



Economic evaluation of the methods used to reduce energy consumption of a single detached house

Gül Nihal Güğül^{1*}, Merih Aydınalp Köksal²

¹Selçuk University, Faculty of Technology, Computer Engineering Department, Selçuklu, Konya, 42075, Turkey

²Hacettepe University, Department of Environmental Engineering, Beytepe, Ankara 06800, Turkey

Highlights:

- A verified hourly energy demand model has been developed with one-year monitored data
- Scenarios based structural retrofits and the use of renewable energy sources are applied to the developed model
- Applicability of scenarios are investigated by conducting economic analyses

Keywords:

- Building energy simulation,
- energy saving at homes,
- economic analysis,
- energy efficiency

Article Info:

Research Article
Received: 29.05.2017
Accepted: 21.08.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416483

Acknowledgement:

Correspondence:

Author: Gul Nihal Gugul
e-mail:
gul.gugul@selcuk.edu.tr
phone: +90 332 223 3330

Graphical/Tabular Abstract

About quarter of the dwellings built in Turkey in the last decade are single detached family homes that have considerably higher energy utilization per unit area than those of apartments. In this study, an hourly energy demand model for space heating of a single detached family home with a heating area of 500 m² in Ankara, Turkey is developed using ESP-r building energy simulation program.

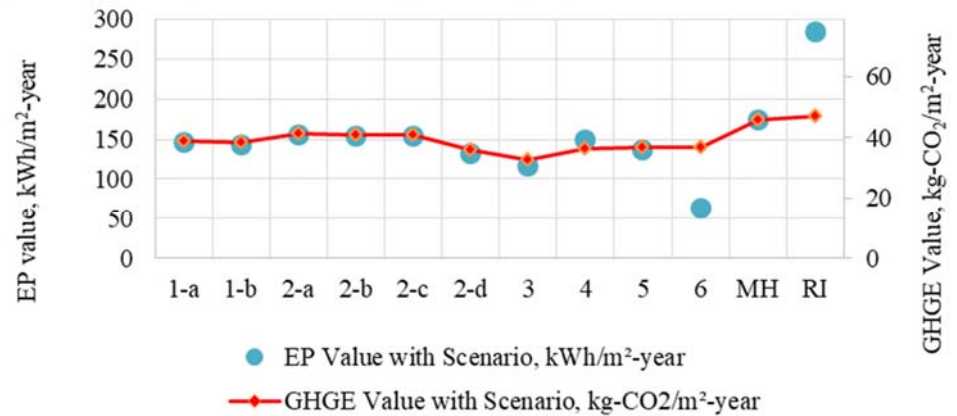


Figure A. Energy performance (EP) and greenhouse gas emissions (GHGE) of the home before and after the application of the scenarios, namely 1-a, 1-b, 2-a, 2-b, 2-c, 2-d, 3, 4, 5 and 6, and Model House (MH) and Reference Index (RI)

Purpose: The aim of this study is to investigate the ways of minimizing the energy demand of single detached residential homes located in Ankara.

Theory and Methods:

Hourly heating demand model of a single detached home is developed by using ESP-r software. Various scenarios based on structural retrofits and the use of renewable energy resources are applied to the developed model after calibrating it with annual monitored data. Energy savings obtained by the application of the scenarios and the pay back periods of each scenario are estimated and economically applicable structural retrofits and the use of renewable energy sources are determined.

Results:

According to the simulation results, the annual heating demand of the test home was estimated as 182 GJ/year. It was calculated that 91 GJ (50%) energy savings could be achieved by applying windows, wall and roof retrofits. Photovoltaic panel and ground sources heat pump scenarios are concluded to be not applicable due to their pay back periods longer than 25 years. The only applicable renewable scenario is found to be the use of solar domestic hot water system with 55% saving and eight-year payback period.

Conclusion:

In Ankara, it was concluded that 50% energy savings could be achieved with structural improvements even for a B energy class single family home, and supplying the domestic hot water demand of the home using solar systems was found to be the most suitable use of renewable energy sources.



Müstakil bir konutun enerji tüketiminin azaltılmasında kullanılan yöntemlerinin ekonomik değerlendirmesi

Gül Nihal Güğül^{1*}, Merih Aydınalp Köksal²

¹Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya, 42075, Türkiye

²Hacettepe Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara, 06800, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Bir yıllık ölçüm verileri ile doğrulanmış saatlik enerji talep modeli geliştirilmiştir
- Geliştirilen modele yapısal ve yenilenebilir enerji senaryoları uygulanmıştır
- Uygulanan senaryoların ekonomik analizi yapılarak uygulanabilirliği incelenmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.05.2017

Kabul: 21.08.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416483

Anahtar Kelimeler:

Bina enerji simülasyonu,
konutlarda enerji tasarrufu,
ekonomik analiz,
enerji verimliliği

