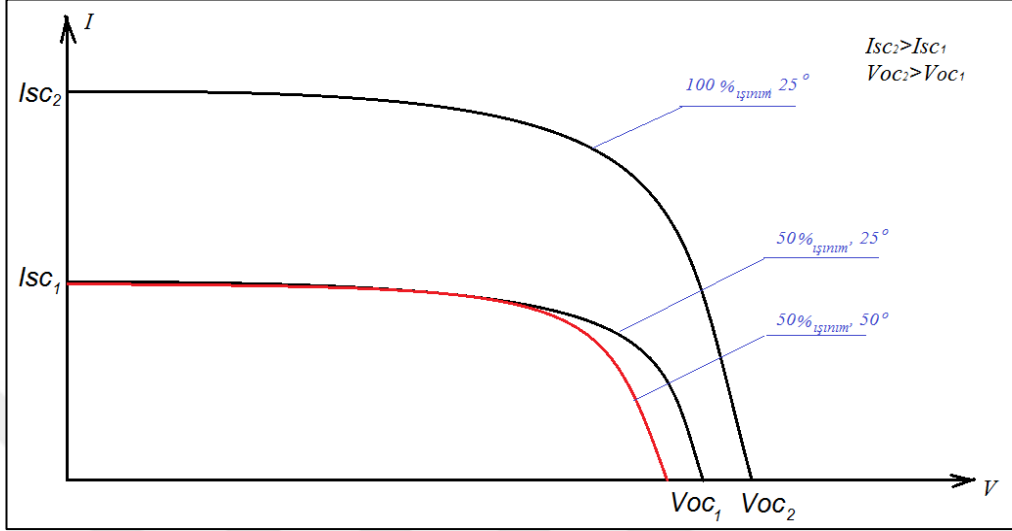
Denklem (2.1)'deki ifade temelinde, PV'nin çıkış akım – gerilim (I-V) karakteristiğinin oluşumu da prensip olarak Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Tipik bir PV'nin çıkış I-V karakteristiğinin oluşumu [36]

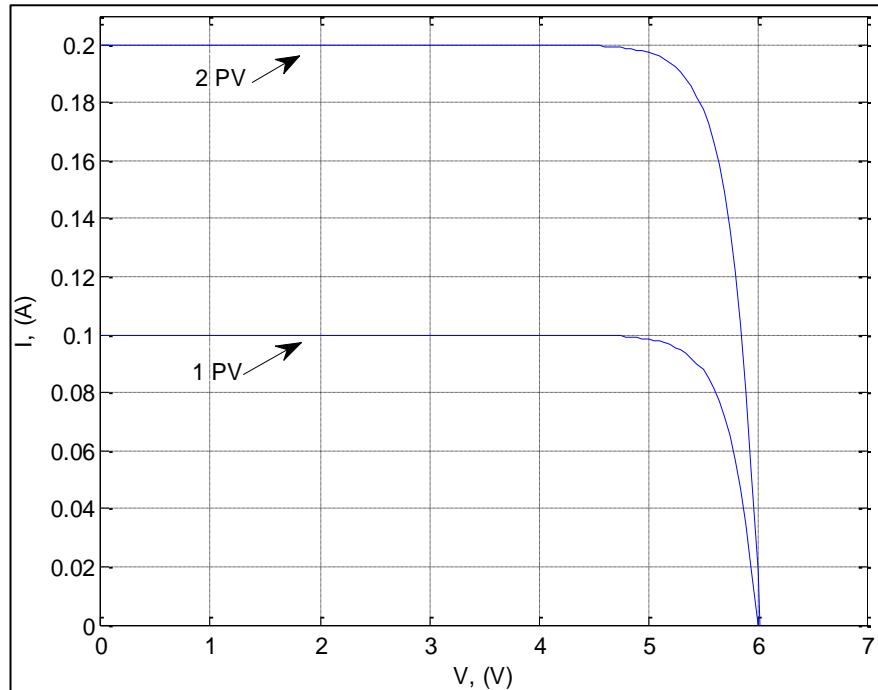
PV'yi elektrik enerjisi kaynağı olarak kullanan sistemlerde, PV çıkış I-V karakteristiği çok önemlidir. Belirli bir boyuttaki PV sisteminin çıkış I-V karakteristiği, ışınım ve sıcaklıkta değişir. PV sisteminin kısa devre akımı (I_{sc}) ışınım ile doğru orantılı değişmektedir. I_{sc} , genelde foton ile üretilen akım olarak kabul edilmektedir. Açık devre gerilimi (V_{oc}) ise ışınım ile logaritmik orantılı, aynı

zamanda sıcaklıkla da negatif şekilde doğru orantılı olarak değişmektedir. Güneş panelinin farklı ışınım ve sıcaklık şartlarında çıkış I-V karakteristikleri prensip olarak Şekil 2.6’te verilmektedir.

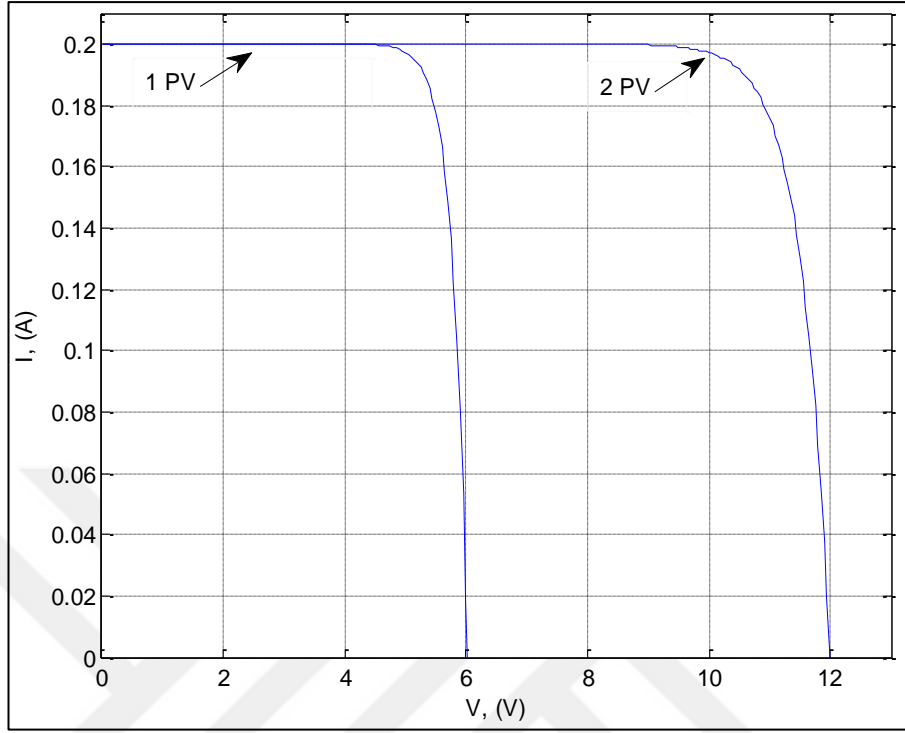


Şekil 2.6. Güneş PV sistemin farklı ışınım ve sıcaklıktaki I-V çıkış karakteristiğinin prensip şeması

Yüksek güce ihtiyaç varsa, birkaç PV modülü paralel (Şekil 2.7) ya da seri (Şekil 2.8) düzen olarak bağlanabilmektedir. Toplam PV düzenin I-V çıkış karakteristiği bireysel I-V eğrilerin tutarındır. PV paralel şekilde bağlandığında, akım verme kapasitesini artırma şansı sağlanır. Seri bağlandığı durumlarda ise, gerilim artılır.



Şekil 2.7. Paralel bağlanan güneş modülleri



Şekil 2.8. Seri bağlanan güneş modülleri

PV'nin çıkış I-V karakteristiği ışınım, sıcaklık gibi şartlara, aynı zamanda sistemin fiziksel yapısına bağlı olmaktadır. I-V çıkış performans modeli için, çoğunlukla kullanılan tek diyot modeli veya benzer modeller ölçüm zorluğu oluşabilecek özel dirençler, şekil faktörü gibi bazı özel parametrelere ihtiyaç duyar. Bu tezde ise herkesin kolaylıkla uygulayabileceği bir alternatif modelleme yöntemi olarak değişen ışınım ve sıcaklık şartlarında, bir PV'nin I-V eğrilerini tanımlama ve tahmin etme amaçlanmaktadır. Bu model [38]'te tanıtılmaktadır ve modelleme aşamaları ilgili PV'lere uyarlanabilir.

2.2. PV Modellemesi ve Deneysel Çalışmaları

İlgili PV çıkış akım-gerilim ($I - V$) karakteristiğinin modellemesi, verilmiş ışınım ve sıcaklık farklı değerlerinin aralığında, [38]'deki adımlara göre yapılmıştır. Bu modelleme aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- sabit sıcaklıkta (T), kısa devre akımı – açık devre voltajı (I_{sc} - V_{oc}) testi;
- sabit I_{sc} , T - V_{oc} testi;

- sabit sıcaklıkta (T), I – V çıkış karakteristik testi.

PV için I_{sc} 'nin ışınım seviyelerine doğru orantılı olduğu sayılmaktadır.

Bu testlerde, Şekil 2.9'te gösterilen monokrystal silisyum 5V'luk PV enerji kaynak olarak kullanılmıştır; yüzey alanı $10 \times 10 \text{cm}$ 'dir, ağırlık – 80 gramdır. 74 W'lık halogen lamba, yapay aydınlatma, güneş ışınım yerine geçmektedir.



Şekil 2.9. Test için kullanılan PV

2.2.1. Sabit T, I_{sc} - V_{oc} testi

I_{sc} - V_{oc} testi sabit sıcaklıkta $T=35^\circ\text{C}$ ve değişken ışınım seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. En yüksek örneklenmiş ışınım, $I_{sc}=0,2\text{A}$ 'dir ve bu değer,

referans kısa devre akım ($I_{sc_{ref}}$) olarak tanımlanmaktadır. I_{sc} , 0,01 – 0,2A civarında örneklenmektedir. Bu aralıkta, her I_{sc} değeri için, V_{oc} değerleri ölçülmüştür. I_{sc} - V_{oc} karakteristiği doğrusal olmayan logaritmik şekle sahip olduğundan dolayı, V_{oc} denklemi, I_{sc} 'ye bağlı fonksiyon olarak, Denklem (2.2)'de gösterilmektedir. Bu denklem üç esas ölçülmüş I_{sc} , V_{oc} noktalarına göre oluşmaktadır. Denklem (2.2)'e $k_2 \cdot (I_{sc} - I_{sc_{ref}})$ parçası ekleyerek daha hassas bir eğri modeli temsil edilebilmektedir.

$$V_{oc}(I_{sc}) = V_{oc_{ref}} + k_1 \cdot \ln \frac{I_{sc}}{I_{sc_{ref}}} + k_2 \cdot (I_{sc} - I_{sc_{ref}}) \quad (2.2)$$

Burada: $V_{oc_{ref}}$, $I_{sc_{ref}}$ 'ye karşılık gelen açık devre voltajıdır. I_{sc} - V_{oc} testinde $V_{oc_{ref}} = 5,84V$, $I_{sc_{ref}} = 0,2A$ olarak ölçülmüştür. Denklem (2.2)'de bulunan, eğri donatım katsayıları; k_1, k_2 , üç referans akım ve gerilim noktaları aynı denkleme ekleyip Denklem (2.3, 2.4)'teki gibi hesaplanır:

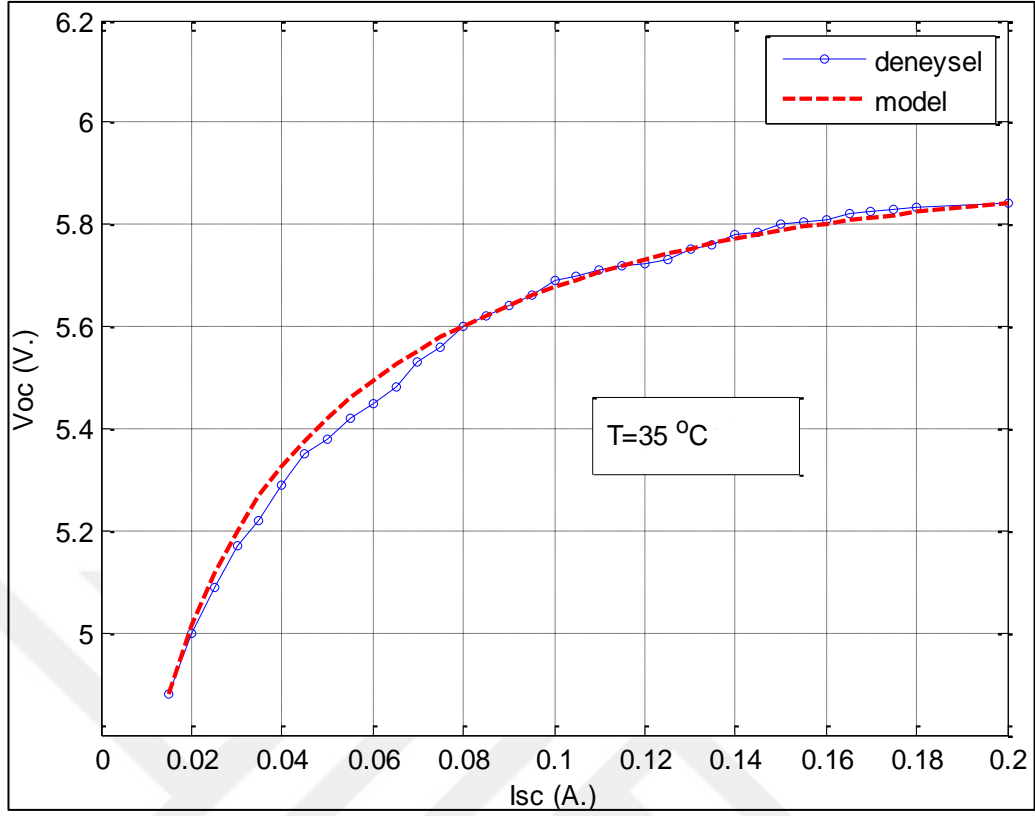
$$V_{oc_2} = V_{oc_1} + k_1 \cdot \ln \frac{I_{sc_2}}{I_{sc_1}} + k_2 \cdot (I_{sc_2} - I_{sc_1}) \quad (2.3)$$

$$V_{oc_3} = V_{oc_1} + k_1 \cdot \ln \frac{I_{sc_3}}{I_{sc_1}} + k_2 \cdot (I_{sc_3} - I_{sc_1}) \quad (2.4)$$

Referans değerleri $I_{sc_1} = 0,2A$, $V_{oc_1} = 5,84V$, $I_{sc_2} = 0,095A$, $V_{oc_2} = 5,66V$, $I_{sc_3} = 0,015A$, $V_{oc_3} = 4,88V$ değerleri, Denklem (2.3) ve (2.4)'e yerine yazıldığında Denklem (2.5)'teki matris oluşturmaktadır.

$$\begin{bmatrix} V_{oc_2} - V_{oc_1} \\ V_{oc_3} - V_{oc_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \left(\frac{I_{sc_2}}{I_{sc_1}} \right) & (I_{sc_2} - I_{sc_1}) \\ \ln \left(\frac{I_{sc_3}}{I_{sc_1}} \right) & (I_{sc_3} - I_{sc_1}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'te katsayılar $k_1 = 0,5028$ ve $k_2 = -1,8503$ olarak bulunmaktadır. Güneş paneli ışık kaynağına farklı uzaklıklarda tutularak ürettiği kısa devre akımı ve açık devre gerilim ölçümleri yapılmıştır. I_{sc} , 0,01A – 0,2A civarında değiştirilmektedir. Model tahmini ve deneysel I_{sc} - V_{oc} eğrileri Şekil 2.10'da birlikte verilmektedir.



