

Araştırma Makalesi - Research Article

Marmara Bölgesindeki Bir Konteyner Limanı İçin Fotovoltaik Enerji Sistem Kurulumunun Tekno-Ekonomik ve Çevresel Analizi

Techno-Economic and Environmental Analysis of a Photovoltaic Energy System Utilization for a Container Port in the Marmara Region in Turkey

Ali Rıza Dal^{1*}, Fatih Yılmaz²

Geliş / Received: 15/02/2022

Revize / Revised: 21/04/2022

Kabul / Accepted: 22/04/2022

ÖZ

Dünyada 1960'lı yıllardan itibaren gelişen konteyner gemileri ve konteyner limanlarının, ülkemizin dış ticaret, kabotaj ve transit yüklerinin taşınmasında önemli bir rolü bulunmaktadır. Özellikle Marmara Bölgesinde yer alan konteyner limanlarının ülkemizin toplam konteyner elleçleme kapasitesinde önemli bir payı vardır. Diğer taraftan, güneş enerjisinden faydalanarak elektrik üretimi, dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de yaygınlaşmakta olup konteyner limanlarında da bu teknolojiye azami ölçüde faydalanılması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı; Marmara (Kocaeli) Bölgesinde bulunan büyük ölçekli bir konteyner limanında fotovoltaik yenilenebilir enerji sistemi kurulumunun tekno-ekonomik ve çevresel analizini gerçekleştirmektir. Bu amaçla, büyük ölçekli bir konteyner limanı incelenmiş, yıllık elektrik ihtiyacı tespit edilmiş ve Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi yazılımı yardımıyla uygun PV sistem gücü belirlenmiştir. Ayrıca, İndirgenmiş Geri Ödeme Süresi Yöntemi kullanılarak PV sistemin ilk yatırım maliyeti ve geri ödeme süresi hesaplanmış ve RETScreen yazılımı yardımıyla PV sisteminin zararlı sera gazı salımını azaltmadaki rolü ve çevresel etkileri analiz edilmiştir. Çalışmada, konteyner limanındaki kapalı binaların çatılarına 962 kW_p gücünde PV sistem kurulabileceği ve PV sistemin bu güç ile yılda 1.061.034 kWh elektrik üretimi gerçekleştirebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Limana yapılacak PV sistem yatırımının geri ödeme süresi 8,33 yıl olarak belirlenmiştir. Söz konusu PV sistemin yılda 37,7 tCO₂/yıl sera gazı emisyonuna engel olacağı da tespit edilmiştir. PV sistemden üretilen elektrik ile limanın yıllık elektrik ihtiyacının %9,47'lik bir kısmı sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, bir limana kurulacak PV sistemden en yüksek seviyede yararlanılmasına katkı sağlamak üzere bazı öneriler de sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler- Güneş Enerjisi, Elektrik Üretimi, Fotovoltaik Teknoloji, Konteyner Limanı

ABSTRACT

Container ships and ports, that have developed in the world since the 1960s, have important roles for the foreign trade of Turkey, as well as for the transportation of cabotage and transit cargoes. Container ports, especially in the Marmara Region, have an important share in the total container handling capacity of Turkey. On the other hand, solar-based electricity generation has become widespread in Turkey as well as in the world, and therefore this technology should be benefited as much as possible at the Turkish container ports. The aim of this study is to carry out a techno-economic and environmental analysis of a photovoltaic renewable energy system installation for a large-size container port in the Marmara (Kocaeli) Region. In accordance with this aim, a large-sized container

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: ardal1969@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-3646-2288>)

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Hakkı Turaylıç Cad. No:5/C Emek, Çankaya-Ankara, Türkiye

²İletişim: yilmazf58@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-5652-0265>)

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Hakkı Turaylıç Cad. No:5/C Emek, Çankaya-Ankara, Türkiye

port has been investigated, and its annual electricity need has been detected, and the appropriate PV system power has been determined by using the Photovoltaic Geographical Information System software, respectively. Additionally, the initial investment cost and payback period of the PV system have been calculated by using the Reduced Payback Time Method, and the environmental effects of PV system to be installed regarding harmful greenhouse gas emissions have been analyzed by using RET Screen software. As a result of this study, it is found that a PV system with a power of 962 k W_p can be installed on the roofs of enclosed buildings in the container port and the PV system with this power can produce 1,061,034 kWh of electricity per a year. The payback period for the PV system investment to be made in the port is determined as 8.33 years. It also determined that the PV system to be installed can prevent 37.7 tCO₂/year greenhouse gas emissions per a year. With the electricity to be produced from the PV system, 9.47% of the annual electricity need of the port can be provided. In this study, some suggestions are also presented in order to contribute to the maximum utilization of the PV system of a sea port.

Keywords- Solar Energy, Electricity Generation, Photovoltaic Technology, Container Port

I. GİRİŞ

Dünya ticaretinin %85-90'ı ticaret gemileri ile yapılmakta olup yüklerin elleçlenmesi limanlarda gerçekleşmektedir. Dünya ticaretinin aksamadan devam edebilmesi açısından limanların stratejik önemi bulunmaktadır. Konteyner limanları, konteyner yükü taşıyan ticaret gemilerinin yükleme-boşaltma işlemlerinin yapıldığı tesislerdir. Bu limanlarda, kendi idari ve sosyal binalarının yanı sıra limanda kullanılan vinç, kreyn ve istifleyici kreynler gibi ekipmanlarda da elektrik enerjisine sıklıkla ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla en önemli maliyet kalemlerinden biri elektrik enerjisi giderleridir. Konteyner limanlarında ihtiyaç duyulan elektrik, genellikle şehir şebekesinden ve nadiren sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) veyahut dizel yakıtı dayalı dizel jeneratörler ile karşılanmaktadır.

Ticari malların birim yük haline getirildiği bir dağıtım yöntemi olan konteyner ile taşımacılık, dünyada 1960'lı yıllardan itibaren gelişmeye başlamış [1] olup, günümüz deniz ticaretinde yaygınca kullanılan bir taşımacılık yöntemidir. Konteyner taşımacılığının gelişmesiyle beraber, konteyner limanlarının önemi de artmış, lojistik tedarik zincirlerinin entegrasyon ihtiyacı nedeniyle deniz, hava, demir ve karayolunu kapsayan "intermodal taşımacılık" sistemleri gelişmiştir [2]. Konteyner ile taşımacılık, parça yüklerin birleştirilmesini, yükün parça parça işlem görmesi yerine toplu olarak yüklenmesi ve boşaltılmasını mümkün hale getirmekte ve dolayısıyla depolama masrafları, sigorta giderleri gibi maliyetlerde azalma sağlamaktadır [3]. Avantajları nedeniyle, günümüz dünya ve Türk deniz ticaretinde konteyner taşımacılığının önemli bir yeri bulunmaktadır.

Tablo 1'de, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (UAB) Denizcilik Genel Müdürlüğü (DGM)'nün web sitesinde kamuya açık olarak yayınlanan liman başkanlıkları bazında ülkemizde elleçlenen konteyner miktarları yer almaktadır.

Tablo 1. 2020 yılında liman başkanları bazında Türk limanlarında gerçekleştirilen toplam konteyner elleçleme miktarları [12]

Liman başkanlığı bölgesi	Dış ticaret			Kabotaj	Transit	Toplam konteyner elleçleme (TEU)
	Türk bayraklı	Yabancı bayraklı	Dış ticaret			
Ambarlı	316.006	1.653.072	1.969.078	152.806	765.923	2.887.807
Mersin	122.822	1.743.754	1.866.576	40.283	41.836	1.948.695
Kocaeli	133.699	1.513.805	1.647.504	66.555	86.584	1.800.642
Tekirdağ	26.268	343.516	369.784	182.509	891.742	1.444.035
Aliağa	41.632	1.208.503	1.250.134	19.707	5.680	1.275.521
Gemlik	86.934	631.908	718.842	123.033	1.245	843.119
İskenderun	8.399	691.822	700.221	6.775	3.591	710.587
İzmir	52.249	355.552	407.802	28.584	0	436.385
Antalya	9.301	55.390	64.691	44.717	0	109.408
Samsun	22.528	52.263	74.791	31.491	0	106.282
İstanbul	1.040	27.435	28.475	13.111	0	41.586
Bandırma	212	10	222	12.965	0	13.187
Trabzon	0	495	495	5.206	0	5.701
Marmara Adası	0	0	0	2.214	0	2.214
Karabiga	0	0	0	1.399	0	1.399
Karasu	0	65	65	0	0	65
Karadeniz Ereğli	0	18	18	0	0	18
Toplam	821.090	8.277.608	9.098.697	731.352	1.796.601	11.626.650

Tablo 1’de görüldüğü üzere, 2020 yılında Türkiye’deki konteyner limanlarında dış ticaret, kabotaj ve transit amaçlı 11,63 milyon konteyner elleçlemesinin büyük bir bölümü ülkemizin Marmara Bölgesinde yer alan konteyner limanlarında gerçekleştirilmiştir. Örneğin; 2020 yılında 1,8 milyon konteynerin elleçlendiği Kocaeli Bölgesindeki konteyner limanları, Türkiye genelinde %15,5’lik paya sahip olup, Türk dış ticareti açısından önemli bir yere sahiptirler. Bu nedenle, bu çalışmada Kocaeli’ndeki bir konteyner limanı ele alınmıştır.