ÖZET

Türkiye'nin 2015 yılında konut ve hizmetler sektöründen kaynaklanan enerji tüketimi nihai tüketimin %33'ünü oluşturarak sanayi sektörünün de önüne geçmiştir. Nüfus artışına paralel olarak ülkemizde konut sayısı hızla artmaktadır. Ülkemizde son on yılda inşa edilen konutların yaklaşık dörtte biri birim alan başına enerji kullanımı apartman dairelerine kıyasla daha fazla olan tekil aile konutlarından oluşmaktadır. Bu çalışmada, Ankara'da bulunan 500 m² ısıtma alanına sahip müstakil bir tekil aile konutunun ısıtma amaçlı saatlik enerji talep tahmin modeli ESP-r bina enerji simülasyon programı kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan modele farklı senaryoların uygulanması ile Ankara iklimi için enerji kullanımını en aza indireyecek yapısal malzemeler ve yenilenebilir enerji kaynakları tespit edilmiştir. Saatlik ısıtma tahmin modeli saatlik iklim verisi, binanın dış cephe yapı bileşenleri ve ısı kazanç verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan model bir yıl süresince ölçülen günlük ısıtma amaçlı doğalgaz tüketimi verisi ile kalibre edilmiştir. Modelin kalibrasyonu tamamlandıktan sonra, konutun fiziksel yapısında değişiklik içeren ve enerji talebini farklı kaynaklardan sağlamayı öngören çeşitli senaryolar modele uygulanmıştır. Son olarak senaryolar ile elde edilen enerji tasarrufu ve her senaryonun geri ödeme süreleri hesaplanarak uygulanabilir dış cephe yapısı ve yenilenebilir enerji kaynakları tespit edilmiştir.

Economic evaluation of the methods used to reduce energy consumption of a single detached house

H I G H L I G H T S

- A verified hourly energy demand model has been developed with one-year measurement data
- Structural and renewable energy scenarios are applied to the developed model
- Applicability of scenarios are investigated by conducting economic analysis

Article Info

Research Article

Received: 29.05.2017

Accepted: 21.08.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416483

Keywords:

Building energy simulation,
energy saving in housing,
economic analysis,
energy efficiency

ABSTRACT

Turkey's energy consumption from residential and services sector in 2015 has been passed the industrial sector, with a share of 33% of final consumption. Parallel to the increase in population, the number of dwellings in our country is increasing rapidly. About quarter of the dwellings built in our country in the last decade are single family homes that have considerably higher energy utilization per unit area than apartments. In this study, an hourly energy demand model for space heating of a single detached family housing with a heating area of 500 m² in Ankara was established by using ESP-r building energy simulation program. Then, the structural materials and renewable energy resources that reduce the energy utilization for space heating based on climate conditions of Ankara were determined by the application of different scenarios to the developed hourly model. The hourly heating estimate model was developed by using hourly climatic data, properties of building envelope and heat gain data. Then the model was calibrated with natural gas consumption data for heating which was monitored daily for one year. After the model was calibrated, various scenarios that suggest the changes in the physical structure of the housing and to use energy demand from different renewable sources were applied to the model. Finally, energy savings obtained by the scenarios and the pay back periods of each scenario are estimated and economically applicable external structure and renewable energy sources are.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: gul.gugul@selcuk.edu.tr, aydinalp@hacettepe.edu.tr / Tel: +90 332 223 3330

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Konutlarda kullanılan enerji miktarı, toplam enerji kullanımı içinde önemli bir paya sahiptir ve Türkiye’de toplam kullanımın yaklaşık %32,8’e ulaşarak sanayi sektörünün de önüne geçmiştir [1]. Türkiye’nin 1990-2013 yılları arasında sanayi sektöründen sonra en yüksek enerji kullanımını konut ve hizmetler sektöründen kaynaklanmakta ve nüfusun, dolayısıyla konut sayısının hızla artmasına paralel olarak bu kullanım sürekli artış göstermektedir [2]. 2016 yılında bir önceki yıla göre Türkiye’de ikamet amaçlı yeni yapılan toplam bina sayısında %5 artış görülmüştür [3]. Bu nedenle konutlarda yapılacak enerji tasarrufu büyük önem taşımaktadır.

Konutlarda enerji tasarrufu öncelikle konutun fiziksel yapısında yapılacak iyileştirmeler ile ısı kaybının azaltılması hedeflenerek elde edilebilir. Konutun fiziksel yapısında iyileştirmeler yapılması; bina zarfının iyileştirilmesi, yalıtım uygulanması ve pencerelerin cam tipinin, büyüklüğünün, yönlenmesinin iyileştirilmesi ile sağlanabilir. Daha sonra, konutun enerji talebinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla veya yeni teknolojilerle sağlanması ile enerji kullanımının azaltılması hedeflenebilir. Konutlarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile fosil yakıt tüketimi ve dolayısıyla çevreye verilen zarar da azalmaktadır. Buna ek olarak yenilenebilir enerji sisteminin Geri Ödeme Süresi (GÖS) tamamlandıktan sonra konut sahibinin enerjiyi daha düşük fiyata satın almasına ve konutun mali değerinin artmasına sebep olmaktadır. Ülkemizde toplam yıllık ortalama güneşlenme süresi 2.640 saat/m², ışınım şiddeti 1.311 kWh/yıl’dır. Yüzölçümü 779.452 km² olan Türkiye için güneş enerjisi miktarı yaklaşık olarak 14.000.000 kWh/yıldır ve bu miktar yıllık kişi başı elektrik tüketiminden yaklaşık 5.000 kat fazladır [4]. Bu sebeple ülkemizin coğrafi konumu nedeni ile Türkiye’de uygulanabilen en uygun yenilenebilir enerji kaynağı, elektrik üretimi ve sıcak su temini için güneş enerjisidir.