Şekil 2.10. I_{sc} - V_{oc} değişimi sabit sıcaklıkta $T=35^{\circ}\text{C}$

Denklem (2.2) sadece $T=35^{\circ}\text{C}$ sıcaklığı altında geçerlidir. I_{sc} - V_{oc} modeli diğer sıcaklığa göre adapte etmek için, sabit ışınım seviyede T - V_{oc} testinin yapılması gerekmektedir.

2.2.2. Sabit I_{sc} , T - V_{oc} testi

Sıcaklık değişiminin güneş paneline etkisini gösteren T - V_{oc} testi $I_{sc}=0,2\text{A.}$ 'e karşılık gelen sabit bir ışınım şiddetinde yapılmıştır. Sıcaklık $20^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ civarında örneklenmiştir. 50°C 'den daha yüksek sıcaklık güneş paneline zarar verebildiğinden uygulanmamıştır.

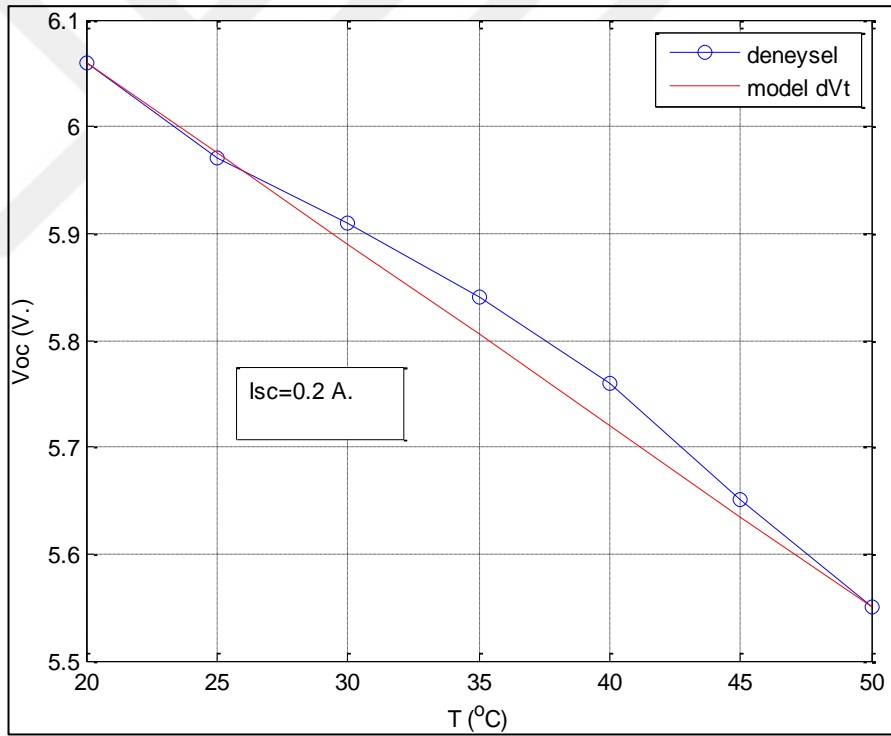
Sıcaklık değişiminin gerilim üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonunda elde edilen T - V_{oc} eğrisine bakıldığında sabit açık devre akım değerinde gerilimin sıcaklıkla ters orantılı olduğu görülmektedir. Sıcaklık arttığı zaman V_{oc} , sıcaklığa bağlı olarak, düşmektedir. Bu halde güneş panelinden elde edilen gücün düşmesi demektir. Bu sonuç güneş panellerinin soğuk kalmasının önemini ve avantajını göstermektedir. Şekil 2.11'de T - V_{oc} karakteristiği gösterilmektedir.

$V_{oc}(T)$ fonksiyonu yaklaşık olarak doğrusaldır, bu yüzden sıcaklığa bağlı voltaj değişim katsayısı (dV_t) Denklem (2.6)'de tanımlanmaktadır. Çalışmada kullanılan PV için $dV_t = -0,017$ (V/C°) olarak hesaplanmıştır. Buradaki eksi (-) işareti, gerilimin sıcaklıkla azalmasını göstermektedir.

$$dV_t = \frac{\Delta V_{oc}}{\Delta T} \quad (2.6)$$

$$dV_t = \frac{(V_{oc_{max}} - V_{oc_{min}})}{(T_{min} - T_{max})} = \frac{(6,06 - 5,55)}{(20 - 50)} = -0,017 \frac{V}{C^\circ}$$

Burada $V_{oc_{max}}$ ve $V_{oc_{min}}$ deneysel sonuç olarak elde edilen maksimum ve minimum değerleridir.



Şekil 2.11. T- V_{oc} değişimi sabit ışınım şiddetiyle $I_{sc}=0,2A$

Sıcaklık etkisini, Denklem (2.2)'deki I_{sc} - V_{oc} fonksiyonuna eklemek için, V_{oc} modelleme denklemi, hem I_{sc} 'yi hem de T 'yi hesaba katarak ($V_{oc}(I_{sc}, T)$), Denklem (2.7)'de belirlenmiş PV için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$V_{oc}(I_{sc}, T) = V_{oc}(I_{sc})_{T_{ref}} + dVt(T-T_{ref}) = V_{oc_{ref}} + k_1 \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_{sc_{ref}}}\right) + k_2 \cdot (I_{sc} - I_{sc_{ref}}) + dVt(T-T_{ref}) \quad (2.7)$$

$$V_{oc}(I_{sc}, T) = 5,84 + 0,5028 \ln\left(\frac{I_{sc}}{0,2}\right) - 1,8503(I_{sc} - 0,2) - 0,017(T - 35)$$

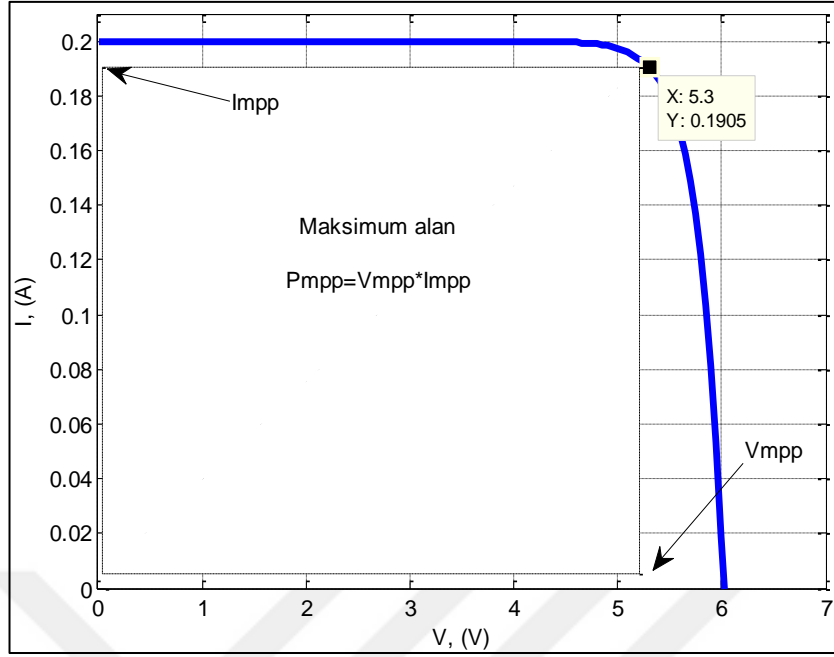
2.2.3. Sabit T ve I_{sc} , I-V çıkış karakteristik testi

PV'nin I-V çıkış karakteristiği referans ışınımında ($I_{sc}=0,2A$) ve sabit sıcaklıkta ($T=35^\circ C$) gerçekleştirilmiştir. I-V çıkış karakteristiği doğrusal olmayan bir eğridir. Bu modelleme Denklem (2.8) yardımıyla oluşmaktadır. K_p maksimum güç noktasının modellemesini sağlayan bir katsayıdır.

$$I = I_{sc} - I_{sc} \cdot e^{K_p \cdot \left(\frac{V}{V_{oc}(I_{sc}, T)} - 1\right)} \quad (2.8)$$

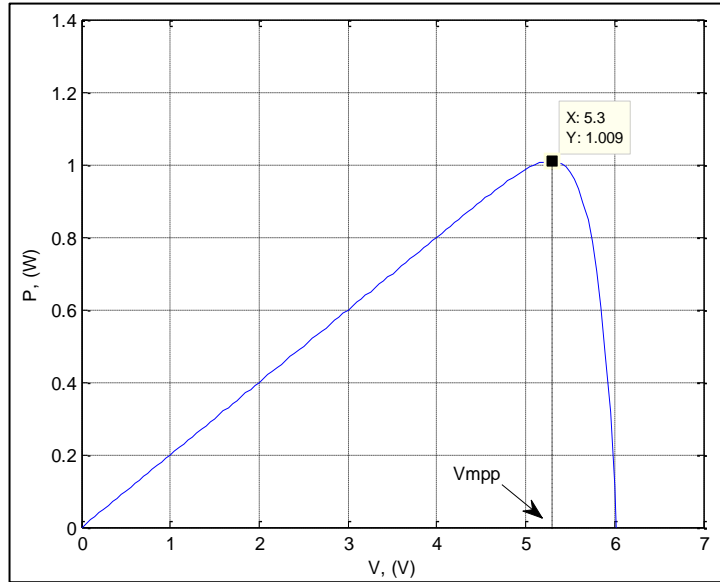
PV'nin maksimum güç noktası (MPP) değeri, aynı boyuttaki farklı güneş panelleri karşılaştırmak için güzel bir parametre ve göstergedir. Maksimum güç noktası düşük olduğu takdirde güneş panelinin verimliliği de çok düşüktür.

PV'nin MPP değeri, PV I-V çıkış eğrisinin bir noktası olarak gerilim ve akım çarpımının en büyük değerini temsil eder. MPP'nin tanımlaması Şekil 2.12'te gösterilmiştir.



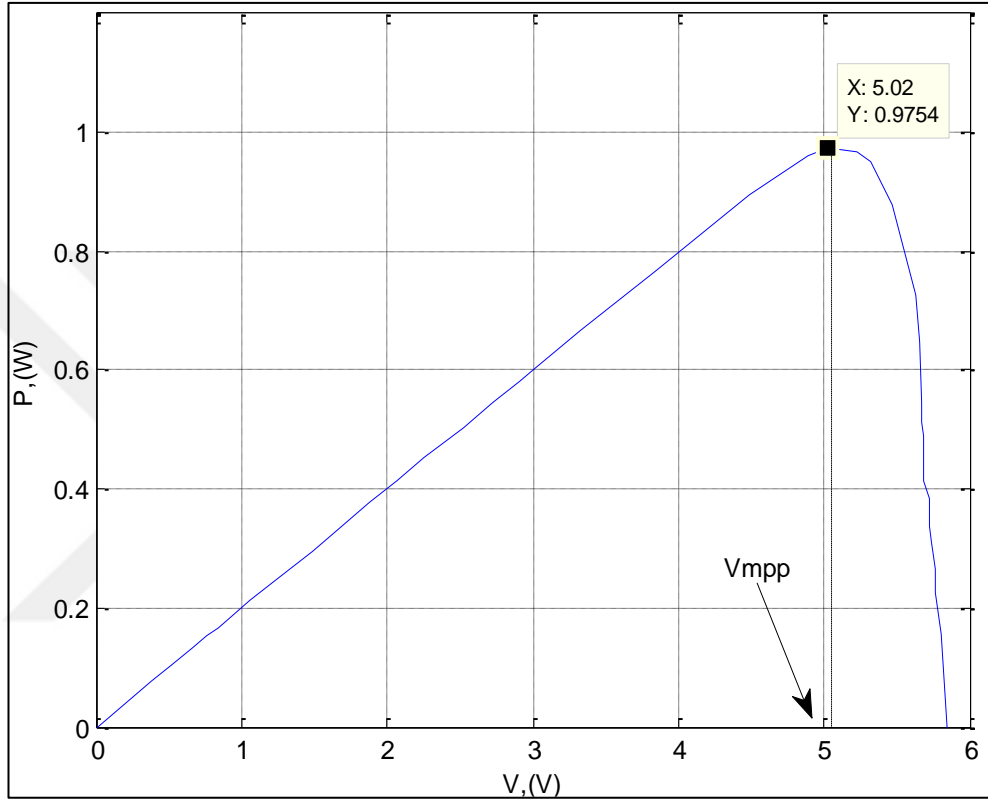
Şekil 2.12. MPP tanımlaması

Bu noktayı bulabilmesi için çıkış güç – voltaj (P-V) karakteristiğinin çizilmesi gerekmektedir. P-V karakteristiğinin genel örneği Şekil 2.13’de betimlenmektedir. P-V eğrisinde en yüksek güç değerine karşılığında gelen maksimum güç noktasındaki gerilim (V_{MPP}) tanımlanmaktadır.