Son yıllarda dünyada olduğu gibi ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. 2018 yılında güneş enerjisinden elektrik üretimindeki artış bir önceki yıla göre dünya genelinde %28,9 iken, bu oran ülkemizde %170’tir [4, 5]. Diğer taraftan, ülkemizde güneş enerjisinden elektrik üretimindeki artış dünyaya göre 5,9 kat daha fazla gerçekleşmiştir. Ülkemizde 2019 yılında güneş enerjisine dayalı toplam elektrik üretimi 303,9 milyar kWh olup, bunun 9,3 milyar kWh’i güneş enerji santrallerinde gerçekleşmiştir [4].

Fosil yakıtlardan elektrik üretimi esnasında açığa çıkan zararlı sera gazlarının neden olduğu hava kirliliğini asgari düzeye indirmek için elektrik üretiminde alternatif/yenilenebilir enerji kaynaklarına ve çevre dostu teknolojilere yönelim de her geçen gün artmaktadır. Artan enerji ihtiyacı ve teknolojik gelişmeler, günümüzde güneş enerjisini diğer yenilenebilir/alternatif enerji kaynaklarına göre biraz daha ön plana çıkarmaktadır. Güneş enerjisinin etkin kullanımı, ülkemiz ekonomisi açısından da önem arz etmektedir.

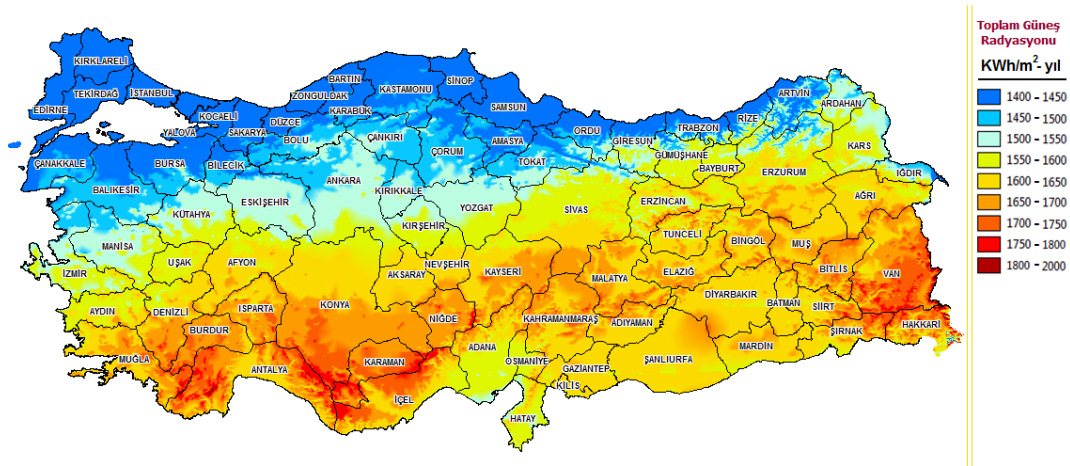
Varınca ve Gönüllü tarafından yapılan çalışmada; güneş enerjisinin, üretim teknolojileri açısından yakıt ve işletme gideri bulunmayan bir enerji kaynağı olduğu ve güneş enerjisinden elektrik üretimine uzun vadeli finansmanı sağlandığı takdirde ülkemizdeki enerji darboğazının aşılabileceği belirtilmiştir [6].

A. Marmara Bölgesinin Güneş Enerji Potansiyeli

Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli açısından dünyada ön sıralarda yer almaktadır. Karadeniz Bölgesi haricindeki tüm bölgelerin Fotovoltaik (PV)sistem kurulumu bakımından yatırım yapılabilir nitelikte olduğu

belirtilmektedir [6,7]. Bir bölgenin güneş enerji potansiyelinin belirlenmesinde, güneş ışınımı ve güneşlenme süresi en önemli etkindir.

Şekil 1’de Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca (ETKB) hazırlanan Güneş Enerji Potansiyeli Atlası (GEPA) yer almakta olup, buna göre Karadeniz ve Marmara Bölgelerinin güneş enerjisi potansiyelinin 1400-1450 kWh/ m² arasında olduğu görülmektedir [8]. Yıllık güneş ışınımı 1050-1300 kWh/ m² [9] civarında olan Almanya gibi bazı ülkelerin dahi güneş enerji potansiyelinin düşük olmasına rağmen PV sistem kurulu güçlerinin oldukça yüksek olduğu da bilinmektedir [10]. Öyle ki; 2020 yılı verilerine göre, Almanya’nın 53.783 MW olan PV sistem kurulu gücünün ülkemizinkinden (6,668 MW) 8 kat daha fazla olduğu görülmektedir [11]. Bu durum, ülkemizde en az güneş ışınımı alan Karadeniz ve Marmara Bölgelerinin bile PV sistemler ile elektrik üretimi açısından daha etkin değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 1. Türkiye'nin güneş ışınımı dağılımı [8]

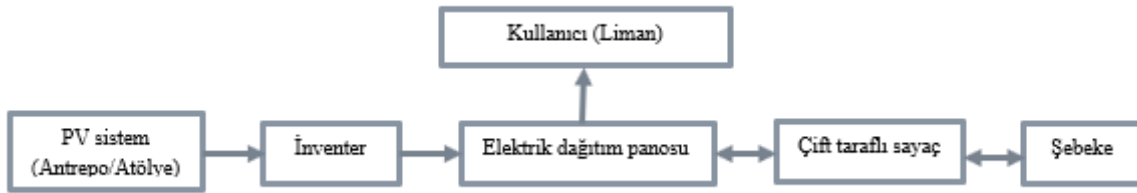
Dünyada ve ülkemizde bina çatılarında güneş enerjisinden elektrik üretimine yönelik çok sayıda sayısal ve deneysel çalışmalar [13-21] yapılmıştır. Dondariya ve arkadaşları tarafından Hindistan’da yapılan bir çalışmada; şebekeye bağlı çatı üstü PV sistemin fizibilitesini incelenmiş olup 20 adet 320 W_p nominal güçteki mono-kristal silikon sistem ile yılda 1528.125 kWh / yıl enerji üretilerek, mevcut elektrik ihtiyacının yaklaşık %41’inden fazlasının karşılanabildiği gösterilmiştir [22]. Akkaya ve Akkaya Oy tarafından Samsun, Bayburt ve Mersin’de şebekeye bağlı sırasıyla 3 kW, 5 kW ve 10 kW kurulu gücünde çatı tipi PV sistemler, PVGIS, HOMER ve PVsyst yazılımları ile modellenmiş olup çatı tipi GES modellerlerinin aylık tüketimlerini karşılayacak büyüklükte olması ve birim maliyeti düşük olan üretim tesisi kurulmasının ilk yatırımın geri dönüş süresi açısından avantajlı olacağı belirtilmiştir [23]. Dünyada limanların yenilenebilir enerjiye geçişine yönelik gönüllük esaslı yeşil liman (green port) kavramının ötesinde, uygulanan herhangi bir uluslararası düzenleme bulunmamaktadır. Dünya çapında bazı ülkeler kendi yeşil liman uygulamalarını başlattılar [24-26]. Limanlarda yenilenebilir enerji uygulamaları bir işletmenin enerji ihtiyacının şebekeden temininden daha ucuzdur. Ayrıca, limanlarda enerji yönetimi ve uygulama mevzuatları ile işletmelerin enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır [25, 27]. Singapur denizcilik idaresi çevre dostu denizciliği teşvik etmek amacıyla 2011 yılında yeşil gemi, yeşil liman ve yeşil teknoloji programlarında güneş enerjisinden yararlanılmaktadır [28]. İspanya limanlarının %46’sı son beş yılda yenilenebilir kaynaklar ile elektrik üretimi yapmaya başlamıştır. Söz konusu limanlardaki yenilenebilir kaynaklar içerisindeki güneş enerjisi payı %13’e ulaşmıştır [29]. Nikishin ve Kharitonov tarafından Kaliningrad balıkçı limanında yapılan çalışmada, limanın elektrik tüketiminin bir kısmının rüzgâr türbini ve güneş panelleri ile karşılanabileceğini göstermişlerdir [30]. Misra ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, doğru akımın (DC) mikro şebekeler için bir çözüm olduğu belirtilerek, limanların güneş, rüzgâr gibi daha az sera gazı (GHG) üretmeleri açısından işletme maliyetlerini düşürdüğü ve esneklik sağladığı belirtilmiştir [31]. Elnejjar ve arkadaşları tarafından Jabel Ali Limanı’nın yeşil liman konsepti ile ilgili deneysel ve sayısal yazılım kullanılarak yapılan çalışmada bölgedeki rüzgâr ve güneş potansiyelini değerlendirmişlerdir. Söz konusu çalışmada, şebekeye PV sistem entegre edildiğinde enerji maliyetinde %10,5’lik bir azalmanın, şebekeye rüzgâr santrali entegre edildiğinde enerji maliyetinde %20,8 azalma, şebekeye hem rüzgâr santrali hem de PV sistemi entegre edildiğinde ise enerji maliyetinde %28,7 maliyet azalması olduğu tespit edilmiştir [32]. Güney Afrika’da Port Elizabeth limanında şebekeye entegre edilen 3,2 kW_p’lik bir PV sistemin deneysel ve sayısal çalışma karşılaştırılmıştır. Çalışmada, PV sistemin performans oranı %84 gerçekleşmiş olup şebekeye 5757 kWh/yıl elektrik enerjisi verildiği

belirtmiştir [33]. Güneş enerjisinden elektrik üretiminde ilk yatırım maliyetinin geri ödeme süresinin 5 yıl civarına düştüğü ifade edilmektedir [34]. Sulukan tarafından İstanbul'da 600 kW_p kurulu güç kapasitedeki çatı üstü PV sistem uygulama çalışmasında; yıllık 310.1 tCO₂ sera gazı salımının azalacağı ve yaklaşık 721,1 ton ham petrolün kullanımından tasarruf edileceği, belirtilmiştir [35].