Bir binada enerji kullanımını azaltmanın yöntemlerinin belirlenebilmesi için ilk olarak binanın enerji kullanım miktarı bilinmelidir. Daha sonra binanın simülasyon programı kullanılarak enerji talebinin modeli oluşturulur. Oluşturulan model ölçülen enerji kullanımı ile kalibre edilir. Kalibre edilmiş modele uygulanan senaryolar ile enerji kullanımını azaltmanın yöntemleri ve bu yöntemlerden elde edilecek enerji tasarrufu hesaplanabilmektedir. Elde edilen enerji tasarrufu hesaplandıktan sonra ise önerilen senaryonun ekonomik analizi yapılarak uygulanabilirliği tespit edilmektedir. Buna ek olarak CO₂ salımındaki azalma da hesaplanmaktadır. Bir binanın bina enerji simülasyon programı ile enerji talebinin modellenmesi için ilk olarak binanın ısı kaybına uğradığı dış cephe bileşenleri ve mimari çizimi ile binanın geometrik modeli oluşturulur. Daha sonra, binanın bulunduğu fiziksel ortamın iklim verileri modele girilir. Son olarak, binanın havalandırma sistemi ve ısıtma/soğutma sistemi tanımlanarak ısıtma/soğutma amaçlı enerji kullanımı tahmin edilir.

Literatürde son yıllarda konutlarda ısıtma/soğutma amaçlı enerji talebinin bilgisayar yazılımı kullanılarak modellenmesi üzerinde birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda binalarda yapısal iyileştirmeler yapılması, binanın mimarisinin değiştirilmesi ve alternatif enerji kaynakları kullanılması ile elde edilecek enerji tasarrufu yöntemlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak yapılan çalışmalarda sistemin sağlayacağı enerji tasarrufu ve bu tasarruf ile elde edilen sera gazı salımındaki azalmalar hesaplanmıştır. Türkiye’de ise konutlarda enerji talebini modelleyen az sayıda çalışma mevcuttur.

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak yapılan çalışmalarda fotovoltaik sistemlerin binanın dış cephesine, pencerelerine veya çatısına yerleştirilmesi, ısı pompası, rüzgâr türbini ve güneş enerjisi ile çalışan sıcak su sistemleri kullanılması ile elde edilebilecek enerji tasarrufu simülasyon yazılımları ile hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalarda elde edilecek enerji tasarrufunun hesaplanması ile sera gazı salımındaki azalma da rahatlıkla hesaplanabilir. Sera gazı salımındaki azalmayı en çok etkileyen faktör sistemin kullandığı yakıt türüdür.

Enerji tasarruf potansiyelini ve sera gazı salımlarında oluşacak azalmayı hesaplamak amacı ile, toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP), yerden ısıtma, ısı geri kazanımlı havalandırma sistemi ve güneş panelinden oluşan bir sistemin modellendiği bir çalışmada ESP-r yazılımı kullanılmış ve sera gazı salımının yakıt türlerine bağlı olarak, %19 ile %90 arasında azalabileceği hesaplanmıştır [5]. Yine konutlarda yenilenebilir enerji teknolojileri ile elde edilecek enerji tasarrufunun ESP-r ile modellendiği başka bir çalışmada hibrid fotovoltaik/rüzgâr enerjisi sistemlerinin devreye alınması ile Quebec ve British Columbia eyaletlerindeki CO₂ salımlarında azalma olacağı hesaplanmıştır [6]. TRNSYS programı kullanılarak yapılan bir modelleme çalışmasında ise bir binanın dış duvarlarına şeffaf güneş enerjisi kolektörlerinin entegre edilmesi ile %30 enerji tasarrufu sağlayacağı hesaplanmıştır [7]. Fotovoltaik sistemin kullanılmasının modellendiği başka bir çalışmada Sefaira bina simülasyon programı kullanılarak Mumbai’de 3 katlı bir konukevi modellenmiş ve güneş paneli kullanılması durumunda elektrik tüketiminin %45 azalacağı görülmüştür [8]. Kanada konut stoku veri tabanı kullanılarak yapılan bir çalışmada, çatısı güney, güneydoğu veya güneybatıya bakan uygun konutlarda sıcak su için güneş enerjisi kullanılması durumunda Kanada’da bulunan konutların enerji kullanımının ve sera gazı salımının %2 azalacağı görülmüştür [9]. İngiltere’de yapılan bir araştırmada konutlarda çeşitli mikro üretim teknolojilerinin kullanılmasının ESP-r simülasyon programı kullanılarak incelenmesi ile tüm senaryoların %20 emisyon azaltma hedefinin karşılanabileceği ancak yalnızca bazı senaryoların ev sahibi için maddi olarak cazip olabileceği görülmüştür [10]. Konutların enerji taleplerini azaltmada fotovoltaik sistemlerin etkisinin incelendiği başka bir çalışmada HVAC sistemi ve güneş paneli bulunan Bükreş’teki bir pasif evin

enerji kullanımı ve üretimi EnergyPlus ile modellenmiştir. Bu çalışmada oluşturulan model gerçek enerji kullanımı verileri ile kalibre edilmiş, güneş panelinin geri ödeme süresi pasif ev için dokuz yıl olarak tahmin edilmiştir [11]. Mevcut Kanada evlerinde güneş yardımcı ısı pompalarının kullanımının tekno-ekonomik analizinin incelendiği bir çalışmada ise Rogers vd. tarafından yürütülen çalışmaya benzer şekilde, uygun evlerin hepsinin bu sistemleri alması durumunda emisyonların yaklaşık %20 azaltılabileceği görülmüştür [12].