Şekil 2.13. P-V karakteristiğinin genel örneği

K_p katsayısının bulunabilmesi için MPP'nin bulunması gerekmektedir. PV'nin I-V çıkış karakteristiği, referans ışınımında ve sabit sıcaklıkta deneysel olarak elde edilmiştir. Deneysel I-V eğrisindeki akım ve voltaj değerleri çarpılınca, laboratuvarında kullanılan PV'nin P-V karakteristiği Şekil 2.14'te gösterildiği gibi elde edilmektedir. En yüksek güç değerine karşılığın gelen V_{MPP} , 5,02V'a eşittir.



Şekil 2.14. PV'nin V_{MPP} belirtmesi için P-V karakteristiği

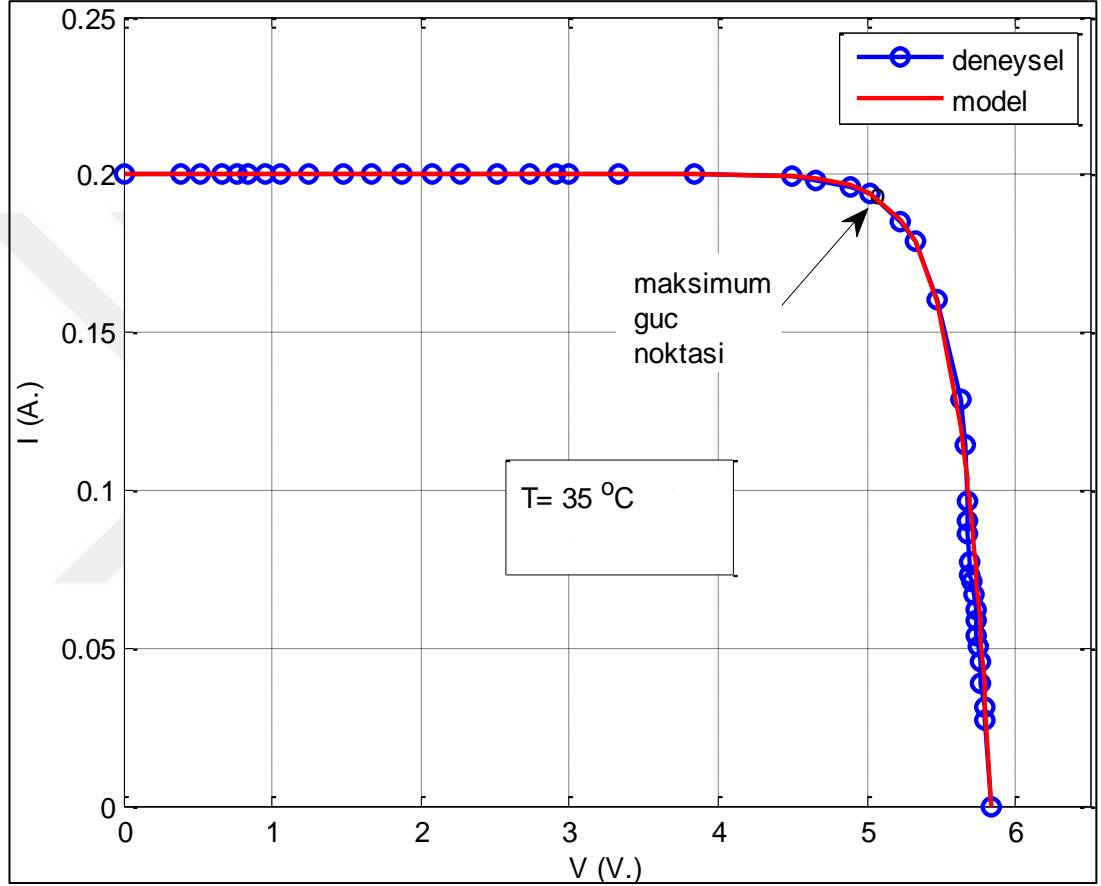
Şekil 2.15'de gösterilmiş olan deneysel I-V karakteristiğinde $V_{oc}=5,84V$, V_{MPP} 'ye karşılığın gelen maksimum güçteki akım (I_{MPP}) 0,1943A olarak ölçülmüştür.

V_{MPP} ve I_{MPP} değer çifti Denklem (2.8)'deki akımın ve gerilimin yerine yazıldığında, K_p ifadesi Denklem (2.9) ile tanımlanmaktadır.

$$K_p = \frac{\ln\left(\frac{I_{sc}-I_{MPP}}{I_{sc}}\right)}{\left(\frac{V_{MPP}}{V_{oc}}-1\right)} \quad (2.9)$$

Tezdeki PV için, V_{oc} , I_{sc} , V_{MPP} ve I_{MPP} değerlerine göre K_p katsayısı 25,3388 olarak bulunmuştur. Bu K_p değeri bir kez hesaplanmaktadır ve değeri modelde sabit tutulmuştur.

Deneysel ve modellemedeki PV'nin I – V çıkış eğrileri, referans ışınım şiddeti için, ($I_{sc}=0,2A$) Şekil 2.15'de gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Referans ışınım şiddeti $I_{sc}=0,2A$ ve sıcaklık $T=35^{\circ}C$ için deneysel ve modellemedeki PV'nin I – V çıkış karakteristikleri

Güneş panelinin farklı sıcaklık T ve farklı ışık şiddetlerine göre (farklı I_{sc}) genel I – V çıkış karakteristiğinin modellenmesi için, ilk olarak Denklem (2.7)'de bulunan $V_{oc}(I_{sc},T)$ değeri, belirli I_{sc} ve T 'ye göre bulunmaktadır. Ardından, bulunan $V_{oc}(I_{sc},T)$ değeri, Denklem (2.8)'de yerine yazılarak I-V karakteristiği tanımlanır. Şekil 2.16'da farklı I_{sc} ve T değerleri için beklenen I-V karakteristik örnekleri verilmektedir. Model sonuçlara karşı deneysel V_{oc} değerleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir. Bağıl hata Denklem (2.10)'de hesaplanmıştır.

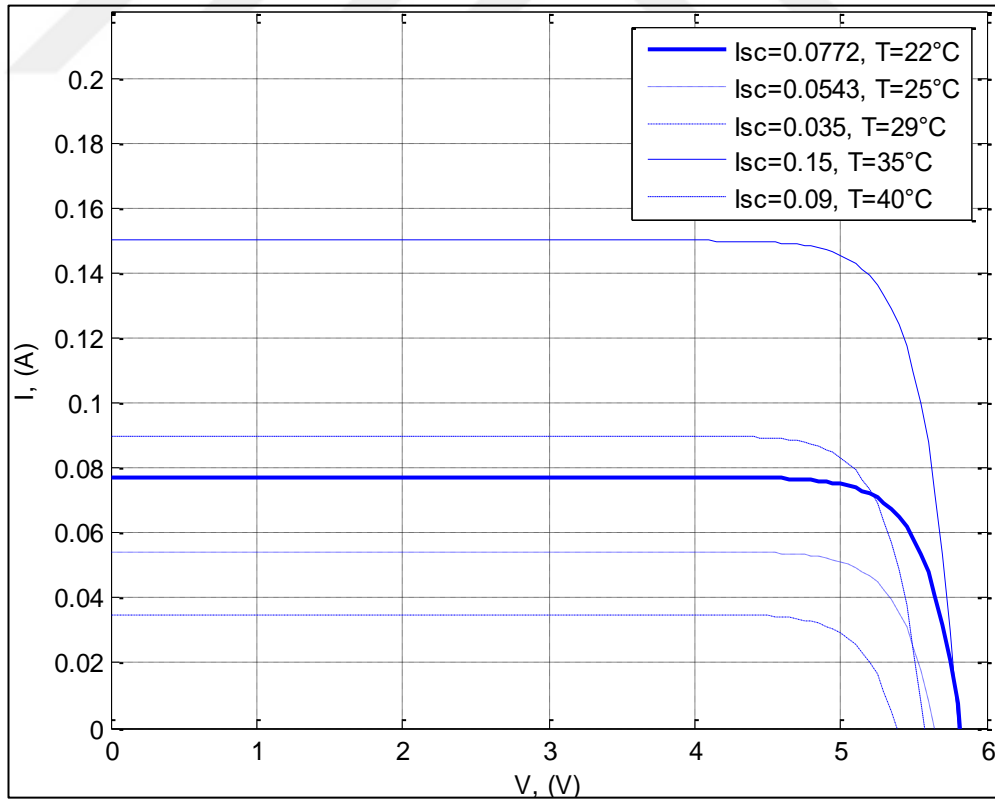
$$\text{Bağıl hata} = \frac{\text{model değeri} - \text{deney değeri}}{\text{deney değeri}} \cdot 100\% \quad (2.10)$$

Deney değerleri gerçek değer olarak kabul edilmektedir.

Tablo 2.1. $V_{oc_{deney}}$ ve $V_{oc_{model}}$ arasındaki bağıl hatalar

I_{sc}, A	$T, ^\circ C$	$V_{oc_{deney}}, V$	$V_{oc_{model}}, V$	Bağıl hata, %
0,0772	22	5,81	5,8231	0,2255
0,0543	25	5,59	5,6375	0,8497
0,035	29	5,36	5,3844	0,4552
0,15	35	5,79	5,8014	0,1969
0,09	40	5,56	5,57	0,1799

Tablo 2.1’de görüldüğü gibi en büyük bağıl hata – %0,85.



Şekil 2.16. Farklı I_{sc} ve T örneklerine göre, PV'nin I-V çıkış karakteristikleri.

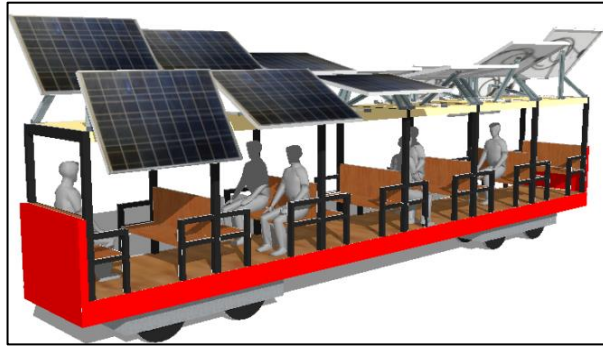
2.3. Güneş Panelinin Yerleştirilmesi

Treni ya da raylı taşıt besleyen güneş panelinin farklı yerleşim fırsatları bir avantaj sağlar. Güneş panelinin yerleşimi ilk olarak Şekil 1.3 ve Şekil 2.17'deki gibi çatıda olabilir.



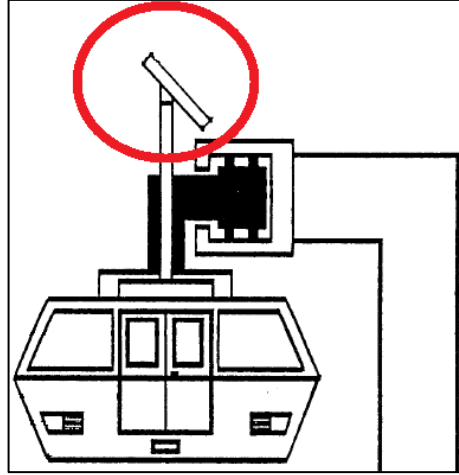
Şekil 2.17. Güneş panelinin çatıdaki yerleşimi [39]

İkinci seçenek olarak hareket eden güneş panelleri vardır. Daha fazla ışınım enerjisinin güneş paneline gelmesi için, PV paneli ışığın geliş yönüne göre pozisyon alır. Nasıl bir ayçiçeği doğudan batıya güneşi takip ederse, güneş panelleri de güneşi takip edebilir [35]. Bunun için ilave konum ayarlama mekanizmaları sisteme eklenebilir. Şekil 2.18'te güneşi takip panelli bir taşıt gözükmektedir. 'Helianto' adı verilen bu araç ayçiçeği gibi davranır.



Şekil 2.18. 'Helianto' ultra – hafif güneş treni [40]

Asılı ray sistemlerinde, PV'nin tekerlerin ve rayların yanına oturması çok uygundur. Böyle durumda panel rayın yanına monte edilebilir. İstenirse güneş takip sistemi de olabilir. Şekil 2.19'de böyle bir sistemin prensip şeması verilmektedir.



Şekil 2.19. Trenin üstünde – dik ayaklarda güneş panelinin yerleşimi [41]

PV çatıya koyulmadığında çoğunlukla PV ile üreten elektrik enerji direkt motora uygulanmamıştır, bu takdirde elektrikleştirme raylara doğru gerçekleştirilebilmektedir. Böyle sistemde güneş panelleri durakların çatısına yerleştirilebilmektedir. Şekil 1.5’te bu opsiyondaki örneği gösterilmektedir.

Tren üzerindeki bir güneş tüneli PV yerleşimin güzel bir örnektir. Güneş panelleri aracın gittiği yol üzerinde sabit olarak konumlandırılabilir. Tam Hunt “You can’t get much juice from panels on trains, but you can with panels over them,” diye yorumluyor [42]. Tren Şekil 2.20’de gösterilen tünelin altında gider.



Şekil 2.20. Güneş tüneli örneği, Belçika [21]

Tamamen ayrı güneş sistemi de uygun olabilmektedir. Avustralya’da tren (Şekil 2.21) bir PV santralinden enerji alır. Şehrin dışında oluşturulan iki yeni güneş santrali yıllık 80 GW saat elektrik üretiyor.