B. PV Sistemler

Yarı iletken malzemeden üretilen PV paneller, güneş ışınlarını elektrik enerjisi üreten bir teknolojidir [36]. Enerjinin bir şekli olan ışık; PV hücrelerinde elektronları harekete geçirerek enerjiyi ortaya çıkarmaktadır. Bu enerji ise elektronların elektrik akımı oluşturabilecekleri kadar voltajı üretir [37].

PV sistemlerin verimli olarak çalışabilmesi, PV panel eğimi azimut açısı, panel malzemesi, ortam sıcaklığı, ortam tozu ve temizlik gibi parametrelere bağlıdır. Ayrıca bu sistemler, depolamalı ve şebeke bağlantılı olmak üzere iki çeşittir. Depolamalı sistemler, güneş panelinden üretilen elektriğin akülerde depolayarak ihtiyaç halinde yeniden kullanıma alan sistemlerdir. Şebeke bağlantılı sistemler (on-grid) ise; elektrik gereksinimi PV sistem ile karşılanmakta iken, üretilen fazla elektrik enerjisi şebekeye verilmektedir. PV sistemin yeterli olmadığı durumlarda ise şebekeden yararlanılır. Şebeke bağlantılı PV sistemde üretilen enerjinin depolamasına ihtiyaç yoktur; sadece üretilen doğru akım invertörlerle doğru akım (DC) alternatif akıma (AC) dönüştürülmesi gerekir. [38]. Bu dönüşüm invertör tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada şebekeye bağlı sistem tercih edilmiş olup, Şekil 2'de bir PV sistem enerji akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 2. PV sistem enerji akış diyagramı

C. PV Sistemlerin Bina Çatılarında Kullanımı

Gelişen teknoloji ile PV sistemlerin binaların çatı ve dış yüzeylerine (kabuk) konumlandırılarak güneşten enerji üretmek mümkün olmaktadır. Kentsel alanlardaki mevcut veya yeni bir binanın çatısında uygun azimut ve eğim açısına sahip PV sistemin geliştirilmesi elektrik enerjisi üretmek için olası bir seçenektir. Şehir merkezlerindeki PV paneller binaların gölgesinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Maksimum seviyede güneş ışınımı elde etmek için binaların yüksekliği, planı, konumu ile panel azimut ve eğim açısı önemli parametrelerdendir [39]. Karaca ve Uçar tarafından yapılan çalışmada, bina çatılarına kurulan PV sistemlerin bina dış cephelerinde kurulan PV sistemlere göre daha fazla enerji üretildiği belirtilmiştir [40]. Rotterdam gibi dünyanın önemli deniz limanlarında da kapalı alanların çatılarına PV sistem kurulumu ile elektrik üretimi yapıldığı, bazı uygulamalarda deniz yüzeyine dahi PV sistem kurulabildiği görülmektedir [41,42].

Dünya Enerji Geçişlerine Bakış (2022) raporunda 2050 yılına kadar toplam elektrik ihtiyacının %90'ının yenilenebilir kaynaklardan, sağlanacağı öngörülmektedir [43]. Ülkemizde, "Paris Anlaşmasının Onaylanmasının Uygun Bulduğuna Dair Kanun" 7 Ekim 2021 tarihinde Resmî Gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiştir. Bahse konu Anlaşma gereği ülkelerin iklim eylemlerine imzanları çerçevesinde katkı sunmaları öngörülmektedir. Türkiye'nin ulusal katkı beyanına göre, sera gazı emisyonlarını 2030 yılına kadar %21 varan artış oranından azaltım öngörülmüştür [44]. 2021 yılı dünya enerji kaynakları fiyatlarında rekor artışların yaşandığı bir enerji krizine sahne olmuştur. Covid-19 salgını nedeniyle enerji talebinde yaşanan tarihi düşüş sonrasında, enerji arzındaki hızlı artışın talebi karşılamaması nedeniyle krizin bu yılda devam edeceği tahmin edilmektedir [45]. Fosil yakıt fiyatlarının yüksek seyri ve iklim değişikliğindeki kötüleşme durumu temiz enerji kaynaklarına daha hızlı geçilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu itibarla, Ülkemizdeki limanlarda elleçleme ve taşıma işleminde fosil ve elektrikli araçlar kullanılmaktadır. Son yıllarda bu limanlarda verilen hizmetlerden ötürü bir limanın ihtiyacı olan elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden üretilmesi daha da önemli hale gelmiştir. Ülkemizde ise Samsun ve Tekirdağ'da bulunan iki limanda PV sistem ile elektrik enerjisi üretme çalışmalarına başlanıldığı bilinmektedir. Ancak bu çalışma kapsamında yapılan saha ve literatür incelemesinde, ülkemizde bulunan konteyner limanlarında güneş enerjisinden elektrik üretimi ile kullanımının henüz yeterli düzeyde olmadığı gibi yeterli bilimsel çalışma bulunmamakta olup, bu alanda daha fazla bilimsel çalışma

yapılmasına ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile ülkemizin deniz ticaret faaliyetlerinde çok önemli bir yeri olan ve Marmara Bölgesinde yer alan bir konteyner limanının en önemli maliyet kalemlerinden biri olan elektrik ihtiyacının (en azından bir kısmının) güneş enerjisinden karşılanmasına yönelik liman antrepo ve atölye çatıları üzerine kurulacak PV sistemin tekno-ekonomik ve çevresel analizlerinin yapılması amaçlanmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Ülkemizin toplam konteyner elleçleme kapasitesinin %15,5'lik kısmına sahip olan Kocaeli Bölgesindeki büyük ölçekli bir konteyner limanı seçilmiştir. Seçilen konteyner limanının 2019 yılına ait yıllık elektrik tüketim miktarı Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 3'te ise konteyner limanında kullanılan ekipman ve kullanılan enerji türleri görülmektedir. Söz konusu limanda 11.201.143 kWh/yıl elektrik tüketilmektedir. Limanda, kapalı alanlarda (idari bina, depolar gibi) kullanılan elektriğin yanısıra, açık alanlarda raylı portal kreynerler, istifleyici kreynerler gibi elektrikli ekipmanlarda elektrik sıkça kullanılmaktadır.

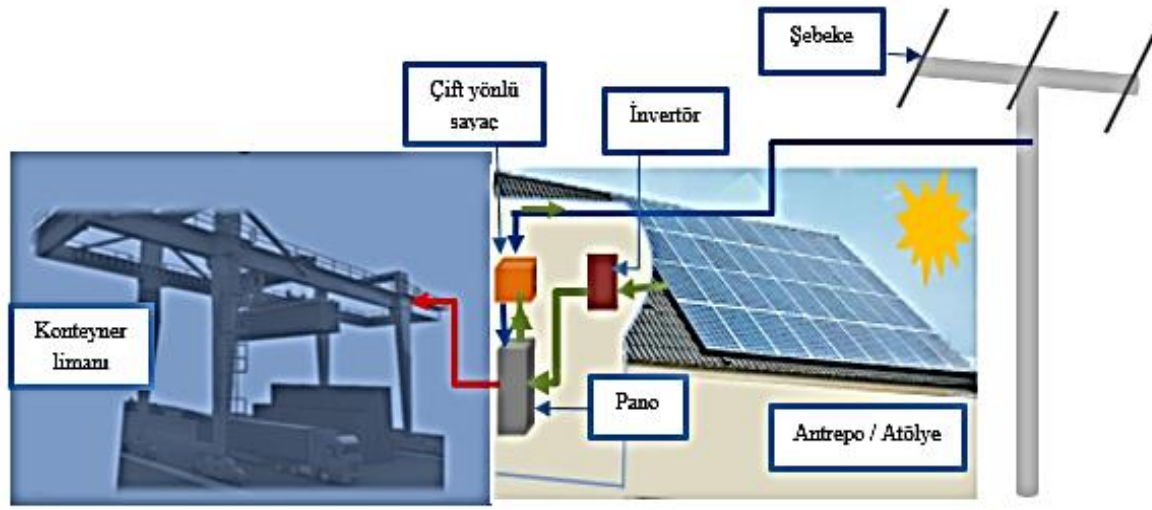
Tablo 2. Konteyner limanının 2019 yılı aylık elektrik tüketimi (kWh)