Binalarda enerji tasarrufu elde etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile yapılan modelleme çalışmalarının yanı sıra; binanın tasarımının ve fiziksel yapısında kullanılan malzemelerin değiştirilmesi ile elde edilecek enerji tasarrufunu inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Binaların yapısında değişiklikler yapılması ile soğutma ve ısıtma amaçlı enerji kullanımını azaltmak mümkündür. Bir binada her yapının sebep olduğu ısı kaybı ayrı ayrı hesaplanarak bina enerji kullanımına en çok etki edecek iyileştirme yöntemi belirlenebilir.

Çatıdan kaynaklanan enerji kaybı, çatının ısı iletim katsayısı düşürülerek ve rengi değiştirilerek azaltılabilir. DOE-2.1E bina simülasyon programı kullanılarak yapılan bir çalışmada, çatının renginin değiştirilmesi ile soğutma yükünün ortalama %19 azalacağı hesaplanmıştır [13]. Çatı yalıtımının incelendiği başka bir çalışmada ise, TRNSYS programı kullanılmıştır. Bu çalışmada yalıtımın iyileştirilmesi ile soğutma yükünün %45, ısıtma yükünün ise %75 azalabileceği hesaplanmıştır [14]. Bina yapılarından kaynaklanan enerji kaybının ayrı ayrı hesaplandığı bir çalışmada HOT2000 yazılımı ile Yunanistan, Selanik’de bulunan bir konutun modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada, yıllık ısı kaybının %5’inin tavadan, %23’ünün duvarlardan, %4’ünün kapılardan, %11’inin zeminden, %16’sının pencerelerden ve kalanının bodrumdan kaynaklandığı hesaplanmıştır [15]. Çatılardan kaynaklanan enerji kaybı yeşil çatı uygulamaları ile de azaltılabilmektedir. Portland Eyalet Üniversitesi’nde yapılan bir çalışmada EnergyPlus bina enerji simülasyon programına yeşil çatının enerji kullanımına etkisini hesaplayan bir modül entegre edilmiştir. Bu modül ile çatıda yetiştirilecek farklı tipteki bitkilerin enerji kullanımına etkileri incelenebilmektedir [16]. Portekiz’de ESP-r programı kullanılarak yapılan bir çalışmada, daha çok trafikte yolların çizilmesi amacıyla kullanılan kalın ve rutubet geçirmeyen bir yapıya sahip olan soğuk boya olarak adlandırılan boyanın çatıda kullanılması ile toplam güneş yansıtmasının %50’den %92’ye çıkacağı hesaplanmıştır. Aynı zamanda bu uygulama ile yalıtımsız binalarda iç mekân sıcaklığını 2°C-4,7°C arasında, yalıtımlı yeni binalarda ise 1,2°C-3°C arasında azalacağı hesaplanmıştır. Buna ek olarak, binanın güneş enerjisini daha çok yansıtması sebebi ile ısıtma yükünde %30 artma olacağı tespit edilmiştir [17]. Binaların çatısına ek olarak dış duvarda iyileştirilme yapılması ile de enerji kullanımını azaltmak mümkündür. Binaların inşasında kullanılan malzemelerin iyileştirilmesinin enerji tasarrufuna etkisini inceleyen bir çalışmada ESP-r programı kullanılarak,

Norveç’te bulunan bir binanın doğu cephesine çift katlı duvar uygulanmasının ısıtma ihtiyacını %20 azaltacağı hesaplanmıştır [18]. Sıcak ve nemli iklim bölgelerinde konutların ısıtma ve soğutma yüküne en çok etki eden bina parametrelerinin tespit edildiği bir çalışmada EnergyPlus bina simülasyon programı kullanılarak binanın enerji kullanımını hesaplanmıştır. Konutun enerji ihtiyacının; bulunduğu kata, pencerelerin alanı ve pencerelerin ısı geçirgenlik katsayısına (U değeri, W/m²K) ve konutun mimarisine göre değiştiği sonucuna varılmıştır [19]. Dubai’de yapılan bir çalışmada ise Design Builder ve Energy Plus yazılımı kullanılarak duvar yalıtım stratejileri uygulanması durumunda %30’a kadar enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür [20]. Radiance programı kullanılarak yapılan bir çalışmada ise mikro yapıda delikli gölgeleme perdesinin soğutma yükünü %20-30 arasında azaltacağı hesaplanmıştır [21]. İsveç’te Gustafsson vd. tarafından yapılan bir başka çalışmada ise birden fazla ailenin yaşadığı bir konut için ısı geri kazanımlı HVAC sistemleri ile çeşitli dış cephe yenileme çalışmaları, TRNSYS simülasyon programı kullanılarak modellenmiştir [22]. DAYSIM ve EnergyPlus simülasyon yazılımları kullanılarak Danimarka’da yapılan bir çalışmada ise sıfır enerjili binaların güneş kazanımlarını kullanabilme kapasitesi konusunda önceki bulguları destekleyen sonuçlara ulaşılmıştır. Simülasyonlar Roma ve Kopenhag iklim verileri için çalıştırılmıştır. Her iki iklimde de, kuzey yönündeki odalarda bulunan pencerelerin g-değerinin (güneş iletkenlik değeri) artmasının, güney yönündeki odalarda g-değerinin artmasına kıyasla ısıtma talebini daha fazla azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca Kopenhag’daki kuzey yönelimli odalarda, camın U-değeri ve g-değeri eşit tasarruf potansiyeline sahipken Roma’da g-değerinin, tüm oda tipleri için U-değerinden önemli olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma, uygun çalışma ışığı ve havalandırma seçenekleri olan bir konut için hem kuzey hem de güney Avrupa ikliminde Dinamik gölgeleme aygıtı veya mekanik soğutma olmadan bile konfor sağlamanın mümkün olduğunu göstermiştir [23]. Romanya’da yapılan bir çalışmada ise dış cephesi cam olan ofis binalarında ısı borularının dış cephede yerleştirilmesi durumunda ısıtma amaçlı enerji kullanımında %43 tasarruf sağlanacağı görülmüştür [24].