Şekil 2.21. PV santralinden enerji alan tren [43]

3. TOPLU TAŞIMA TRENLERİNDE KULLANILABİLECEK ELEKTRİK MOTORLAR

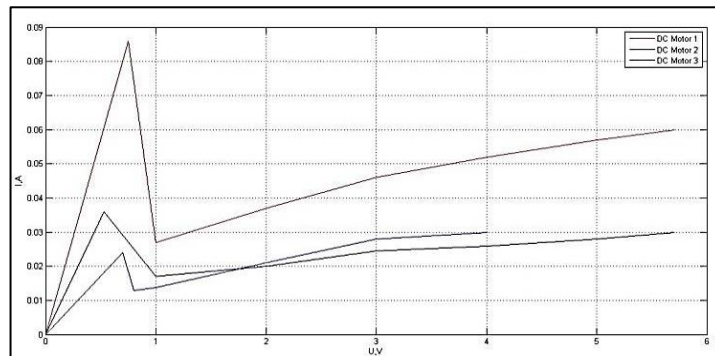
Elektrikli araba ve otobüs gibi araçlarda genel olarak üç fazlı senkron motorlar kullanılmaktadır. Bu motorları üç fazlı alternatif akım (AC) beslemektedir. Senkron motorların avantajı, asenkron motorlarla karşılaştırıldığında, daha hassas kontrol edilebilmesidir [44].

Genel olarak trenlerde çekme DA motor tercih edilmektedir, çünkü PV'nin veya bataryanın ürettiği elektrik enerjisi doğru akım motoruna gönderilmektedir. Güneş panelinden doğru akım üretildiği için inverter yada diğer ilave cihazlar gerekmemektedir. DA motorların jeneratör olarak çalışılmasında da avantaj vardır. Trenler rejeneratif frenleme sisteminden faydalanabilmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada trenin itici kuvveti olarak sabit mıknatıslı (PM) dişli DA motor kullanılmıştır.

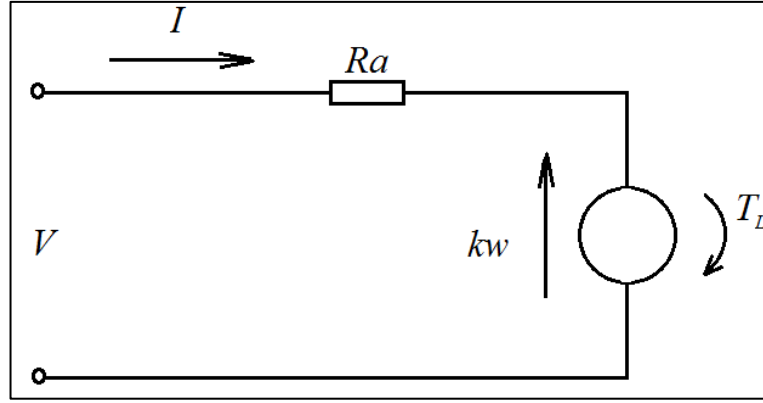
3.1. Sabit Mıknatıslı DA Motorun Genel Karakteristikleri

Motorlar sahip oldukları parametreler ve yük durumlarına göre bir I-V giriş karakteristik değişimi gösterir. Örnek olarak birkaç farklı motor ile deneysel çalışma yapılmıştır, onların I-V karakteristikleri Şekil 3.1'de belirtilmiştir.

Motorun genel elektrik eş değer devre şeması Şekil 3.2'de veilmektedir.



Şekil 3.1. Farklı motorların I-V karakteristikleri



Şekil 3.2. Motorun elektriksel eş değer şeması

Sürekli durumda bulunan PM DA motor performans modelinin Denklemleri (3.1, 3.2) gösterilmiştir [45].

$$V=I \cdot R_a+k \cdot w \quad (3.1)$$

$$k \cdot I=B \cdot w+T_0+T_L \quad (3.2)$$

Buradaki w – açısal hız (rad/s); R_a – armatür sargısı direnci (Ohm); k – dönme momenti katsayısı (N.m/A.) aynı zamanda açısal hıza bağlı voltaj katsayısı (V.s/rad); T_0 – motorun ilk hareketi başlamak için gerekli minimum dönme momenti (N.m); B – dinamik sürtünme dönme momenti katsayısı, hava direnci kuvvetine bağlantılıdır; ve T_L – mekanik yük momentidir (N.m).

Denklem (3.1, 3.2) motorun mili hareket ettiği durum ($w>0$) içindir. O zaman Denklem (3.2)'dan türetilmiş açısal hız ifadesi ($w = \frac{k \cdot I \cdot (T_0+T_L)}{B}$) Denklem (3.1)'de yerine yazılarak Denklem (3.3)'teki yüklerle ve makine parametrelerine göre giriş I-V modeli tanımlanabilir. Verilen bir gerilimde I akımı cevabı için Denklem (3.4) kullanılabilir.

$$V = I \cdot R_a+k \cdot \left[\frac{k \cdot I \cdot (T_0+T_L)}{B} \right] = I \cdot \left(R_a+\frac{k^2}{B} \right) - \frac{k}{B} \cdot (T_0+T_L) \quad (3.3)$$

$$I = \frac{V+\frac{k}{B} \cdot (T_0+T_L)}{\left(R_a+\frac{k^2}{B} \right)} = \frac{1}{\left(R_a+\frac{k^2}{B} \right)} \cdot V+\frac{\frac{k}{B}}{\left(R_a+\frac{k^2}{B} \right)} \cdot (T_0+T_L) \cong mx+n \quad (3.4)$$

R_a , T_0 , B ve k motorun kendi yapısal parametreleridir. T_L parametresi - raylı aracın taşıdığı yüklere bağlıdır.

3.2. Dişli PM DA Motorun Modellemesi

6V, 1200 RPM, $k=0,0406$ V.s/rad ve $R_a = 33$ Ohm parametrelere sahip olan redüktörlü (eksenel dişli mekanizma) bir motor çalışmada kullanılmaktadır. Motordaki dişli mekanizması daha yüksek moment daha düşük hız tip şeklindedir. Böylece DA motorun mil momenti mekanik yüke göre yükseltilmekte ve aynı oranda devri düşmektedir. Tekerler redüktör şaftına bağlıdır. Tekerin yarı çapı (r) 0,0125m'dir. Raydaki motor sistemin I – V giriş karakteristiği, ayarlı DA kaynak yardımıyla, farklı mekanik yükler için ölçülmüştür. Mekanik yükler, taşıt gövdesi dara ağırlığından (81gr.), dara ağırlığının 3,5 katına kadar (281gr.), farklı ağırlıklar için örneklenmiştir. Elde edilen eğriler Şekil 3.3'dedir.

Herhangi bir yük için motorun dönmeye başladığı kritik bir akım (I_{st}) ve gerilim (V_{st}) değerleri vardır. Bu değerlerden daha düşük çalışma akım ve voltajında motor dönmekte ve motor sistemi sadece R_a armatür sargı direncinden oluşmaktadır. $w>0$ durumu bu başlangıç noktalarından itibaren daha büyük çalışma noktaları aralığında oluşmaktadır. I_{st} ve V_{st} değerleri Tablo 3.1'da bulunmaktadır. Çizgisel hız Denklem (3.5) yardımıyla hesaplanmıştır.

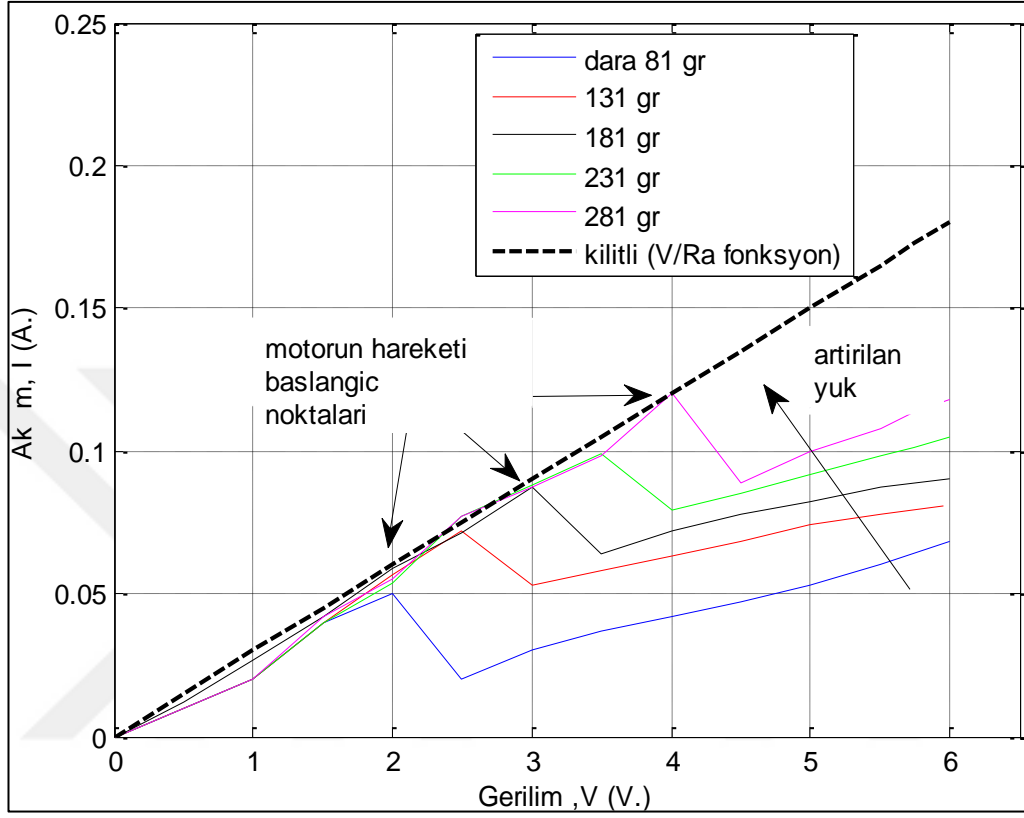
$$v = \frac{L}{t} \quad (3.5)$$

Burada L raylı taşıtın geçtiği mesafe, t zaman deneysel olarak elde edilmiş değerleridir.

Tablo 3.1. Minimum hareket başlatmak için gerekli akım ve voltaj değerleri

Ek yük, g	I_{st} , A	V_{st} , V
0	0,05	2
50	0,072	2,5
100	0,087	3
150	0,099	3,5
200	0,12	4

Şekil 3.3'te gösterilen I – V giriş karakteristiği; raylı taşıt raylar üstünde hareket ettiğinde ölçülmüştür. Her eğride, belirli bir başlangıç noktası var. Bu noktadan sonra motor dönmeye başlayıp, raylı taşıtı hareket ettirmektedir.



Şekil 3.3. Farklı yüklere göre örneklenmiş raylı taşıt sistemin I-V giriş karakteristiği

Grafikte görüldüğü gibi, başlangıç noktaları yük arttıkça da artmaktadır. Verilen bir çalışma voltajı değeri için, yük arttıkça akım değerleri artmakta ve yüklendikçe, motor kilitli durumdaki karakteristiğe (V/Ra fonksiyonu) yaklaşmaktadır.

Şekil 3.2'deki grafiklere dikkatle bakıldığında, I-V eğrilerinin karakteristik yapısı Denklem (3.1-3.4)'teki model denklemleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Motorun kalkınma noktasından önce, farklı mekanik yüklerde, tüm eğriler neredeyse aynı doğrusal çizgiden geçmektedirki, bu doğrusal çizgi zaten R_a direncinin I-V giriş karakteristiğidir. $w = 0$ için, Denklem (3.1)'un sadece $V = I \cdot R_a$ kısmı gerçekleştirilmektedir ve motorun I-V giriş karakteristiği çizgisel olarak tanımlanmaktadır. R_a değeri motorun mili dönmediğinde hesaplanabilmektedir ve tüm başlangıç noktalarında aynı olması gerekmektedir. Farklı başlangıç noktadaki

deneysel olarak elde edilen I_{st} ve V_{st} değerleri Denklem 3.6 ile hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 3.2.'de bulunmaktadır.

$$R_a = \frac{V_{st}}{I_{st}} \quad (3.6)$$

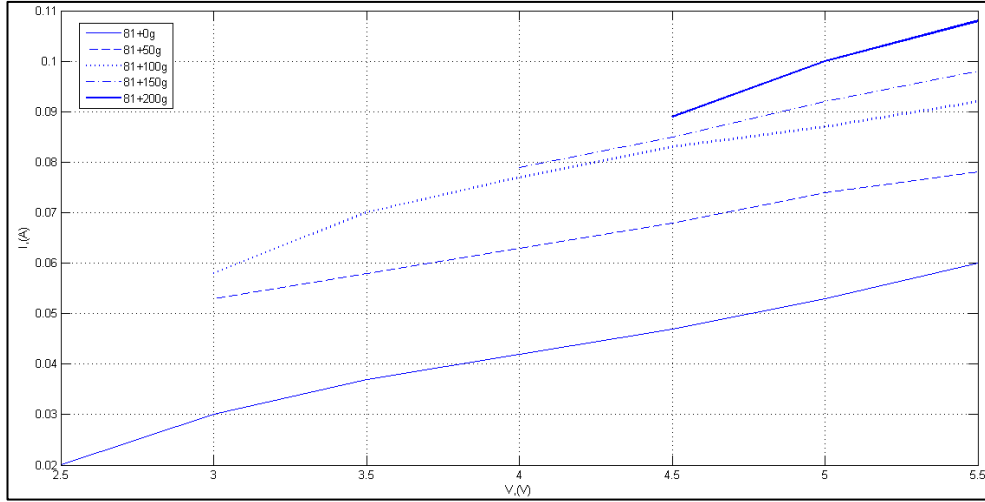
Tablo 3.2. Farklı başlangıç noktalar için R_a değerleri

Ek yük, g	R_a , Ohm
0	40
50	34,7
100	33,13
150	33,65
200	33,33

Sonuçlara göre dara ağırlığında başlangıç noktasının I_{st} değeri beklenenden daha düşük çıkmıştır. Bu ufak sapma ray veya arabasının kusurlu olduğundan kaynaklandığı şeklinde açıklanabilmektedir. Bu yuzden R_a değeri ortalama olarak 33 Ohm'dır.

