

# İstanbul'da bir fotovoltaik sistemin tekno-ekonomik ve çevresel analizi

## Techno-economic and environmental analysis of a photovoltaic system in Istanbul

Egemen SULUKAN<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Deniz Harp Okulu Dekanlığı, Milli Savunma Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
esuluk@dh.o.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 02.01.2019, Kabul Tarihi/Accepted: 25.06.2019

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2019.24022

Araştırma Makalesi/Research Article

### Özet

Artan küresel enerji talebi ve değişken maliyetler, insanoğlunu sürdürülebilir ve düşük maliyetli enerji çözümlerine yönlendirmektedir. Yenilenebilir kaynaklar ve buna benzer enerji üreten teknolojiler, ekonomik ve çevre dostu seçenekler olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda enerji üretim maliyetlerindeki ciddi azalma ile güneş enerjisi ön plana çıkmıştır ve milli ekonomiler içerisindeki üretim payı artmıştır. Güneş enerjisinden elektrik üreten teknolojiler sadece düşük maliyetli olmalarından dolayı değil, aynı zamanda iklim değişikliği ile mücadelede ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkılarından dolayı da tercih edilmektedir. Bu çerçevede; bu çalışmanın amacı, İstanbul'da bulunan bir yerleşkenin elektrik talebini karşılayacak, güneş enerjisini kaynak olarak kullanan fotovoltaik (FV) modüllerden oluşan bir sistemin tekno-ekonomik ve çevresel yönlerini incelemektir. Milli Savunma Üniversitesi Deniz Harp Okulu'nun toplam güneş potansiyeli; yerleşkedeki FV modüllerin çatıdaki kullanılabilir alanına, çatının kullanılabilir birim alanına, verime, inventör verimine ve FV dizini üzerindeki sıcaklık etkisine bağlı olarak hesaplanmıştır. Önerilen çatı tip FV sisteminin potansiyeli, modifiye edilmiş bir hesaplama yöntemi ile belirlenmiş ve daha sonra önerilen FV sisteminin fizibilitesi RETScreen simülasyon aracı tarafından geliştirilmiştir. Sonuç olarak, önerilen sistemin dört sene geri ödeme süresi sonunda pozitif nakit akışına ulaştığı ve öngörülen 25 yıllık proje ömrünün devamında da kâr durumunu devam ettirdiği, toplam sera gazı salımında %93 oranında azaltım sağlayarak 721.1 ton ham petrol kullanımından tasarruf sağlayacağı hesaplanmış ve Deniz Harp Okulu yerleşkesi için maliyet-etkin ve çevre dostu bir uygulama olduğu değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Fotovoltaik, Yenilenebilir enerji, Enerji sistem simülasyonu, RETScreen, Türkiye

### Abstract

Increasing global energy demand and fluctuating costs drive mankind to sustainable and cost-effective energy solutions. Renewable resources and relevant energy-generating technologies stand out as sustainable and eco-friendly options. In recent years, with a significant decrease in energy production costs, solar energy has come to the fore and increased its production share in the national economies. Solar based electricity production technologies are preferred not only with their cost-effectiveness but also with their contribution to combating climate change and achieving sustainable development targets. In this context; the aim of this study is to analyze the techno-economic and environmental aspects of a system consisting of photovoltaic (PV) modules that use solar energy as a source to provide electrical power demand in a campus located in Istanbul. The solar potential of the Turkish Naval Academy of the National Defense University has been calculated based on the available rooftop area for PV modules in the campus, the availability of per unit area of the roof, the efficiency, inverter efficiency and temperature effects on the PV array's performance. The potential of the roof-mounted PV system was calculated using a modified calculation and then the feasibility of the proposed energy system has been developed by the RETScreen simulation tool. As a result, it is calculated that the proposed system will reach positive cash flow at the end of four years repayment period and continue its profit condition throughout the 25 years project life cycle, which will decrease the total greenhouse gas emissions by 93% and save 721.1 tons of crude oil. It has been evaluated as a cost-effective and environment-friendly application for the campus of the Turkish Naval Academy.

**Keywords:** Photovoltaic, Renewable energy, Energy system simulation, RETScreen, Turkey

## 1 Giriş

Fotovoltaik (FV), güneş radyasyonunu elektrik enerjisine, güneş hücrelerinin oluşturduğu modüller yardımıyla güvenilir bir şekilde dönüştüren bir teknolojidir. Çağımızda, iklim değişikliğinin önemli bir konu başlığı olduğu zaman diliminde, temiz ve güvenilir bir şekilde elektrik enerjisi üreten FV hücreler silikon gibi yarı iletkenlerden üretilmektedir. FV modüllerinin verimini belirleyen en önemli faktör, çalışma sıcaklığındaki değişikliklerdir [1]. Bu değişiklikler, sistemin güç-kalite performansını önemli ölçüde belirler [2]. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin şebekeye bağlantısından kaynaklanan sorunlardan dolayı, güneş enerjisine dayalı dağıtık sistemler, şebeke bağlantılı sistemlerden daha güvenilir bir güç desteği olarak kullanılabilir [3]. Bağımsız sistemlerde şarj kontrolörlerine bağlı bataryalar, çeşitli sıcaklık ve çalışma şartlarında radyasyon dalgalanmalarında yüksek tolerans sağlamaktadır [4].