Türkiye’de de konutların enerji kullanımını azaltma yöntemlerinin incelenmesi amacı ile yapılan bazı çalışmalar mevcuttur. EnergyPlus simülasyon programı ile İstanbul’da bulunan 12 katlı bir ofis binasının modellendiği bir çalışmada ofis binasında 3 hafta saatlik soğutma yükü, 3 hafta saatlik ısıtma yükü ölçülmüştür. Daha sonra modelin enerji kullanım tahmini ölçüm sonuçları ile kalibre edilmiş ve ortalama %3-5 fark olduğu görülmüştür. Oluşturulan model farklı iklim bölgeleri (Ankara, İstanbul, İzmir, Antalya) için de çalıştırılmıştır [25]. Denizli’de yapılan bir çalışmada ise bir evin saatlik ısıtma enerjisi tüketimini tahmin etmek için yapay sinir ağı (YSA) modeli geliştirilmiştir. YSA modeli, 2004-2007 yıllarının ısıtma amaçlı enerji kullanımı değerleri ile geliştirilmiş ve 2008 yılı ısıtma amaçlı enerji kullanımı değerleri ile kalibre edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ortalama-karekök hata,

regresyon katsayısı (R^2) ve ortalama mutlak yüzdelik hata değerleri sırasıyla modelin geliştirilmesi aşamasında 1,25, 0,99 ve 0,20 ve kalibrasyon aşamasında 1,21, 0,98 ve 0,20 olarak elde edilmiştir [26]. Pencere yapılarının ve büyüklüklerinin incelendiği bir çalışmada ise e-QUEST simülasyon programı kullanılarak İzmir’de bulunan bir otel binasının modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada yalıtımın ve pencere sistemlerinin iyileştirilmesi ve dışarıya bakan pencerelerin %50 küçültülmesi ile soğutma yükünün %56 azalacağı sonucuna varılmıştır [27]. Yine Türkiye’de farklı iklim bölgeleri için enerji ihtiyacının analiz edildiği bir çalışmada Özkan ve Onan tarafından pencere/duvar oranının ısıtma enerjisi talebi ve optimum izolasyon kalınlığı üzerindeki etkisi P1-P2 yöntemini kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada %20 pencere/duvar oranı olması ve optimum yalıtım bulunması durumunda, konutlarda CO₂ ve SO₂ emisyonlarında yaklaşık %55’lik bir azalma elde edilebileceği görülmüştür [28]. Trabzon iklimi için yapılan bir çalışmada ise farklı cam tiplerinin incelenmesi için TOKI tarafından inşa edilen iki tip konut Design-Builder v.1.8 enerji simülasyon programı ile modellenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre düşük yayımlı (low-e) cam ve akıllı camın, Trabzon için en verimli alternatif olduğu görülmüştür. Şeffaf çift cam ile karşılaştırıldığında, düşük yayımlı (low-e) cam ve akıllı camın %3 ve %2 ısıtma enerjisinden, %7 ve %9 soğutma enerjisinden tasarruf sağladığı görülmüştür [29]. Eskişehir’de yapılan bir çalışmada ise iki katlı bir konut DesignBuilder ve EnergyPlus yazılımı ile modellenmiş ve modele uygulanan dış cephe iyileştirme senaryoları ile ısıtma talebinde %37 azalma elde edilebileceği görülmüş ve geri ödeme süresi 10 yıldan fazla tahmin edilmiştir [30]. Konutlarda dış cephe malzemelerinin incelendiği başka bir çalışmada İstanbul’da bir evin IESVE yazılımını kullanarak oluşturulan modeline farklı senaryolar uygulanmıştır. Senaryoların sonuçlarına göre ısıtma ve soğutma talebinde %72, CO₂ salımında %62 azalma elde edilebileceği görülmüştür [31]. İzmir Kaynaklar mevkiinde yer alan müstakil bir konutun DesignBuilder ile modellendiği bir çalışmada, toplam bir yıllık süreye ait yerel iklim verileri ile binanın termal ve enerji performans göstergelerinin ölçülmüştür. 17 – 24 Ağustos 2009 tarihleri arasında hava kaynaklı ısı pompası kesintisiz olarak soğutma amaçlı çalıştırılmıştır. EnergyPlus programı ile modellenen ısı pompası 17 - 24 Ağustos 2009 tarihleri arasındaki ölçüm verileri ile kalibre edilmiştir. Isı pompası sisteminin gerektirdiği teknik özelliklerin DesignBuilder v.4.2’de yeterince tanımlanamamasından dolayı hata oranlarının kabul edilebilir seviyenin bir miktar dışında kaldığı görülmüş ve bu nedenle modelin yeterince kalibre edilemediği kabul edilmiştir [32]. Balıkesir Üniversitesi’nde yapılan bir çalışmada Ankara iklimi için yalıtım malzemesi ve hava boşluğunun birlikte kullanılması durumunda oluşacak optimum yalıtım kalınlığı (OYK), toplam maliyet, enerji tasarrufu ve geri ödeme süresi (GÖS) hesaplanmıştır. Yapılan analizlere göre, yakıt olarak doğalgaz kullanıldığında ve yalıtım malzemesine 4 mm hava boşluğu ilave edildiğinde OYK 9,2 cm’den 3,4 cm’e düşmekte, GÖS 1,509 yıldan 1,320 yıla düşmekte, toplam maliyet de %28 azalmakta, yıllık kazanç ise %96 artmaktadır. 2014 yılı nüfus

