

Yenilenebilir Enerji Difüzyon Patikası ve Bilgi Difüzyonu Temelinde Sosyoekonomik Etkileşimler: Türkiye’de Fotovoltaik Sistem¹

Özlem FİKİRLİ (<https://orcid.org/0000-0002-4003-7276>), Bartın University, Türkiye;
ozlem_fikirli@hotmail.com

Hasan ŞAHİN (<https://orcid.org/0000-0001-5922-068X>), Ankara University, Türkiye; hasansahin68@gmail.com

Diffusion Pathways of Renewable Energy and Socioeconomic Interactions Based on Knowledge Diffusion: Photovoltaic Systems in Türkiye²

Abstract

This study investigates the diffusion process of photovoltaic (PV) systems and the role of social interactions that facilitate knowledge diffusion in Türkiye. Policy changes and the diffusion process under different scenarios are examined through a hybrid model that consists of econometric and agent-based modelling. According to the findings, the adoption of PV systems by interacting households has a positive influence on the adoption of these systems by other households. Policies such as reducing payback periods would enhance renewable energy production. Yet, a mandatory transition to PV systems may be necessary to increase the share of renewable energy in total energy.

Keywords : Photovoltaic Systems, Renewable Energy, Knowledge Economy, Simulation Modelling.

JEL Classification Codes : O13, O33, Q28, C63.

Öz

Bu çalışmanın amacı Türkiye’de fotovoltaik (PV) sistem difüzyon sürecinin ve bu süreçte bilgi difüzyonunu sağlayan sosyal etkileşimlerin rolünün araştırılmasıdır. Çalışmada politika değişiklikleri ve farklı senaryolar altında difüzyon süreci ekonometrik modelleme ile ajan bazlı modelleme kombinasyonundan oluşan hibrit bir modelle incelenmektedir. Elde edilen bulgulara göre etkileşim içerisinde bulunan hanelerin PV sisteme geçişi, diğer hanelerin adaptasyonunu pozitif yönde etkilemektedir. Geri ödeme sürelerinin azaltılması gibi politikalar yenilenebilir enerji üretimini artırsa da yenilenebilir enerjinin toplam enerji içerisindeki payının artırılması için zorunlu PV sisteme geçiş uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Anahtar Sözcükler : Fotovoltaik Sistem, Yenilenebilir Enerji, Bilgi Ekonomisi, Simülasyon Modelleme.

¹ Bu çalışma Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İktisat Anabilim Dalında hazırlanan “Sürdürülebilir büyüme üzerine üç makale” başlıklı doktora tezinden üretilmiştir. Dergi editör kurulu ve hakemlere katkıları için teşekkür ederiz.

² This study is derived from the doctoral dissertation "Three Essays on Sustainable Growth" prepared in the Department of Economics at the Institute of Social Sciences, Ankara University. We thank the journal's editorial board and reviewers for their contributions.

1. Giriş

Avrupa Yeşil Mutabakatı ve pandemi süreci döngüsel ekonomilere yapılan vurguyu artırmaktadır. Mutabakat çerçevesinde oluşacak yeni iş çevrimlerine adaptasyon için ülkeler farklı politikalar geliştirmektedir. Bu dönüşüm sürecinde ülkeler kendi iç dinamiklerine göre stratejiler geliştirirler de yenilenebilir enerji politikalarına verilen önemin arttığı açıkça görülmektedir (Kuzmin et al., 2024). Diğer yandan piyasalardaki dijital dönüşüm enerji sektörünü de yapısal olarak değiştirirken, performans artışlarından maliyetin azalmasına kadar pek çok avantaj sunarak (Olabi et al., 2023) yenilenebilir enerji kaynaklarının ileride daha cazip bir alternatif olmasını vaat etmektedir (Nazari & Musilek, 2023).

Türkiye, 2023 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi içerisindeki payını %30’a çıkarmayı hedeflemekteydi (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2010: 16). Bu hedef doğrultusunda 29/12/2010 tarihinde 6094 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun uygulamaya konulmuştur. Türkiye bulunduğu coğrafik konum sebebiyle pek çok Avrupa ülkesinin üzerinde güneşlenme süresi ve güneşlenme şiddetine sahip olduğu için güneş enerjisinde avantaja sahiptir. 6094 sayılı kanunda yer alan sabit fiyat alım politikalarıyla birlikte 2011-2017 yıllarında lisanslı ve lisanssız kurulu güneş enerjisi kapasitesi önemli ölçüde artırılmıştır. Bu politikalar sayesinde Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı’nda 5 GW olarak belirlenen 2023 yılı hedefine (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2014: 22) 2018 yılında ulaşılmıştır (Owid, 2021). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın 2019-2023 yılları stratejik planında 2023 yılı yeni güneş enerjisi hedefi ise 10 GW olarak belirlenmiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019: 76).

Türkiye’de önemli miktarda kullanılabilir çatı alanı olmasına rağmen uygulanan sabit fiyat alım politikaları, çatı sistemlerine geçişi istenilen seviyelere çıkarmaya yetmemiştir. Bu sebeple 2018 yılı itibarıyla ‘çatı mevzuatı’ olarak bilinen yeni bir mevzuat uygulamaya konulurken, 2019 yılında aylık mahsuplaşma düzenlemesi yapılmıştır. Türkiye’de PV sistemin hanehalkı için getirisi 2018 yılına kadar sadece kullanılan elektrikten, mahsuplaşma politikasıyla kullanılmayan elektrikten gelir elde etmenin önü açılmıştır. Bu mevzuatla birlikte çatı alanlarının güneş enerjisi üretimi için kullanımının artırılması planlanmaktadır. Yapılan düzenlemeyle AVM, hastane, eğitim kurumları gibi çatı alanı fazla olan konutların yüksek güçte güneş enerjisi üretiminin önü açılmaktadır. Daha önce uygulanan sabit fiyat alım tarifeleri 13,3 sent iken, yeni mevzuatla birlikte birim elektrik fiyatına düşürülmüştür. Dolayısıyla uygulamaya konulan yeni mevzuatın, kısıtlı üretim kapasitesi olan hanehalkı üzerindeki etkileri tartışılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı Türkiye’de PV sistem difüzyon sürecinin ve bu süreçte bilgi difüzyonunu sağlayan sosyal etkileşimlerin rolünün araştırılmasıdır. PV sistem, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemleri nitelerken, PV sistem difüzyonu bu sistemlerin yayılımı anlamına gelmektedir. Çalışmada ekonometrik modelleme ile ajan bazlı modelleme kombinasyonundan oluşan hibrit bir model kullanılmaktadır. Hibrit model ise iki veya daha fazla modelin veya tekniğin bir arada kullanıldığı modelleri belirtmektedir.

Çalışma kapsamında uygulanan politika değişikliklerinin etkileri araştırılırken, farklı senaryolar altında difüzyon sürecinin nasıl seyredeceği incelenmektedir.

Türkiye’de PV sistemi araştıran kısıtlı çalışma (Cebeci, 2017) içerisinde çok az bir bölümü konutlarda PV sisteme odaklanmaktadır (Dinçer, 2011; Güngül vd., 2018; Flora et al., 2019; Acar vd., 2020; Duman & Güler, 2020). Konutlarda PV sistemi araştıran çalışmaların ise temel araştırma sorusu PV sistem yatırım kararının ekonomik olarak değerlendirilmesidir. Bu çalışmalarda Türkiye’de konutlarda PV sistem için kesit değerlendirmeler yapılmıştır. Bildiğimiz kadarıyla Türkiye’de konutlarda PV sistem difüzyonunu olası senaryolar altında araştırarak kamu politikalarını değerlendiren bir çalışma bulunmamaktadır.

Konutlarda PV sistem difüzyonunun ekonometrik tahmin ve ajan bazlı modellemeyen oluşan hibrit bir model ile araştırılması çalışmanın ilk özgün değerini oluşturmaktadır. Oluşturulan hibrit modelle literatüre yöntemsel olarak katkı sağlanmaktadır. Çalışmanın ikinci ve temel özgün değeri ise Türkiye’de konutlarda PV sistem difüzyon patikasının ortaya konmasıdır. Türkiye’de yıllar itibarıyla PV sistem adaptasyon oranlarının belirlenmesi ve uygulanan kamu politikalarının etkisinin ortaya konması gerek döngüsel ekonomiler kapsamında politik değerlendirmelerin yapılabilmesi gerekse belirlenen kurulu kapasite hedeflerine ulaşılabilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Çalışmanın üçüncü ve son özgün değeri ise Türkiye’de uygulanan kamu politikalarındaki değişimin PV sistem difüzyon patikasında yarattığı etkinin ortaya konmasıdır.

Çalışmanın ikinci kısmında yenilenebilir enerji difüzyon sürecini belirleyen unsurlar ve bu süreçte sosyal etkileşimlerin rolüne ilişkin bilgi verilmektedir. Çalışmanın üçüncü kısmında ajan bazlı model sunulmaktadır. Çalışmanın dördüncü ve beşinci kısımlarında sırasıyla logit model ve simülasyona yer verilirken, altıncı kısmında simülasyon değerlendirmesi yapılmaktadır. Çalışmanın yedinci ve son kısmında ise sonuç bölümü yer almaktadır.

2. Literatür

2023 yılında Dünya’daki elektrik üretiminin yaklaşık %30’u yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmıştır (Owida, 2024). Dünya’da toplam yenilenebilir enerji kapasitesi 2023 yılında 3864 GW’tır ve bu kapasitenin 1418 GW’ı güneş enerjisidir (IRENA, 2024). Artan güneş enerjisi kapasitesinin PV sistem maliyetlerini azaltması böylelikle güneş enerjisi kapasitesindeki ivmenin artması beklenmektedir. Dahası döngüsel ekonomi vurgusuyla birlikte tüketicilerin kendi ihtiyaç duydukları enerjiyi üretmelerini hedefleyen politikalara verilen önem artmıştır. Bu gelişmeler ışığında konutlarda PV sistem difüzyonunu araştıran çalışma sayısı da artmıştır (Boumaiza et al., 2018; Pearce & Slade, 2018; Stavrakas et al., 2019).

İnovasyon difüzyonu ajanlar arası etkileşimler ve etkileşimler neticesinde bilginin ajanlar arasında difüzyonu temelinde ortaya çıkar (Garcia & Jager, 2011: 148). Ajanlar arası etkileşimleri temel alan bir yöntem olarak ajan bazlı modelleme, inovasyon difüzyon sürecinin doğasına en uygun modeller arasında yer alır. Bilgisayar teknolojilerinde ortaya çıkan gelişmelerle birlikte özellikle son yıllarda ajan bazlı modelleme çalışmalarına ilgi artmıştır (Macal & North, 2010).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde enerji alanında da çok sayıda ajan bazlı modelleme çalışması bulunmaktadır (Xu et al., 2020; Karimi & Vaez-Zadeh, 2021; Fouladvand et al., 2022). Bu çalışmaların bazılarında enerji piyasası (Ma & Nakamori, 2009; Chappin & Dijkema, 2010) ve piyasadaki yeni ürünlerin özellikle de bir fenomen olarak elektrikli araçların difüzyonu (Eppstein et al., 2011; Shafiei et al., 2012; Tran, 2012; McCoy & Lyons, 2014; Plötz et al., 2014; Huang et al., 2021) araştırılmıştır. Bazı çalışmalarda ise yenilenebilir enerji başlığı altında konutlarda PV sistem difüzyonu incelenmiştir (Zhao et al., 2011; Iachini et al., 2015; Palmer et al., 2015; Rai & Robinson, 2015; Pearce & Slade, 2018; Stavarakas et al., 2019; Ramshani et al., 2020; Peralta et al., 2022).

Konutlarda PV sistem difüzyonunu araştıran ajan bazlı modelleme çalışmalarında hanelerin özellikleri ve tutumlarının adaptasyon kararı üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Ekonometrik yöntemlere dayalı çalışmalarda hane temsilcisinin cinsiyeti, yaşı ve eğitimi gibi farklı hane özellikleri dikkate alınırken (Ameli & Brandt, 2015; Rahut et al., 2017; Bashiri & Alizadeh, 2018), ajan bazlı modelleme çalışmaları gelir etkisi üzerinde yoğunlaşmıştır. Literatürde gelir ve yenilenebilir enerji adaptasyonu arasında pozitif ilişki olduğunu savunan çalışmaların (Kwan, 2012: 337; Dharshing, 2017: 121; Tian & Chang, 2020; Menyeh, 2021) yanı sıra gelirin etkisinin bulunmadığını (Korcaj et al., 2015: 411) veya negatif etkisinin bulunduğunu gösteren çalışmalar (Bashiri & Alizadeh, 2018: 3137; Van der Kam et al., 2018: 76; Best & Chareunsky, 2022; Mahn et al., 2024) da yer almaktadır.

Türkiye’de konutlarda PV sistemi araştıran çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır (Dinçer, 2011; Bhattacharjee et al., 2018; Güngül vd., 2018; Flora et al., 2019; Acar vd., 2020; Duman & Güler, 2020). Bu çalışmalarda ise PV sistemin finansmanı, ekonomik getirisi veya bu ekonomik getirinin bir ölçüsü olan geri ödeme süresi üzerinde durulmuştur. Çalışmaların önemli bir bölümünde anlık kesit görüntü değerlendirmesi yapılmış, olası senaryolar altında geleceğe ilişkin tahminler belirlenmemiştir (Dinçer, 2011; Güngül vd., 2018). Bildiğimiz kadarıyla literatürdeki çalışmalarda konutlarda PV sistem difüzyonu ekonomik etkiler dışında incelenmemiştir. Türkiye’de konutlarda PV sistemi araştıran çalışmalar da Türkiye’nin önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur (Bhattacharjee et al., 2018; Acar vd., 2020). Bununla birlikte hanehalkının PV sisteme geçişinde ek teşvik, kredilendirme gibi PV sistemin ekonomik getirisini artıracak başka bir deyişle yatırımın geri ödeme süresini düşürecek politikaların önemine vurgu yapılmıştır (Flora et al., 2019; Acar vd., 2020; Duman & Güler, 2020). Bu potansiyelin hayata geçirilebilmesi için politika değerlendirmelerinin yapılmamış olması önemli bir eksiklik oluşturmaktadır.

PV sistem adaptasyonunda öne çıkan davranış ve tutumların içerisinde en önemli unsurlardan birisi çevresel yaklaşımlardır. Çevreye karşı duyarlılık ve çevresel problemlerin farkındalığı arttıkça PV sistem adaptasyon olasılığı da artar (Chen, 2014; Korcaj et al., 2015: 413). Ajan bazlı modelleme çalışmalarında hanelerin çevreye karşı tutumlarının bir ölçüsü olarak çevresel fayda tanımlanmıştır (Iachini et al., 2015: 143-144; Palmer et al., 2015: 112).

Tutum ve davranışları belirleyen temel unsurlardan birisi sosyal ağlar içerisinde hangi sosyal statüde yer alındığı ve ağ içerisindeki aktörlerin birbirleri üzerindeki etkisidir. Dolayısıyla sosyal yapı ve sosyal etkileşimler PV sistem adaptasyonda belirleyici role sahip diğer bir unsurdur (Pearce & Slade, 2018: 101; Stavrakas et al., 2019: 7). Sosyal etkileşimler aracılığıyla ortaya çıkan bilgi difüzyonu sayesinde PV sisteme ilişkin farkındalık ve bilgi artar. Bilgi ve farkındalığın artması ise PV sistem difüzyonunu hızlandırır (Ameli & Brandt, 2015: 10; Bashiri & Alizadeh, 2018: 3137).