Literatürde, şebeke bağlantılı FV çatı sistemleri ile ilgili olarak birçok çalışma bulunmaktadır. Sharma ve Chandel Pencap, Hindistan'da şebekeye bağlı 190 kW kurulu güce sahip bir FV güç santralini inceleyerek son kazanç, referans kazanç ve performans oranlarının sırasıyla 1.45'ten 2.84 kWh/kWp-gün'e, 2.29'dan 3.53 kWh/kWp-güne ve %55'ten %83'e değişim gösterdiğini tespit etmişlerdir [5]. Santralin yıllık ortalama enerjisi %8,3'lük sistem verimi ile 812.76 kWh/kWp olarak gerçekleşmiştir. Mondol tarafından yapılan başka bir çalışmada, 13 kW çatı tip şebeke bağlantılı bir FV sistemi için, aylık, ortalama, günlük FV, sistem ve invertör verimleri sırasıyla %4.5'tan %9.2'ye, %3.6'dan %7.8'e ve %50'den %87'ye şeklinde hesaplanmış; performans değeri 0.29 ile 0.66 oranında değişimler gösterdiği bildirilmiştir. Endonezya'da Tarigan ve Kartikasari tarafından yapılan bir başka tekno-ekonomik çalışma ise 1 kW şebeke bağlantılı FV sistemi üzerine yoğunlaşmış ve bu tip bir sistemin teknik olarak konut elektrik ihtiyacını karşılayabilir olduğu belirtilmiştir [6].

Bu sistem, şebekeye %72 performans oranı (PR) ile yılda yaklaşık 1 MWh elektrik üretimi sağlarken 1296 ton CO<sub>2</sub> azaltımı sağlamıştır. Bu sistemin amortisman periyodu, sistemin kara geçmesinden sonra 17.6 yıl olarak hesaplanmıştır [7]. Pundir ve arkadaşları IIT Rookee’de şebeke bağlantılı bir FV güç sistemi performansı üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapmış ve enerji üretim maliyetini % 63.68 performans oranı ile kWh başına 8.50 Hindistan Rupisi ve kapasite faktörünü ise % 8.77 olarak hesaplamıştır. Yılda 2764 ton CO<sub>2</sub> azaltımı sağlayan bu çevre dostu sistemin amortisman periyodunun 7.5 yıl olduğu bildirilmiştir [8].

Çevresel bir bakış açısı ile literatüre bakıldığında; sera gazı salımı, yaşam döngüsü ve enerji amortisman zamanı (EPBT) ile ilgili çalışmaların son dönemlerde iklim değişikliği tartışmaları ile birlikte arttığı görülmektedir. Kato ve arkadaşları, düşük kaliteli silikon malzemeden imal edilmiş 3 kW çatı montajlı FV sistem için mono kristal hücrelerin üretimi aşamasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> salımını tahmin etmiştir. Bu çalışmada, yıllık 3.47 MWh’lık elektrik üretimi ve 315.8 ton CO<sub>2</sub> eş/yıl toplam CO<sub>2</sub> salımı olduğu hesaplanmıştır [9]. Kannan [10] ve Muneer [11] de sözleşme, üretim, işletme ve devreden çıkarma gibi aşamaların tümünü dikkate alarak mono kristal FV güç sistemlerinin EPBT ve sera gazı (SG) miktarlarını hesaplamıştır. Singapur’da kurulan 2.7 kW güce sahip FV sistemi için enerji tüketimi kullanım süresi ve EPBT sırasıyla 2.2 MJ/kWe ve 4.5 yıl olarak hesaplanmış ve SG salımı yaklaşık 165 gr-CO<sub>2</sub> eş/kWh olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, Honda tarafından çatı tip polikristal FV sistemlerindeki SG salımı 53.4 gr-CO<sub>2</sub> eş/kWh olarak hesaplanmış ve eğer FV hücrelerinde kristal olmayan silikon yerine polikristal silikon kullanılırsa SG salımının 26 gr CO<sub>2</sub> eş/kWh’e ineceği sonucuna varılmıştır [12]. Jungbluth aynı zamanda enerji ihtiyacını ve küçük ölçekli şebeke bağlantılı polikristal FV sistemi inceleyerek EPBT ve SG salımının sırasıyla 3-6 yıl ve 39-110 gr-CO<sub>2</sub> eş/kWh arasında olduğunu bildirmiştir [13],[14].