ve meskene ait elektrik abone sayıları baz alınarak yapılan hesaplamalara göre; doğalgaz kullanıldığında, yalıtımsız binaya göre, 4 cm XPS ve 4 cm hava boşluğu eklenmesi halinde CO₂ salımının %82 azalacağı, belirlenmiştir. Kömür kullanılması durumunda ise CO₂ ve SO₂ oranlarının %82 azalacağı tespit edilmiştir [33]. Türkiye’de yüksek katlı apartman bloklarını temsil eden referans bir binanın modellendiği ve oluşturulan modele 1300’den fazla senaryo uygulandığı bir çalışmada ise yüksek katlı apartmanlarda maliyet etkin enerji tasarrufu potansiyelinin % 70’in üzerinde olduğu görülmüştür [34]. Yine apartmanlar için yapılan bir çalışmada Türk apartmanlarında fiziksel iyileştirmenin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğini değerlendirmek için bir yöntem geliştirilmiştir [35]. Yazarlar daha sonra geliştirilen yöntemi İstanbul’daki altı apartmana uygulayıp ve çeşitli fiziksel iyileştirme seçeneklerini değerlendirdiler [36]. Binaların enerji kullanımına hane halkının davranışlarının etkisini inceleyen çalışmalar da yapılmıştır. Çankaya Üniversite’nde yapılan bir çalışmada konut kullanıcı davranışının enerji kullanımı üzerindeki etkisini ortaya çıkarabilmek amacı ile bir anket çalışması yapılmıştır. Anket sonucunda, kullanıcıların enerji kullanımını etkileyecek düzeydeki en belirgin davranışının havalandırma amaçlı pencere açıp/kapatma olduğu ortaya çıkmıştır. Yapay aydınlatma seçiminde, önemli bir bilinçlenmenin olduğu ve büyük bir oranda (%92,9) enerji tasarruflu ampul kullanıldığı belirlenmiş olup, enerji kullanımına karşı hassasiyet ve konfor memnuniyetinin eğitim seviyesi yükseldikçe arttığı ortaya çıkmıştır [37].

Türkiye’de konutların enerji kullanımını azaltma potansiyelinin incelenmesi üzerine yapılan bazı çalışmalar vardır. Fakat, bu çalışmadan önce Türkiye’de İç Anadolu Bölgesi iklimi şartlarında, mevcut müstakil bir konutun bir yıl süresince saatlik elektrik ve günlük doğalgaz tüketimi ölçülerek, konutun bina enerji simülasyon programı ortamında saatlik ısıtma talebi modelinin oluşturulmasına, oluşturulan model üzerine farklı senaryolar uygulanması ile elde edilebilecek enerji tasarruflarının hesaplanmasına dair bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın bu eksikliği gidermesi öngörülmektedir.

Bu çalışmada Ankara’da bulunan müstakil bir tekil aile konutunun ısıtma amaçlı enerji kullanımı ESP-r bina enerji simülasyon programı ile modellenmiş ve ısıtma amaçlı saatlik enerji talebi tahmin edilmiştir. İç Anadolu’da ısıtma talebinin yüksek olması sebebi ile Ankara’da doğalgazlı kombi ile ısıtılan bir konut model olarak seçilmiştir. Konutun bir yıl süresince saatlik elektrik ve günlük doğalgaz tüketimi ölçülmüştür. Meteoroloji Genel Müdürlüğü ve Beytepe Meteoroloji İstasyonu’ndan ölçüm yapılan yıla ait saatlik iklim verileri temin edilmiştir [38]. Ayrıca konutun iç ortamında insanlardan, aydınlatmadan ve elektrikli cihazlardan kaynaklanan ısı kazanç verilerini oluşturmak amacı ile konut sahibi ile anket yapılmıştır. Anket sırasında konutun mimari çizim ve yapısal özellikleri hakkında da bilgi alınmış, elde edilen veriler kullanılarak konutun modellenmesi yapılmıştır. Bu çalışmada konutun ısıtma amaçlı enerji talep modeli akademik açıdan yaygın olarak

kullanılmakta olan açık kodlu ESP-r yazılımı ile yapılmıştır [39]. Modeli kalibre etmek amacı ile yazılım tarafından tahmin edilen ısıtma talebi ölçülen ısıtma amaçlı doğalgaz tüketimi ile kıyaslanmıştır. Konutun enerji talebi belirlendikten sonra enerji kullanım sınıfı ve sera gazı salım sınıfı belirlenmiştir. Daha sonra, Ankara iklimine uygun olduğu düşünülen farklı senaryolar modele enerji kullanımını azaltmak amacı ile uygulanmış, senaryo uygulamaları ile elde edilen enerji tasarrufu ve buna bağlı CO₂ salım miktarlarındaki azalmalar hesaplanmıştır. Son olarak önerilen senaryoların uygulanabilirliğini tespit etmek amacı ile ekonomik analiz yapılarak geri ödeme süreleri hesaplanmıştır.