şekil 3.3'da görüldüğü gibi kalkınma noktalarından sonra farklı yüklerdeki bireysel I-V eğrileri neredeyse paralel görünmektedir. Bu olayın açıklaması Denklem (3.4)'te bulunmaktadır. Denklem (3.4), temel olarak $y = m \cdot x + n$ gibi bir doğrusal fonksiyona benzer.

Burada B , k , R_a , T_0 sabit parametreler doğrusal fonksiyondaki eğim (m) terimini oluşturmuştur. n terimi ise T_L yük momenti ile ilgili ifadeye denk geldiğinden, n kısmı yk artıkça artmaktadır. Böylece her yeni ek yük ile, sabit eğimde (paralel olarak) düşey koordinatta I akımı yükselmektedir. Bu durumlar şekil 3.4'te görünmektedir.

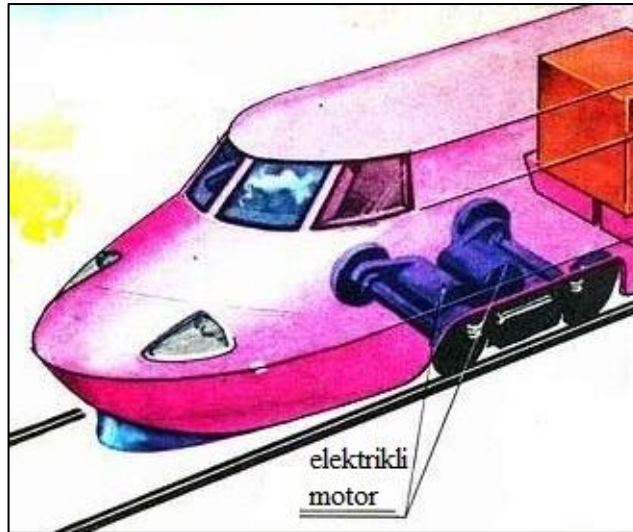


Şekil 3.4. Motorun I-V giriş karakteristiklerinin $w > 0$ kısmı

Eğrilerin ordinat ile kesişme noktaları her yük için n değeri tanımlamaktadır.

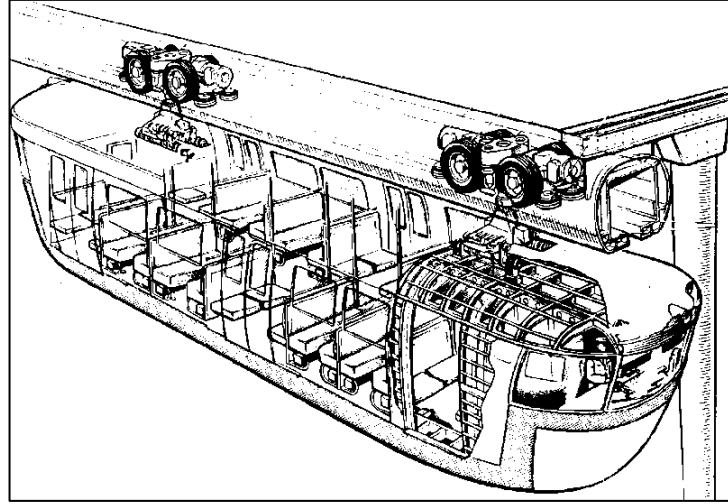
3.3. Motor Yerleşimi

En yaygın motor yerleşimi Şekil 3.5'te gösterilmektedir. İki ray sisteminde en uygun ve en kolayca gerçekleştirilecek bir opsiyondur.



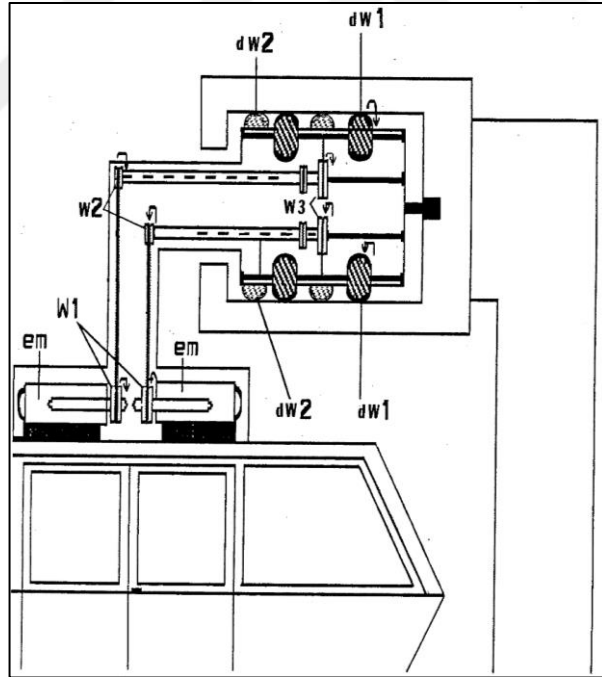
Şekil 3.5. Motorun trenin altında yerleşimi [46]

Asılı monoray sistemlerinde motor trenin üstüne yerleştirilebilmektedir. Aşağıdaki şekilde tekerlerin arasında bulunan motor tren ile verilmektedir.



Şekil 3.6. Asılı monoray treninin aktarma sistemi [47]

Motor trenin çatısında yerleştirilmiş hali de bulunmaktadır. Asılı ray sistemi de kullanabilecek bir yapıdır. Şekil 3.7’te trenin ya da raylı taşıtın çatısına konulan enerji aktarma sistemi örneklennmiştir.



Şekil 3.7. Enerji aktarma sistemi [41]

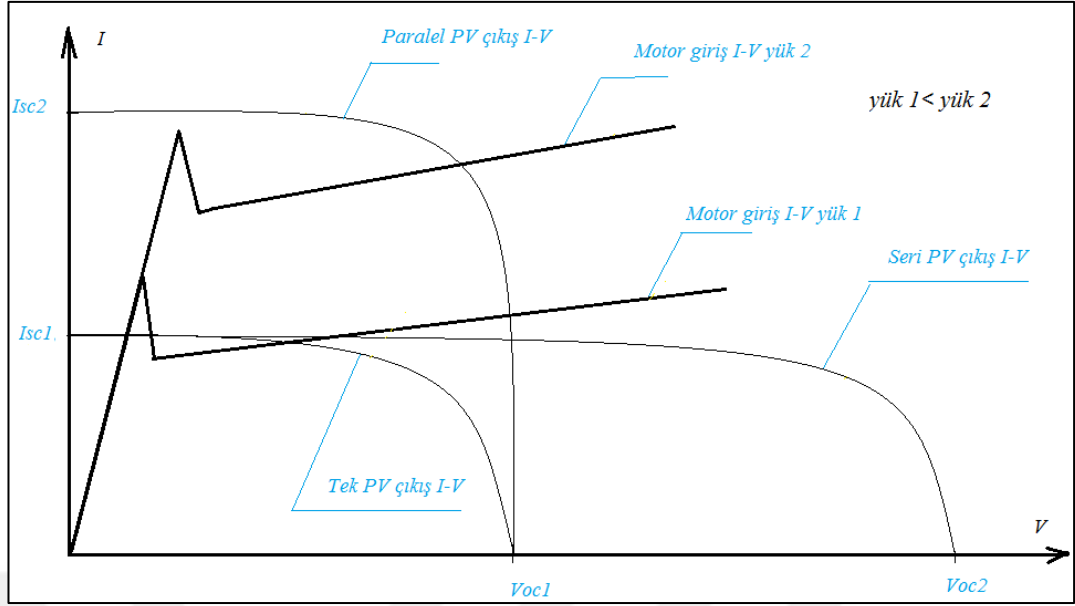
4. PV İLE RAYLI TAŞITININ ÇALIŞTIRILMASI VE PERFORMANS MODELİ

Uygun motor ve güneş paneli seçimi çok önemlidir ve performansı oldukça etkiler.

4.1. Genel PV-Motor-Batarya Teknik ve Dinamik Analizi

Bir PV-motor sistemi için, eğer bir motorla uygun olmayan panel kullanılırsa, kalkış hareketi için döndürme momenti yetmeyebilir ve motor dönmez. Araç hareket etmez. Motorun giriş I-V ve PV çıkış I-V eğrilerinin kesim noktasında sistem çalışır [48]. Şekil 4.1'de prensip olarak motor ve herhangi bir ışınımdaki güneş panelinin karakteristikleri birlikte gösterilmektedir. Aynı prensip şemada, PV'nin I-V karakteristikleri tek, iki PV seri ve iki PV paralel durumlar için örnek olarak verilmiştir. Tek PV'li sistem yük 1'li motoru döndürmez, çünkü kalkınma için gerekli başlangıç torkunu üretecek bir akım ve enerjiye sahip değildir. Çözüm olarak seri, paralel veya seri-paralel bağlantı kurulmaktadır. Paralel bağlantı yeterli akım, seri bağlantı yeterli gerilim sağlayabilir. Aynı yük 1 için paralel iki PV'li sistemde motor kalkınma için yeterli akıma sahip olur ve ilgili yükte motor döner (Şekil 4.1'de görüldüğü gibi). Aynı yük 1 için iki seri PV'li sistem yine motoru döndürememektedir, çünkü seri sistemde karakteristik eğri gerilim bakımından artmış, fakat akım aynı kalmıştır. Sistemin kesim noktaları yeni duran yerde gerçekleştiği için motor yine dönmez. Herhangi bir yükte tek bir PV sistemi motoru döndürebilseydi, iki seri PV'li sistem yine motoru döndürebilecek, hatta daha büyük devirle motoru çalıştırma şansı verirdi.

Öyle ise herhangi bir yükte ve ışınımdaki motorun giriş I-V ve PV'nin sisteminin çıkış I-V karakteristiklerinin kesim noktası sistemin çalışma noktalarını ve böylece gösterebileceği performansı belirler. Bu prensip altında, PV sistem ve raylı taşıtın karakteristikleri birlikte incelenecek ve kesim noktaları tespit edilerek sistem performansı analiz edilecektir.



Şekil 4.1. Motorun ve güneş panelinin dinamik analizi

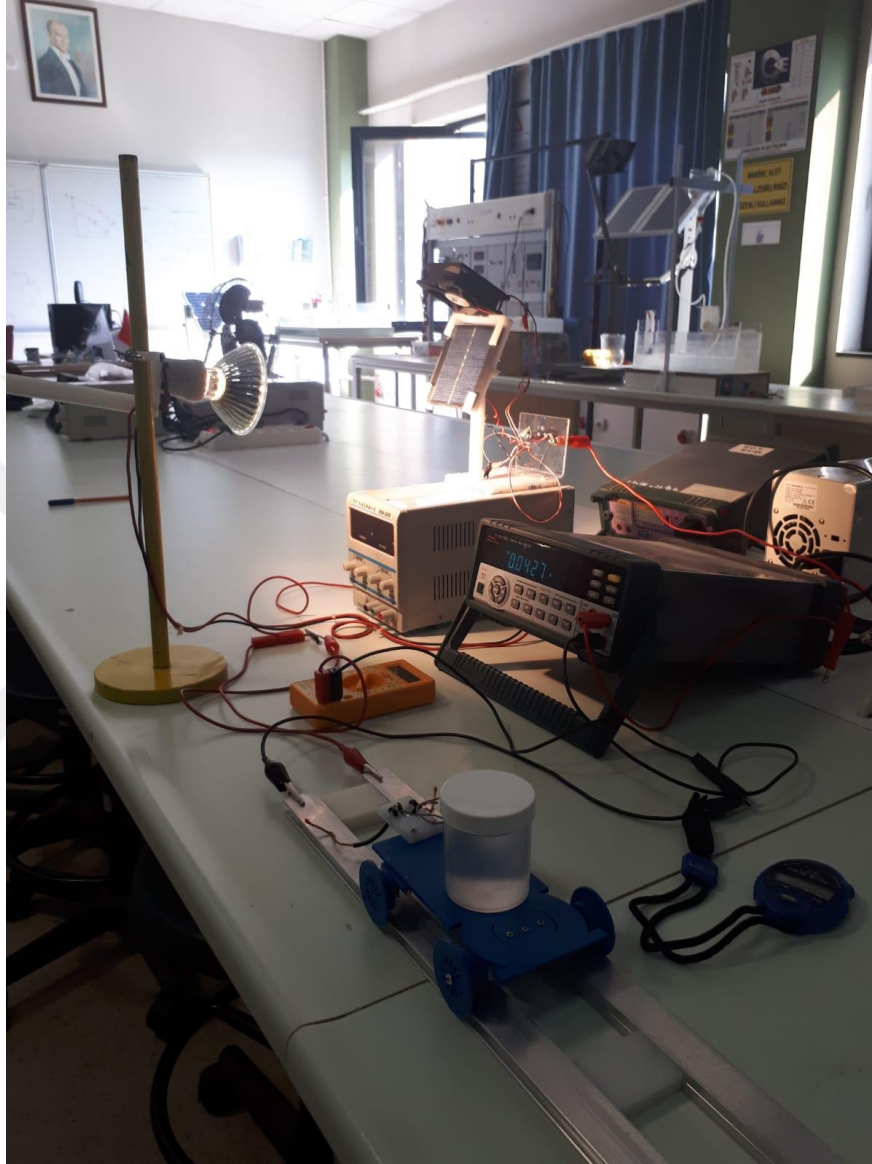
4.2. PV – Motor Sistemi ve Deneysel Çalışma

PV – motor sisteminin modellenmesi değişik şartlar altında sistemin davranışının incelenmesi ve tahmin edilmesi amacıyla yapılmıştır. Güneş paneli ve raylı taşıt farklı ışınım şiddeti, farklı sıcaklık ve farklı yükler ile bileşik sistem olarak çalışmaktadır.

Tüm gerekli modelleme testleri gerçekleştirmek için raylı taşıt sistemi PV'ye doğrudan bağlanmıştır. Deneysel kurulumun prensip şeması Şekil 4.2'de gösterilmektedir.