### 1.1 FV modüller FV sistemleri ve bileşenleri

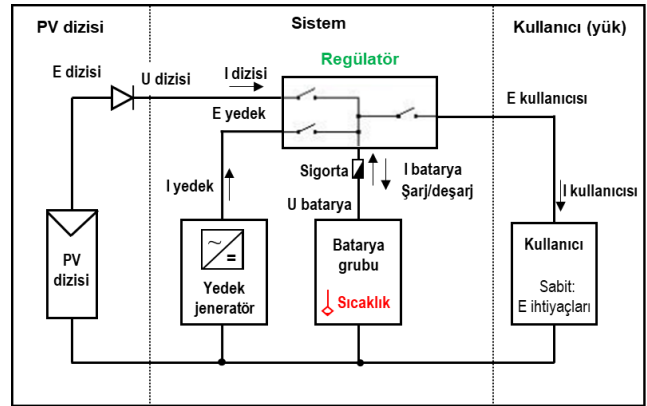
Yarı iletken malzemeden imal edilen FV hücreleri, güneş ışınımını doğru akıma, daha sonra bir şebekeye bağlı ise inventör (dönüştürücü) yardımıyla alternatif akıma dönüştürmek için kullanılan sıralı bir biçimde bir araya getirilmiş bağımsız modüllerden oluşur [15]. 1950’lerde ilk hücre %4 verimden daha düşük [16] çalışırken; daha sonra üretilen hücrelerin verimi, maliyetlerindeki hızlı düşüşle beraber ciddi bir oranda artmıştır. Günümüzde FV hücrelerin ortalama verimleri %15 ila %20 arasında değişmektedir. Bu sistemlerin toplam verimi; FV modüllerin verimi ile inventör, kablo ve diğer sistem bileşenlerindeki kayıplara bağlıdır [17].

Polikristal silikon güneş FV ve elektronik endüstrisinde hammadde olarak kullanılan yüksek saflığa sahip silikonun polikristal bir formudur. Polikristal silikon, monokristal silikonun çeşitli küçük taneleri ile bağımsız kristallerin arasındaki çeşitli tane sınırlarından meydana gelir ve %17’lik bir verim ile polikristal hücre çoğunlukla takviye malzemeler ile karıştırılmış eriyik haldeki sıvı silikon kullanılarak hazırlanır. Erimiş sıvı kristalleşme yerine, kütük şeklindeki bir pota içinde soğutulur. Soğuma hızı, kristal taneceklerin boyutunu ve takviyenin karışım içindeki dağılımını belirler. Soğutulduktan sonra elde edilen külçe metal tellerden geçecek şekilde genellikle kare geometriye sahip ince parçalar halinde kesilir. Bu hücreler, polikristal güneş paneli oluşturacak şekilde bir araya getirilirler. Böylece, polikristal silikon hücrelerin

üretimi, monokristal hücrelerden daha basit yapıda ve ucuzdur [18].

Türkiye; Akdeniz, Ege ve Karadeniz’i içeren 36 ve 42° kuzey paralelleri ile 26 ile 45° doğu meridyenleri arasında kalan güneşli kuşakta yer aldığından, FV tesis kurulumu açısından avantajlı bir konuma sahiptir. Ülke boyunca uzanan Akdeniz Güneş Kuşağı, Türkiye’yi Avrupa’da güneş enerjisi potansiyeli açısından en önemli konumlardan birine sahip kılmıştır. Her yıl, Türkiye’deki ortalama güneş radyasyonu miktarı sırasıyla yılda 1311 kWh/m<sup>2</sup> ve günde 3.6 kWh/m<sup>2</sup> civarında gerçekleşmektedir; toplam yıllık yatırım periyodunun ve yüzeye gelen güneş enerjisi miktarının ise sırasıyla 2460 sa./yıl ve 7.2 sa./gün civarlarında olduğu hesaplanmıştır [19].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı; CO<sub>2</sub> salımı gibi çevre sorunlarının azaltılmasına katkıda bulunurken, bu kaynaklarla ilgili teknolojiler de gelişerek düşen maliyetleri ile rekabet avantajını arttırmaktadır [20]. Araştırma&geliştirme ve yeni teknolojilerin desteklenmesi yönünde hükümetler tarafından yapılan yasal düzenlemelerin ve özel sektör yatırımlarının bu alanda ciddi biçimde arttığı görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen gücün birim maliyeti ciddi bir miktarda azalmıştır ve bu kaynakları artık geleneksel güç üretim sistemleri ile rekabet edebilecek duruma getirmiştir. %10 verim ile dünya yüzeyine etki eden sadece %0.1’lik anlık güneş enerjisi 3000 GW’lık bir güç üretebilir. Dünya yüzeyine ulaşan yıllık güneş radyasyonu yaklaşık 3400000 EJ civarındadır. Tahrip edilmiş alanların onarılması, ulusal güç şebeke ağına bağımlılığın azalması, su kalitesinin ve kırsal alanlara elektrik ulaştırma imkânının artırılması bu teknolojinin diğer faydaları arasında sayılabilir.



Şekil 1: 1 kW tipik bir çatı tip şebekeden bağımsız FV sisteminin şematik gösterimi.

Güneş FV hücreleri, radyasyonu FV bir işlem ile elektrik enerjisine dönüştürür. Şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı iki tip güneş FV sistemi vardır. Bağımsız güneş FV sistemleri bataryalar ile birlikte çalışır [21]. Çatı tip şebekeden bağımsız güneş güç santralinde, FV panelden üretilen DC güç, bir inventör yardımıyla AC güce dönüştürülür ve tek faz bağlantılarından üretilen yük ile beslenir, aynı zamanda DC güç gün boyunca bataryalarda depolanır ve gece boyunca sistem bataryalardan beslenir. Şekil 1’de tipik bir şebekeden bağımsız çatı tip FV güç santralinin şematik bağlantısı gösterilmiştir. FV modüller, binaların çatılarına monte edilir ve güneş ışığını doğru akıma dönüştürür. İstenilen voltaj ve akımı sağlamak için, bir FV modül grubu “FV dizini” denilen şekilde sisteme kablo ile bağlanır. FV dizinin desteği, FV modüllerini binaların çatılarına yerleştirmek için kullanılan galvanizlenmiş çelik yapılarıdır.