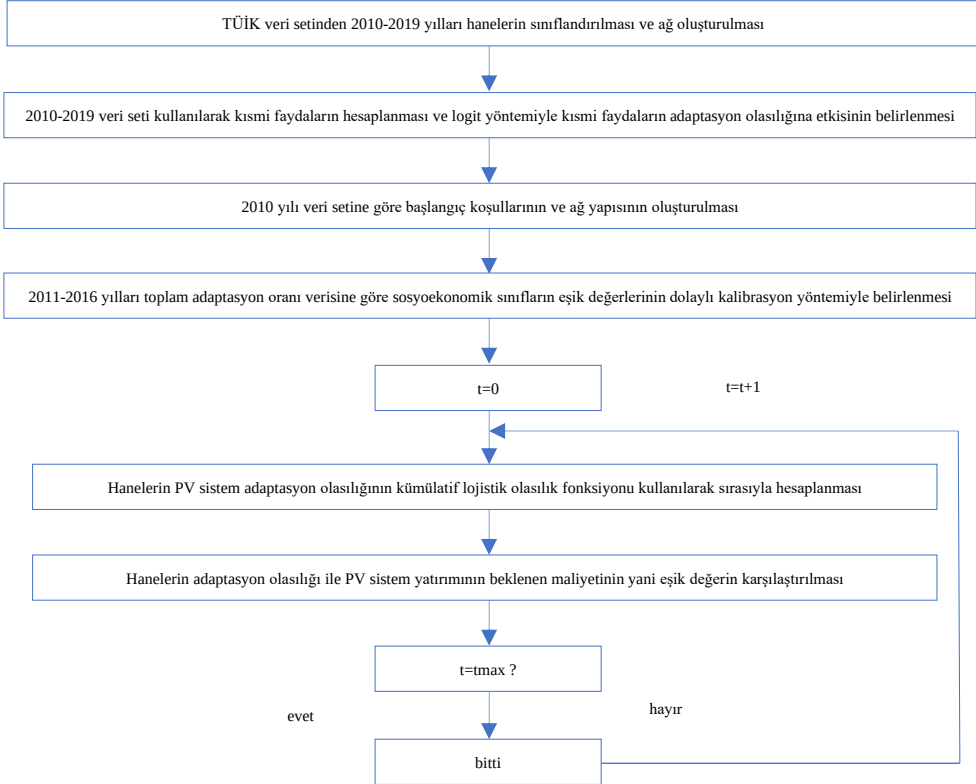
Çalışmaların yoğunlaştığı araştırma konularından bir diğeri PV sistem geri ödeme süresidir (Sun et al., 2013; Muhammad-Sukki et al., 2014; Sow et al., 2019; Duman & Güler, 2020). Yenilenebilir enerji politikalarının temel amacı geri ödeme sürelerini azaltarak yenilenebilir enerji adaptasyonunu artırmaktır. Ajan bazlı modelleme çalışmalarında ise geri ödeme sürelerine göre belirlenen PV sistemin ekonomik faydası araştırılmıştır. Literatürde yer alan çalışmaların tamamı geri ödeme süreleri ile yenilenebilir enerji adaptasyonu arasında ters yönlü bir ilişkinin var olduğu üzerinde uzlaşmıştır.

3. Model

Çalışmada hanelerin adaptasyon kararı altı aşamadan meydana gelen ekonometrik yöntem ile ajan bazlı modellemenin kombinasyonundan oluşan hibrit bir model ile araştırılmaktadır. Modelin aşamaları Şekil 1’de gösterilmektedir.

Birinci aşamada 2010-2019 yılları için hanelerin sosyoekonomik sınıflandırılması yapılarak, ağ yapısı ve her hane için komşuluk bilgisi oluşturulmaktadır. Bu bilgiler kullanılarak, hanelerin PV adaptasyonundan beklenen kısmi faydaları hesaplanmaktadır. İkinci aşamada logit modeli kullanılarak, kısmi faydaların adaptasyon kararı üzerindeki etkisi belirlenmektedir. Üçüncü aşamada 2010 yılı veri seti kullanılarak ağ bilgisi ve başlangıç koşulları oluşturulmaktadır. Dördüncü aşamada dolaylı kalibrasyon yöntemi (Fagiolo et al., 2007: 208-210) kullanılarak eşik değerler belirlenmektedir. Beşinci aşamada hanelerin adaptasyon olasılığı kümülatif lojistik olasılık fonksiyonu kullanılarak hesaplanmaktadır. Altıncı ve son aşamada ise haneler sıralı olarak adaptasyon kararını değerlendirmektedirler. Bu aşamada hanelerin adaptasyon olasılığı ile PV sistem yatırımının beklenen maliyeti olarak tanımlanan eşik değer karşılaştırılmaktadır. Adaptasyon olasılığı, eşik değere eşit veya büyük olan haneler PV sistem yatırımı yapmaya karar vermektedirler.

Şekil: 1
Hibrit Model

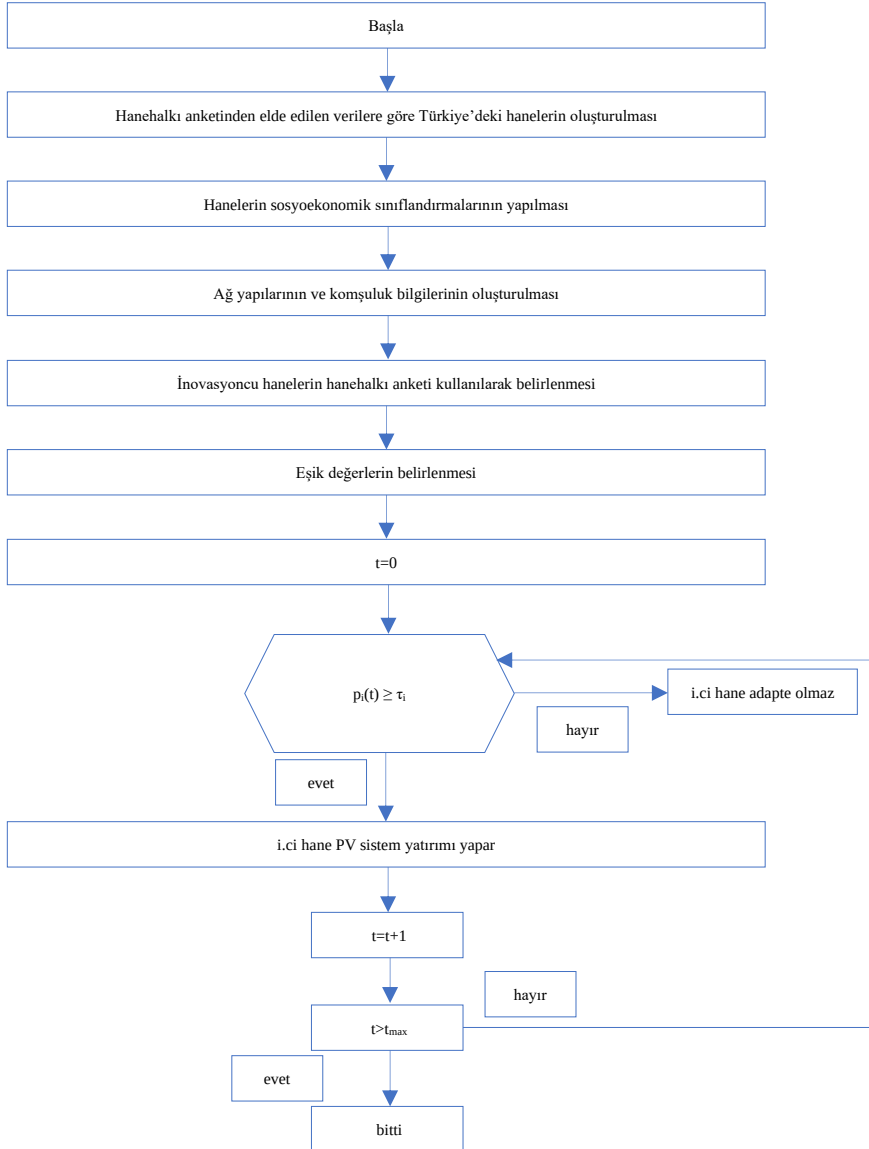


3.1. Ajanların Karar Mekanizması

Ajan bazlı modelleme, heterojen ajanların, ajanlar ve ajanlarla çevre arasındaki etkileşimlerin bulunduğu kompleks adaptif sistemlerin incelenmesine imkân veren bir simülasyon tekniğidir (Macal & North, 2010). Ajan bazlı modelleme özellikle teknoloji difüzyonu gibi kompleks sistemlerin kendiliğinden düzenlendiği durumlarda iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemeler ajan bazlı modellemeye ilgiyi artırmış ve araştırmalarda kullanımı yaygınlaştırmıştır.

Güneş enerjisine adaptasyon söz konusu olduğunda fotovoltaik (PV) sistem yatırımından tüm hane etkilendiği ve tüm hanenin kullanımına yönelik bir ürün olarak karşımıza çıktığı için bu çalışmada ajanlar haneleri temsil eder.

Şekil: 2
Karar Mekanizması Akış Diyagramı



Hanelerin PV sistem adaptasyon kararı x ile gösterilen iki değerli bir değişken ile temsil edilir. Bu değişken hane PV sistemine yatırım yapmaya karar veriyse 1, vermediyse 0 değerini alır.

$$x_i(t+1) = \begin{cases} 1, \text{Denklem 2 (t) anında sağlanıyorsa} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (1)$$

Ajanların adaptasyon kararı Denklem 2’ye göre belirlenir ve temelde fayda maliyet analizine dayanır.

$$p_i(t) \geq \tau_i \quad (2)$$

$p_i(t)$ i ajanının t anında PV sistem adaptasyon olasılığını ve τ_i i ajanının eşik değerini yani yatırımdan beklenen maliyetini temsil eder. Haneler, PV sistem yatırım olasılığının beklenen maliyete eşit veya büyük olduğu durumlarda güneş enerjisine adaptasyon kararı verirler.

Hanelerin karar mekanizmasına ilişkin akış diyagramı Şekil 2’de yer almaktadır. Analizin yapıldığı tüm yıllarda modelde yer alan tüm haneler için bu akış diyagramı sırayla yinelenir.

3.2. Fayda Fonksiyonu

PV sistem yatırımdan beklenen fayda U ile temsil edilmekte ve Denklem 3’te gösterildiği gibi beş bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenler sırasıyla ekonomik fayda, çevresel fayda, gelir faydası, iletişim faydası ve sosyal normlar olarak tanımlanmaktadır (Iachini et al., 2015; Palmer et al., 2015; Pearce & Slade, 2018).

$$U_i(t) = F\{U_{\text{ekonomik},i}(t), U_{\text{çevre},i}(t), U_{\text{gelir},i}(t), U_{\text{iletişim},i}(t), U_{\text{sosyal}}(t)\} \quad (3)$$

Ekonomik fayda, iletişim faydası ve sosyal normlar 0 ile 1 arasında değer alan doğrusal (linear) fayda fonksiyonu olarak ele alınır. Çevresel fayda ve gelir faydası ise teknoloji difüzyon süreçlerinin S-şekilli yapısıyla uyumlu olarak S-şekilli fayda fonksiyonu şeklinde tanımlanır. S-şekilli fayda fonksiyonlarının hem teoride hem de uygulamada kullanımı bulunur (Rogers, 2003; Modis, 2007; Phillips, 2007; Zhao et al., 2011; Iachini et al., 2015; Palmer et al., 2015).

3.2.1. Ekonomik Fayda

PV sistemlerin ekonomik analizinde net bugünkü değer (NBD), kârlılık endeksi, fayda maliyet oranı, iç kârlılık oranı, düzenlenmiş iç kârlılık oranı, geri ödeme süresi, fatura tasarrufları ve indirgenmiş enerji maliyeti gibi farklı değişkenler kullanılır (Drury et al., 2011: 6-11). Çalışmalarda en fazla yer verilen değişkenlerden birisi NBD ve geri ödeme süresidir (Iachini et al., 2015; Palmer et al., 2015 ; Güngül vd., 2018; Flora et al., 2019).

Geri ödeme süresi yatırımdan elde edilen getirinin yatırımın maliyetine eşit olduğu süreyi ifade eder. Çalışmada ekonomik fayda geri ödeme süresi kullanılarak Denklem 4’teki gibi hesaplanır. Denklemde gs geri ödeme süresini temsil ederken, PV sistemin ortalama ekonomik ömrü 20 yıl olduğundan maksimum geri ödeme süresi 21, minimum geri ödeme süresi ise 1 olarak alınır (Iachini et al., 2015: 143; Palmer et al., 2015: 110). Geri ödeme süresi 20 yılın üzerinde hesaplanan haneler için ekonomik fayda sıfır olarak kabul edilir.

$$U_{\text{ekonomik},i}(t) = \frac{\text{maksimum(geri ödeme süresi)} - gs(i)}{\text{maksimum(geri ödeme süresi)} - \text{minimum(geri ödeme süresi)}} \quad (4)$$

$$U_{\text{ekonomik},i}(t) = \frac{21 - gs(i)}{20} \quad (5)$$

Geri ödeme süresi, NBD negatiften pozitifte döndüğü yıl olarak tanımlanır. NBD, yatırımın bugüne indirgenmiş değerini ifade eder. PV sistem maliyetleri azaldıkça, hücre ve panel verimliliği arttıkça NBD artar. NBD sıfıra eşit olduğunda güneş enerjisi üretmenin maliyeti elektrik maliyetine eşit olur ve bu şebeke paritesine ulaşmak olarak adlandırılır (Denholm et al., 2009: 1). Denklem 6’da $I_0(t)$, $R(t)$ ve $i(t)$ sırasıyla PV sistem yatırımının t anındaki maliyeti, yatırımdan beklenen getiriler ve indirgeme oranını temsil eder. İndirgeme oranı ağırlıklı ortalama sermaye maliyeti (Weighted Average Cost of Capital - WACC) yöntemi kullanılarak Denklem 7’deki gibi belirlenir (Cebeci, 2017: 112). Ağırlıklı ortalama sermaye maliyeti, yatırımda kullanılan kaynakların getirileri ilgili kaynağın yatırım içerisindeki oranı ile çarpılarak elde edilir (Farber et al., 2006: 215; Mian & Vélez-Pareja, 2008: 24; Bal, 2009: 223; Güzel & Cingöz, 2016: 39). Denklem 7’de E öz kaynak miktarını, K_E öz kaynak sermaye maliyetini, D yabancı kaynak miktarını yani yatırım için kullanılan kredi miktarını, K_D kredi faiz oranını, T ise vergi oranını temsil eder. K_E , 1 yıl ve üzeri vadeli TL mevduat faiz oranı olarak alınır. K_D ise TL üzerinden tüketici ihtiyaç kredisi faiz oranına eşittir. Öz kaynak miktarının ilk yatırım maliyetine oranı kişi başına ortalama kullanılabilir gelire sahip haneler için %50 olarak kabul edilir (Flora et al., 2019: 10). Diğer haneler için öz kaynak miktarının ilk yatırım maliyetine oranı kişi başına ortalama kullanılabilir gelir ile doğru orantılı olacak şekilde belirlenir.

$$NBD(i, t) = -I_0(t) + \sum_{t=1}^{20} \frac{R(t)}{(1+i(t))^t} \quad (6)$$

$$WACC = (E/I_0) K_E + (D/I_0) K_D (1-T) \quad (7)$$

PV sistem yatırım maliyeti, maksimum pik gücü ($P_{\max}$) ile PV sistem yatırımının kW başına fiyatının (p_{GP}) çarpımından oluşur. $P_{\max}$ Denklem 9 kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem 9’da G , A_{GP} , η_c ve $\eta_{GP}(t)$ sırasıyla normal koşullarda ışıma şiddeti, PV sistemi için kullanılabilir çatı alanı, hücre verimliliği ve yatırım anındaki PV sistem verimliliği olarak adlandırılır. Çalışmada G değeri 1 kW/m^2 (Palmer et al., 2015: 110) ve çekirdek verimliliği %16 (EPIA, 2011: 25) olarak alınır.