Deneysel çalışmalarda, tren yolu yapmak için çift alüminyum ray kullanılmıştır. Düşük dirence sahip olan ray malzemesi, iyi bir iletken olarak seçilmiştir. Elektrik enerjisi bakır fırçalar ile ray üzerinden motora iletilmektedir. PV raylı taşıtın tavanına yerleştirebilir bir durumdadır. Ancak bu deneysel çalışmada tüm testlerin kolaylığı açısından PV sistemi rayların yanında sabitlenmiştir. Pratik uygulamalarda güneş panelleri hem çatıda, hem de tren duraklarının çatısında ya da rayların yanında olan herhangi alanda konuşlanabilmektedir. Bu durumda enerji yeterli miktarda sağlanmaktadır.

Yapılan deney düzeneğinde, ışınım seviyesi %100 – 27 civarında değiştirilmiştir. En yüksek örneklenmiş ışınım şiddeti, $I_{sc}=0,2$ A'a karşılık gelen bir değerdir. Bu değer PV'nin nominal kısa devre akımıdır.



Şekil 4.2. Deneysel kurulum

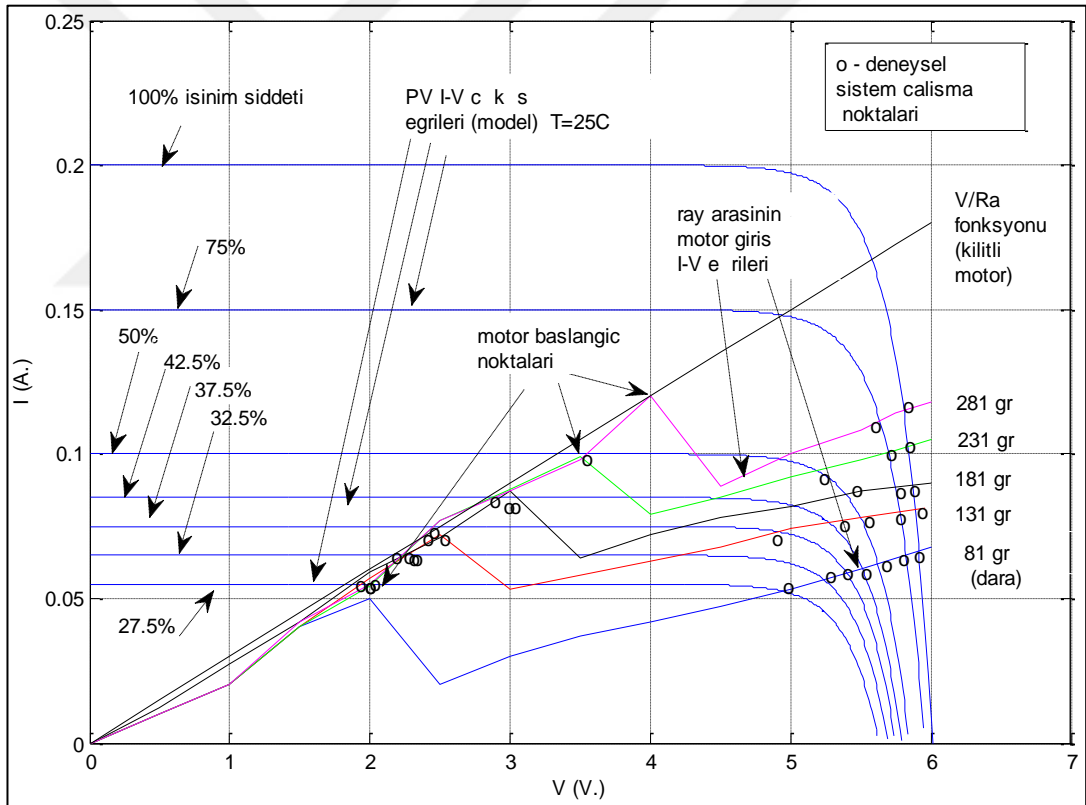
Deney esnasında PV-motor sisteminin çalışma akımı ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Üstelik, arabanın çizgisel ortalama hızı (v), Denklem (3.5) kullanılarak tespit edilmiştir.

PV modülün I-V çıkış karakteristiği sabit sıcaklıkta $T=25^{\circ}\text{C}$, farklı ışınım şiddetiyle ve motorun I-V giriş karakteristiği farklı mekanik yüklerle Şekil 4.3'te verilmektedir.

Denklem (4.1)'de gösterildiği gibi, PV'nin I-V çıkış karakteristiğinin motorun I-V giriş karakteristiği ile kesişme noktası, belirli ışınım ve ağırlıkta, PV – motor sistemin çalışma noktasıdır.

$$f(V,I)_{PV_{\text{çıkış}}} = f(V,I)_{\text{motor}_{\text{giriş}}} \quad (4.1)$$

Deneysel olarak ölçülen sistem çalışma noktaları (I,V değerleri) her ışınım şiddeti ve her mekanik yük için Şekil 4.3'te 'o' işaret ile gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Modelleme esnasında elde edilen ve deneysel I – V karakteristiğinin çalışma noktaları farklı ışınım ve ağırlık değerlerinde

Böylece, fonksiyon (4.1)'in temelinde, PV – motor sistemin davranışı tahmin edebilir. Şekil 4.3'te PV ve motor eğrilerin kesim noktaları ise model tahminleridir, çünkü PV için giriş olarak verilen bir I_{sc} ve T değerlerine göre modellenmiş, çıkış I-

V eğrileri kullanılmaktadır. Çalışma noktaları (I,V) bakımından model tahmini ile deneysel ölçümler ('o' işaretleri ile eğri kesişme noktaları) birbirine çok yakındır.

Karşılaştırma sonuçları Tablo 4.1'da bulunmaktadır. Bağıl hatalar Denklem (2.10) ile hesaplanmıştır.

Tablo 4.1. Modeldeki ve deneysel I-V değerleri, karşılaştırılması ve bağıl hataları

Yük,gr	I_{sc},A	I_{den},A	V_{den},V	I_{model},A	V_{model},V	Bağıl hata I,%	Bağıl hata V,%
81+0	0,05	0,054	4,95	0,054	4,95	2,96	0
	0,065	0,058	5,25	0,0564	5,24	2,76	0,19
	0,075	0,059	5,37	0,0587	5,4	0,51	0,56
	0,085	0,0592	5,5	0,06	5,52	1,35	0,36
	0,1	0,062	5,65	0,062	5,625	0	0,44
	0,15	0,064	5,77	0,0651	5,82	1,72	0,87
	0,2	0,065	5,88	0,0666	5,91	2,46	0,51
81+50	0,05	-	-	-	-	-	-
	0,065	-	-	-	-	-	-
	0,075	0,071	4,87	0,073	4,925	2,82	1,13
	0,085	0,076	5,35	0,0761	5,28	0,13	1,31
	0,1	0,077	5,52	0,078	5,5	1,3	0,36
	0,15	0,078	5,75	0,079	5,775	1,28	0,43
	0,2	0,08	5,9	0,082	5,885	2,5	0,25
81+100	0,05	-	-	-	-	-	-
	0,065	-	-	-	-	-	-
	0,075	-	-	-	-	-	-
	0,085	-	-	-	-	-	-
	0,1	0,088	5,44	0,086	5,39	2,27	0,92
	0,15	0,087	5,75	0,0885	5,75	1,72	0
	0,2	0,088	5,85	0,089	5,87	1,14	0,34

Tablo 4.1. (Devam) Modeldeki ve deneysel I – V değerleri, karşılaştırılması ve bağıl hataları

81+150	0,05	-	-	-	-	-	-
	0,065	-	-	-	-	-	-
	0,075	-	-	-	-	-	-
	0,085	-	-	-	-	-	-
	0,1	0,092	5,2	0,0941	5,185	2,28	0,29
	0,15	0,1	5,68	0,1005	5,69	0,5	0,18
	0,2	0,103	5,81	0,1025	5,83	0,49	0,34
81+200	0,05	-	-	-	-	-	-
	0,065	-	-	-	-	-	-
	0,075	-	-	-	-	-	-
	0,085	-	-	-	-	-	-
	0,1	-	-	-	-	-	-
	0,15	0,11	5,57	0,113	5,62	1,18	0,9
	0,2	0,117	5,8	0,115	5,81	1,71	0,17

Modelin deneysel değerleri ile arasında akım için ortalama bağıl hatası %1,5 -2 civarında hesaplanmıştır, maksimum akım bağıl hatası %2,96'dir. Genel olarak voltaj için bağıl hatalar %0,5-1 civarlarındadır, maksimum gerilim bağıl hatası %1,31'dir.

Şekil 4.3'te, herhangi bir yükteki motorun I-V giriş karakteristiği için, kritik ışınım seviyesi vardır. Bu ışınım seviyesi ve üstündeki değerlerde motor dönmeye başlamaktadır. Motor çalışmasının sağlanması için, kalkınma noktasındaki akım, ışınım seviyesine karşılığa gelen I_{sc} 'den daha düşük olması gerekmektedir. Örnek olarak, raylı taşıt en ağır mekanik yük altında (281gr) sadece %65-100 ışınım aralığında hareket etmektedir. Motor hareket etmediği durumda, çalışma noktaları kalkınma noktasının sol tarafında gerçekleşir. Bu olay motorun kilitli olduğunu göstermektedir. Bu durumda PV I-V çıkış eğrisinde bir nokta olarak sadece motorun armatür direnci R_a çalışır anlamına gelir, PV eğrisinin doğrusal kilit V/R_a karakteristiği ile kesişme noktası, kilitli durumda sistemin çalışma noktası olarak tanımlanmaktadır.

Raylı taşıtın performansı ışınım şiddeti artıkça yükselmektedir. Sistemin çalışma noktaları (raylı taşıt hareket ederken) PV karakteristiğinde V_{oc} bölgesine yakın bulunmaktadır. Bu olay PV'den enerji depolama sisteminin (batarya) şarj edilmesine iyi bir fırsat vermektedir.

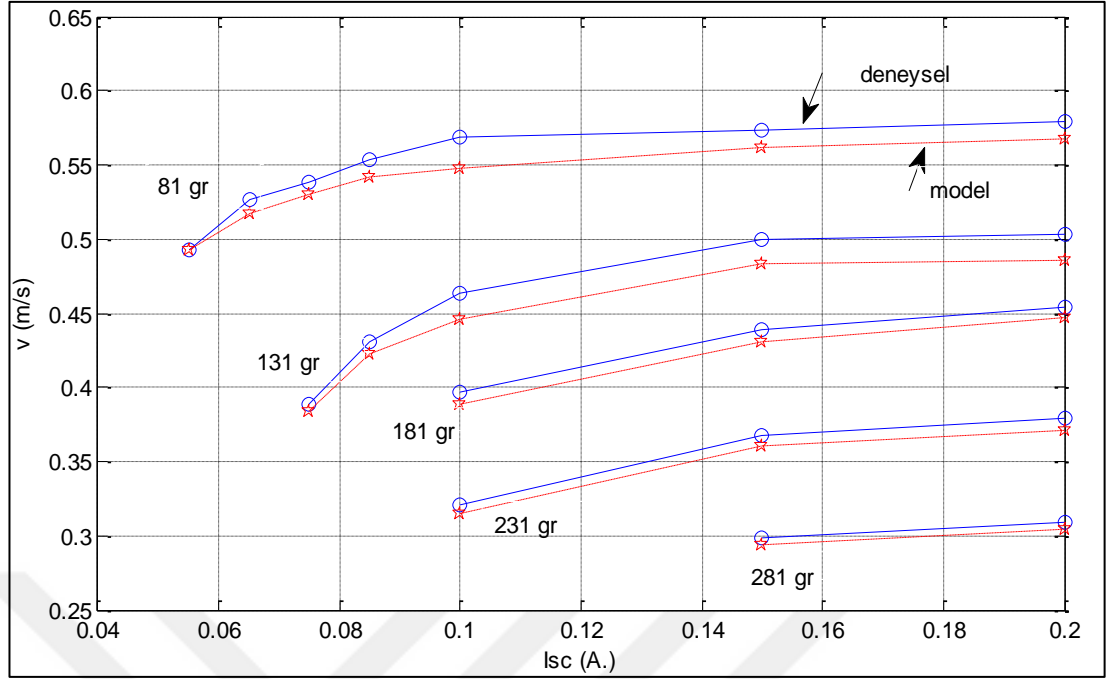
Sistem çalışma noktalarının akım ve gerilim değerleri (I,V) model yöntemiyle bulunduktan sonra, Denklem (3.1)'deki w ifadesi Denklem (4.2)'ye yazıldığında, çalışma noktalarına karşılık gelen raylı taşıtın çizgisel ortalama hızı (v_{av}) tahmin edilmektedir.

$$v_{av}(\text{model}) = \frac{v_{lim}}{2} = \frac{w \cdot r}{2} = \left(\frac{V - I \cdot R_a}{k} \right) \cdot r \cdot \left(\frac{1}{2} \right) \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de, çizgisel hız ortalama değeri olarak sayılmaktadır, çünkü deneysel çalışmada ray mesafesi ($L=2,5m$) boyunca raylı taşıt duruş pozisyonundan son noktaya kadar ivmeli hareket etmektedir. Çizgisel ortalama hızının model tahminleri ölçüm değerleri ile karşılaştırmak için, limit hızı (v_{lim}) sistem çalışma noktalarına göre (I,V) tanımlanmaktadır.

Ölçüm ve hesaplama çizgisel hızlarının karşılaştırma sonuçları Tablo 4.2'de gösterilmektedir. Bağlı hatalar Denklem (2.10) ile hesaplanmıştır.

I_{sc} -v eğrileri için model tahmini ve deneysel veriler farklı mekanik yüklere göre Şekil 4.4'te karakterize edilmiştir.