Bağlantı yapısı, yerleştirilmek için bir çatıya ihtiyaç duyar ve güneş panellerinin doğru bir şekilde montajı üretilen güç miktarına etki eden faktörlerden birisidir. Daha sonra bir inventör, üretilen doğru akımı, gerek görülürse bir şarj kontrol ünitesi ve batarya şarj düzenleyicisi yardımıyla alternatif akıma dönüştürür [21]. Literatürde, binalardaki güneş potansiyelini belirlemek için araştırmacılar tarafından birçok yöntem geliştirildiği görülmektedir. Çatı güneş potansiyelini tahmin edebilmek için, geliştirilen bir yöntem ile Hindistan'daki şehirler için hesaplamalar yapılmıştır [22].

Bu makale dört bölüme ayrılmıştır. İlk bölüm kısaca sırasıyla FV teknolojileri ile şebekeden bağımsız çatı tip güneş FV sistemleri hakkında genel bilgileri vermektedir. İkinci bölümde, analizlerde kullanılan RETScreen simülasyon aracı ile enerji sistem tanımları hakkında hesaplama ve öngörüler sunulmaktadır. Üçüncü bölümde yapılan analiz ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen temel veriler ile sonuçlanmaktadır.

## 2 Materyal ve metodlar

Bu çalışmada, bağımsız bir FV sistemi RETScreen Simülasyon aracı kullanılarak modellenmiştir. Çeşitli FV dizin kontrol teknolojileri, şebeke bağlantılı güç teknolojilerinden şebekeden bağımsız güç teknolojisine geçişteki birçok yararın değerlendirmesinde kullanılmaktadır. FV modüllerinin güçlendirilmesi veya bunların yapılara uygulanması, özellikle gelişmiş ülkelerde temel ilgi alanlarından biri olarak ortaya çıkmıştır.

Çatı tip FV potansiyelinin tahmini iki kritik aşama içerir. Bunların ilki mevcut çatı alanının tahmini, diğeri ise enerji üretimindeki teorik maksimum potansiyelin tahminidir. Elektrik üretimi için potansiyelin doğru hesaplanması, FV sistemlerin teknik özellikleri ile önceden hesaplanan teorik maksimum değerlere uygulanmasıyla belirlenir. Üretilebilecek maksimum enerji miktarı aşağıda verilen Denklem 1 kullanılarak hesaplanır:

$$E_{max}(kWh) = A_{çatı}(m^2) \times H_{T,POA}(kWh/m^2) \quad (1)$$

Bu eşitlikte,  $E_{max}$  yatay anlık enerjiyi,  $A_{çatı}$  çatıdaki toplam kullanılabilir alanı ve  $H_{T,POA}$  ise günlük yatay güneş radyasyonu yoğunluğunu ifade eder. Deniz Harp Okulu'nun total FV güneş potansiyeli, kullanılabilir FV çatı alanı, çatıdaki FV alanına etki eden güneş radyasyonu, FV dizinin verimi, invertör verimi ve FV dizini performansı üzerinde sıcaklık etkisi göz önünde bulundurularak Singh ve Banarjee [23] tarafından önerilen Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$E_{PV}(kWh) = A_{çatı}(m^2) \times U_f \times H_{T,POA}(kWh/m^2) \times \eta_{mod} \times \eta_{pcu} \times f_{temp} \times f_{misc} \quad (2)$$

Bu eşitlikte, EFV FV'den elektrik enerjisi üretim potansiyelini,  $A_{çatı}$  toplam çatı alanını,  $U_f$  çatının kullanılabilirlik faktörünü,  $H_{T,POA}$  kullanılacak çatının birim alanına etki eden aylık ortalama güneş radyasyonunu,  $\eta_{mod}$  modüllerin dönüştürme verimini,  $\eta_{pcu}$  aynı zamanda inventör olarak da ifade edilen güç şartlandırma ünitesinin verimini ifade eder.  $f_{temp}$  faktörü, modüllerin performansı üzerindeki sıcaklık etkisi dikkate alınarak kullanılmış ve Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{temp} = 1 - \mu(NOCT - T_{hava,ort}) \quad (3)$$

Bu eşitlikte,  $\mu$  verilen bir sıcaklıkta modüllerdeki sıcaklık katsayısını, NOCT nominal hücre çalışma sıcaklığını,  $T_{hava,ort}$ ,

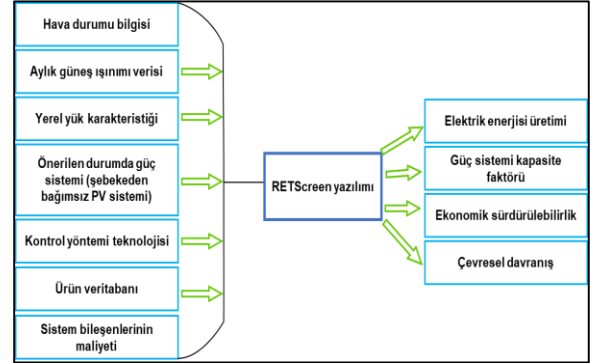
aylık ortalama hava sıcaklığını ifade ederken,  $f_{misc}$  düşük ışık durumundaki hücre verimini de içeren diğer önemli kayıpları içerir. Bu çalışmada yapılan kabullerin özeti Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Kabullerin özeti.