Türkiye’de hane başına ortalama kullanılabilir çatı alanı yaklaşık olarak 72 m^2 ’dir (Bhattacharjee vd., 2018:8). Kullanılabilir çatı alanı, PV sistem yatırım maliyetini ve PV

sistemin kurulu gücünü belirleyen temel unsurlardan birisidir. Yaygın kullanıma sahip olan silikon PV sistem için kW başına gerekli çatı alanı ortalama 7-8 m² civarındadır (EPIA, 2011: 25). Çalışmada hanelerin kullanılabilir çatı alanının müstakil konutlarda hanenin konut alanının 1/3’ü, diğer konutlarda ise hanenin konut alanının 1/5’i olduğu kabul edilir. Kullanılabilir çatı alanı değerleri kW başına gerekli alan olan 8’e bölünerek, en yakın tam sayıya yuvarlanır. Bu varsayımlar altında oluşturulan başlangıç veri setine göre hanelerin sahip olduğu çatı alanı ortalama 3,4 kW PV sistem kurulumuna izin verir. Bu değer ise bir hanenin elektrik ihtiyacını karşılayan ortalama bir değer olan 3 kW’a (Dinçer, 2011: 13; Güngül vd., 2018: 140) yakındır.

PV sistem verimliliğinin 2010 yılındaki başlangıç değerinin %13 (EPIA, 2011: 25) olduğu ve her yıl %1,5 verimlilik artışı (Kost et al., 2012; Palmer et al., 2015: 122) olduğu kabul edilir. PV sistem yatırımının kW başına t anındaki fiyatı Denklem 10’a göre hesaplanır. Denklem 10’da $p_{GP}(t_0)$ PV sistem yatırımının kW başına baz alınan yıldaki fiyatını, $TKK(t)$ t anında küresel düzeyde toplam kurulu PV sistem kapasitesini, $TKK(t_0)$ baz yıldaki küresel düzeyde toplam kurulu PV sistem kapasitesini ve b tecrübe parametresini simgeler. Tecrübe parametresi, öğrenme oranından faydalanılarak elde edilir. Öğrenme oranı 2020 yılına kadar %20, 2030 yılına kadar %18 ve 2040 yılına kadar ise %16 olarak alınır (EPIA, 2011: 70).

$$I_o(t) = P_{max}(t) p_{GP}(t) \quad (8)$$

$$P_{max}(t) = G A_{GP} \eta_C \eta_{GP}(t) \quad (9)$$

$$p_{GP}(t) = p_{GP}(t_0) \left(\frac{TKK(t)}{TKK(t_0)} \right)^{-b} \quad (10)$$

$$\ddot{O}O = 1 - 2^{-b} \quad (11)$$

PV sistem yatırımından beklenen ekonomik getiriler, elektrik tasarruflarından elde edilen getiriler ($R_{tasarruf}$), kamu destekleri (R_{kamu}), idari ödemeler (R_{idari}), bakım ve ön yatırım maliyetleri (R_{bakim}) ve amortisman ödeneği olmak üzere beş bileşenden oluşur.

$$R(t) = R_{tasarruf}(t) + R_{kamu}(t) - R_{idari}(t) - R_{bakim}(t) - R_{amortisman}(t) \quad (12)$$

Elektrik tasarruflarından elde edilen getiriler hanelerin ürettikleri elektriğin ne kadarını tükettiklerine başka bir deyişle öz tüketim oranına ve kamu politikalarına göre değişir. Elektrik tasarruflarının hesaplanmasında 2018 yılına kadar Denklem 13 kullanılırken, bu yıldan itibaren Denklem 14 kullanılır. Aşağıdaki Denklemlerde $E_{GP}(t)$, $X_{\ddot{O}ztüketim}$, $\mu_{elek,alıs}$, $\mu_{elek,satıs}$, $\mu_{elek,alıs}$ ve $\mu_{elek,satıs}$ sırasıyla PV sisteminin ürettiği elektrik miktarı, öz tüketim oranı, elektriğin şebekeden satın alınma bedeli, tüketim fazlası elektriğin şebekeye satış bedeli, elektrik satış fiyatı artış oranı ve elektrik alış fiyatı artış oranı olarak tanımlanır. Denklemden yer alan öz tüketim oranı %50 olarak alınır (Flora et al., 2019: 10). 2010-2020 yılları elektrik alış ve satış fiyatları EPDK’nın belirlediği tutarlara eşit olarak belirlenirken¹, sonraki yıllar için denklemlerde yer alan elektrik fiyatı ortalama artış oranına göre hesaplanır. PV sisteminin ürettiği elektrik miktarı ise Denklem 4.15’e göre hesaplanır. Denklemden $E_{güneş}$ güneş ışınım şiddetini ve γ PV sistem aşınımını temsil eder. GEPA

verilerine göre Türkiye’de yıllık güneş ışınım şiddeti 1527 kWh/m²’dir. PV sistem aşınım değeri ise %0,40 olarak alınır (Flora et al., 2019: 10).

$$R_{\text{tasarruf}}(t) = E_{\text{GP}}(t) X_{\text{öztüketim}} \mu_{\text{elek,alış}} (1 + \mu_{\text{elek,alış}})^{t-1} \quad (13)$$

$$R_{\text{tasarruf}}(t) = E_{\text{GP}}(t) [X_{\text{öztüketim}} \mu_{\text{elek,alış}} (1 + \mu_{\text{elek,alış}})^{t-1} + (1 - X_{\text{öztüketim}}) \mu_{\text{elek,satış}} (1 + \mu_{\text{elek,satış}})^{t-1} \quad (14)$$

$$E_{\text{GP}}(t) = E_{\text{güneş}} P_{\text{max}}(t) (1 - \gamma)^{t-1} \quad (15)$$

Türkiye’de 2018 yılına kadar mahsuplaşma yapılmadığı için bu yıla kadar elektrik tasarruflarından elde edilen getiriler sadece öz tüketimden kaynaklanır. 2018 yılında uygulamaya konulan mahsuplaşma düzenlemesiyle birlikte kullanılmayan elektrik miktarı şebekeye satılır. Yapılan düzenlemeye göre kullanılmayan elektrik miktarının şebekeye satış fiyatının şebekeden elektrik alış fiyatına eşit olduğu kabul edilir.

Kamu destekleri PV sistem yatırımlarında uygulanan teşvik ve sübvansiyon politikalarının bir ürünüdür. Kamu desteği Denklem 4.16 kullanılarak hesaplanır. Denklemde $E_{\text{GP}}(t)$, $X_{\text{öztüketim}}$ ve p_{FIT} sırasıyla PV sisteminin ürettiği elektrik miktarı, öz tüketim oranı ve tarife garantili fiyattır. Türkiye’de 2018 yılına kadar uygulanan tarife garantili fiyat (feed-in tariff - FIT) politikası kapsamında hanelerin öz tüketim fazlası elektrik üretimi 13,3 cent/kWh tarife (p_{FIT}) fiyatı üzerinden satın alınır.

$$R_{\text{kamu}}(t) = E_{\text{GP}}(t) (1 - X_{\text{öztüketim}}) p_{\text{FIT}} \quad (16)$$

İdari ödemeler, tedarikçiye şebeke kullanım karşılığında yapılan dağıtım sistemi kullanım bedeli ve yıllık sistem işletim bedelinden oluşur. Üretimi 10 kW’ın altında kalan lisanssız üretim tesislerinden yıllık sistem işletim bedeli alınmadığı için çalışmada idari ücretler dağıtım sistemi kullanım bedeline eşittir. Çalışmada kullanılan dağıtım bedelleri ($\varphi_{\text{dağıtım}}$) EPDK’nın belirlediği dönemlik tarifelerin her yıl için ortalama değerleri alınarak belirlenir. İdari ödemeler ise sisteme verilen net elektrik miktarı üzerinden Denklem 4.17’ye göre hesaplanır.

$$R_{\text{idari}}(t) = E_{\text{GP}}(t) (1 - X_{\text{öztüketim}}) \varphi_{\text{dağıtım}} \quad (17)$$

Bakım ve ön yatırım maliyetleri, ilk yatırım maliyetinin belirli bir oranından oluşur. Çalışmada lisanssız üreticiler için ön yatırım maliyetlerinin başlangıç maliyetlerinin yaklaşık %1,6’sı olduğu kabul edilir (Cebeci, 2017: 107). PV sistem bakım giderlerinin ise başlangıç maliyetlerinin yaklaşık %1’i olduğu kabul edilir. Bakım maliyetlerinin yıllık %2 oranında artış gösterdiği varsayılır (Kost et al., 2012; Palmer et al., 2015: 122).

$$R_{\text{bakım}}(t) = \begin{cases} (\beta_{\text{bakım}} + \beta_{\text{önyatırım}}) I_0, & t = 1 \\ \beta_{\text{bakım}} I_0, & t \neq 1 \end{cases} \quad (18)$$

Amortisman ödeneği, PV sisteminin ekonomik ömrü boyunca güneş paneli başlangıç yatırım maliyetinin eşit olarak dağıtılması ile oluşur. Başka bir ifadeyle ekonomik ömrünün sonunda güneş paneli yatırım değeri sıfır olacak şekilde amortisman ödemesi ayrılır.

$$Ramortisman(t) = I_0(t)/20 \quad (19)$$

3.2.2. Çevresel Fayda

PV sistem yatırım kararlarında en etkili unsurlardan birisi ajanların çevreye karşı tutumlarıdır (Zhai & Williams, 2012: 351; Iachini et al., 2015: 143-144; Bashiri & Alizadeh, 2018: 3133). PV sistem yatırımlarının erken aşamalarında yatırım kararı ekonomik olmasa bile çevresel kaygılarla adaptasyon kararı alındığını gösteren çalışmalar da bulunmaktadır (Van Benthem et al., 2008; Rai & McAndrews, 2012). PV sistem yatırımlarının çevresel faydası panelin sağladığı CO₂ emisyonu azalması ile temsil edilebilir. Çalışmada kolaylık sağlaması için PV sistem yatırımlarının çevresel faydası panelin ürettiği temiz enerji ile orantılı olarak alınır ve sistemin güneş enerjisi üretmek için ihtiyaç duyduğu elektrik miktarı görece çok küçük olduğundan ihmal edilir (Palmer et al., 2015: 112).

Çevresel fayda Denklem 20, 21 ve 22 kullanılarak hesaplanır. Denklemlerde $P_{max}(t_0)$ yatırım yılındaki maksimum pik gücünü, $E_{GP,i}$ PV sisteminin beklenen ömür boyu elektrik üretimini, $E_{GP,toplam}$ ise yatırım esnasında diğer tüm PV sistemlerinin beklenen ömür boyu elektrik üretim ortalamasını ifade eder. Çevresel faydanın bu formda gösterimi, PV sistemden beklenen elektrik üretimi azaldığında hanelerin CO₂ tasarruflarını daha fazla göz önünde bulundurmalarını yansıtır. $E_{GP,toplam}$ bir kırılma noktası oluşturur ve $E_{GP,i}$ bu ortalama değerin altında iken ajanların PV sisteminden elektrik üretmesi pozitif marjinal etki yaratırken, üzerinde olduğu durumlarda PV sisteminden enerji üretmenin marjinal etkisi azalır (Palmer et al., 2015: 112).

$$U_{çevre,i}(t) = \frac{\exp\left(\frac{E_{GP,i}(t) - E_{GP,toplam}(t)}{10000}\right)}{1 + \exp\left(\frac{E_{GP,i}(t) - E_{GP,toplam}(t)}{10000}\right)} \quad (20)$$

$$E_{GP,i}(t) = \sum_{t=1}^{20} E_{güneş} P_{max}(t_0) (1 - \gamma)^{t-1} \quad (21)$$

$$E_{GP,toplam}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i(t) E_{GP,i}}{\sum_{i=1}^N x_i(t)} \quad (22)$$

3.2.3. Gelir Faydası

Gelir faydası, hanehalkının yıllık kullanılabilir gelirinin adaptasyon kararı üzerindeki etkisini tanımlar. Denklem 23’te yer alan w_i i.ci ajanın her bir hane üyesine düşen yıllık kullanılabilir gelirini, w ise toplumda her bir hane üyesine düşen yıllık ortalama kullanılabilir geliri ifade eder (Palmer et al., 2015). Hane başına yıllık kullanılabilir gelir ve hane üyesi başına yıllık ortalama kullanılabilir gelir aritmetik ortalamalar alınarak hesaplanır. N ve h_i sırasıyla toplumdaki hane sayısını ve i. ajanın hanehalkı sayısını temsil eder.

$$U_{gelir,i}(t) = \frac{\exp\left(\frac{w_i - w}{10000}\right)}{1 + \exp\left(\frac{w_i - w}{10000}\right)} \quad (23)$$

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^{h_i} w_j}{h_i} \quad (24)$$

$$w = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{N} \quad (25)$$

3.2.4. İletişim Faydası

Çalışmada ajanlar arası etkileşimler iletişim faydası ve sosyal normlar olmak üzere iki farklı şekilde temsil edilir. İletişim faydası iki veya daha fazla ajan arasında etkileşim olduğu durumda ortaya çıkar (Zhao et al., 2011: 2195; Iachini et al., 2015: 144; Palmer et al., 2015: 114; Pearce & Slade, 2018: 101). İletişim faydası, ajanların sahip olduğu bilgi ve tecrübenin etkileşime girdikleri ajana yayılması sonucunda ortaya çıkar. Başka bir ifadeyle ajanlar diğer ajanlar ile etkileşime girdiklerinde onların tecrübe ve bilgilerini öğrenerek elde ettikleri bilgiden de fayda sağlarlar. Aynı sosyoekonomik sınıftan ajanlar arasındaki iletişim etkisi daha güçlüdür (Rogers, 2003: 5).

İletişim faydası ajanların etkileşim içerisinde oldukları ajanlar ile ilişkilerinden sağladıkları fayda düzeyini temsil eder ve ajanların PV sistemine adaptasyon sağlamış olan komşularının oranı ile hesaplanır (McCoy & Lyons, 2014). Denklem 26’da $A_{i,j}$ simgesi ile gösterilen komşuluk matrisi ajanların iletişim kurdukları ajanları başka bir deyişle komşularını, k_i ise i .ci ajanın komşu sayısını tanımlar.

$$U_{\text{iletişim},i}(t) = \frac{\sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(t)}{k_i} \quad (26)$$

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1, & i \text{ ajanı } j \text{ ajanı üzerinde etkiye sahipse} \\ 0, & i \text{ ajanının } j \text{ ajanı üzerinde etkisi yoksa} \end{cases} \quad (27)$$

3.2.5. Sosyal Normlar

Sosyal normlar, toplumun inovasyona karşı yaklaşımının bir ölçüsüdür. Toplumun yenilenebilir enerjiye ilişkin tutumunu göstermenin yanı sıra toplumun kültürünü de yansıtan bir olgu olarak karşımıza çıkar. Aynı zamanda tıpkı iletişim faydasında olduğu gibi, ajanların toplumda yer alan bilgiyi toplum ile etkileşimleri sayesinde almaları ve bu bilgiden fayda sağlamaları sonucunda ortaya çıkar. Sosyal normlar, tüm nüfus içerisinde PV sisteme yatırım yapan hane oranına eşittir ve aşağıdaki denklemle hesaplanır (McCoy & Lyons, 2014: 7).

$$U_{\text{sosyal}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) \quad (28)$$

3.3. Veri Seti

Hanehalkı tüketim harcamaları deseni ve gelir dağılımını araştıran anketlerden ilki 1994 yılında hanehalkı gelir ve tüketim harcamaları anketi başlığı altında ortaya çıkar. Bu yıldan sonra ise 2002 yılından itibaren düzenli olarak her yıl gerçekleştirilen hanehalkı bütçe anketi uygulanmıştır. Çalışmada hanehalkı bütçe araştırması verileri TÜİK tarafından izin alınarak kullanılmaktadır (TÜİK, 2020). Kamu politikalarındaki önemli değişiklikler göz önünde bulundurularak çalışmada 2010-2019 yılları arasındaki veri setinden yararlanılır.