Aylar	Elektrik tüketimi
Ocak	981.221
Şubat	825.640
Mart	880.123
Nisan	840.917
Mayıs	842.076
Haziran	856.525
Temmuz	989.005
Ağustos	938.911
Eylül	991.696
Ekim	1.029.287
Kasım	1.028.169
Aralık	997.574
Toplam	11.201.143

Tablo 3. Konteyner limanında kullanılan ekipman ve yakıt türleri

Ekipman	Enerji kaynağı
Raylı portal krenler	Şehir şebekesi (Elektrik)
İstifleyici krenler	Şehir şebekesi (Elektrik)
Traktör/treyler ve kamyonlar	Fosil yakıt (Dizel)
Jeneratörler (10 MW)	Fosil yakıt (Dizel)
Reefer konteynerler (640 priz)	Şehir şebekesi (Elektrik)
Binalar/aydınlatma	Şehir şebekesi (Elektrik)

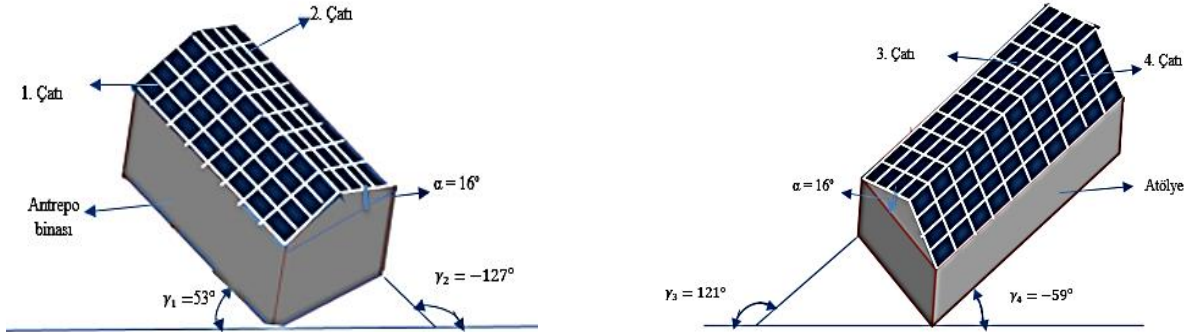
Şekil 3'te konteyner limanına kurulacak PV sistem, liman ve şebeke bağlantısı şeması gösterilmiştir.



Şekil 3. Konteyner limanı için öngörülen şebekeye bağlı PV sistemin genel enerji akış şeması

PV sistem kurulumunda teknik açıdan PV panellerin çatıların güney yönünde yani azimut açısının 0° olacak şekilde konumlandırılması tercih edilmektedir. Fakat binaların yönleri belediyelerce uygulanan imar planları ve yol kullanım amacı gibi durumlar nedeniyle genellikle güney yönde olmamaktadır. Çalışma kapsamında incelenen konteyner limanında bulunan antrepo ve atölye binasının konumlandırıldığı çatı eğimleri 16° olarak tespit edilmiştir. Antrepo çatısının toplam alanı $2 \times 2125 = 4250 \text{ m}^2$ ve atölye çatısının toplam alanı $2 \times 850 = 1700 \text{ m}^2$ dir.

Şekil 4'te görüldüğü üzere; antrepo ve atölye bina çatılarının güneşe göre farklı yönlerde yüzeylerinin bulunması hesaplamaların farklı azimut açılarına göre yapılmasını gerektirmiştir.



Şekil 4. Konteyner limanındaki antrepo ve atölye binalarının güneşe göre çatı yönleri

Bu nedenle dört farklı azimut açısı belirlenmiştir. Antrepo çatısındaki 2125 m^2 alan için 1. çatı $\gamma_1 = 53^\circ$, diğer 2125 m^2 alan için 2. çatı $\gamma_2 = -127^\circ$ olarak azimut açısı belirlenmiştir. Atölye çatısındaki 850 m^2 alan için 3. çatı $\gamma_3 = 121^\circ$, diğer 850 m^2 alan için 4. çatı $\gamma_4 = -59^\circ$ olarak azimut açısı belirlenmiştir. Antrepo ve atölye binalarının çatılarına kurulması öngörülen PV sistemin özellikleri ile sistemin kurulu gücü için gerekli olan panel ve invertör bilgileri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Konteyner limanında bulunan antrepo ve atölye çatılarına kurulması öngörülen PV sistem panel ve invertör teknik özellikleri

		Teknik özellikler
PV sistem	Sistem bağlantı şekli	Şebeke bağlantılı (On grid)
	PV sistem kurulu gücü	962 kW _p
	Panel eğim açısı	16°
Panel	Panel teknolojisi	Polikristal
	Panel gücü	275 W/panel
	Panel sayısı	1250x2 + 500x2 = 3500 adet
	Panel hücre sayısı	60 adet
	Panel hücre boyutu	156x156 mm
	Panel ölçüsü / Alan	1652*997*42 mm / 1,7 m ²
İnvertör	İnvertör sayısı	22
	İnvertör gücü	40 kW

Tablo 4’deki panel verileri ile çatı alanlarının tamamı PV sistem kurulumu için kullanılacak olup, Eşitlik 1 ve 2 yardımıyla panel alanı dikkate alınarak, çatılara yerleşecek olan maksimum panel sayısı tespiti ve akabinde buna bağlı PV sistem kurulu gücü hesaplanmıştır.

$$A = A_p n \quad (1)$$

$$P = P_p n \quad (2)$$

Burada, Açatı alanı (m²), A_p panel alanı (m²), n panel sayısı, P toplam güç (W_p), P_p panel gücüdür (W_p). Eşitlik 1 ve 2 ile yapılan hesaplamalar neticesinde, antrepo çatısında 1. ve 2. çatı için 343 kW_p olmak üzere toplam 686 kW_p, atölye çatısında ise 3. ve 4. çatı için 138 kW_p olmak üzere toplam 276 kW_p güce sahip panellerin yerleştirilmesi mümkün olmaktadır. Konteyner limanının tamamına 962 kW_p güce sahip PV sistem kurulabileceği anlaşılmaktadır. PV sistem gücü ile üretilecek olan tahmini elektrik enerjisi miktarının belirlenmesi için Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS) simülasyon yazılımı ve sera gazı salımı için ise RETScreen simülasyon yazılımı kullanılmıştır.

A. PVGIS Simülasyon Yazılımı

Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak deneysel çalışmaların yanında simülasyon yazılımları da gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Bu simülasyon programlarından biri PVGIS yazılımıdır. Meteorolojik verileri kullanarak güneş ışınımından elde edilebilen enerjiyi hesaplamaktadır. PVGIS veri tabanı coğrafi konum ve panel eğim açısı değerine göre ortalama günlük, aylık ve yıllık ışınımını hesaplamaktadır. Ayrıca, PV sistemin kapasitesi, panel malzeme cinsi, sistem kayıp oranı, azimut açısı ve eğim açısı değerlerine göre üretilecek olan elektrik miktarı tahmin edilebilmektedir. PVGIS, ışınım ve panel sıcaklığına bağlı olarak Eşitlik 3, 4, 5 ve 6 ile hesaplama yapmaktadır [9,46].

$$P(G', T') = G' (P_{STC,m} + k_1 \ln(G') + k_2 \ln(G')^2 + k_3 T' + k_4 T' \ln(G') + k_5 T' \ln(G')^2 + k_6 T'^2) \quad (3)$$

$$G' \equiv G / G_{STC} \quad (4)$$

$$T' \equiv T_{mod} - T_{STC} \quad (5)$$

$$\eta_{rel}(G', T') \equiv \frac{P(G', T')}{P_{STC,m} G'} \quad (6)$$

Eşitlik 3’de belirtilen; $P(G, T)$ anlık panel gücü [W], $P_{STC,m}$ standart test koşullarındaki maksimum gücü [W] belirtmektedir. k_1 ’den k_6 ’ya kadar olan katsayılar Avrupa Güneş Test Kurumu (ESTI) tarafından ölçülen değerlerdir. Eşitlik 3 ve 4’de ise G güneş ışınımı [W/m^2] olup G' güneş ışınımının normalize edilmiş boyutsuz değeri, T_{mod} panel sıcaklığı [$^{\circ}C$] ve STC ise standart test koşullarında G ve T ’ye bağlı güç değerini içerir. η_{rel} , panel verimidir.