Parametreler	Değerler
Kullanılabilirlik faktörü ( $U_f$ )	%30-%50
Modül verimi ( $\eta_{mod}$ )	%16
İnventör verimi ( $\eta_{pcu}$ )	%90
NOCT	45 °C
Sıcaklık katsayısı ( $\mu$ )	-%0.4/°C
Önemli kayıplar ( $f_{misc}$ )	%10

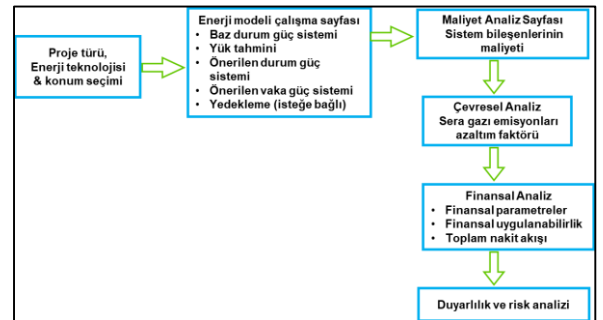
### 2.1 RETScreen yazılımı

RETScreen CANMET Enerji Çeşitlendirme Araştırma Laboratuvarı (CEDEL) ve Kanada Doğal Kaynaklar Bakanlığı'nın geliştirdikleri bir temiz enerji proje simülasyon aracıdır [24]. Yazılım sistem geliştiricilerine uygulama safhasından önce oluşturulan enerji projelerinin fizibilitesinin hızlı ve ucuz bir şekilde değerlendirilmesi imkânını sunar. Şekil 2'de gösterildiği gibi, yazılım platformu proje tipi ve teknoloji seçimiyle başlayan iki metodu içeren arayüz ile başlar ve enerji model bilgisi, finansal ve çevresel analiz gibi bütün bilgileri kısaca içerir. İkinci metottaki detaylı enerji proje sayfası, sistem bileşenlerinin maliyetini, çevresel analizi, ekonomik uygulanabilirliği ile duyarlılık ve risk analizlerini içerir [25].



Şekil 2: Metodoloji adımları.

RETScreen enerji verimi teknolojilerini ve yenilenebilir enerji sistemlerini içeren, temiz enerji projelerinin değerlendirilmesinin yapılabileceği erişime açık bir yazılımdır. Yazılım algoritması Şekil 3'te gösterildiği üzere duyarlılığın tahmin edilmesi ve risk değerlendirilmesinin yapılabilmesi için gerekli olan teknik, ekonomik ve çevresel potansiyeli hesaplar [26].



Şekil 3: RETScreen platformu: Altı adımlı standart analiz akışı diyagramı.

## 2.2 RETScreen model tanımı ve meteorolojik bilgiler

Sistem performansı; seçilen FV teknoloji tipi, en uygun enerji değeri ve kontrol teknolojisi ile belirlenir. RETScreen mono-Si, poli-Si, a-Si, CIS, CdTe ve s-Si gibi farklı FV teknolojilerini kullanarak sistemi simüle eder. Mono-Si modül verimi %14-20 iken, poli-Si modüller %12-17 verim değerlerine sahiptirler; fakat mono-Si'den daha ucuzdurlar. Bu sebeplerden; çalışmada hücre sıcaklık değerleri de göz önünde bulundurularak poli-Si malzemeden imal edilmiş FV modüller seçilmiştir. Modellenen FV sisteminin karşılaştırılmalı performansı FV dizini ile eşleştirilerek, seçilen modelin parametrik özellikleri aşağıda Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca, yakıt maliyeti artış oranı, enflasyon oranı ve iskonto (indirim) oranı gibi finansal parametrelerin de projenin uygulanabilirliğini oldukça etkilediği bariz bir gerçektir. Bu çalışmada kullanılan teknik ve finansal giriş parametreleri Tablo 2'de topluca gösterilmiştir.

RETScreen yazılımı veri tabanı, Dünya haritasındaki bütün mevkileri içerecek şekilde NASA Yüzey Meteoroloji ve Güneş Enerjisi (Surface Meteorology and Solar Energy-SSE) veri seti içine gömülmüş durumdadır. NASA SSE veri seti enlem, boylam, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, atmosferik basınç, küresel sıcaklık gibi bütün iklim ve coğrafi bilgileri içerir. RETScreen aylık güneş radyasyonu ve veri setlerini bütün mevkiler için detaylı olarak sağlamaktadır.

Tablo 2: Model giriş parametreleri.