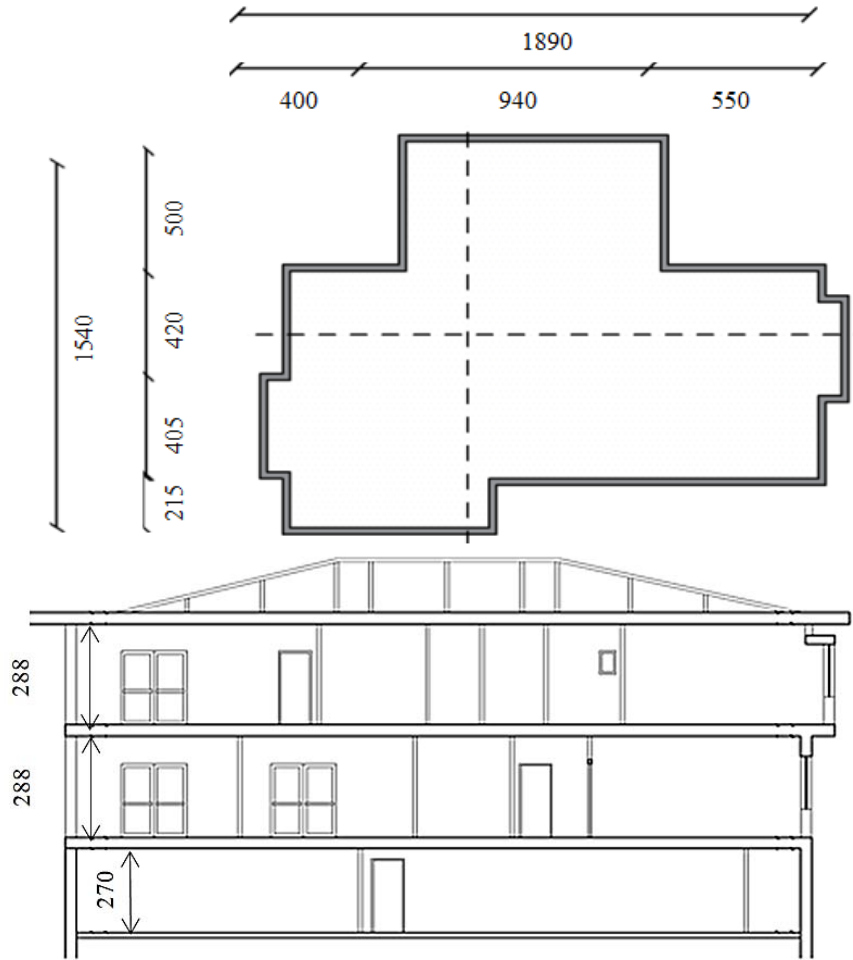
2. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ (METHODOLOGY OF THE STUDY)

Bu kısımda, konutun ısıtma amaçlı enerji talep modelinin oluşturulması ve modele senaryoların uygulanması sırasında izlenen yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır. Çalışmada ilk olarak model konut seçilmiştir. Daha sonra modelleme için gerekli veriler temin edilmiştir. Gerekli veriler temin edildikten sonra simülasyon programı ile model oluşturulmuş ve ölçüm verileri ile modelin kalibrasyonu

yapılmıştır. Kalibre edilmiş modele Ankara iklimi için uygun görülen senaryolar uygulanmıştır. Modele senaryoların uygulanmasından sonra ise, senaryolarda elde edilen enerji tasarrufları, CO₂ salımındaki azalmalar ve senaryoların ekonomik analizi sırasında izlenen yöntemler bu bölümde açıklanmıştır.

2.1. Model Konut (Sample Housing)

Bu çalışmada Ankara'da yeni yapılan müstakil konut sayısının hızla artması ve müstakil konutlarda birim alan başına enerji kullanımının apartmanlara kıyasla daha fazla olması sebebi ile Ankara Beytepe'de bulunan tekil müstakil bir konut model olarak seçilmiştir. Konutta yedi kişi ikamet etmektedir. Konutun ısıtılması, sıcak su ihtiyacının karşılanması ve yemek pişirme amaçlı enerji ihtiyacı doğalgaz ile sağlanmaktadır. Yapımı 2007 yılında tamamlanan konutun 500 m²'si ısıtılan alan olmakla birlikte toplamda 700 m² büyüklüğe sahiptir. Konutun duvar alanı 367 m², oturma alanı 228 m², pencere alanı ise 73 m²'dir. Bu durumda konutun pencere duvar oranı %20'dir. Konutun mimari çizimi Şekil 1'de, konutta dış ortama bakan yapılarda kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Model konutun kat planı ve kesit alanı (Floor plan and cross-sectional area of the model house)

Tablo 1. Konutun dış ortama bakan yapılarının ve malzemelerinin özellikleri
(The characteristics of the construction and materials of the house facing the outside environment)