PVGIS veri tabanına çatının özellikleri de dikkate alınarak limanın bulunduğu yerin koordinatları ve Tablo 5’de belirtilen hususlar sisteme manuel olarak girilmiştir:

Tablo 5. Antrepo ve atölyede kullanılacak PV panel özellikleri ve yerleşim açıları

PV sistem	Teknik özellikleri
PV panel malzemesi	Kristal silikon
Sistem kaybı	%14
Antrepo PV sistem gücü	343 kW _p
Atölye PV sistem gücü	138 kW _p
PV panel eğim açısı	$\alpha = 16^{\circ}$
1. çatı azimut açısı	$\gamma_1 = 53^{\circ}$
2. çatı azimut açısı	$\gamma_2 = -127^{\circ}$
3. çatı azimut açısı	$\gamma_3 = 121^{\circ}$
4. çatı azimut açısı	$\gamma_4 = 59^{\circ}$
Atölye ve antrepo yüksekliği	15 m

Ayrıca, liman antrepo ve atölye çatıları 15 metre yüksekliğinde olması nedeniyle gölge oluşmamaktadır. Antrepo ve atölye çatılarının dört farklı yönde olması nedeniyle PVGIS yazılımında dört azimut seçilmiştir.

Çalışma kapsamında, öncelikle konteyner limanının 2019 yılına ait aylık elektrik tüketiminin aylara göre dağılımları incelenmiştir. Seçilen kurulu güç, eğim açısı, azimut açısı, sistem kaybı, kullanılan panel malzeme ve koordinata bağlı olarak konteyner limanın bulunduğu yerdeki atölye ve antrepo çatı pozisyonlarına göre üretilecek olan elektrik enerjisi [kWh] miktarları ayrı ayrı simüle edilmiştir.

B. RET Screen Simülasyon Yazılımı

Çalışma kapsamında incelenen konteyner limanına kurulması öngörülen PV sistemin çevresel etkisinin belirlenmesi ve sera gazı salım miktarı hesaplamalarında RETScreen simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Söz konusu yazılım, RETScreen CANMET Enerji Çeşitlendirme Araştırma Laboratuvarı (CEDEL) tarafından geliştirilmiştir [47]. Enerji verimliliği, yenilenebilir enerji ve kojenerasyon proje fizibilite analizi ile enerji performans analizlerini yapmak için kullanılabilir. Bu çalışmada, söz konusu yazılımın sera gazı salımı profili senaryoları kullanılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Çalışmada, her iki bina çatısının eğim açısı 16° olması panellerin çatıya konumlandırılma ve montajda kolaylık açısından aynı eğimde olacak şekilde planlanmıştır. PVGIS yazılımına antrepo için 53° , -127° ve atölyede 121° ve -59° olacak şekilde 16° eğim açısında, sistem kaybı %14 ve PV sistemi panel toplam gücü 343 ve 138 kW_p olarak ayrı ayrı girilmiştir.

Yapılan hesaplamalarda piyasada yaygın kullanılan kristal silikon hücre PV panel teknolojisi seçilerek, güneş ışınımı ve PV sistemi panel gücü değerleri dört azimut açısının dört farklı çatı yönüne göre PVGIS yardımıyla hesaplanmıştır. PVGIS’te yapılan simülasyonda; PVGIS yazılımında dört farklı çatı için dört farklı yıllık güneş ışınımı miktarı tespit edilmiştir. Yıllık güneş ışınımı miktarları; 1. çatıda 1543 kWh/m^2 , 2. çatıda 1318 kWh/m^2 , 3. çatıda 1355 kWh/m^2 ve 4. çatıda 1508 kWh/m^2 olarak hesaplanmıştır.

A. PV Sistem ile Üretilmesi Öngörülen Aylık Elektrik Miktarı

PVGIS simülasyonunda, antrepolarda iki adet 343 kW_p güç kapasiteli PV sistem ile iki farklı çatı durumu ile atölyede iki adet 138 kW_p güç kapasiteli PV sistem ile iki farklı çatıdaki üretilmesi öngörülen elektrik miktarları Tablo 6’te, üretimin tüketimi karşılama oranları ise Tablo 7’da sunulmuştur.

Tablo 6. PV sistemde (dört çatıda) üretilen elektrik miktarı (kWh)

Aylar	Konteyner limanı elektrik tüketimi	343 kW _p güçteki elektrik üretimi		138 kW _p güçteki elektrik üretimi		Toplam üretim
		1. çatı	2. çatı	3. çatı	4. çatı	
Ocak	981.221	15.705	9.824	4.109	6.158	35.796
Şubat	825.640	18.462	13.409	5.557	7.266	44.694
Mart	880.123	29.423	24.056	9.917	11.608	75.004
Nisan	840.917	39.302	34.561	14.277	15.461	103.601
Mayıs	842.076	49.302	45.533	18.826	19.379	133.040
Haziran	856.525	52.330	49.693	20.466	20.677	143.166
Temmuz	989.005	56.942	52.583	21.959	22.218	153.702
Ağustos	938.911	52.099	45.331	19.114	20.157	136.701
Eylül	991.696	37.722	31.261	12.825	14.944	96.752
Ekim	1.029.287	24.820	18.935	7.748	9.861	61.364
Kasım	1.028.169	19.179	12.059	5.078	7.482	43.798
Aralık	997.574	15.145	8.685	3.694	5.892	33.416
Toplam	11.201.143	410.431	345.930	143.570	161.103	1.061.034

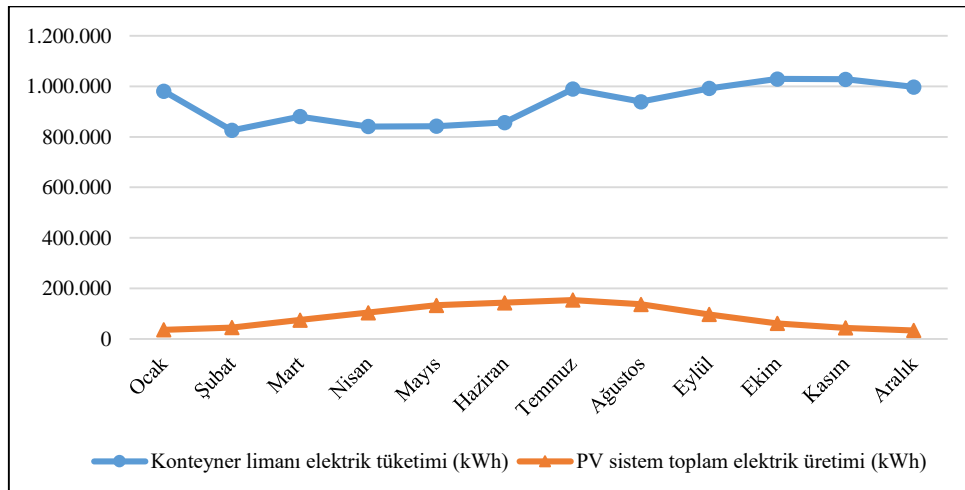
Tablo 6’teki değerler incelendiğinde; PV sistemi kapsamında en yüksek miktarda elektrik üretiminin (410.431 kWh/yıl), azimut açısının 53° olduğu 1. çatıda gerçekleşebildiği görülmektedir. Azimut açısının -127° olduğu 2. çatıda ise yıllık 345.930 kWh elektrik üretimi mümkün olabilecektir. Azimut açısının 121° olduğu 3. çatıda üretilen yıllık elektrik miktarı 143.570 kWh iken, azimut açısının -59° olduğu 4. Çatıda ise yıllık 161.103 kWh elektrik üretimi sağlanabilecektir. Sonuç itibarıyla; bu çalışma kapsamında incelenen konteyner limanına kurulması öngörülen PV sistemi sayesinde güneş enerjisine dayalı olarak yıllık toplam 1.061.034 kWh/yıl elektrik üretiminin mümkün olabileceği anlaşılmaktadır. PV sistem ile en fazla elektrik üretimi temmuz ayında, en düşük elektrik üretimi ise aralık ayında olmaktadır.

Tablo 7. PV sistemin (dört çatının) üretimi karşılama oranı (%)

Aylar	343 kW _p güçteki elektrik üretimi		138 kW _p güçteki elektrik üretimi		PV ile elektrik üretiminin, limanın elektrik tüketimini karşılama oranı
	1. çatının karşılama oranı	2. çatının karşılama oranı	3. çatının karşılama oranı	4. çatının karşılama oranı	
Ocak	1,60	1,00	0,42	0,63	3,65
Şubat	2,24	1,62	0,67	0,88	5,41
Mart	3,34	2,73	1,13	1,32	8,52
Nisan	4,67	4,11	1,70	1,84	12,32
Mayıs	5,85	5,41	2,24	2,30	15,80
Haziran	6,11	5,80	2,39	2,41	16,71
Temmuz	5,76	5,32	2,22	2,25	15,54
Ağustos	5,55	4,83	2,04	2,15	14,56
Eylül	3,80	3,15	1,29	1,51	9,76
Ekim	2,41	1,84	0,75	0,96	5,96
Kasım	1,87	1,17	0,49	0,73	4,26
Aralık	1,52	0,87	0,37	0,59	3,35
Toplam	3,66	3,09	1,28	1,44	9,47

Ayrıca, limanın elektrik tüketim miktarı ile PV sisteminde üretilmesi öngörülen elektriğin tüketimi karşılama oranı aylık bazda farklılık arz etmektedir. Tablo 7’de görüldüğü üzere, PV sistemle üretilen elektrik 1. çatı durumunda tüketimin %3,66’lık kısmını, 2. çatı durumunda tüketimin %3,09’luk kısmını, 3. çatı durumunda tüketimin %1,28’lik kısmını, 4. çatı durumunda tüketimin %1,44’lük kısmını karşılayabilmektedir. Toplamda ise PV sistemden üretilen elektrik ile konteyner limanının yıllık elektrik ihtiyacının %9,47’lik kısmının karşılanması mümkün olabilmektedir. PV sistemde üretilen elektriğin en fazla temmuz ayında olmasına karşın, üretimin tüketimi karşılama oranı en yüksek haziran ayında gerçekleşmektedir.