Özellik/faktör	Değer
Teknoloji	FV
Şebeke tipi	Bağımsız
<b>Güç Sistemi</b>	
Güç teknolojisi	Şebeke elektriği
Güç oranı	0.133\$/kWh
Yıllık maksimum yük	600 kW
Çalışma günleri/hafta	7
Önerilen güç sistemi	Şebekeden bağımsız
İnvertör kapasitesi	961 kW
İnvertör verimi	%90
<b>FV Teknolojisi</b>	
FV dizin eğimi	41°
FV teknoloji tipi	Poli-Si
FV modül verimi	%16
Nominal çalışma hücre sıcaklığı	45 °C
Çerçeve alanı/FV modülü	1936 m <sup>2</sup>
<b>Sistem Bileşenlerin Maliyeti (yatırım)</b>	
Toplam sistem maliyeti	3.3\$/W
Çalışma ve bakım maliyetleri	0.044\$/W
<b>Finansal Parametreler</b>	
Enflasyon oranı	%19.71
İskonto (indirim) oranı	%18.50
Proje ömrü	25 yıl
Borç oranı	%80
Borç faiz oranı	%22.5
Borç vadesi	5 yıl
Elektrik ithalat artış oranı	%10

Deniz Harp Okulu yerleşkesi, İstanbul'un Tuzla ilçesinde, Tuzburnu yarımadasında bulunmaktadır. Meteorolojik verinin esas alındığı mevki, 41.1 °N enlemi, 29 °E boylamında 29 m yüksekliktedir. Deniz Harp Okulu ise 40.8 °N enlemi, 29.3 °E boylamında ve yaklaşık olarak deniz seviyesinde yer almaktadır (Tablo 3).

Tablo 3: Deniz Harp Okulu'nun mevki bilgileri.

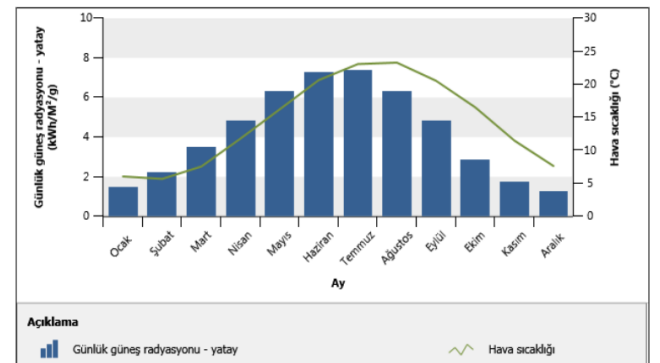
	Birim	Meteoroloji verisi	Yerleşke bilgisi
		Türkiye-İstanbul	
Enlem	°N	41.1	40.8
Boylam	°E	29	29.3
Rakım	m	21	0

Deniz Harp Okulu yerleşkesinde idari binalar, hizmet binaları, modern spor tesisleri, tam donanımlı bir marina ve liman ile mühendislik eğitimlerinin verildiği dersliklerin, amfilerin ve laboratuvarların bulunduğu akademik bir kompleks bulunmaktadır. Bu yapılar, Şekil 4'te verilen uydu görüntüsünde görülmektedir.



Şekil 4: Deniz Harp Okulu yerleşkesinin uydu görüntüsü.

Bu çalışmada esas alınan aylık ve günlük güneş radyasyonu ile ortalama sıcaklık değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Güneşlenmenin Aralık-Ocak aylarında en düşük değerde gerçekleştiği, Temmuz ayında ise en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Sıcaklık değeri 3 °C ile 25 °C arasında değişirken, günlük güneş radyasyonu 2 ila 7.5 kWh/m<sup>2</sup> değerleri arasında değişmektedir. Bu sıcaklık ve güneşlenme değerleri çalışma alanının güneş açısından doğal bir avantaja sahip olduğu ve yüksek verimle elektrik üretiminin mümkün olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 5: Bölgedeki aylık ve günlük güneş radyasyonu.

## 3 Sonuçlar ve tartışmalar

Her projede üretilen mal veya hizmetin kalitesi, dağıtımı ve müşterinin memnuniyetini içeren finansal dengenin sağlanması, yatırımcı için en önemli kriterdir. Çevre dostu projelerin topluma kazandırılması ile SG salınının azaltılması mümkün olabilmektedir. Bunun yanında, bir projenin ekonomik performansı, net bugünkü değer (NPV), iç verim oranı (IRR), amortisman periyodu, fayda/maliyet oranı (BCR)

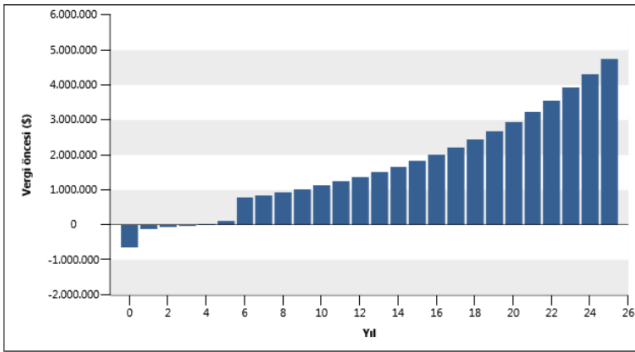
ve yıllık kullanım süresi kazancı gibi finansal parametrelere bakılarak değerlendirilir. Bu parametreler içinde NPV ve IRR ekonomik açıdan en önemli belirleyicidir. Burada NPV, belirli bir iskonto oranında, para akışının zaman içerisindeki değerini ifade ederken, IRR ise projenin NPV değerini sıfıra eşitler. NPV, Denklem 4 kullanılarak hesaplanır:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (4)$$

Bu eşitlikte, NPV önerilen sistemdeki mevcut net değeri,  $C_t$  bir t zaman periyodunda net para akışını,  $C_0$  total ilk yatırım değerini, r iskonto oranını, t ise zaman periyodu sayısını ifade eder.