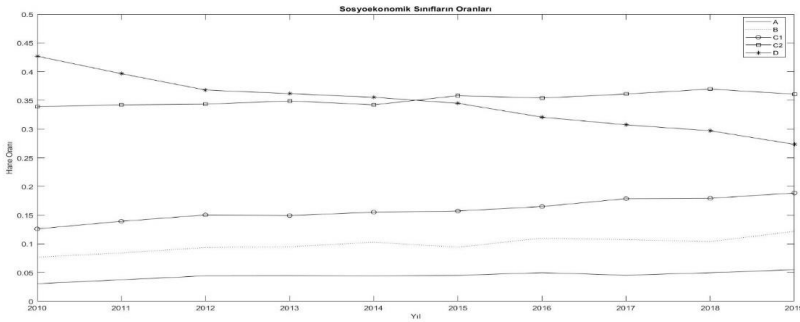
PV sistem yatırımlarını belirleyen en önemli unsurlardan birisi PV sistem maliyetlerini belirleyen sistemin kW başına fiyatıdır. PV sistem kW başına fiyatı baz alınan yıldaki fiyat ve toplam kurulu kapasiteye göre belirlenir. PV sistemin 2010 yılı kW başına vergiler hariç fiyatı ortalama bir değer olarak 2.5 € kabul edilir (EPIA, 2011; Dinçer, 2011). Küresel düzeyde toplam kurulu PV sistem kapasitesi, 2010-2019 yılları için Owid (our world in data) gerçek verilerine ve 2020-2024 yılları için simülasyon tahminlerine (ESP, 2020) göre alınır. 2025 yılından itibaren toplam kurulu PV sistem kapasitesi ortalama büyümeler dikkate alınarak hesaplanır.

Çalışmada kullanılan tüm değişkenler EK 1’de yer almaktadır. EK 1’de değişkenlerin simgeleri ve nasıl belirlendiği kısaca özetlenmektedir.

3.4. Sosyoekonomik Sınıflandırma

Türkiye’de Veri Araştırma, Televizyon İzleme Araştırmaları Kurulu, Türkiye Araştırmacılar Derneği, MAYAK Araştırma gibi kuruluşlar ve araştırmacılar (Kalaycıoğlu vd., 2010) tarafından gerçekleştirilen bazı sosyoekonomik sınıflandırmalar bulunmaktadır. Türkiye’ye özgü sosyoekonomik sınıflandırma endeksleri incelendiğinde çoğu endekse göre istatistiki olarak daha güvenli olması ve neredeyse tamamına göre daha güncel olması sebepleriyle çalışmada Kalaycıoğlu vd. (2010)’nin sınıflandırması temel alınmıştır.

Şekil: 3
Sosyoekonomik Sınıfların Oranları

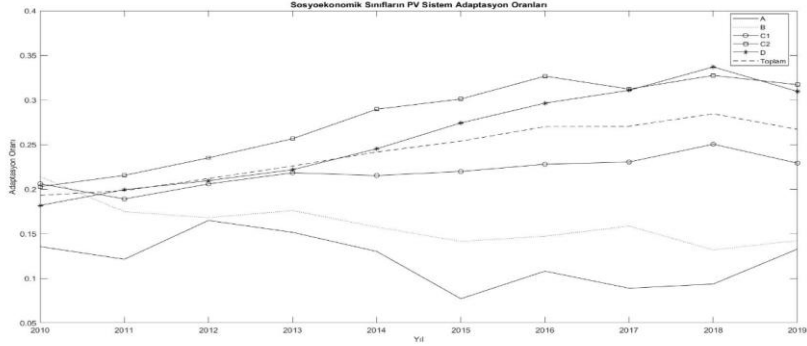


Sosyoekonomik sınıflandırmanın belirlenmesinde hane üyelerinin eğitim düzeyi, kişi başına düşen ortalama hane geliri, hane iş gücünün meslek statüsü, hanenin sahip olduğu mülkler başka ifadeyle hanenin servet bilgisi ve hanenin sahip olduğu eşya bilgisi kullanılmaktadır (Kalaycıoğlu vd., 2010). Bu sınıflandırmaya göre Türkiye’de en yüksek sınıf grubu A olmak üzere, A, B, C1, C2 ve D olarak isimlendirilen beş farklı grup bulunur.

Şekil 3’e göre A, B, C1 ve C2 gruplarının nüfus içerisindeki oranı zamanla düşük bir ivmeyle artarken, D grubunun oranı azalmıştır. Şekil 4’e göre ise C1, C2 ve D gruplarında

PV sistem yatırımları zamanla artmıştır ve toplam adaptasyon oranının yükselmesinde bu grupların adaptasyon kararı etkilidir.

Şekil: 4
Sosyoekonomik Sınıfların Adaptasyon Oranları



3.5. Ağ Yapısı

Küçük dünya ağları gerçek dünya ile daha uyumludur ve teknoloji difüzyon süreçlerini daha iyi yansıtır (Watts & Strogatz, 1998). Çalışmada yer alan ağ yapısının küçük dünya ağları özelliklerini taşıdığı kabul edilir (Palmer et al., 2015; Rai & Robinson, 2015; Stavarakas et al., 2019). Oluşturulan ağ için dışsal komşuluk oranının bir ölçüsü olan bağlanma olasılığı (β) değeri 0.1 ve komşu sayısının ölçüsü olan K değeri 4 olarak alınır (McCoy & Lyons, 2014). Ağ için başlangıç koşulları 2010 yılı veri setine göre oluşturulmuştur.

4. Tahminler

4.1. PV Sistem Adaptasyon Olasılığının Hesaplanması

Hanelerin inovasyona karşı tutumunu gösteren herhangi bir ölçüt mevcut anketlerde yer almamaktadır. İnovasyona karşı tutumu belirten bir değişken olarak hanelerin PV sistem yatırımı yapma olasılığı, gözlenebilir bağımsız değişkenler kullanılarak ikili adaptasyon modeli ile belirlenir (Schreinemachers et al., 2009: 521). İnovasyon difüzyon eğrilerinin S-şekilli yapısını iyi bir şekilde tanımladığı için lojistik fonksiyon kullanılır (Meade & Islam, 2006; Plötz et al., 2014). Kümülatif lojistik olasılık fonksiyonunda p_i adaptasyon olasılığını gösterirken, α , ξ_j ve U_j , sırasıyla sabiti, katsayıları ve bağımsız değişkenleri temsil eder.

$$p_i = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum_{j=1}^J \xi_j U_j)}} \quad (29)$$

Çalışmada yer alan bağımsız değişkenler, ekonomik fayda, çevre faydası, gelir faydası ve iletişim faydası olmak üzere fayda bileşenlerini temsil eder. Logit model

kullanılarak fayda bileşenlerinin PV sistem adaptasyon kararı üzerindeki etkisi araştırılır başka bir ifadeyle kümülatif lojistik olasılık fonksiyonundaki katsayılar belirlenir. Logit modelinde katsayılar, bağımsız değişkenin bağımlı değişkenin gerçekleşme olasılığını hangi yönde etkilediğini ifade eder. Bu çalışmada logit modelden elde edilen katsayılar PV sistem adaptasyon olasılığının katsayılarını temsil eder. Logit tahmininde bağımlı değişken PV sistem yatırım kararının verilmesi başka bir deyişle yeni teknolojiye adaptasyonun sağlanmasıdır. Bağımlı değişken PV yatırım kararının alındığı durumlarda 1, adaptasyonun olmadığı durumlarda ise 0 değerini alır.

Logit tahmininde kullanılan veri seti 2010-2019 yılları TÜİK hanehalkı bütçe anketinden faydalanılarak hazırlanır. Bu yıllarda sıcak su elde etmek için güneş enerjisi kullanan hanelerin bağımlı değişkeni 1 değerini alır. Hanelerin ekonomik faydası, çevre faydası, gelir faydası ve iletişim faydası model bölümünde belirtildiği gibi hesaplanır. İletişim faydasının hesaplanabilmesi için her yıla özgü hane sayısına göre küçük dünya ağları meydana getirilir. Çevre faydasının hesaplanmasında kullanılan kişilerin ürettiği güneş enerjisi miktarı, simülasyon başlangıç koşulları oluşturulurken benimsenen varsayımla benzer şekilde son on yılın ortalama verimlilik değeri alınarak hesaplanır. Değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri ve korelasyon matrisi Tablo 1 ve Tablo 2’de yer almaktadır.

Tablo: 1
Değişkenlerin Tanımlayıcı İstatistikleri

Değişkenler	Ortalama	Standart Hata	Minimum	Maksimum
X (Adaptasyon Kararı)	0.2439	0.4294	0	1
Ekonomik Fayda	0.4431	0.1761	0	1
Çevre Fayda	0.7132	0.0887	0.3968	1
Gelir Fayda	0.4842	0.1438	0.2722	1
İletişim Fayda	0.2439	0.2602	0	1
Sosyal Normlar	0.2439	0.0308	0.1929	0.2844
Gözlem Sayısı: 109271				

Tablo: 2
Korelasyon Matrisi

Değişkenler	X (Adaptasyon Kararı)	Ekonomik Fayda	Çevre Fayda	Gelir Fayda	İletişim Fayda	Sosyal Normlar
X (Adaptasyon Kararı)	1					
Ekonomik Fayda	0.0354	1				
Çevre Fayda	0.2773	0.0025	1			
Gelir Fayda	-0.1186	0.2529	-0.0386	1		
İletişim Fayda	0.5538	0.0684	0.2000	-0.1446	1	
Sosyal Normlar	0.0718	0.8801	0.0088	-0.0057	0.1182	1

Logit tahmin sonuçları ise Tablo 3’te gösterildiği gibidir. Logit tahminine göre gelir faydasının katsayısı negatiftir. Literatürde gelirle yenilenebilir enerji arasında genel olarak kabul edilen pozitif yönlü ilişkinin sadece varsayımlardan kaynaklandığını, doğrusal olmayan etkiler veya servet etkilerine göre ilişkinin yönünün değiştiğini gösteren çalışmalar bulunmaktadır (Best & Chareunsky, 2022; Mahn et al., 2024). Gelir faydasının negatif katsayıya sahip olması, ilgili dönem için Türkiye’de gelirle yenilenebilir enerji adaptasyonu arasında ters yönlü bir ilişki olduğunu gösterir. Gelirle yenilenebilir enerjiye geçiş arasındaki negatif yönlü ilişki literatürdeki çalışmalarla uyumludur (Bashiri & Alizadeh, 2018: 3137;

Van der Kam et al., 2018: 76; Best & Chareunsky, 2022; Mahn et al., 2024). Logit tahmininde kullanılan örneklem 2010-2019 yılları TÜİK hanehalkı bütçe anketinden elde edilmiştir. Türkiye’de 2011-2017 yıllarında ise PV sistem yatırımlarını teşvik etmek amacıyla 13,3 sent sabit fiyat alım tarifesini uygulanmıştır. Dolayısıyla ilgili yıllarda PV yatırımının avantajlı olması, düşük gelirli haneler için PV sistemlerin gelir kaynağı olarak değerlendirilmesine yol açmış olabilir. Ek gelir kaynağı motivasyonu ise gelirle PV sisteme geçiş arasında ters yönlü bir ilişkiyi doğurmuş olabilir. Bununla birlikte yüksek gelirli haneler için PV sisteme geçişin çevreyi koruma motivasyonundan ziyade bir prestij kaybı olarak algılanması da ters yönlü ilişkiyi destekleyebilir.

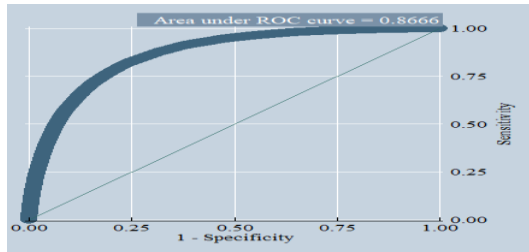
Tablo: 3
Logit Tahmin Sonuçları

Bağımsız Değişken	Katsayı	Standart hata
Ekonomik Fayda	0.3495***	0.1246
Çevre Fayda	6.8316***	0.1018
Gelir Fayda	-1.2392***	0.0754
İletişim Fayda	5.1779***	0.037
Sosyal Normlar	0.0854	0.6806
Sabit	-7.3222***	0.158
Gözlem Sayısı: 109271		
Wald chi2: 24179.41		
Prob > chi2: 0.0000		

Standart hatalar robust değerlerdir. *, ** ve *** sırasıyla %10, %5 ve %1 anlamlılık düzeyini ifade etmektedir.

Logit modelden elde edilen katsayılara göre hanelerin PV sistem adaptasyon olasılığı Denklem 29 aracılığıyla hesaplanır. Tahmin sonuçlarına göre sosyal normlar dışında fayda bileşenlerinin tamamı adaptasyon kararı üzerinde %1 anlamlılık düzeyinde etkiye sahiptir. Şekil 5’te yer alan ROC eğrisi, modelin PV adaptasyon kararını açıklamaktaki yeterliliğini göstermektedir. ROC eğrisine göre model yaklaşık %87 oranında doğru tahmin üretmektedir.

Şekil: 5
ROC Eğrisi



4.2. Sosyal Etkileşimlerin Etkinliğinin Belirlenmesi

Fayda fonksiyonu bileşenlerinin PV sistem adaptasyonu üzerindeki etkisi, standardize edilmiş değişkenler kullanılarak elde edilen logit tahminine göre karşılaştırılır. Standardize edilmiş değişkenler ile logit tahminindeki marjinal etkiler, bağımsız değişkenlerdeki bir standart sapmalık değişimin bağımlı değişken üzerinde yarattığı

değişimi gösterir. Marjinal etkiler incelendiğinde, PV sistem difüzyon sürecinin temel belirleyicisinin iletişim faydası olduğu görülmektedir. Başka bir ifadeyle iletişim faydası, PV sistem yatırım kararında diğer fayda bileşenlerine göre daha fazla etkiye sahiptir.

Tablo: 4
Standardize Edilmiş Logit Tahmin Sonuçları

Bağımsız Değişken	Katsayı	Standart Hata
Ekonomik Fayda	0.0615	0.0219***
Çevre Fayda	0.6058	0.009***
Gelir Fayda	-0.1782	0.0108***
İletişim Fayda	1.3474	0.0096***
Sosyal Normlar	0.0026	0.021
Sabit	-1.6111	0.0096***
Gözlem Sayısı: 109271		
Wald chi2: 24179.41		
Prob > chi2: 0.0000		

Standart hatalar robust değerlerdir. *, ** ve *** sırasıyla %10, %5 ve %1 anlamlılık düzeyini ifade etmektedir. Marjinal etkiler, ortalamada değerlerdir.