Şekil 6’da konteyner limanının elektrik tüketimi ile PV sistemle elektrik üretiminin ilişkisi görülmektedir.



Şekil 5. Konteyner limanı elektrik tüketimi ile PV sistemin elektrik üretimi ilişkisi

Tablo 6 ve Şekil 5’te görüldüğü gibi, konteyner limanındaki aylık elektrik tüketimi 825.640 ile 1.029.287 kWh arasında değişmektedir. PV sistem ile üretilmesi öngörülen aylık elektrik miktarı ise 33.416 kWh ile 153.702 kWh seviyesindedir.

B. PV Sistemin İlk Yatırım Maliyeti ve Geri Ödeme Süresi

PV sistemlerin maliyet kalemleri arasında sistemin kurulacağı arazi ve trafo merkezinin durumunun da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Konteyner limanında bulunan antrepo çatısı, güneş panellerinin dizinimi ve PV sistem kurulumu açısından uygundur. PV sisteminin kullanılması öngörülen çatı alanı, liman işletmesinin kendi kullanımına aittir. Ayrıca, limanın kendi tasarrufunda olan trafo merkezi de mevcuttur. Bu nedenle, PV sistemi için arazi ve trafo giderleri bulunmayıp hesaplamalara dâhil edilmemiştir.

PV sistemde ilk yatırım maliyetinin hesaplanması piyasa araştırması yapılarak belirlenmiştir. Antrepo ve atölye çatısına kurulacak olan 962 kW_p kurulu güçteki PV sistemde kullanılacak ekipmanların ilk yatırım maliyeti ayrı ayrı yapılmıştır. Kurulması planlanan 962 kW_p kurulu güce sahip PV sistem için gerekli olan PV paneli, malzeme ekipmanları ile mühendislik hizmetleri ve süreç yönetimine ilişkin maliyet kalemleri ayrıntılı olarak Tablo 8’de ve Tablo 9’da ayrı ayrı verilmiştir.

Antreponun her bir çatı için kurulması öngörülen 343 kW_p kurulu güce sahip PV sistemin ilk yatırım maliyeti 1.958.800 TL olarak, atölyenin her bir çatıya için kurulması öngörülen 138 kW_p kurulu güce sahip PV sistemin ilk yatırım maliyeti ise 761.100 TL olarak hesaplanmıştır.

Sonuç itibariyle; konteyner limanındaki antrepo ve atölye çatılarına kurulması öngörülen dört çatıdaki PV sistemin toplam ilk yatırım maliyeti 5.439.800 (2x761.100 + 2x1958.800) TL olarak belirlenmiştir.

Tablo 8. 343 kW_p PV sistem için panel ve ekipman maliyet hesabı

Malzeme adı	Adet	Birim fiyat (TL)	Toplam fiyat (TL)
PV sistem paneli (polikristal 275 W _p)	1.250	660	825.000
İnvertör (40 kW)	8	55.000	440.000
Taşıyıcı sistem (Alüminyum-set)	1.250	60	75.000
Kablo, tava, pano vb. diğer malzeme ve kurulum	1	300.000	300.000
Mühendislik hizmetleri süreç yönetimi	1	20.000	20.000
Toplam (KDV hariç)			1.660.000
Toplam gider (%18 KDV dahil)			1.958.800

Tablo 9. 138 kW_p PV sistem için panel ve ekipman maliyet hesabı

Malzeme adı	Adet	Birim fiyat (TL)	Toplam fiyat (TL)
PV sistem paneli (polikristal 275 W _p)	500	660	330.000
İnvertör (40 kW)	3	55.000	165.000
Taşıyıcı sistem (Alüminyum-set)	500	60	30.000
Kablo, tava, pano vb. diğer malzeme ve kurulum	1	100.000	100.000
Mühendislik hizmetleri süreç yönetimi	1	20.000	20.000
Toplam KDV hariç)			645.000
Toplam gider (%18 KDV dahil)			761.100

PV sistemin faaliyete geçmesini müteakip, konteyner limanı yıl içerisinde ihtiyaç duyduğu elektriğin 1.061.034 kWh’lik kısmını kendisi üretebilecektir. Geri kalan kısmın ise şebekeden tedarik edilmesi gerekecektir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK)’nun belirlemiş olduğu elektrik fiyat tarifesine göre elektrik birim fiyatı 1,007573 TL/kWh olarak alınmıştır [48].

Tablo 10’da konteyner limanına PV sistem kurulması durumunda güneş enerjisine dayalı olarak üretilen elektrik ile sağlanabilecek tasarruf miktarları yer almaktadır.

Tablo 10’da görüldüğü gibi, halihazırda konteyner limanının yıllık elektrik ihtiyacı 11.201.143 kWh/yıl mevcut durumda şebekeden sağlanmakta olup bunun için yılda yaklaşık 11.285.970 TL ödenmektedir. PV sistem

kurulması halinde ise güneş enerjisine dayalı olarak üretilecek olan 1.061.034 kWh/yıl elektriği doğrudan kendisi kullanabileceği için bu sayede elektrik faturasından yılda yaklaşık 1.069.069 TL tasarruf sağlayabilecektir.

Tablo 10. Güneş enerjine dayalı elektrik üretimi ve tasarruf miktarları

	Yıllık enerji üretimi ve tasarrufu (kWh/yıl)	Birim fiyat (TL/kWh) (KDV Dahil)	Yıllık üretim/tüketim bedeli (TL/yıl)
PV sistem kurulmadan önceki tüketim	11.201.143	1,007573	11.285.970
1. çatıdaki üretim	410.431	1,007573	413.539
2. çatıdaki üretim	345.930	1,007573	348.550
3. çatıdaki üretim	143.570	1,007573	144.657
4. çatıdaki üretim	161.103	1,007573	162.323
Yıllık toplam tasarruf	1.061.034		1.069.069

Yatırım projelerinde işletmeler tarafından yapılacak yatırım kararını; yatırımın tutarı ile geri ödeme süresi belirlemektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen konteyner limanına kurulması öngörülen PV sistem yatırımının geri ödeme süresinin belirlenmesinde İndirgenmiş Geri Ödeme Süresi Yöntemi uygulanmış olup Eşitlik 7'ye göre hesaplanmıştır [49]:

$$\sum_{t=0}^{m-1} \frac{I_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=m}^n \frac{A_t}{(1+i)^t} \quad (7)$$

Eşitlik 7'de; geri ödeme süresi işletme dönemindeki yıl sayısı olarak tanımlanmaktadır. Burada; m yatırım kuruluş süresini, n yatırım kuruluş süresi ile ekonomik ömür süresi toplamını, I_t , t yılda katlanılan yatırımın maliyetini, A_t , t yılda ortaya çıkan net nakit akışını, i ise iskonto oranını ifade etmektedir.

Konteyner limanına kurulması öngörülen PV sistem yatırımına yönelik olarak İndirgenmiş Geri Ödeme Süresi Yöntemi ile yapılan geri ödeme süresi hesaplaması Tablo 11'da sunulmuştur. Hesaplama, PV sistemi ile sağlanacak tasarrufun her yıl sabit olacağı kabul edilmiştir.

Ayrıca, ülkemizde son 7 yılda gerçekleşen tüketici enflasyon oranı ağırlıklı ortalaması 12,02 [50] olup, iskonto oranı %12 ve Türk lirası değeri (1 USD=8 TRY) sabitlenerek hesaplama yapılmıştır. PV sistemin kurulmasının bir yıl içerisinde tamamlanacağı öngörülmüştür.

Tablo 11 değerleri incelendiğinde; PV sistem enerji senaryosuna göre Kocaeli Bölgesindeki konteyner limanına kurulması öngörülen PV sistem yatırımının geri ödeme süresi 8,33 yıl olarak belirlenmiştir. PV sistemlerin geri ödeme süresinin önceki yıllarda yapılan bazı çalışmalarda [51] 10 yıl ve üzerinde olduğu belirtilirken, günümüzde yapılan bazı çalışmalarda [35] ise dört yıla kadar düştüğü ifade edilmektedir.