Şekil 4.4. Farklı mekanik yüklerle göre I_{sc} -v eğrileri

Tablo 4.2. Deneysel ve modelleme çizgisel hız değerleri (farklı ışın şiddeti ve mekanik yükler)

Yük, gr	I_{sc}, A	$v_{av}(\text{model}), \frac{m}{s}$	$v_{av}(\text{deneysel}), \frac{m}{s}$	Bağıl hata $v_{av}, 100\%$
+0	0,05	0,4932	0,4921	0,21
	0,065	0,5173	0,5263	1,72
	0,075	0,5301	0,5388	1,61
	0,085	0,5419	0,5531	2,02
	0,1	0,5478	0,5682	3,59
	0,15	0,5619	0,5734	2
	0,2	0,5681	0,5787	1,84
+50	0,075	0,3836	0,3888	1,34
	0,085	0,4224	0,431	2,01

Tablo 4.2. (Devam) Deneysel ve modelleme çizgisel hız değerleri (farklı ışın şiddeti ve mekanik yükler)

	0,1	0,4465	0,463	3,56
	0,15	0,4837	0,5	3,27
	0,2	0,4852	0,503	3,54
+100	0,1	0,3885	0,3968	2,1
	0,15	0,4311	0,4386	1,7
	0,2	0,447	0,4545	1,66
+150	0,1	0,3154	0,3205	1,6
	0,15	0,3603	0,3671	1,86
	0,2	0,3716	0,3788	1,91
+200	0,15	0,2941	0,2983	1,42
	0,2	0,3043	0,3094	1,63

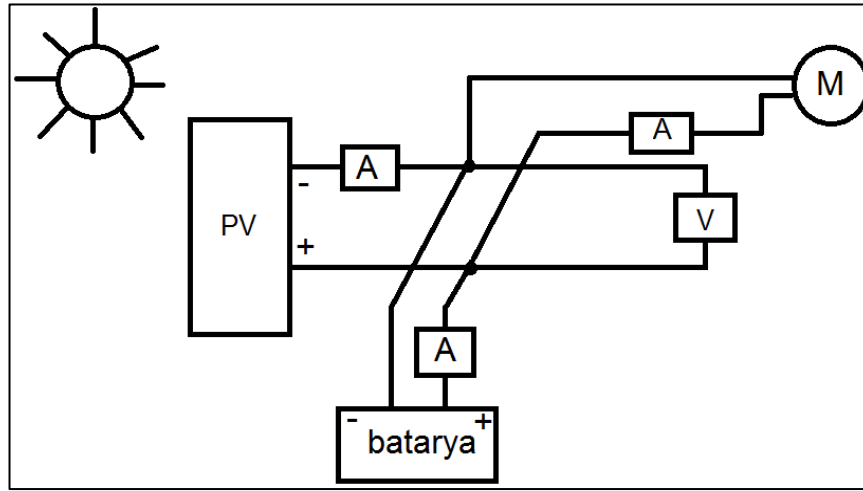
Raylı taşıtın tekerlerindeki kayma ve ray kusurları olabildiği için, ve kısa süreleri kronometre ile çok hızlı ve hassas okuyamadığımız için ölçüm kaynaklı hatalar olabiliyor. Genel olarak çizgisel hız üzerindeki bağlı hatası %1,5 – 3,5 civarındadır. Maximum bağlı hata - %3,59. Herşeye rağmen bağlı hatalar kabul edebilir.

5. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ

Elektrik aracının kesintisiz, güvenli ve özgür şekilde hareket etmesi için, güneş panelinden gelen elektrik enerjisini depolanan batarya sistemi kullanılabilir. Enerji depolaması, çeşitli tip bataryalar ile (kurşun-asitli, lityum ya da akış bataryası gibi) gerçekleştirilebilir. Özel bir ‘akış bataryasının’ özellikleri kurşun bataryadan daha avantajlıdır: 10 kat daha uzun ömürlü ve 10 kat daha iyi enerji depolama kapasitesi, hızlı doldurma süresi, düşük sıcaklıklara sahiptir [49].

5.1. PV-Motor-Batarya Sistemin Genel Çalışma Prensibi

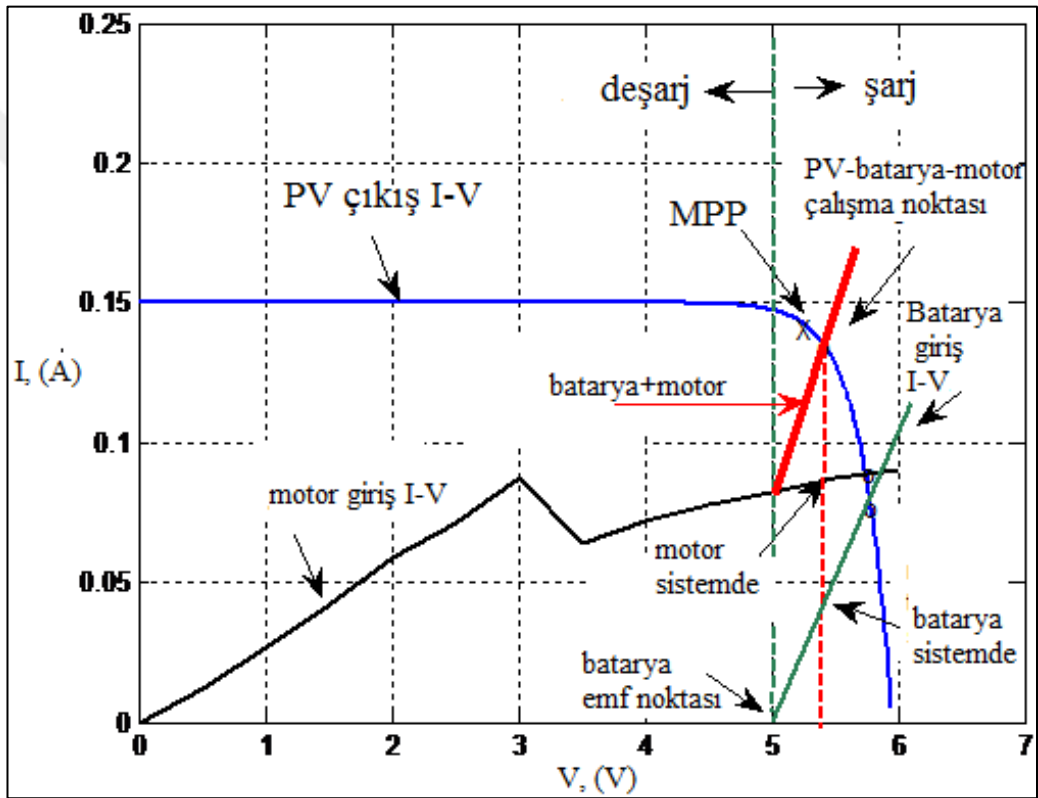
PV – motor sisteminin enerji verimliliğini arttırmak ve geliştirmek için, sistemin performans modeli kullanılarak, performanslı uyumlu bir enerji depolama sistemi yapılabilir. PV-motor –batarya Şekil 5.1’de prensip olarak görüldüğü gibi, paralel olarak bağlanır.



Şekil 5.1. PV-motor-batarya elektrik prensip şeması

Şekil 4.3’te görüldüğü gibi, PV – motor sisteminin çalışma noktaları (raylı taşıt hareket ederken) PV I-V eğrisinde açık devre gerilimi bölgesine yakındır. MPP noktası ise bu çalışma noktasının sol tarafında (daha yüksek akım daha düşük voltaj)

gerçekleşir. Herhangi bir ışınımında, bataryanın şarj edilmesi için, onun elektro motor kuvvet (emk, ya da açık devre voltaj) değeri PV-motor sistemi çalışma noktası geriliminden daha küçük olması gerekmektedir. Bu durumlarda PV hem raylı taşıt motorunu çalıştırabilir hem de enerji depolama sistemi (batarya gibi) şarj edilebilir. Aksi takdirde, (bataryanın emk sistemin çalışma noktasındaki voltaja göre daha düşük ise) ve güneş ışınım şiddeti düşük değerlerde ise, batarya deşarj olmaya başlar ve motoru besler. PV–batarya–motor sisteminin genel prensip şeması, batarya şarj edildiği durumda Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



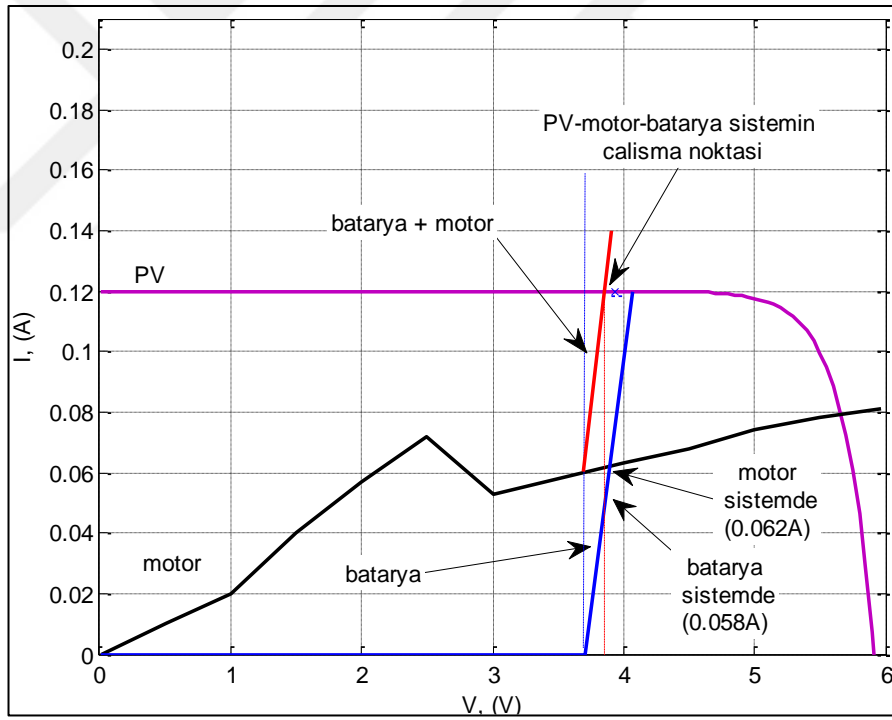
Şekil 5.2. PV – Batarya – Motor sisteminin çalışması

Şekil 5.2’de, iki elemanın (motor ve şarj modunda olan batarya) bireysel giriş karakteristiğinin voltaj değerlerin toplamı, paralel şekilde bağlanmış yeni PV – motor – batarya sisteminin giriş karakteristiğini oluşturur. Yeni batarya-motor I-V karakteristiği ile PV çıkış I-V karakteristiğinin kesim noktasından gerilim eksenine bir dikme çizildiğinde bu çizginin bireysel motor giriş I-V, batarya giriş I-V eğrilerinin kestiği noktalar, bileşik sistemin her bir elemanın çalışma noktalarını ifade eder. Paralel devrede zaten her eleman için gerilimler eşittir. Akımlar ise ışınım seviyesine göre eleman arasında paylaşılacaktır.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, batarya emk değeri doğrudan bağlı PV-motor çalışma noktası geriliminden daha düşük olması seçilip ve aynı zamanda MPP bölgesi PV-motor çalışma noktasının sol tarafında gerçekleşmiş ise, böyle durumda hem motor çalışır hem de batarya PV modülünden şarj edilir. Aynı zamanda PV MPP bölgesinde çalışması nedeniyle maksimum verimde ondan faydalanılması mümkün olacaktır. Sistemin çalışma noktası sürekli durum için geçerlidir. Motorun kalkınma anı için, ışınım seviyesi yeterli olmadığı taktirde, motor hem bataryadan hem de PV’den akım çekebilmektedir.

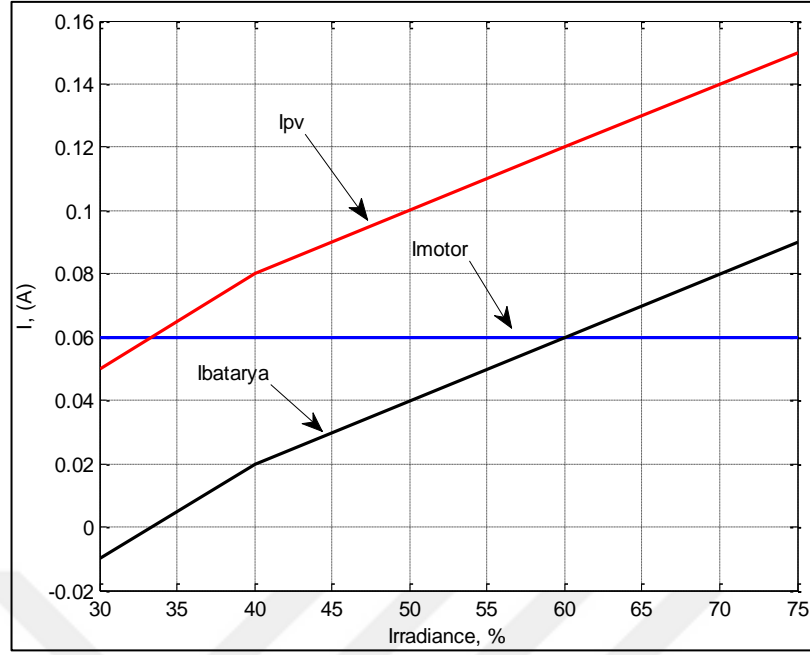
5.2. PV-Motor-Batarya Sistemin Deneysel Çalışması

Şekil 5.3’de, PV–motor–batarya sistemi deneysel çalışma kapsamında sonuç olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Deneysel PV–motor–batarya sisteminin I–V karakteristiği, $I_{sc}=0,2A$, $T=25^{\circ}C$

Yukarıdaki şekildeki durumda ışınım şiddeti ($I_{sc}=0,12A$) hem motoru hareket ettirmeye hem de bataryayı şarj etmeye yeterlidir.



Şekil 5.4. PV, motor, bataryanın I_{sc} -I karakteristikleri

Farklı ışınım şiddetleri (farklı I_{sc}) altında PV-batarya-motor her birinin akımları grafikte bilertilmektedir. Negatif batarya akımı ($I_b < 0$) deşarj durumunu, pozitif ise şarj durumunu ifade eder.