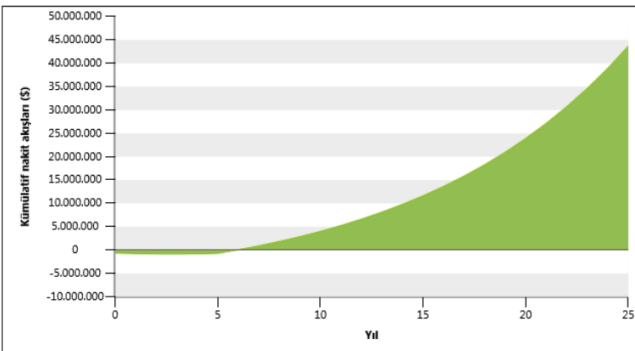
SG salımı, küresel ısınma gibi küresel sorunlar ile sağlık ve çevre sorunlarına neden olmaktadır. Bu bağlamda, SG salımını kontrol altına almak için uluslararası düzeyde protokoller imzalanmış ve standartlar geliştirilmiş; yatırımcıların bu protokollerden gelecekteki çevre ve karbon güvenliği içindeki ek finansal yararlar gibi temel faydaları elde etmesi hedeflenmiştir [26].

Vergi öncesi kar veya zarar ise, bir işletmenin vergi öncesi yaptığı toplam kar veya zarardır. İncelenen durumda, tavsiye edilen FV kurulumunun sadece dört sene geri ödeme süresi ile pozitif nakit akışına ulaştığı ve öngörülen 25 yıllık proje ömrü devamında da kâr durumunu devam ettirdiği hesaplanmıştır.



Şekil 6: Yıllık vergi öncesi kar ve zarar.

Analize ait yıllık vergi öncesi kâr ve zarar durumu Şekil 6'da ve yıllık kümülatif nakit akışı Şekil 7'de gösterilmiştir.

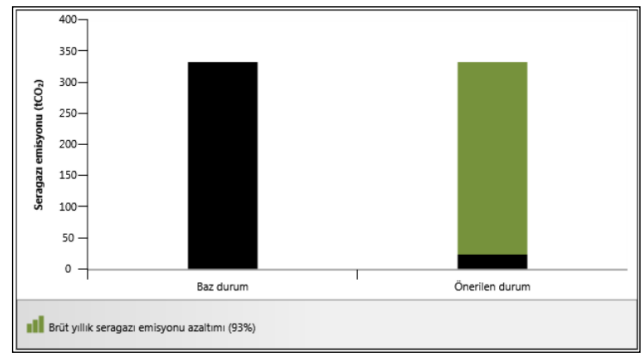


Şekil 7: Yıllık kümülatif nakit akışı.

Bu çalışmada kullanılan RETScreen yazılımı, yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) kullanılmadan sera gazı (SG) salım miktarını tahmin etmek için de gayet kullanışlıdır. Program, SG salım profilinin baz durum (referans durum) ve önerilen senaryo CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O salımını hesaplar.

Enerji üretimi için konvansiyonel güç üretim yöntemleri yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı atmosfere daha az sera gazı salımıyla sonuçlanır. Sera gazı salımındaki azalmayı hesaplamak için, geçiş kayıpları 7.0 ve SG faktörü 0.507 t/MWh CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak dikkate alınmıştır. Çatı tip FV sistemin kurulumu yıllık 310.1 tCO<sub>2</sub> SG salımının azalmasını sağlamaktadır.

Yapılan analizde baz durum için, yıllık SG salımı 334.4 tCO<sub>2</sub> ve önerilen sistemde ise yıllık SG salımı 23.3 tCO<sub>2</sub> olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, toplam SG salımında azalım oranı Şekil 8'te gösterildiği üzere %93 oranında gerçekleşmektedir. Bu tip bir güneş enerjisi güç sisteminin kurulumunun 721.1 ton ham petrol kullanımından tasarruf sağlanacağı anlamına gelmektedir. Bütün bu veriler ışığında, Deniz Harp Okulu yerleşkesi için incelenen çatı tip FV sistemi kurulumunun maliyet etkin ve çevre dostu olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 8: SG salımında sağlanacak yıllık toplam azalma.

## 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, İstanbul'daki Deniz Harp Okulu yerleşkesinin talebini karşılayacak, güneş enerjisini kaynak olarak kullanan FV modüllerden oluşan bir sistemin tekno-ekonomik ve çevresel yönleri incelenmiştir. Bu analizlerde RETScreen temiz enerji proje simülasyon aracı kullanılmıştır ve önerilen çatı tip FV sistemin kurulumu ile yerleşkenin öz tüketiminin bu sistem tarafından karşılanabileceği; yıllık 310.1 tCO<sub>2</sub> SG salımı azaltımının mümkün olacağı ve yaklaşık 721.1 ton ham petrol kullanımından tasarruf sağlanabileceği hesaplanmıştır.