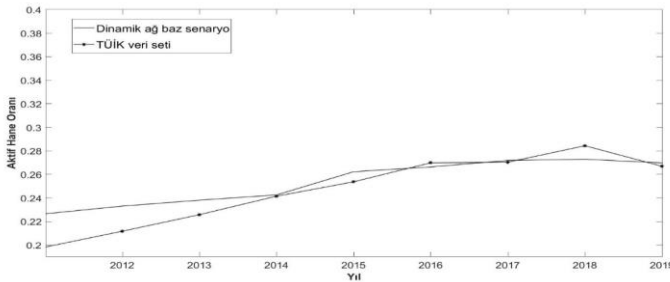
4.3. Kalibrasyon ve Doğrulama

Sosyoekonomik sınıfların eşik değerlerinin belirlenmesinde dolaylı kalibrasyon yöntemi benimsenir (Fagiolo et al., 2007: 208-210). Bu yöntemle göre sosyoekonomik sınıfların eşik değerlerinin belirlenmesinde farklı değerler yazar tarafından kullanılır ve gerçek veri ile en uyumlu olan değerler eşik değer olarak belirlenir (Palmer et al., 2015: 118). Çalışmada kullanılan eşik değerler 2011-2016 yılları arasındaki veri setine göre yazar tarafından belirlenmiş, modelin ve parametrelerin doğrulaması ise 2017-2019 yılları toplam adaptasyon oranı verisi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmadaki tüm modeller için belirlenen eşik değerler Tablo 5’te listelenmektedir. Eşik değerler, PV sisteme geçişin maliyetinin bir ölçüsü olarak değerlendirilebilir.

Tablo: 5
Sosyoekonomik Sınıfların Eşik Değerleri

Sosyoekonomik Sınıf	A	B	C1	C2	D
Eşik Değer	0.96	0.95	0.79	0.49	0.57

Şekil: 6
Dinamik Ağ

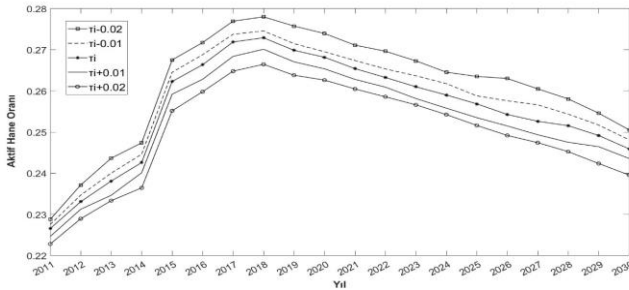


2011-2019 yılları baz senaryo ve anket verilerinden oluşturulan PV sistem adaptasyon oranları Şekil 6’da yer alır. 2011-2016 ve 2017-2019 yılları simülasyon sonuçları anket verileri ile uyumlu olduğundan modellerin ve parametrelerin doğrulandığı kabul edilir. Şekil 6 incelendiğinde, anket verilerinden elde edilen adaptasyon oranının yukarı yönlü ivmesi 2018 yılında artarken, simülasyon sonuçları bu artışı yakalayamaz. Bu fark, 2018 yılındaki politika değişikliğine ilişkin beklentilerin 2017 yılında ortaya çıkmasına ve kurulumu 2018 yılında olsa da 2017 yılı sonuna kadar alınan izinler için sabit fiyat tarifesini uygulamasının geçerli olmasına dayanabilir.

4.4. Duyarlılık Analizi

Çalışmada duyarlılık analizi parametre kalibrasyonu ile ele alınır. Modelin parametre değerlerine duyarlılığı farklı eşik değerlerindeki adaptasyon oranlarına göre araştırılır. Duyarlılık analizi aynı zamanda modelin doğruluğunun da araştırılmasına olanak tanır. PV sistem adaptasyonunun maliyetini temsil eden eşik değeri arttığında PV sistem adaptasyonunun azalması beklenir. Eşik değeri azaldığında ise PV sistem adaptasyonunun artması gerekir.

Şekil: 7
Dinamik ağ Modeli (Eşik Değer Duyarlılığı)



Şekil 7 incelendiğinde, modelin eşik değeri duyarlılığı beklendiği gibidir. Eşik değeri arttığında durumlarda adaptasyon oranı (aktif hane oranı) azalırken, azaldığında durumlarda adaptasyon oranı (aktif hane oranı) artar.

5. Simülasyon

Çalışmada ele alınan modelin duyarlılığı ve doğruluğu yedi farklı senaryo altında incelendi. Bunlardan ilki baz senaryo olarak nitelendirilir ve mevcut mahsuplaşma politikasının devam ettiği varsayımı altında PV sistem adaptasyonu araştırılır. Baz senaryo simülasyonlarının ardından iki farklı durum için difüzyon süreci incelenir.

Bunlardan ilki PV sistem ilk yatırım maliyetlerinin değişmesidir ve senaryo2 olarak adlandırılmıştır. İlk yatırım maliyetlerini belirleyen temel unsur kW başına PV sistem

fiyatlarıdır ki bu da kümülatif kurulu kapasite ile orantılıdır. Yüksek senaryoda kümülatif kurulu kapasitenin beklenenden %20 fazla olduğu durumdaki PV sistem ilk yatırım maliyetleri, düşük senaryoda ise kümülatif kurulu kapasitenin beklenenden %20 düşük gerçekleştiği maliyetler dikkate alınmaktadır.

İkinci durum ise PV sistem yatırımlarını teşvik eden kamu politikalarıdır. PV sistem yatırımlarını teşvik eden ve Avrupa’da yaygın olarak kullanılan en önemli politikalardan birisi sabit fiyat alım garantileridir. Sabit fiyat alım garantilerinin uygulanması senaryo3 olarak nitelendirilmiştir. Mahsuplaşma politikaları kapsamında öz tüketim fazlası elektriğin şebeke tarafından satın alınmasında uygulanan tarife şebekenin sattığı elektrik fiyatlarına eşittir ve ortalama 8 sent civarındadır. Önceki yıllarda uygulanan 13,3 sent sabit fiyat alım tarifesinin uygulanması yüksek senaryo tahminidir. Yüksek senaryoda son yıllardaki ortalama kur değişimi (2010-2020 yılları kur değerlerine göre ortalama %17 artış) de göz önünde bulundurularak tarife oluşturulur (Merkez Bankası, 2021). Tarifenin mahsuplaşma politikasına göre belirlenen fiyatlamasının %10 üstünde uygulanması orta senaryo, %10 altında olması ise düşük senaryo tahminidir.

PV sistem yatırımlarını belirleyen ikinci bir politika olarak PV sistem yatırımı için gerekli finansmanın sağlanması araştırılmış ve senaryo4 olarak isimlendirilmiştir. Hanelerin PV sistem yatırımları için ihtiyaç duydukları kredilere tüketici kredisine göre daha düşük faiz oranlarına sahip konut kredisi faiz oranlarının uygulandığı varsayımı yüksek senaryoyu oluşturur. PV sistem finansman maliyetinin indirilmesi PV sistemden beklenen getirilerin bugüne indirgenmiş değerinin artması anlamına gelir. Dolayısıyla sistemin geri ödeme süresi indirgenerek, ekonomik faydası artırılır. Düşük senaryoda ise mevcut tüketici kredisi faiz oranlarının %5 arttığı kabul edilmektedir.

PV sistem yatırımlarına ilişkin kamu politikalarının temel amacı geri ödeme süresinin kısaltılmasıdır. Türkiye’nin PV sistem yatırımlarını artırmasının geri ödeme sürelerinin kısaltılmasına bağlı olduğunu vurgulayan çalışmalar yer almaktadır (Flora et al., 2019: 8; Duman & Güler, 2020: 709). Alternatif bir senaryo olarak, uygulanan kamu politikasının içeriğine bakılmaksızın, geri ödeme sürelerinin kısaltılması senaryo5 başlığı altında incelenmiştir. PV sistem yatırımlarının geri ödeme sürelerinin 7 yıla ve 3 yıla düşürülmesi durumunda adaptasyon oranları araştırılmıştır.

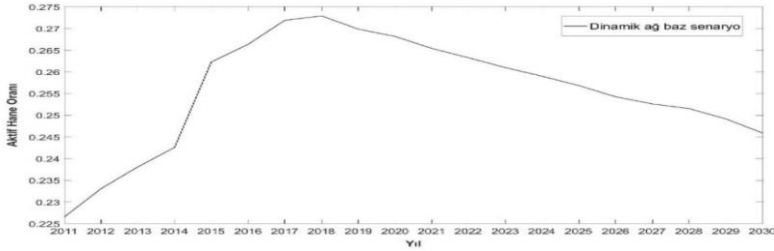
Çalışmada ele alınan bir diğer senaryo, hanelerin PV sistem adaptasyonunu zorunlu hale getiren düzenlemelerin uygulanmasıdır ve senaryo6 olarak isimlendirilmiştir. Bu senaryo iki aşamada incelenir. Birinci aşamada daha önce PV sistem adaptasyonu olmayan haneler tespit edilir. Bu hanelerden rassal olarak belirlenen hanelerin zorunlu olarak PV sistem yatırımı yaptıkları varsayılır. Zorunlu PV sistem yatırımı yapacak hane sayısı, daha önce PV sistem kullanmayan haneler içerisinde 50 hane, 100 hane ve 150 hane olarak alınır. İkinci aşamada, bu politikanın farklı sosyoekonomik statülerde uygulanmasının etkileri araştırılır. A, B, C1, C2 ve D statülerinde bulunan ve daha önce PV sistem adaptasyonu olmayan hanelerden 50 tanesi rassal olarak seçilir.

Son olarak kamu politikasındaki farklılaşmanın etkisini araştırmak için senaryo7 incelenmiştir. Senaryo7’de PV sistemlerinde 2018 yılına kadar uygulanmakta olan sabit fiyat alım politikasının devam etmesi durumu araştırılır. Böylelikle kamunun PV sistemler için belirlediği mahsuplaşma politikası ile sabit fiyat alım tarifesi politikası karşılaştırılır başka bir ifadeyle kamu politikasındaki değişim incelenir.

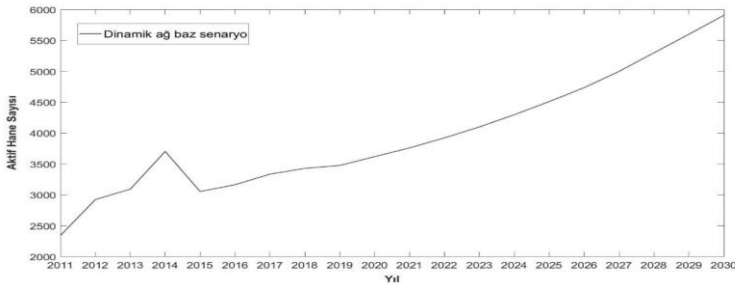
5.1. Baz Senaryo

2020-2030 yılları arasındaki PV sistem ortalama geri ödeme süresi 13,8 yıl olarak hesaplanmaktadır (Geri ödeme süresinin hesaplanma aşamaları Bölüm 3.2.1’de yer almaktadır). Hesaplanan geri ödeme süreleri literatürde yer alan çalışmalarla uyumludur (Güngül vd., 2018; Acar vd., 2020: 27-28).

Şekil: 8
Baz Senaryo Adaptasyon Oranı



Şekil: 9
Baz Senaryo PV Sisteme Adaptasyon Sağlayan Toplam Hane Sayısı



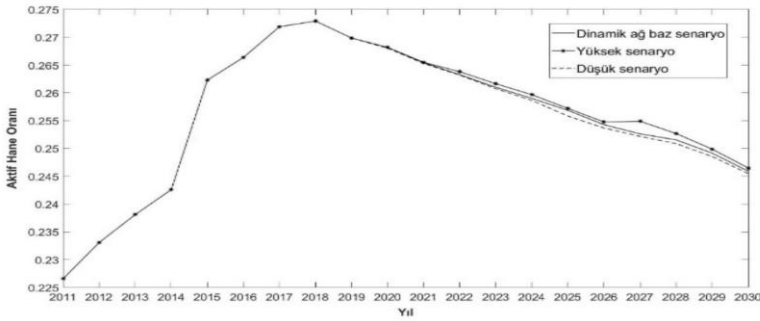
Baz senaryodaki mahsuplaşma politikalarına göre belirlenen geri ödeme sürelerinin PV sistem yatırımlarını ekonomik açıdan cazip kılan seviyenin altında olduğu açıktır (Flora et al., 2019: 2). Baz senaryoya göre belirlenen adaptasyon oranı grafikleri de hane halkının PV sistem yatırımı konusundaki isteksizliğini desteklemektedir. PV sistem adaptasyon oranları zamanla düşmektedir. PV sistem yatırımları cazibesini kaybettiği için yeni adaptasyon sayısı düşerken, zamanla hane sayısı arttığı için adaptasyon oranlarında düşüş gözlenmektedir.

Şekil 9 göz önünde bulundurulduğunda, Şekil 8’deki adaptasyon oranlarındaki azalmanın temel sebebi PV sistem adaptasyon sayısının yeni hane sayısından çok daha az kalmasıdır. Şekil 9’da yıllar itibariyle hanelerin PV sistem adaptasyonunun devam ettiği daha açık bir şekilde görülmektedir. Bununla beraber 2011-2018 yıllarında PV sistem adaptasyonunun kazandığı ivme sonraki yıllarda devam ettirilemez.

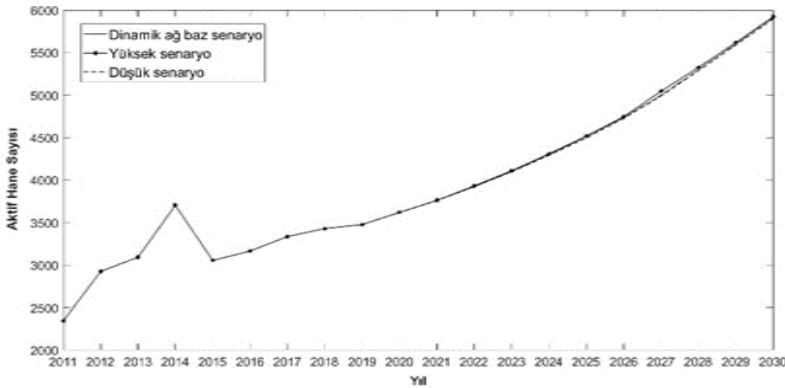
5.2. İlk Yatırım Maliyetleri

İlk yatırım maliyetleri, kümülatif kurulu kapasite ile ters orantılıdır. Başka bir ifadeyle küresel düzeyde toplam kurulu kapasite artarsa ilk yatırım maliyetleri düşer, küresel düzeyde toplam kurulu kapasite azalırsa ilk yatırım maliyetleri artar. Yüksek senaryoda kümülatif kurulu kapasitenin beklenenden fazla olması, düşük senaryoda ise beklenenden az olması değerlendirilmektedir.

Şekil: 10
Senaryo2 (İlk Yatırım Maliyetleri)

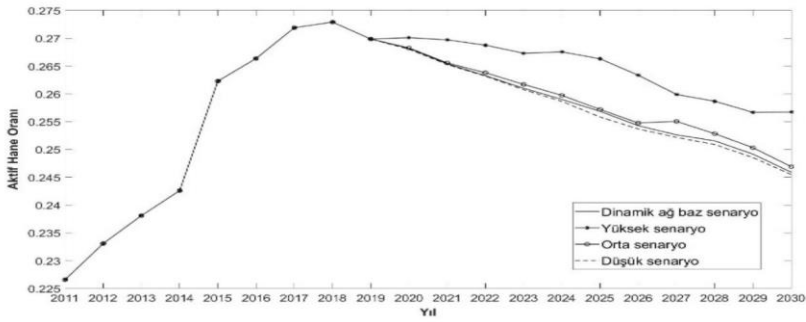


Şekil: 11
Senaryo2 PV Sisteme Adaptasyon Sağlayan Toplam Hane Sayısı

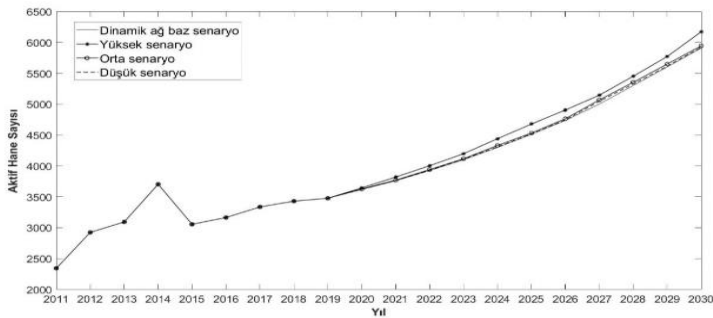


İlk yatırım maliyetlerindeki değişiklikler göz önüne alındığında baz senaryo, yüksek senaryo ve düşük senaryonun neredeyse aynı sonuçları ürettiği Şekil 10 ve Şekil 11’de görülmektedir. Baz senaryoya göre nispi değişiklikler çok az olsa da yüksek senaryoda beklediği gibi adaptasyon oranları artarken, düşük senaryoda azalır. Bununla birlikte difüzyon patikasının yöneliminde herhangi bir değişiklik meydana gelmez. Adaptasyon oranlarındaki değişimin küçük olmasının temelinde küresel toplam kurulu kapasiteye göre belirlenen PV sistem fiyatlarının Euro üzerinden belirlenmesi yer almaktadır. Türkiye’de ortalama Euro kuru artışının yaklaşık %15 olarak belirlendiği göz önünde bulundurulduğunda PV sistem fiyatlarındaki düşüşün hane halkını yatırıma yönlendirememesi anlaşılır hale gelir.