Benzeyen bir sistemin planlaması ve ayırması (ayrıca şebekeye bağlanmayan sistemler için), sistemin çalışma noktalarının PV'nin I-V çıkış karakteristiğinin MPP bölgesine yakın olması daha iyidir, çünkü o zamanda ilk olarak sistem en avantajlı ve verimli şekilde yararlanmaktadır, ikinci, sisteme bataryayı eklemeye ve onu şarj etmeye yol açılmaktadır. Üstelik, o bölgelerde ışınım siddeti değişirse bile, akımlar daha sabit olduğu için sisteme gelen zarar öngörölmektedir. Böylece, uygun motorlar ve PV seçilince, PV-motor sistemi batarya ile kendi kendine yeterli olan bir sistem olarak çalışmaktadır. Dıştan gelen ilave enerji kaynağına gerek yoktur. Böyle bir çalışma yaklaşımı daha uygulanabilir ve kullanışlı ray sistemlerinin planlaması ve gerçekleştirilmesini kolaylaştırabilmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde elektrikli trenler yaygın olarak kullanılmamasına rağmen, gelecek için büyük potansiyel oluşturur, çünkü bu teknoloji daha temiz, hafif, hızlı bir teknolojidir. Sürdürülebilir gelecek için, gelecek kuşaklar düşünülerek, yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak, yeni elektrikli toplu taşıma sistemi kurmak çok mantıklı ve gereklidir.

Bu tezde PV'den beslenen raylı taşıtın performans modelleme çalışması deneysel sonuçlar ile beraber yapılmıştır. PV modül ve PM DA dişli motor ayrı şekilde modellenmiştir. PV'nin I-V çıkış karakteristiği farklı ışınım şiddetinde ve sıcaklıkta tanımlanmıştır. Motorun I-V giriş eğrileri ise farklı mekanik yüklerle göre modellenmiştir. Aynı zamanda sistemin performans test çalışması, laboratuvarın ortamında, küçük ölçekte hazırlanmış raylı taşıt modeli ile gerçekleştirilmiştir. Ray yolların yanına sabit şekilde konulan güneş panelinin ürettiği enerji, direkt ray yollarına verilip PM DA motor beslenmektedir. Ölçümler PV raylı taşıtın tavanında monte edilmiş halindeki mekanik yükleri içermektedir, zaten ağırlık örnekleri 81gr'lık çalışmada kullanılan PV'nin dara ağırlığını kapsamaktadır. Deneysel çalışma, %27-100 ışınım aralığında ve raylı taşıtın dara ağırlığının 3 katına kadar mekanik yüklerde yapılmıştır.

Model tahmini ve deneysel sonuçlar sistem çalışma noktaları gerilim ve akım değerleri bakımından karşılaştırılmıştır. Üstelik, raylı taşıt çizgisel hızı, farklı %27-100 aralığındaki ışınım şiddetlerinde ve farklı mekanik yüklerde, hem deneysel olarak ölçülmüş hem de performans modeli tahmin sonuçlarına göre de hesaplanmıştır. Bu çalışmada, hareket eden raylı taşıtın hava sürtünme direnci, detaylı şekilde verilmemektedir, fakat benzeyen proje planlandığı ve simülasyon yapıldığı zamanda raylı taşıtın şekli tanımlandıktan sonra dikkate alınmalıdır. Yapılan test sonuçlarına göre, akım ve voltaj üzerindeki bağlı hata çok küçüktür (1-3%). Bu nedenle sistemin başarılı bir şekilde modellendiği ve çeşitli koşullar altında

davranışını tahmin etmek için kullanılabilmesi söylenebilir. Genel olarak çizgisel hızdaki bağlı hata %1,5 – 3,5 arasında değişmektedir. Bu durum raylı taşıtın tekerlerinin bazı kusurlarına bağlı ve ölçülen zaman aralığı çok kısa olmasından kaynaklı hassas ölçüm zorluğu olabilir. Bütün bunlara rağmen, bir PV güçlü raylı taşıt sistemi için, sistemin dinamik davranışında etkili pek çok parametreye rağmen, önerilen güç katına ait performans modellemesi başarılıdır ve benzer PV güçlü raylı taşıt sistemlerinin araştırılması ve planlanması sırasında referans olarak kullanılabilir.

PV-motor-batarya sisteminde, raylı taşıt motorun, PV modülünün çıkış I-V eğrilerindeki MPP noktalarının sağ tarafında çalıştırılması önerilmektedir. Paralel bağlanmış bir sistem için, bataryanın emk değeri, PV-motor sistemi çalışma noktası geriliminden daha küçük olduğu durumda, sistem daha kullanışlı ve verimli olabilir. Böylece, sistemin çalışma noktaları bakımından, yüksek ışınım seviyelerinde bataryanın şarjına, aynı zamanda düşük ışınım seviyelerinde bataryanın yardımcı bir güç kaynağı gibi çalışmasına imkan verir. Aynı zamanda bu düzenleme PV'den anlık ışınımında maksimum güç transferinin sağlanması (MPP noktalarında çalışma) şeklinde maksimum yararlanma imkanı verebilir. Böyle bir sistem, elektrik şebekesinden bağımsız, düşük ve kesintili ışınım şartlarında kendi kendine yeterli olabilir. Ayrıca bu düzenleme konsepti ile, PV güçlü raylı taşıtların güç kısmının üzerindeki kontrol ve sürücü stratejileri daha kolay, verimli ve ekonomik olma imkanı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Manning J., Garbon J., *Yeşil Enerji: Yeni Enerji Buluşları Dünyamızı Nasıl Değiştirir*, 1st ed., Sistem Yayıncılık, İstanbul, 2013.
- [2] Madsen M., Coursera Course, Introduction to solar cells, Technical University of Denmark, <https://www.coursera.org/learn/solar-cells>, (Ziyaret tarihi: aralık 2016).
- [3] Fathabadi H., Novel solar powered electric vehicle charging station with the capability of vehicle-to-grid, *Solar Energy*, 2017, **142**, 136-143.
- [4] Denholm P., Kuss M., Co-benefits of large scale plug-in hybrid electric vehicle and solar PV deployment, *Journal of Power Sources*, 2013, **236**, 350-356.
- [5] Vliet O., Kruithof T., Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in hybrid, fuel cell and regular cars, *Journal of Power Sources*, 2010, **195**, 6570-6585.
- [6] Chandra M. G., Bauer P., Zeman M., System design for a solar powered electric vehicle charging station for workplaces, *Applied Energy*, 2016, **168**, 434-443.
- [7] Bhatti A, Salam Z., Junaidi A., Electric vehicles charging using photovoltaic: Status and technological review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **54**, 34-47.
- [8] Xiaosong H., Johannesson L., Murgovski N., Egardt B., Longevity-conscious dimensioning and power management of the hybrid energy storage system in a fuel cell hybrid electric bus, *Applied Energy*, 2015, **137**, 913-924.
- [9] Michalczyk M., Grzesiak L., Ufnalski B., A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source, for an urban electric vehicle, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 2012, **88**, 158-162.
- [10] Vergara P., Rey J.M., Ordóñez G., Comparative analysis of design criteria for hybrid photovoltaic/wind/battery systems, *IET Renew. Power Gener.*, 2017, **11**(3), 253-261.
- [11] Gonzalez-Gil A., Palacin R., Batty P, Powell J.P., A systems approach to reduce urban rail energy consumption, *Energy Conversion and Management*, 2014, **80**, 509-524.

- [12] Akbari M.A., Aghaei J., Barani M., Multiobjective capacity planning of photovoltaics in smart electrical energy networks: improved normal boundary intersection method, *IET Renew. Power Gener.*, 2017, **11**(13), 1679-1687.
- [13] Sharma P., Vashista S., Shivani P., Solar Powered Vehicle, *Imperial International Journal of Eco-friendly Technologies*, 2016, **1**(1), 209-212.
- [14] Gattuso D., Greco A., Marino C., Sustainable Mobility: Environmental and Economic Analysis of a Cable Railway Powered by Photovoltaic System, *Int. Journal of Heat and Technology*, 2016, **34**(1), 7-14.
- [15] Vajih M., Solar-powered light rail vehicle and tram systems, Master's thesis, Sapienca Universita di Roma, Transport System Engineering, 2016.
- [16] Chester M., Passenger Transportation Life Cycle Assessment Database, USA, <http://www.transportationlca.org/tlcadb-passenger.php/> (Ziyaret tarihi: nisan 2017).
- [17] The times of India, Indian Railways goes green as solar-powered train set for trial, India, <http://timesofindia.indiatimes.com/india/Indian - Railways - goes-green - as - solar - powered - train-set-for-trial/articleshow/52249707.cms/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [18] Shrvanth V. M., Vashista G.A, Srinivasan J, Rail coaches with rooftop solar photovoltaic systems: A feasibility study, *Energy*, 2017, **118**, 684-691.
- [19] Solar Panels, Индия начала тестирование поездов с солнечными батареями, Ukraine, <http://solarpanels.com.ua/news/indiya-nachala-testirovanie-poezdov-s-solnechnymi-batareyami/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [20] The Engineer Edition, Here comes the sun: India's trains go solar, England, <https://www.theengineer.co.uk/issues/august-2015-online/here-comes-the-sun-indias-trains-go-solar/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [21] Inhabitat News, Two-mile-long solar tunnel unveiled for paris-amsterdam high speed rail line, England, <http://inhabitat.com/paris-amsterdam-high-speed-rail-line-powered-by-two-miles-of-solar-panels/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [22] Inhabitat News, Belgian high-speed rail system to get solar boost, England, <https://inhabitat.com/belgian-high-speed-rail-system-to-get-solar-boost/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [23] Bryan Nelson, Mother Nature Network, 7 modern solar-powered vehicles, USA, <http://www.mnn.com/green-tech/transportation/photos/7-modern-solar-powered-vehicles/vili-solar-train/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [24] Ecology, 7 современных транспортных средств на солнечной энергии, <http://ecology.md/page/7-sovremennyh-transportnyh-sredstv-na/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).

- [25] SkedGo, The future of transport, Australia, <https://skedgo.com/the-future-of-transport-maglev-trains/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [26] Technology and Culture, Общественный Транспорт будущего, Россия, <http://www.techcult.ru/technics/1757-skytran-obshhestvennyj-transport-budushhego/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [27] Ecotopia, Ultralight Rail for Santa Cruz, USA, <http://ecotopia.com/ulr/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [28] Trip Advisor, Taksim Meydanı, Türkiye, https://www.tripadvisor.com.tr/Attraction_Review-g293974-d296220-Reviews-Taksim_SquareIstanbul.html (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [29] Schwebbahn, Wuppertal suspension railway, Germany, <https://www.schwebbahn.de/> (Ziyaret tarihi: nisan 2017).
- [30] Academic, Aerobus, Russia, <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1349675/> (Ziyaret tarihi: nisan 2017).
- [31] Wikipedia, Vista Liner, <https://ru.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:VistaLiner.jpg/> (Ziyaret tarihi: nisan 2017).
- [32] Live journal, Этот удивительный транспорт, Russia, <http://mymaster.livejournal.com/286234.html/> (Ziyaret tarihi: nisan 2017).
- [33] Greeneconometrics, IoT Connected Devices Change Everything, <http://www.greeneconometrics.com/> (Ziyaret tarihi: aralık 2017).
- [34] National Renewable Energy Laboratory, Solar panel efficiency chart, <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png/> (Ziyaret tarihi: aralık 2017).
- [35] Masters G.M., *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, USA, 2014.
- [36] Treble F., *Generating electricity from the sun*, Pergamon Press, England, 1991.
- [37] Atlam Ö., Alternatif bir fotovoltaik panel (PV) modelinin santrifüj su pompa sistemlerine uygulanması ve performans gelişimine yönelik yaklaşımlar, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2004.
- [38] Atlam Ö., An experimental and modelling study of a photovoltaic/proton-exchange membrane electrolyser system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, **34**, 6589-6595.
- [39] Solar Panels, Индия начала тестирование поездов с солнечными батареями, <http://solarpanels.com.ua/news/indiya-nachala-testirovanie-poezdov-s-solnechnymi-batareyami/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).

- [40] Helianto Project, Ultralight Solar Train, Portugal, http://helianto.ist.utl.pt/?page_id=338/ (Ziyaret tarihi: aralık 2017).
- [41] Davis J.G, Solar-rapid rail mass transit system, 1988, US4781119, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [42] Understand Solar, Solar-powered trains, <http://understandsolar.com/solar-powered-trains-future-of-public-transportation/> (Ziyaret tarihi: şubat 2017).
- [43] Clean Technica, Solar-powered tram network in Melbourne, Australia, <https://cleantechnica.com/2015/05/22/solar-powered-tram-network-unveiled-melbourne-worlds-largest/> (Ziyaret tarihi: aralık 2017).
- [44] Witter F., Self study program, Basics of Electric Vehicles, Design and Function, *Investor Roadshow with Evercore ISI*, USA, New York, 30 November – 2 December 2016.
- [45] Atlam O., Kolhe M., Performance evaluation of directly photovoltaic powered DC PM (direct current permanent magnet) motor – propeller thrust system, *Energy*, 2013, **57**, 692-698.
- [46] Родовский А., Шешенин Б., Самолет или поезд, *Юный Техник*, 1973, **10**, 7-19.
- [47] Чудаков Е.А., *Машиностроение*, Изд. Маш-Строительской литературы, Москва, 1949.
- [48] Atlam Ö., *Hibrit Elektrikli Araçların Dinamik Analizleri*, Kocaeli Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli, 2016.
- [49] Helianto project, Energy Storage System, Portugal, http://helianto.ist.utl.pt/?page_id=661/ (Ziyaret tarihi: aralık 2017).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Prokopenko D.**, Atlam Ö., Implementation of PV-Powered Rail Car Idea as a Public Transportation of the Future, *2nd International Students Science Congress*, İzmir Katip Çelebi University, İzmir, 4-5 May 2018.



ÖZGEÇMİŞ

Daria Prokopenko 1992’de Zaporizhzhya’da (Ukrayna) doğdu. 2009 yılında girdiği Zaporizhzhya Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2012 yılında mezun oldu. 2015’te Kocaeli Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitiminde fotovoltaik güçlü raylı toplu taşıma araçları konusunda çalışmaları bulunmaktadır.