Analiz ile elde edilen sonuçlar "ekonomik ve sosyal gelişmeyi desteklemek için yeterli, güvenilir ve ekonomik enerji kaynaklarını temin etmek, enerji arz güvenliğinin sağlanması, iklim değişikliğiyle mücadelede öncelik vermek, artan enerji taleplerini karşılamak için yeterli yatırımları desteklemek" öncelikleri ile yürürlükte olan Türkiye'nin resmi enerji politikaları ile tam bir uyum göstermektedir.

## 5 Kaynaklar

- [1] Parlak KS. "FV Array Reconfiguration method under partial shading conditions". *Electrical Power and Energy System*, 63, 713-721, 2014.
- [2] Patra S, Kishor N, Mohanty S, Ray P.K. "Power quality assessment in 3-U grid connected FV system with single and dual stage circuits". *Electrical Power and Energy System*, 75, 275-288, 2015.
- [3] Pinto SJ, Panda G. "Performance evaluation of WPT based islanding detection for grid-connected FV systems". *Electrical Power and Energy System*, 78, 537-546, 2014.

- [4] Wu YC, Chen MJ, Huang SH, Tsai MT, Li CH. "Maximum power point tracking on stand-alone solar power system: three-point-weighting method incorporating mid-point tracking". *Electrical Power and Energy System*, 52, 14-24, 2014.
- [5] Sharma V, Chandel SS. "Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India". *Energy*, 55, 476-485, 2013.
- [6] Mondol JD, Yohanis Y, Smyth M, Norton B. "Long term performance analysis of a grid-connected photovoltaic system in Northern Ireland". *Energy Conversion and Management*, 47(18), 2925-2947, 2006.
- [7] Tarigan E, Kartikasari FD. "Techno-economic simulation of a grid-connected FV system design as specifically applied to residential in Surabaya, Indonesia". *Energy Procedia*, 65, 90-99, 2015.
- [8] Pundir KSS, Varshney N, Singh GK. "Comparative study of performance of grid connected solar photovoltaic power system in IIT Roorkee Campus". In *Paper of International Conference on Innovative Trends in Science, Engineering and Management*, (1) 22-431, 2016.
- [9] Kato K, Murata A, Sakuta K. "An evaluation on the life cycle of photovoltaic energy system considering production energy of off-grade silicon". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 47(1-4), 95-100, 1997.
- [10] Kannan R, Leong KC, Osman R, Ho HK, Tso CP. "Life cycle assessment study of solar FV systems: an example of a 2.7 kWp distributed solar FV system in Singapore". *Solar Energy*, 80(5), 555-563, 2006.
- [11] Muneer T, Younes S, Lambert N, Kubie J. "Life cycle assessment of a medium-sized photovoltaic facility at a high latitude location". *Journal of Power and Energy*, 220(6), 517-524, 2006.
- [12] Hondo H. "Life cycle SG emission analysis of power generation systems: japanese case". *Energy*, 30(11-12), 2042-2056, 2005.
- [13] Jungbluth N, Bauer C, Dones R, Frischknecht R. "life cycle assessment for emerging technologies: a case studies for photovoltaic and wind power". *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(1), 24-34, 2005.
- [14] Jungbluth N. "Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the swissecoinvent database". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13(5), 429-446, 2005.
- [15] Kaltschmitt M, Streicher W, Wiese A. *Renewable energy: Technology, Economics and Environment*. Berlin, Germany, Heidelberg, Springer Verlag, 2007.
- [16] Messenger RA, Ventre J. *Photovoltaic Systems Engineering*. 2<sup>nd</sup> ed. Washington DC, USA, CRC Press, 2003.
- [17] German Energy Society. *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers*. 2<sup>nd</sup> ed. London, UK, CRC Press, 2008.
- [18] Kick C. "How is 100% Renewable Energy Possible for Turkey by 2020?". Global Energy Network Institute; (GENI), California 92120, USA, Scientific Report, 20, 2011.
- [19] Ozake HB. "Using Solar Energy Sources to Generate Electricity in Turkey. In:". *European Energy and Natural Resources*, 2013.
- [20] Bagher AM, Vahid MMA, Mohsen M. "Types of solar cells and application". *American Journal of Optics and Photonics*, 3(5), 94-113, 2015.
- [21] Radhey SM, Rathore JS. "Shivani J. "Grid connected roof top solar power generation: a review". *International Journal of Engineering Development and Research*, 3(1), 325-330, 2014.
- [22] Kanchikere J, Kumar KK. "Estimation of cost analysis for 5 kW grid connected solar roof top power plant: a case study". *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(4), 4505-4507, 2016.
- [23] Bhoje H, Sharma G. "An analysis of one mw photovoltaic solar power plant design". *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(1), 6969-6973, 2014.
- [24] Clean Energy Decision Support Centre. *Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering and Cases Textbook*. Third Edition. Canada, 2005.
- [25] Lee KH, Lee DW, Baek NC, Kwon HM, Lee CJ. "Preliminary determination of optimal size for renewable energy resources in buildings using RETScreen". *Energy*, 47, 83-96, 2012.
- [26] RETScreen International. "Renewable Energy Project Analysis Software". <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465> (13.04.2019).