Şekil: 12
Senaryo3 (Sabit Fiyat Alım Tarifeleri)



Şekil: 13
Senaryo3 PV Sisteme Adaptasyon Sağlayan Toplam Hane Sayısı



5.3. Sabit Fiyat Alım Tarifeleri

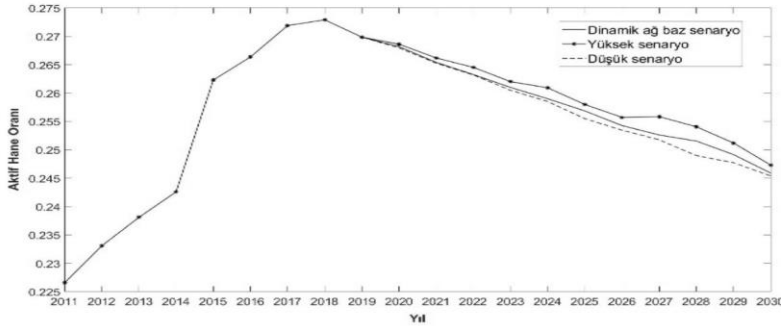
Sabit fiyat alım tarifelerinin değerlendirildiği simülasyon sonuçları Şekil 12’de yer almaktadır. Grafikler açıkça göstermektedir ki hane halkı PV sistem yatırımı yapmak için

teşvike ihtiyaç duymaktadır. Yüksek senaryoda uygulanan tarifeler mevcut politikanın çok üzerinde olduğu için PV sistem adaptasyon oranlarında baz senaryoya göre önemli bir artış olur. Orta ve düşük senaryolar ise hanehalkını yatırıma ikna etmekte yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte yüksek senaryoda bile 2011-2018 yılları arasındaki difüzyon hızına erişilemez.

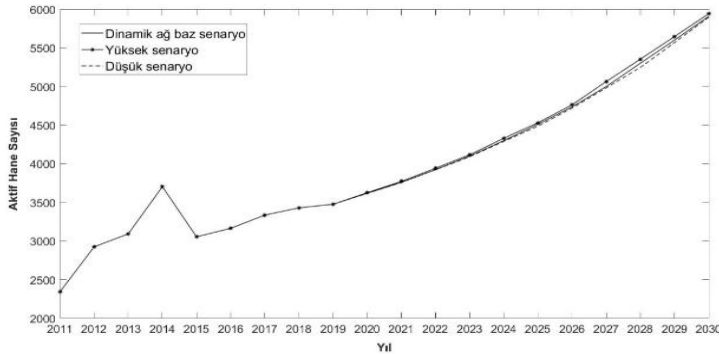
5.4. PV Sistem Finansmanı

Geri ödeme süresini belirleyen unsurlardan bir diğeri de PV sisteminden elde edilen getirilerin net bugünkü değerinin hesaplanmasında kullanılan indirgeme oranıdır. Çalışmada indirgeme oranları her hane için heterojen olarak ve reel faiz oranları kullanılarak oluşturulmaktadır. Dolayısıyla PV sistem finansmanında uygulanan farklı faiz oranları da yatırım kararı üzerinde belirleyici role sahiptir.

Şekil: 14
Senaryo4 (PV Sistem Finansmanı)



Şekil: 15
Senaryo4 PV Sisteme Adaptasyon Sağlayan Toplam Hane Sayısı

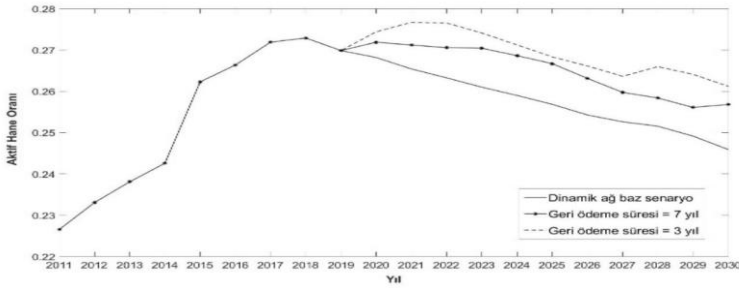


Farklı faiz oranlarının adaptasyon üzerindeki etkisi Şekil 14 ve Şekil 15’te yer almaktadır. Yüksek senaryoda adaptasyon oranları yüksek, düşük senaryoda ise düşük olarak tahmin edilir. PV sistem yatırımı için ihtiyaç duyulan finansmanın daha düşük faiz oranlı krediyle fonlanması PV sistemine geçişi hızlandırırken, daha yüksek faiz oranlı krediler PV sisteme geçişin önünde bariyer oluşturacaktır. Bununla birlikte uygulanan faiz oranlarının birbirine oldukça yakın olması sebebiyle difüzyon patikalarının ve PV sisteme adapte olan toplam hane sayısının baz senaryoya çok benzer olduğunu belirtmek gerekir.

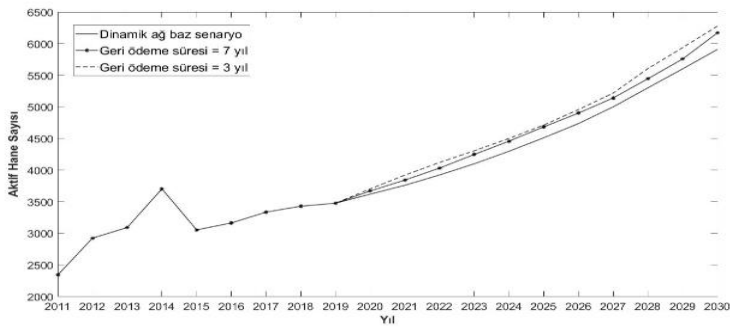
5.5. Geri Ödeme Süreleri

Şekil 16’da açıkça görülmektedir geri ödeme sürelerinin düşürülmesi PV sistem yatırımlarının 2011-2018 yıllarında kazandığı ivmeyi kazanabilmesi için gereklidir. PV sistem yatırımının geri ödeme süresi yatırımın rasyonel hale geldiği seviyelere düşerse adaptasyon oranı baz senaryoya göre artmaktadır.

Şekil: 16
Senaryo5



Şekil: 17
Senaryo5 PV Sisteme Adaptasyon Sağlayan Toplam Hane Sayısı

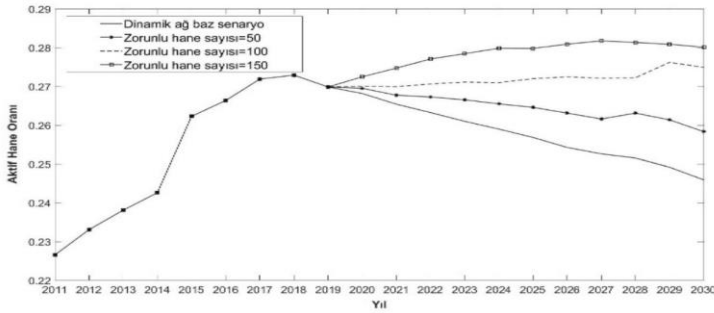


PV sistem geri ödeme süresinin 7 yıla düşürülmesi, sabit fiyat alım tarifelerinin 13,3 sente çıkarılmasına oldukça benzer sonuçlar üretmektedir. Geri ödeme süresinin 7 yıla düşürülmesi baz senaryoya göre önemli artışlar olmasını sağlasa da 2011-2018 yıllarındaki difüzyon ivmesinin yakalanmasına yetmez. Geri ödeme süresinin 3 yıla düşürülmesi ise yukarı yönlü ivmenin birkaç yıl daha devam etmesini sağlarken, sonraki yıllarda baz senaryoya benzer şekilde adaptasyon oranında azalış trendini ortaya çıkarmaktadır. Bununla beraber adaptasyon hızını artırdığı açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 16’ya göre geri ödeme süresinin 7 yıla düşürülmesinin etkisi daha fazla iken, 3 yıla düşürülmesi adaptasyon hızını artırırsa da bu artış hızı zamanla azalmaktadır.

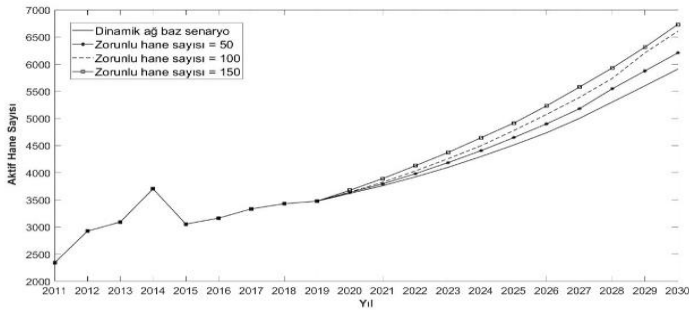
5.6. Zorunlu PV Sistem Adaptasyonu

PV sisteme getirilecek zorunlu yatırım düzenlemeleri sadece hanelerin bir kısmının adaptasyonunu sağlamayacak aynı zamanda sosyal etkileşimler aracılığıyla daha fazla sayıda hanenin adapte olmasını beraberinde getirecektir. Başka bir ifadeyle pozitif dışsalılık etkisi ortaya çıkacaktır. Şekil 18 ve Şekil 19’da da bu durum açıkça görülmektedir.

Şekil: 18
Senaryo6



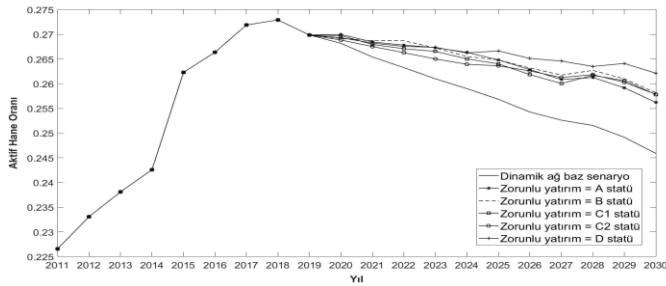
Şekil: 19
Senaryo6 PV Sisteme Adaptasyon Sağlayan Toplam Hane Sayısı



İkinci aşamada zorunlu PV sistem adaptasyon politikası hangi sosyoekonomik statüdeki hanelere uygulanmalı sorusunun cevabı aranmaktadır. Elbette ki böyle bir kamu politikasının hanelerin sosyoekonomik statüleri tespit edilerek bu statülere göre düzenlenmesi mümkün değildir. Nitekim hanelerin yerleşim yeri (yaşanılan bölge) seçimleri ile sosyoekonomik statüleri arasındaki sıkı ilişki oldukça açıktır. Dolayısıyla bu senaryoda aranan cevap zorunlu PV sistem yatırımı düzenlemesinin hangi sosyoekonomik statüye hitap eden yerleşim yerlerine uygulanması gerektiğidir.

Simülasyonlardan elde edilen sonuçlara göre zorunlu PV yatırım düzenlemesi D sosyoekonomik statüdeki hanelere uygulandığında en fazla etki ortaya çıkmaktadır. D sosyoekonomik statüyü C1 ve C2 statüsü takip eder. Üçüncü sırada A statü yer alırken düzenlemenin B statüye uygulanmasının en az etkiyi yarattığı görülmektedir. Şekil 4’e göre Türkiye’de A sosyoekonomik statüdeki hanelerin PV sisteme adaptasyon oranı düşüktür. A sosyoekonomik statüdeki hanelerin küçük bir bölümü zaman içerisinde PV sisteme geçiş sağladığı için, zorunlu PV sistem uygulaması B grubundan daha fazla etki yaratmaktadır. Her ne kadar en fazla sonuç D sosyoekonomik statüde sağlansa da böyle bir düzenlemenin uygulanmasının haneler üzerinde yaratacağı gelir eşitsizliği açısından da ayrıca değerlendirilmesi gerektiği açıktır.

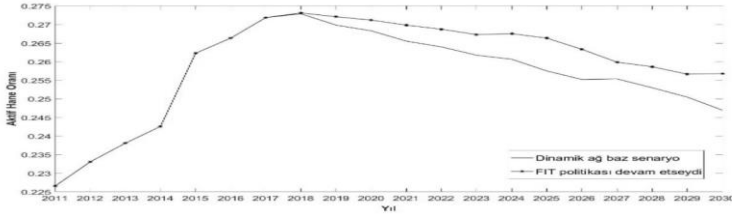
Şekil: 20
Senaryo6 Sosyoekonomik Statüye Göre Zorunlu PV Yatırım Düzenlemesi



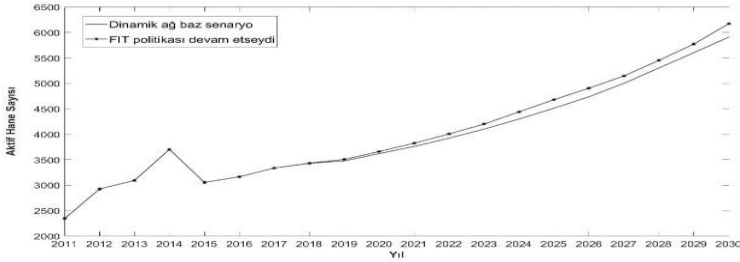
5.7. Kamu Politikaları Farklılaşması

Kamu politikalarındaki değişikliğin PV sistem adaptasyon eğrisini önemli ölçüde belirlediği görülmektedir. Şekil 21’e göre sabit fiyat alım tarifesini uygulanmaya devam edilseydi de PV sistem adaptasyon oranlarında azalma ortaya çıkacaktı. Başka bir ifadeyle sabit fiyat alım tarifesinin devam ettirilmesi, PV sistem yatırımlarını baz senaryoya göre önemli ölçüde artırsa da hane sayısındaki artışı karşılamaya yetmediği için adaptasyon oranındaki düşüşü engelleyemez. Şekil 22’de de sabit fiyat alım tarifesinin devam ettirildiği durumda adaptasyon hızının dolayısıyla PV sisteme adapte olan toplam hane sayısının arttığı görülmektedir.

Şekil: 21
Kamu Politikaları Karşılaştırması



Şekil: 22
Kamu Politikaları Karşılaştırması PV Sisteme Adaptasyon Sağlayan Toplam Hane Sayısı



6. Simülasyon Değerlendirmesi

Türkiye’de 2011-2017 yıllarında uygulanan sabit fiyat alım tarifleri PV sistem yatırımlarının geri ödeme sürelerini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu yıllarda yatırımın ekonomik etkisi hanehalkı adaptasyon kararlarında da açıkça görülmektedir. 2018 yılında uygulanmaya başlanan mahsuplaşma politikasıyla birlikte PV sistem yatırımları önceki yıllarda kazandığı ivmeyi kaybetmektedir. Her ne kadar TÜİK veri setinden elde edilen 2018 yılı adaptasyon oranlarında artış devam ediyor gözükse de bunun sebebi farklıdır. 2018 yılında yapılan mevzuat değişikliği 2017 yılında tartışılmaya başlanmıştır. Daha önemlisi 2017’de onay alan ve 2018’de kurulacak olan PV yatırımları da 13,3 sent sabit fiyat alım tarifesine tabii tutulmuştur. Dolayısıyla 2018 yılında difüzyon hızı azalsa bile küçük bir artış olmasının temelinde bunlar yer alır.