Bu kapsamda, PV sistemin garanti süresinin 25 yıl olduğu da dikkate alındığında, konteyner limanını antrepo ve atölye çatı konumları dikkate alındığında kurulması öngörülen PV sistem yatırımının geri ödeme süresi bakımından makul olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 11. Toplam maliyetin indirgenmiş geri ödeme süresi hesabı

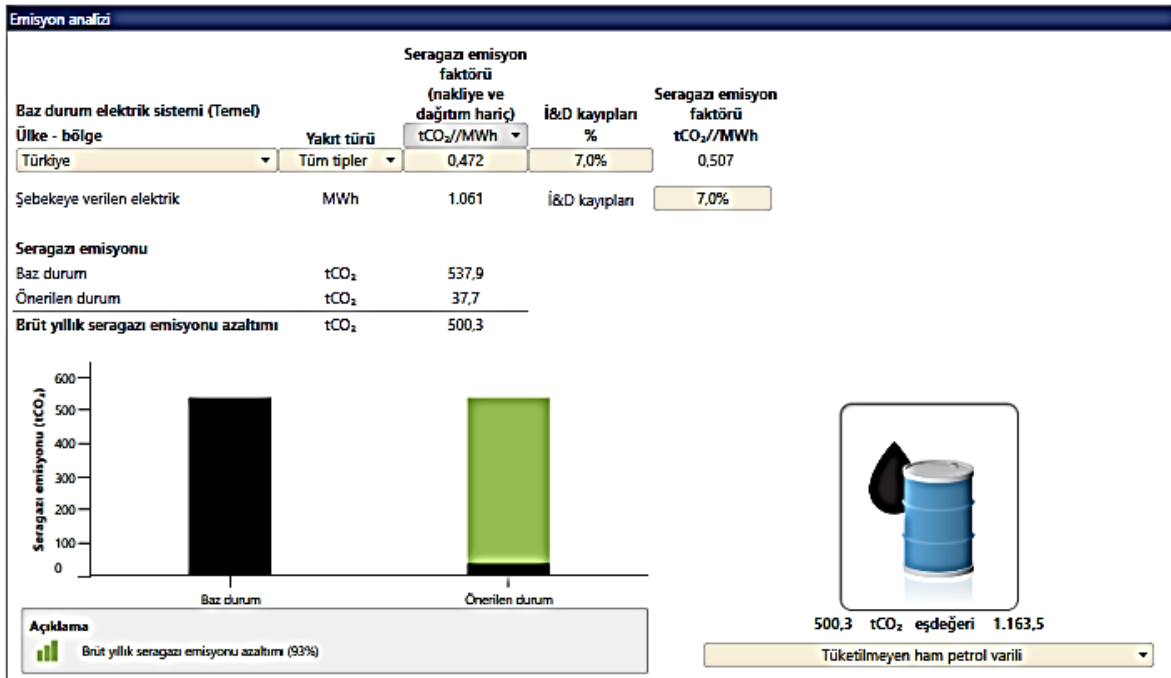
	Net akış (TL)	İndirgenmiş nakit net akışları (TL)	Birikimli indirgenmiş net akış (TL)	Kalan ödeme (TL)	Geri ödeme süresi (yıl)
Temel yıl (0)	-5.439.800				
1. yıl	1.069.069	954.526	1.829.053	4.485.274	
2. yıl	1.069.069	852.255	1.806.781	3.633.019	
3. yıl	1.069.069	760.942	2.567.723	2.872.077	
4. yıl	1.069.069	679.413	3.247.136	2.192.664	
5. yıl	1.069.069	606.618	3.853.754	1.586.046	
6. yıl	1.069.069	541.624	4.395.378	1.044.422	
7. yıl	1.069.069	483.593	4.878.971	560.829	
8. yıl	1.069.069	431.779	5.310.750	129.050	
9. yıl	1.069.069	385.517	5.696.267	-256.467	8,33

C. PV Sisteminin Çevresel Etkisi

Diğer enerji üretim yöntemlerine kıyasla PV sistemler atmosfere daha az sera gazı salımı yapmaktadırlar. Bu çalışma kapsamında PV sistemin sera gazı salım miktarı hesaplamalarında RETScreen yazılımı kullanılmıştır. Sera gazı salım miktarındaki azalmayı hesaplamak için RETScreen yazılımında; coğrafi konum, PV sistem kurulu gücü, geçiş kayıp katsayısı (7.0), sera gazı faktörü (0.507 t/MWh CO² eşdeğeri) olarak kabul edilmek suretiyle emisyon analizi yapılarak PV sistem sayesinde önlenilecek CO² salım miktarı hesaplanmıştır. Söz konusu hesaplama sonucu verileri Şekil 6'da görülmektedir [47].

RETScreen - Emisyon Analizi

Abone: Viewer



Şekil 6. Konteyner limanına PV sistem kurulması ile sağlanacak sera gazı emisyon değerleri [47]

Şekil 6'da görüldüğü gibi, PV sistem ile yıllık 500,3 tCO²/yıl sera gazı salımı önlenmiş olacaktır. Başka bir deyişle 1163,5 varil ham petrol tüketilmemiş olacağı öngörülmektedir. PV sistemin üreteceği yıllık sera gazı emisyonu ise yılda sadece 37,7 tCO²/yıl olacaktır.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; ülkemizin deniz ticaret faaliyetlerinde çok önemli bir yeri olan Marmara (Kocaeli) Bölgesinde yer alan büyük ölçekli bir konteyner limanının elektrik ihtiyacının (en azından bir kısmının) güneş enerjisinden karşılanmasına yönelik PV sistem kurulumunun tekno-ekonomik ve çevresel analizi yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda;

- Konteyner limanındaki antrepo ve atölye binalarının çatılarına belirtilen özelliklerde kurulu gücü 962 kW_p olan PV sistemi kurulabileceği ve yılda 1.061.034 kWh elektrik üretiminin 16°'lik panel eğim açısında elde edilebileceği,
- Öngörülen PV sistemin toplam ilk yatırım maliyeti 5.439.800 TL olup söz konusu yatırımın geri dönüş süresinin 8,33 yıl olacağı,
- Öngörülen PV sistemin kurulması halinde, konteyner limanında bir yıl boyunca ihtiyaç duyulan elektriğin yıllık ortalama %9,47'sinin (bu oran mayıs, haziran, temmuz ve ağustos aylarında %14-17'ye kadar çıkabilmektedir) PV sistemi ile karşılanabileceği, dolayısıyla limanın elektrik ihtiyacının çok daha yüksek bir oranla PV sistemle karşılanabilmesi için bina çatılarının dışındaki alternatiflerin de değerlendirilmesi gerektiği,
- Öngörülen PV sistemin kurulması halinde, yıllık 500,3 tCO₂/yıl sera gazı salımının önlenmiş (1163,5 varil ham petrol tüketilmemiş) olacağı,

tespit edilmiştir. Konteyner limanında bulunan antrepo ve atölye binalarının çatıları, şebeke ile bağlantılı PV sistemlerinin kullanılmasını avantajlı kılmaktadır. Ancak, antrepo ve atölye çatılarına kurulması öngörülen PV sistemin, konteyner limanının elektrik ihtiyacını yüksek oranda karşılamaya yetmeyeceği de anlaşılmaktadır. Sadece bu çalışmada incelenen liman için değil, genel olarak limanlardaki ticari operasyonların çok büyük kısmı 7/24 esasına göre açık sahalarda gerçekleşmekte ve kapalı alan (bina) sayısı da oldukça sınırlı olmaktadır. Dolayısıyla, limanlarda elektrik ihtiyacının daha yüksek bir oranda PV sistemle sağlanabilmesi için bina çatılarının dışındaki alternatiflerin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla liman içerisindeki uygun boş alanlar da PV sistem kurulumu için kullanılabilir.

Fakat, bu çalışma kapsamında incelenen konteyner limanının bulunduğu Kocaeli Bölgesinde çok sayıda başka liman tesisinin de bulunduğu düşünüldüğünde, daha genel bir alternatif çözüm olarak, limanlara yakın bir bölgede büyük ölçekli ortak bir PV sistem kurulması ve burada üretilecek elektriğin limanlara dağıtılması şeklindeki bir yatırım modelinin daha etkin ve ekonomik olabileceği değerlendirilmektedir. Tabii ki bu model, rüzgâr enerjisi vb. gibi diğer alternatif/yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenerek hibrit bir yapıda da olabilir. Bu konu, ilgi duyan araştırmacılar tarafından gelecekteki çalışmalarda da detaylıca ele alınabilir.

KAYNAKLAR

- [1] İMEAK DTO. (2019). *2019 Sektör Raporu*. <https://www.denizticaretodasi.org.tr/tr/yayinlarimiz/sectorraporu> (15.08.2021).
- [2] Donald, M. (2000). *The Development of Container Logistics in Intermodal Transport in South Africa Training in Shipping*. Master of Science Thesis, World Maritime University, Malmö.
- [3] Fulser, S. (2015). *Kombine Taşımacılık ve Türkiye Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Türkiye Elektrik İletişim A.Ş. (TEİAŞ). (2020). *2019 Yılı Türkiye Elektrik İletimi Sektör Raporu*. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/sector-raporlari>. (15.08.2021).
- [5] British Petroleum (BP). (2019). *BP Statistical Review of World Energy*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf> (15.08.2021).
- [6] Varınca, K. B., & Gönüllü, T. (2006). Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma. *I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi (UGHEK)*, Eskişehir.
- [7] Şen, Z. (2004). Türkiye'nin Temiz Enerji İmkânları. *Mimar ve Mühendis Dergisi*, 33, 6-12.
- [8] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). 2021. *Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA)*. <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/>. (15.08.2021).
- [9] European Commission (EU). (2021). *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/methods>, (15.08.2021).

- [10] Alcan, Y., Demir, M., & Duman, S. (2018). Sinop İlinin Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Potansiyelinin Ülkemiz ve Almanya İle Karşılaştırarak İncelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5(19), 35-44.
- [11] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). *Insights Renewables*. <https://www.irena.org/> (15.08.2021).
- [12] Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Denizcilik Genel Müdürlüğü (DGM). (2020). *Denizcilik İstatistikleri – Konteyner İstatistikleri*. <https://denizcilikistatistikleri.uab.gov.tr/konteyner-istatistik>, (15.08.2021).
- [13] Saitov, E. B., Toshov, J. B., Pulatov, A. O., Botirov, B. M., & Kurbanov, Yu. M. (2020). Networked Interactive Solar Panels over the Roof Photovoltaic System (PVS) and its Cost Analysis at Tashkent State Technical University. *Rudenko International Conference (RSES 2020)* 216 (01133).
- [14] Kumar, G. R., Prasad, A. H., Saketha, N. S., & Saichandana, K. (2014). A New Innovative Design principle of Grid Interactive Roof Top Solar Photovoltaic Power Generation. *International Journal of Education and Applied Research (IJEAR)*, 4(1), 37-41.
- [15] Mohanta, P.R., Patel, J., Bhuva, J., & Gandhi, M. (2015). A Review on Solar Photovoltaics and Roof Top Application of It. *International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology (IJAREST)*, 2(4), 2394-2444.
- [16] Singh, S., Srivastava, A., & Rawat, H. S. (2017). Grid Interactive Rooftop Solar Photo Voltaic (PV) System & its Cost Analysis for Pantnagar University. *International Journal on Emerging Technologies (Special Issue NCEST-2017)*, 0975-836.
- [17] Siraki, A. G., & Pillay, P. (2012). Study of Optimum Tilt Angles for Solar Panels in Different Latitudes for Urban Applications. *Solar Energy*, 86(6), 1920-1928. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.030>
- [18] Yıldırım, E., & Aktacir, M. A. (2019). Binaya Entegre Fotovoltaik Sistemlerde Azimut ve Eğim Açısı Etkilerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 609-619.
- [19] Çelebi, G. (2002). Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerinin Kullanım İlkeleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17 (3), 17-33.
- [20] Güven, Ş. Y., & Şenol, R. (2005). Güneş Pili Destekli Çevre Aydınlatma ve Sulama Sisteminin Örnek Bir Uygulaması. *Mühendis ve Makina*, 46 (548),13-20.
- [21] Dikmen, Ç. B., & Gültekin, A. B. (2011). Sürdürülebilirlik Kapsamında Yapılarda Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1(3), 96-100.
- [22] Dondariya, C., Porwal, D., Awasthi, A., Shukla, A. K., Sudhakar, K., SR, M. M., & Bhimte, A. (2018). Performance Simulation of Grid-Connected Rooftop Solar PV System for Small Households: A Case Study of Ujjain, India. *Energy Reports*, 4, 546-553.
- [23] Akkaya, S., & Akkaya Oy, S. (2021). Samsun, Bayburt ve Mersin İllerine Kurulabilecek Güneş Enerjisi Santrallerinin Modellenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 759-773.
- [24] Heras-Saizarbitoria, I., Zamanillo, I., & Laskurain, I. (2013). Social Acceptance of Ocean Wave Energy: A Case Study of an OWC Shoreline Plant. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 27, 515–524
- [25] Yılmaz, F. (2019). Contributions of “Green-Ecoport Approach” to Merchant Trade and Logistics: Comparison of Practices in Turkey and the European Union (EU). *Journal of Transportation and Logistics*, 4(2), 65-78.
- [26] Liu, P., Wang, C., Xie, J., Mu, D., & Lim, MK. (2021). Towards Green Port-Hinterland Transportation: Coordinating Railway and Road Infrastructure in Shandong Province, China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 94, 102806.
- [27] Sifakis, N., Konidakis, S., & Tsoutsos, T. (2021). Hybrid Renewable Energy System Optimum Design and Smart Dispatch for Nearly Zero Energy Ports. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127397.
- [28] Yang Y.C., & Chang W. M. (2013). Impacts of Electric Rubber-Tired Gantries on Green Port Performance. *Research in Transportation Business and Management*, 8, 67-76.
- [29] Villalba, I., & Diaz, F. (2015). Analysis of the Present Situation of Solar Photovoltaic Systems Integration in the Spanish Ports. *EU PVSEC 2015*, Germany.
- [30] Nikishin, A.J., & Kharitonov, MS. (2021) Modernization of Marine Ports Electrical Power Supply Systems in The Framework of Zero-Emission Strategy, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, International conference Germany and Russia.
- [31] Misra, A., Venkataramani, G., Gowrishankar, S., Ayyasam, E., & Ramalingam, V. (2017). Renewable Energy Based Smart Microgrids a Pathway to Green Port Development. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 37(2), 17-32.

- [32] Elnejjar, H. M., Shehata, A. S., Albatran, A. H. A., & Shehadeh, M. F. (2021). Experimental and Techno-Economic Feasibility Analysis of Renewable energy Technologies for Jabel Ali Port in UAE. *Energy Reports*, 7(5), 116-136.
- [33] Vidal, H., Rivera, M., Wheeler, P., & Vicencio, N. (2020). The Analysis Performance of a Grid-Connected 8.2 kWp Photovoltaic System in the Patagonia Region. *Sustainability*, 12, 1-16.
- [34] Yiğit, A., & Atmaca, İ. (2018). *Güneş Enerjisi*, Bursa, Türkiye. Dora Yayınevi.
- [35] Sulukan, E. (2020). İstanbul'da Bir Fotovoltaik Sistemin Tekno-Ekonomik ve Çevresel Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1) 127-132.
- [36] Messenger R.A., & Ventre, J. (2005). *Photovoltaic Systems Engineering*. 2. Baskı, Florida. Taylor & Francis e-Library.
- [37] Sick, F., & Erge, T. (1996). *Photovoltaics in Buildings: A Design Handbook for Architects and Engineers*. London. James & James Ltd.
- [38] Güven, A. F. (2016). Afyon Oruçoğlu Termal Otelinin Enerji İhtiyacını Karşılacak Güneş Enerji Sisteminin Tasarlanması, Optimizasyonu ve Maliyet Analizi. *Uluslararası Sosyal Bilimler ve Eğitimde Stratejik Araştırma Konferansı (ICoSReSSE)*, 1-18.
- [39] Yadav, S., Hachem-Vermette, C., Panda, S. K., Tiwari, G. N., & Mohapatra, S. S. (2021). Determination of Optimum Tilt and Azimuth Angle of BISPVT System Along With its Performance Due to Shadow of Adjacent Buildings. *Solar Energy*, 215, 206-219. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.033>
- [40] Karaca, Ü. B., & Uçar, S. (2018). Konut Çatı ve Cephelelerinde Farklı Fotovoltaik Sistem Uygulamalarının Değerlendirilmesi. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 65-76.
- [41] Port of Rotterdam Authority (PRA). (2021). *Solar Power in the Port*. <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/solar-power-in-the-port> (15.08.2021).
- [42] Tenerife Ports (TP). (2020). *Sustainable Electric Mobility Plan*. <https://sustainableworldports.org/project/tenerife-ports-e-island-sustainable-electric-mobility-plan/> (15.08.2021).
- [43] International Renewable Energy Agency. (2022). <https://www.irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>(15.04.2022).
- [44] Çevre, Şehir ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). (2021). <https://iklim.csb.gov.tr/paris-anlasmasi-i-98587> (15.04.2022).
- [45] Elektrik Üreticileri Derneği (EÜD). (2022). <https://www.eud.org.tr/2022/01/11/dunya-enerji-krizi-kiskacinda/> (15.04.2022).
- [46] Huld T., Friesen G., Skoczek A., Kenny R. P., Sample T., Field M., & Dunlop E. D. (2011). A Power-Rating Model for Crystalline Silicon PV Modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95, 3359-3369. doi:10.1016 / j.solmat.2011.07.026
- [47] Government of Canada (GC). (2021). *RETScreen*. <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465> (15.08.2021).
- [48] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2021). *Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları*. <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tabloları> (15.08.2021).
- [49] Eski, H., & Armaneri, Ö. (2006). *Mühendislik Ekonomisi*. Ankara, Türkiye. Gazi Kitapevi.
- [50] T.C. Merkez Bankası (MB). (2021). *Tüketici Fiyatları*. <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Enflasyon+Verileri/Tuketici+Fiyatları> (15.08.2021).
- [51] Üçgül, İ., Tüysüzoğlu, E., & Yakut, M. (2014). PV Çatı Uygulaması için Enerji Hesaplaması ve Ekonomik Analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(2), 1-6.