Simülasyon sonuçlarına göre 2018-2019 yıllarında uygulanan mahsuplaşma politikasının düzenlenmesi sonucunda hanelerin PV sistem adaptasyonu önemli ölçüde azalsa da devam etmektedir. Nitekim hane sayısındaki artışa göre yeni adaptasyon kararı çok az olduğundan hanehalkı adaptasyon oranları zamanla azalmaktadır. Bununla beraber 2011-2018 yıllarında adaptasyon eğrisinin kazandığı ivmeye erişilemediği de açık bir şekilde görülmektedir.

PV sistem adaptasyon oranlarının incelenmesinde kullanılan ilk yatırım maliyetleri, sabit fiyat alım tarifeleri ve faiz oranları yatırımın geri ödeme süresini belirlemektedir. Simülasyon sonuçları açıkça göstermektedir ki bu değişkenlerde meydana gelen nispi değişiklikler, PV sistem yatırımını teşvik etmeye yetmemektedir ve adaptasyon oranlarında önemli değişiklikler yaratmaz.

Difüzyon patikasının aşağı yönlü eğiliminin kırılması ancak geri ödeme süresinin 7 yıl, 3 yıl gibi önemli ölçüde indirildiği veya 13,3 sent sabit fiyat alım tarifelerinin yeniden uygulanmaya başlandığı radikal politikalarla mümkündür. Nitekim bu politikalar bile 2011-2018 yıllarında kazanılan ivmeye ulaşılmasına ve yukarı yönlü difüzyon eğrilerinin elde edilmesine yetmez. Kamu politikalarının farklılaştırılmadan, 13,3 sent sabit fiyat alım tarifelerinin uygulandığı durumda bile her ne kadar adaptasyon oranı baz senaryonun çok üzerinde olsa dahi, difüzyon hızında azalma trendi gözlenmektedir. Başka bir ifadeyle PV sisteme yatırım yapan hane sayısı topluma eklenen yeni hane sayısının gerisinde kaldığı için adaptasyon oranları azalmaya devam eder.

PV sistem adaptasyon oranlarının artırılması ve hatta 2011-2018 yılların adaptasyon hızının aşılması ancak zorunlu PV sistem yatırımı düzenlemesi ile mümkün olmaktadır. Çalışmada yeni konut sayıları dikkate alınmamış olmakla birlikte, hane sayılarındaki artışların konut taleplerini ve yeni konut sayısını artırdığı göz önünde bulundurulursa dolaylı da olsa çıkarımlar yapmak mümkündür. Yeni konutlara PV sistem zorunluluğunun getirilmesi hem ağ dışsallıkları sayesinde iletişim faydasını artırarak eski binalardaki hanelerde de adaptasyonu sağlayacak hem de dışsal bir şok gibi difüzyon patikasının ivmesini artıracaktır.

7. Sonuç

Türkiye’de PV sistem adaptasyonu ile ekonomik fayda, çevresel fayda, iletişim faydası ve sosyal normlar arasında pozitif bir ilişki bulunurken, gelir faydası ile adaptasyon olasılığı arasında negatif bir ilişki bulunmaktadır. Fayda fonksiyonu bileşenlerinin etkileri incelendiğinde, adaptasyon kararında en belirleyici unsurun iletişim faydası olduğu görülmektedir. Dolayısıyla Türkiye’de PV sistem difüzyon patikasını şekillendiren en önemli unsur tüketiciler arasındaki etkileşim başka bir ifadeyle ağ dışsallığının bir ürünü olan tüketiciler arasındaki bilgi difüzyonudur.

Türkiye’de 2011-2017 yılları arasında uygulanan 13,3 sent sabit fiyat alım tarifesini, PV sistem adaptasyonunu önemli ölçüde hızlandırmıştır. Mahsuplaşma politikasının uygulanmasıyla PV sistem geri ödeme süreleri uzarken, yatırımın ekonomik faydası düşmektedir. Her ne kadar ‘çatı mevzuatı’ uygulaması adaptasyon oranlarını azaltmış olsa da simülasyon sonuçları 13,3 sent sabit fiyat alım tarifesinin devam ettirildiği durumda da ilerleyen yıllarda difüzyon patikasının aşağı yönlü eğiliminin engellenemediğini göstermektedir. Dolayısıyla literatürde yer alan çalışmalar PV sistem adaptasyon oranlarının artırılması için geri ödeme sürelerinin azaltılması gerektiğini savunsa da geri ödeme süresini

azaltmaya yönelik politikalar adaptasyon sayısını artırsa da Türkiye’de difüzyon patikasının pozitif ivmeli bir trende sahip olmasına yetmez.

Türkiye’de PV sistem difüzyon patikası adaptasyon oranları açısından incelendiğinde difüzyon eğrisinin literatürle uyumlu olarak pik yaptıktan sonra azaldığı ve farklı senaryolar altında da pozitif ivme kazanamadığı görülmektedir (Palmer et al., 2015). Sabit fiyat alım tarifelerinin uygulanması, dönemsel olarak yenilenebilir enerji yatırımlarını hızlandırırsa da uzun dönemde nüfus artışıyla beraber eski denge noktasına doğru dönülmektedir. Yenilenebilir enerji üretiminin nüfus artışı ve bu artışa eşlik eden enerji ihtiyacıyla birlikte oransal olarak artması için alternatif kamu politikaları geliştirilmelidir. Toplumun enerji bağımlılığı ve bu bağlamda yenilenebilir enerjinin önemi konusunda bilinçlendirilmesi gerekmektedir. Türkiye’de gelire ve sosyoekonomik statüye bakılmaksızın, yenilenebilir enerjiye atfedilen önemin toplumsal düzeyde içselleştirilmediği gözlenmektedir. Toplumun yenilenebilir enerjinin çevreye faydası, nüfus artışlarının bir sonucu olarak enerji bağımlılığındaki artış, Dünya’nın artan enerji ihtiyacı karşısında kaynakların sınırlı olmasının yarattığı riskler gibi konularda ivedilikle bilinçlendirilmesi gerekmektedir.

Difüzyon patikasının aşağı yönlü eğiliminin temel sebebi PV sistemine geçiş yapan hane sayısının nüfus artışlarına bağlı olarak toplam hane sayısında ortaya çıkan artışı yakalayamamasıdır. Nüfus hızlı bir şekilde artarken PV sisteme yatırım yapan hane sayısı az kalır. Başka bir ifadeyle alternatif politikalarla üretilen yenilenebilir enerji miktarı artırılrsa da toplumun ihtiyaç duyduğu toplam enerji miktarındaki artış dikkate alındığında yetersiz kalır.

Üretilen yenilenebilir enerji miktarının artırılması sürdürülebilir ekonomiler için önemli olsa da enerjide bağımlılığın azaltılması ve kendine yeterlilik açısından ele alındığında toplam enerji ihtiyacının ne kadarının üretilbildiği önem arz eder. Üretilen yenilenebilir enerji miktarının toplam enerji tüketimi içerisindeki payının artırılması için difüzyon patikasının pozitif yönlü bir ivmeye sahip olması gerekmektedir. Difüzyon patikasının yukarı yönlü ivmeli bir patikaya sahip olması ise zorunlu PV sistem yatırımı düzenlemesinin uygulanmasıyla mümkündür. Türkiye’de PV sistem adaptasyon olasılığını belirleyen unsurlar göz önünde bulundurulduğunda adaptasyon oranlarının hızlı bir şekilde yükselmesini sağlamak için geri ödeme süreleri azaltılırken zorunlu PV sistem düzenlemelerinin de yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmanın kapsamı alternatif senaryolar altında Türkiye’de PV sistem difüzyonunun araştırılması ile sınırlandırılmıştır. Çalışma veri seti kısıtlamalarından ötürü PV sisteme geçişin göstergesi olarak sadece PV panel ele alınmıştır. Nitekim PV sisteme geçiş için PV batarya, PV ev aletleri, PV aydınlatma gibi farklı göstergeler de yer almaktadır. Çalışmada incelenen alternatif senaryolar yenilenebilir enerjiye geçişte belirleyici olan yenilenebilir enerjinin ekonomik getirisi ve finansmanına yönelik olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte enerji bağımlılığının azaltılması için yenilenebilir enerjiye geçiş zorunlu tutacak düzenleme etkisi farklı sosyoekonomik statüye sahip gruplar için araştırılmıştır. Elde edilen bulgular enerji bağımlılığının azaltılması için zorunlu PV sisteme geçiş

düzenlemelerine ihtiyaç olduğunu ortaya koysa da detaylı olarak araştırılması gerekmektedir. Çalışmanın temel araştırma sorusu böyle bir düzenlemenin etkileri ve uygulama yöntemleri olmadığı için detaylandırma yapılmamıştır. Zorunlu PV sisteme geçiş düzenlemeleri, sadece PV sisteme geçiş oranları değil gelir eşitsizliği gibi temel unsurlar dikkate alınarak sonraki çalışmalarda incelenmelidir.

Yenilenebilir enerjiye geçişte önemli role sahip unsurlardan birisi de bölgesel özelliklerdir. Bölgesel özellikler, PV sistemlerine yatırımdan beklenen getiriye başka bir ifadeyle geri ödeme süresini değiştirmektedir. Enerji ihtiyacında beklenen artışın bir göstergesi olan hanelerdeki artış oranı da bölgesel dinamiklerden etkilenmektedir. Bu çalışmada hanelerin coğrafik dağılımı veri kısıtlamaları sebebiyle dikkate alınmamıştır. Bölgesel dağılım dikkate alınarak, hanelerin yatırım kararının gözlenecek şekilde uzun periyodlar için takip edildiği veri setlerinin oluşturulması gerekmektedir. Dahası elde edilen veri setlerinin coğrafik bilgi sistemleriyle entegrasyonu gerçek Dünya koşullarına uyumlu simülasyon çevresi yaratacaktır. Bu veri setleri kullanılarak yapılacak bölgeye özgü analizler ve alternatif kamu politikaları bölgelerin gelişimine katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Acar, A. vd. (2020), *Binalarda Çatı Üstü Güneş Enerjisi Potansiyeli - Türkiye’de Çatı Üstü Güneş Enerjisi Sistemlerinin Hayata Geçmesi için Finansman Modelleri ve Politikalar*, SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, Sabancı Üniversitesi.
- Ameli, N. & N. Brandt (2015), “Determinants of Households’ Investment in Energy Efficiency and Renewables: Evidence From The OECD Survey on Household Environmental Behaviour and Attitudes”, *Environmental Research Letters*, 10(4), 044015.
- Bal, H. (2009), “Sermaye Bütçelemesi Yatırım Kararlarında Özkaynağa Nakit Akımı Yönteminin Kullanılması ve Projeye Nakit Akımı Yöntemi ile Karşılaştırılması”, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(1), 219-236.
- Bashiri, A. & S.H. Alizadeh (2018), “The Analysis of Demographics, Environmental and Knowledge Factors Affecting Prospective Residential PV System Adoption: A Study in Tehran”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 3131-3139.
- Best, R. & A. Chareunsky (2022), “The impact of income on household solar panel uptake: Exploring diverse results using Australian data”, *Energy Economics*, 112, 106124.
- Bhattacharjee, U. et al. (2018), *Turkey-Rooftop Solar Market Assessment: Summary Note*, The World Bank, No. 123720.
- Boumaiza, A. et al. (2018), “Modeling the impact of innovation diffusion on solar PV adoption in city neighborhoods”, *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(3), 1749-1762.
- Cebeci, S. (2017), “Türkiye’de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Potansiyelinin Değerlendirilmesi”, *Uzmanlık Tezi*, T.C. Kalkınma Bakanlığı, İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Yayın No: 2977.
- Chappin, E.J. & G.P. Dijkema (2010), “Agent-Based Modelling of Energy Infrastructure Transitions”, *International Journal of Critical Infrastructures*, 6(2), 106-130.

- Chen, K.K. (2014), “Assessing The Effects of Customer Innovativeness, Environmental Value and Ecological Lifestyles on Residential Solar Power Systems Install Intention”, *Energy Policy*, 67, 951-961.
- Denholm, P. et al.(2009), *Break-Even Cost for Residential Photovoltaics in The United States: Key Drivers and Sensitivities*, National Renewable Energy Lab. (NREL), No. NREL/TP-6A2-46909, Golden, CO (United States).
- Dharshing, S. (2017), “Household Dynamics of Technology Adoption: A Spatial Econometric Analysis of Residential Solar Photovoltaic (PV) Systems in Germany”, *Energy Research & Social Science*, 23, 113-124.
- Dinçer, F. (2011), “Türkiye’de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Potansiyeli-Ekonomik Analizi ve AB Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme”, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 14(1), 8-17.
- Drury, E. et al. (2011), *Impact of Different Economic Performance Metrics on The Perceived Value of Solar Photovoltaics*, National Renewable Energy Lab. (NREL), No. NREL/TP-6A20-52197, Golden, CO (United States).
- Duman, A.C. & Ö. Güler (2020), “Economic Analysis of Grid-Connected Residential Rooftop PV Systems in Turkey”, *Renewable Energy*, 148, 697-711.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2010), *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Stratejik Planı (2010-2014)*, <<http://www.sp.gov.tr/tr/stratejik-plan/s/269/Enerji+ve+Tabii+Kaynaklar+Bakanligi+2010-2014>>, 02.03.2023.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2014), *Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı (Aralık 2014)*, <<https://www.ebrd.com/documents/admin/trkiye-ulusal-yenleneblr-enerj-eylem-planı.pdf>>, 02.03.2023.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2019), *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2019-2023 Stratejik Planı*, <<http://www.sp.gov.tr/tr/stratejik-plan/s/1971/Enerji+ve+Tabii+Kaynaklar+Bakanligi+2019-2023>>, 02.03.2023.
- EPIA European Photovoltaic Industry Association (2011), *Solar Generation 6: Solar Photovoltaic Electricity Empowering The World*, Brussels, Belgium.
- Eppstein, M.J. et al. (2011), “An Agent-Based Model to Study Market Penetration of Plug-In Hybrid Electric Vehicles”, *Energy Policy*, 39(6), 3789-3802.
- ESP Europe Solar Power (2020), *Global Market Outlook for Solar Power/2020-2024*, Brussels, Belgium.
- Fagiolo, G. et al. (2007), “A Critical Guide to Empirical Validation Of Agent-Based Models in Economics: Methodologies, Procedures, and Open Problems”, *Computational Economics*, 30(3), 195-226.
- Farber, A. et al. (2006), “A General Formula for The WACC”, *International Journal of Business*, 11(2), 211-218.
- Flora, A. et al. (2019), *Yeni Teşvikler Türkiye’nin Çatı Tipi Güneş Enerjisi Sektörünü Aydınlatıyor*, Institute for Energy Economics and Financial Analysis.
- Fouladvand, J. et al. (2022), “Energy security in community energy systems: An agent-based modelling approach”, *Journal of Cleaner Production*, 366, 132765.
- Garcia, R. & W. Jager (2011), “From The Special Issue Editors: Agent-Based Modeling of Innovation Diffusion”, *Journal of Product Innovation Management*, 28(2), 148-151.

- Güngül, M. et al. (2018), “Türkiye’de Konutlarda Güneş Enerjisinden Elektrik Üretiminin TOPSIS Yöntemiyle Analizi”, *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(3), 133-144.
- Güzel, A. & A. Cingöz (2016), “Proje Değerlendirmede Yeni Bir Yaklaşım: Dinamik Ortalama Sermaye Maliyeti”, *Ekonomi İşletme Siyaset ve Uluslararası İlişkiler Dergisi*, 2(2), 31-68.
- Huang, X. et al. (2021), “Agent-based modelling for market acceptance of electric vehicles: evidence from China”, *Sustainable Production and Consumption*, 28, 206-217.
- Iachini, V. et al. (2015), “Agent Based Simulation of Incentive Mechanisms on Photovoltaic Adoption”, in: *Congress of the Italian Association for Artificial Intelligence* (136-148), Springer, Cham.
- IRENA International Renewable Energy Agency (2024), *Renewable Energy Statistics 2024*, Abu Dhabi.
- Kalaycıoğlu, S. et al. (2010), “Temsili Bir Örneklemde Sosyo-Ekonomik Statü (SES) Ölçüm Aracı Geliştirilmesi: Ankara Kent Merkezi Örneği”, *Sosyoloji Araştırmaları Dergisi*, 13(1), 182-220.
- Karimi, M.J. & S. Vaez-Zadeh (2021), “An agent-based model for electric energy policy assessment”, *Electric Power Systems Research*, 192, 106903.
- Korcaj, L. et al. (2015), “Intentions to Adopt Photovoltaic Systems Depend on Homeowners’ Expected Personal Gains and Behavior of Peers”, *Renewable Energy*, 75, 407-415.
- Kost, C. et al. (2012), *Studie Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*, Fraunhofer ISE.
- Kuzmin, E. et al. (2024), “Digitalization of the energy sector in its transition towards renewable energy: A role of ICT and human capital”, *Energy Strategy Reviews*, 53, 101418.
- Kwan, C.L. (2012), “Influence of Local Environmental, Social, Economic and Political Variables on The Spatial Distribution of Residential Solar PV Arrays Across The United States”, *Energy Policy*, 47, 332-344.
- Ma, T. & Y. Nakamori (2009), “Modeling Technological Change in Energy Systems-From Optimization to Agent-Based Modeling”, *Energy*, 34(7), 873-879.
- Macal, C.M. & M.J. North (2010), “Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation”, *Journal of Simulation*, 4, 151-162.
- Mahn, D. et al. (2024), “What drives solar energy adoption in developing countries? Evidence from household surveys across countries”, *Energy Economics*, 138, 107815.
- McCoy, D. & S. Lyons (2014), “Consumer Preferences and The Influence of Networks in Electric Vehicle Diffusion: An Agent-Based Microsimulation in Ireland”, *Energy Research & Social Science*, 3, 89-101.
- Meade, N. & T. Islam (2006), “Modelling and Forecasting The Diffusion of Innovation-A 25-Year Review”, *International Journal of Forecasting*, 22(3), 519-545.
- Menyeh, B.O. (2021), “Financing electricity access in Africa: A choice experiment study of household investor preferences for renewable energy investments in Ghana”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111132.
- Mian, M.A. & I. Vélez-Pareja (2008), “Applicability of The Classic WACC Concept in Practice”, *Latin American Business Review*, 8(2), 19-40.
- Modis, T. (2007), “Strengths and Weaknesses of S-Curves”, *Technological Forecasting & Social Change*, 74(6), 866-872.

- Muhammad-Sukki, F. et al. (2014), “Feed-In Tariff for Solar Photovoltaic: The Rise of Japan”, *Renewable Energy*, 68, 636-643.
- Nazari, Z. & P. Musilek (2023), “Impact of Digital Transformation on The Energy Sector: A Review”, *Algorithms*, 16(4), 211.
- Olabi, A.G. et al. (2023), “Energy Digitalization: Main categories, Applications, Merits and Barriers”, *Energy*, 271: 126899.
- OWID Our World in Data (N/A), <<https://ourworldindata.org/grapher/installed-solar-pv-capacity>>, 18.03.2021.
- OWID Our World in Data (N/A), <<https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-renewables?tab=table>>, 11.10.2024.
- Palmer, J. et al. (2015), “Modeling The Diffusion of Residential Photovoltaic Systems in Italy: An Agent-Based Simulation”, *Technological Forecasting and Social Change*, 99, 106-131.
- Pearce, P. & R. Slade (2018), “Feed-In Tariffs For Solar Microgeneration: Policy Evaluation and Capacity Projections Using A Realistic Agent-Based Model”, *Energy Policy*, 116, 95-111.
- Peralta, A.A. et al. (2022), “Spatio-temporal modelling of solar photovoltaic adoption: An integrated neural networks and agent-based modelling approach”, *Applied Energy*, 305, 117949.
- Phillips, F. (2007), “On S-Curves and Tipping Points”, *Technological Forecasting and Social Change*, 74(6), 715-730.
- Plötz, P. et al. (2014), “Modelling Market Diffusion of Electric Vehicles with Real World Driving Data - Part I: Model Structure and Validation”, *Ecological Economics*, 107, 411-421.
- Rahut, D.B. et al. (2017), “Factors Determining Household Use of Clean and Renewable Energy Sources for Lighting in Sub-Saharan Africa”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 661-672.
- Rai, V. & K. McAndrews (2012), “Decision-Making and Behavior Change in Residential Adopters of Solar PV”, *Proceedings of the World Renewable Energy Forum*.
- Rai, V. & S.A. Robinson (2015), “Agent-Based Modeling of Energy Technology Adoption: Empirical Integration of Social, Behavioral, Economic, and Environmental Factors”, *Environmental Modelling & Software*, 70, 163-177.
- Ramshani, M. et al. (2020), “An agent-based approach to study the diffusion rate and the effect of policies on joint placement of photovoltaic panels and green roof under climate change uncertainty”, *Applied Energy*, 261, 114402.
- Rogers, E. (2003), *Diffusion of Innovations* (3rd edition), USA: The Free Press.
- Schreinemachers, P. et al. (2009), “The Diffusion of Greenhouse Agriculture in Northern Thailand: Combining Econometrics and Agent-Based Modeling”, *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 57(4), 513-536.
- Shafiei, E. et al. (2012), “An Agent-Based Modeling Approach to Predict The Evolution of Market Share of Electric Vehicles: A Case Study From Iceland”, *Technological Forecasting and Social Change*, 79(9), 1638-1653.
- Sow, A. et al. (2019), “Economic Analysis of Residential Solar Photovoltaic Electricity Production in Canada”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 33, 83-94.
- Stavrakas, V. et al. (2019), “An Agent-Based Model to Simulate Technology Adoption Quantifying Behavioural Uncertainty of Consumers”, *Applied Energy*, 255, 113795.

- Sun, Y.W. et al. (2013), “GIS-Based Approach for Potential Analysis of Solar PV Generation at The Regional Scale: A Case Study of Fujian Province”, *Energy Policy*, 58, 248-259.
- Tian, S. & S. Chang (2020), “An agent-based model of household energy consumption”, *Journal of Cleaner Production*, 242, 118378.
- Tran, M. (2012), “Agent-Behaviour and Network Influence on Energy Innovation Diffusion”, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17(9), 3682-3695.
- TÜİK (2020), *Hanehalkı Bütçe İstatistikleri Mikro Veri Seti*, <<https://www.turkiye.gov.tr/tuik-mikro-veri-talep-uygulamas-3399>>, 02.03.2023.
- Van Benthem, A. et al. (2008), “Learning-By-Doing and The Optimal Solar Policy in California”, *The Energy Journal*, 29(3), 131-152.
- Van der Kam, M.J. et al. (2018), “Diffusion of Solar Photovoltaic Systems and Electric Vehicles among Dutch Consumers: Implications for The Energy Transition”, *Energy Research and Social Science*, 46, 68-85.
- Watts, D.J. & S.H. Strogatz (1998), “Collective dynamics of ‘small-world’ networks”, *Nature*, 393(6684), 440-442.
- Xu, X. et al. (2020), “A multi-agent reinforcement learning-based data-driven method for home energy management”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(4), 3201-3211.
- Zhai, P. & E.D. Williams (2012), “Analyzing Consumer Acceptance of Photovoltaics (PV) Using Fuzzy Logic Model”, *Renewable Energy*, 41, 350-357.
- Zhao, J. et al. (2011), “Hybrid Agent-Based Simulation for Policy Evaluation of Solar Power Generation Systems”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(10), 2189-2205.

EK-1

Tablo: 6

Çalışmada Kullanılan Değişkenler

Değişkenler	Singesi	Belirlenme Yöntemi
Zaman	t	Başlangıçta t=0, tmax=21
Adaptasyon kararı	$x_i(t)$	Hane PV yatırımı yaptıysa 1, yapmadıysa 0 değerini alır.
Kümülatif lojistik olasılık (Adaptasyon olasılığı)	$p_i(t)$	Logit modele göre hesaplanmaktadır.
Eşik değeri	τ_i	Yazar tarafından dolaylı kalibrasyon yöntemiyle belirlenmektedir.
Beklenen fayda	$U_i(t)$	$F\{U_{ekonomik,i}(t), U_{cevre,i}(t), U_{gelir,i}(t), U_{iletisim,i}(t), U_{sosyal,i}(t)\}$ Çalışmada hesaplanmamaktadır. Beş kısmi faydanın fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.
Ekonomik fayda	$U_{ekonomik,i}(t)$	Denklem 4’e göre hesaplanmaktadır.
Çevre faydası	$U_{cevre,i}(t)$	Denklem 20’ye göre hesaplanmaktadır.
Gelir faydası	$U_{gelir,i}(t)$	Denklem 23’e göre hesaplanmaktadır.
İletişim faydası	$U_{iletisim,i}(t)$	Denklem 26’ya göre hesaplanmaktadır.
Sosyal normlar	$U_{sosyal,i}(t)$	Denklem 28’e göre hesaplanmaktadır.
Geri ödeme süresi	gs	Denklem 6’ya göre hesaplanmaktadır.
Net bugünkü değeri	NBD	Denklem 6’ya göre hesaplanmaktadır.
PV yatırım maliyeti	I_0	Denklem 8’e göre hesaplanmaktadır.
PV yatırımdan beklenen getiri	$R(t)$	Denklem 12’ye göre hesaplanmaktadır.
İndirgeme oranı	$i(t)$	Denklem 7’ye göre hesaplanmaktadır.
PV yatırım öz kaynak oranı	E/I_0	Ortalama gelire sahip olanlar için %50, gelirle doğru orantılı olarak belirlenmektedir.
PV yatırım kredi oranı	K/I_0	Öz kaynak oranına göre belirlenmektedir.
1 yıl ve üzeri TL mevduat faiz oranı	K_E	2010-2020 yılı Merkez Bankası verisi 2021-2030 yılı için 2010-2020 yılları ortalama değeri
İhtiyaç kredisi faiz oranı	K_D	2010-2020 yılı Merkez Bankası verisi 2021-2030 yılı için 2010-2020 yılları ortalama değeri
Maksimum pik gücü	P_{max}	Denklem 9’a göre hesaplanmaktadır.
PV sistem kW başına fiyat	$p_{cr}(t)$	Denklem 10’a göre hesaplanmaktadır.
Normal koşullarda ısıma şiddeti	G	1 kW/m ² olarak alınmaktadır.

Kullanılabilir çatı alanı	A_{GP}	Müstakil konutlarda konut alanın 1/3’ü, Diğer konutlarda 1/5’i olarak hesaplanır ve birim kW için gerekli 8 m ² veya katlarına en yakın tamsayı olarak belirlenmektedir.
Çekirdek verimliliği	η_c	%16
PV sistem verimliliği	$\eta_{GP}(t)$	Başlangıçta %13, her yıl %1.5 arttığı kabul edilmektedir.
Toplam kurulu kapasite	TKK(t)	2010-2019 - Owid (our World in data) veri seti 2020-2024 - ESP tahminleri 2025-2030 - Yıllık %15 artış varsayılmaktadır.
Tecrübe parametresi	b	Denklem 11’e göre hesaplanmaktadır.
Öğrenme oranı	ÖO	2020 yılına kadar %20, 2030 yılına kadar %18 ve 2040 yılına kadar ise %16 olarak alınmaktadır.
Elektrik tasarruf getirisi	$R_{tasarruf}(t)$	Denklem 13 ve 14’e göre hesaplanmaktadır.
Kamu getirisi	$R_{kamu}(t)$	Denklem 16’ya göre hesaplanmaktadır.
İdari ödemeler	$R_{idari}(t)$	Denklem 17’ye göre hesaplanmaktadır.
Bakım ve ön yatırım maliyetleri	$R_{bakim}(t)$	Denklem 18’e göre hesaplanmaktadır.
Amortisman ödeneği	$R_{amortisman}(t)$	Denklem 19’a göre hesaplanmaktadır.
PV sisteminin ürettiği elektrik miktarı	$E_{GP}(t)$	Denklem 15’e göre hesaplanmaktadır.
PV sisteminin beklenen ömür boyu elektrik üretimi	$E_{GP,i}$	Denklem 21’e göre hesaplanmaktadır.
Yatırım esnasında diğer tüm PV sistemlerinin beklenen ömür boyu elektrik üretim ortalamasını	$E_{GP,toplam}$	Denklem 22’ye göre hesaplanmaktadır.
Öz tüketim oranı	$X_{oztuketim}$	%50
Elektriğin şebekeden satın alınma bedeli	$P_{elek,alis}$	EPDK yıllık ortalama fiyatlarına eşittir.
Tüketim fazlası elektriğin şebekeye satış bedeli	$P_{elek,satis}$	EPDK yıllık ortalama fiyatlarına eşittir.
Elektrik satış fiyatı artış oranı	$\mu_{elek,alis}$	2010-2020 yılları arasındaki ortalama artış oranı olarak hesaplanır (%10,67).
Elektrik alışı fiyatı artış oranı	$\mu_{elek,satis}$	2010-2020 yılları arasındaki ortalama artış oranı olarak hesaplanır (%10,67).
Güneş ışıının şiddeti	E_{gunes}	GEPA verisi - 1527 kWh/m ²
PV sistem aşınma oranı	γ	%0.40
Tarife garantili fiyat	P_{FTT}	13,3 cent/kWh (Yeni düzenlemeye göre tarife garantili fiyat, satın alınan birim elektrik fiyatına eşittir.)
Dağıtım bedeli	$\Phi_{dagitim}$	EPDK yıllık ortalama fiyatlarına eşittir. 2020 sonrası için %10.67 artış oranı kabul edilerek hesaplanmaktadır.
Ön yatırım maliyetleri oranı	$\beta_{onyatirim}$	Başlangıç maliyetlerinin %1.6’sı
Bakım maliyetleri oranı	β_{bakim}	Başlangıç maliyetlerinin %1’i ve yıllık %2 oranında artmaktadır.
Hane üyesi başına düşen yıllık kullanılabilir gelir	w_i	TÜİK veri setinden belirlenmektedir.
Toplumdaki hane sayısı	N	TÜİK veri setinden belirlenmektedir.
Hanehalkı sayısı	h_i	TÜİK veri setinden belirlenmektedir.
Toplumda hane üyesine düşen yıllık ortalama kullanılabilir gelir	w	TÜİK veri setinden belirlenmektedir.
Komşuluk matrisi	$A_{i,j}$	Küçük dünya ağları paket program ile yazar tarafından oluşturulmaktadır.
Komşu sayısı	k_i	Küçük dünya ağları paket program ile yazar tarafından oluşturulmaktadır.
Adaptasyon olasılığı sabiti	α	Logit tahminine göre belirlenmektedir.
Adaptasyon olasılığı katsayıları	ξ_i	Logit tahminine göre belirlenmektedir.