Yapı adı	Malzeme adı	Kalınlık (mm)	Isıl İletkenlik, W/m-K	Termal Direnç, R_i (m^2K/W)	Isı geçirgenlik katsayısı, U, (W/m^2K)
Dış duvar	Çimento Harcı	30	1,40	0,021	0,411
	Yatay Delikli Tuğla	85	0,44	0,193	
	Polistren-partiküler köpük	80	0,04	2	
	Yatay Delikli Tuğla	85	0,44	0,193	
	Kireç çimento harcı	20	0,80	0,025	
	Toplam			2,432	
Dış duvar kolon	Anorganik asıllı hafif agregalardan yapılmış sıva harçları	30	0,35	0,085	0,527
	Normal beton (TS 500)	250	2,10	0,119	
	Yüzeyi Pürüzlü ve kanallı levha	50	0,03	1,666	
	Kireç çimento harcı	20	0,80	0,025	
	Toplam			1,895	
Çatı zemin	Normal beton (TS 500)	320	2,10	0,152	5,63
	Kireç çimento harcı	20	0,8	0,025	
	Toplam			0,177	
Çatı tavan	Normal beton	250	1,28	0,195	4,53
	Kireç çimento harcı	20	0,80	0,025	
	Toplam			0,220	
Cam	Cam	6	0,76	0,007	63,33
	Hava boşluğu	12	0		
	Cam	6	0,76	0,007	
	Toplam			0,015	
Çerçeve	Ahşap	50	0,16	0,312	3,2
Kapı	Ahşap	25	0,19	0,131	7,6
Zemin	Normal beton (TS 500)	150	2,10	0,071	0,365
	Kristal yapılı püskürük ve metamorfik taşlar	100	2,90	0,034	
	Cam tülü armatürlü polimer bitümlü membran	2	0,19	0,010	
	Polistren-partiküler köpük	100	0,04	2,500	
	Polimer bitümlü su yalıtım örtüleri	2	0,19	0,010	
	Çimento	150	1,40	0,107	
	Toplam			2,733	
Isıtıl-mayan ortam tavanı	Çimento Harcı	30	1,40	0,021	0,536
	Yüzeyi Pürüzlü ve kanallı levha	50	0,03	1,666	
	Normal beton (TS 500)	150	2,10	0,142	
	Normal beton (TS 500)	150	2,10	0,142	
	Çimento	50	1,40	0,035	
	Toplam			1,865	

2.2. Verilerin Temin Edilmesi (Data Collection)

Konutun saatlik ısıtma amaçlı enerji talep modelinin oluşturulması için öncelikle konutun ısı kaybeden yüzey alanında bulunan yapılarının özellikleri, konutun mimari çizimi ve iç ortamda bulunan enerji kazanç bilgileri konut sahibinden temin edilmiştir. Aydınlatmadan kaynaklanan ısı kazanç listesi; konutun odalarında bulunan lambaların güç değerleri, lambaların kullanım süreleri ve saatleri hakkında bilgi temin edilmesi ile oluşturulmuştur. Hane halkından kaynaklanan ısı kazanç listesi; konutta belirli saat aralıklarında odalarda bulunan kişi sayısı ve bu kişiler

tarafından yapılan aktiviteler hakkında bilgi temin edilmesi ile oluşturulmuştur. Hane halkından kaynaklanan ısı kazancı kişinin yaptığı fiziksel aktiviteye göre farklılık göstermektedir. Bu konuda birçok referans değer vardır. Bu çalışmada aktivitelerinden kaynaklanan ısı kazanç değerleri ASHRAE 2007 kataloğu referans alınarak hesaplanmıştır [40]. Elektrikli cihazlardan kaynaklanan ısı kazanç listesi ise; konutta bulunan elektrikli cihazların tespiti ve kullanım süreleri hakkında bilgi temin edilmesi ile oluşturulmuştur. Konutun bulunduğu Ankara iline ait 2013 yılı saatlik iklim verileri iki farklı istasyondan temin edilmiştir [38, 41]. Buna ek olarak, senaryoların uygulanması sırasında ABDEB web

sitesinden temin edilen Ankara için 18 yıla ait iklim verisi kullanılarak oluşturulan normal iklim verileri kullanılmıştır [42]. Konutta doğalgaz tüketimi günlük olarak 2013 yılı süresince ölçülmüştür. Ölçülen doğalgaz (DG) tüketiminin ısıtma, yemek pişirme ve sıcak su temin etme amacı ile kullanılan toplam doğalgaz miktarı olması sebebi ile ölçülen doğalgaz tüketim verisi içinde ısıtma amaçlı kullanılan doğalgaz tüketimi hesaplanmıştır. Günlük ısıtma amaçlı doğalgaz tüketim verisi bina enerji simülasyon programında oluşturulan modeli kalibre etmek amacı ile kullanılmıştır. Modelin kalibrasyonu tamamlandıktan sonra binalarda enerji performansı yönetmeliğinde yer alan Birincil Enerjiye Göre Referans Göstergesi ve Sera Gazı Referans Göstergesi kullanılarak binanın enerji ve sera gazı salım sınıfı belirlenmiştir. Konutun saatlik elektrik tüketimi uzaktan sayaç okuma sistemi ile doğalgaz ölçümü yapılan aynı yıl süresince güneş paneli senaryosunda kullanılmak üzere okunmuştur.

Konutun sıcak su tüketimi ve güneş enerjisi sistemi senaryosu hesaplamalarında günlük sıcak su tüketim miktarının yıl boyunca sabit olduğu ve şebeke suyunun sıcaklığı yerin 100 cm altında toprak sıcaklığı ile aynı olduğu varsayılmıştır. Güneş enerjisi ile sıcak su temin etme senaryosu için konutta tüketilen sıcak su miktarı bilgisine ihtiyaç vardır. Konutta sıcak su temin etmek için tüketilen doğalgaz miktarı bilinmektedir. Sıcak su temini için tüketilen doğalgaz miktarı verisi kullanılarak, sıcak su temini için tüketilen enerji miktarı belirlenmiştir. Daha sonra, bu miktarda enerji ile günlük kaç kg sıcak su tüketildiği hesaplanmıştır. Günlük tüketilen sıcak su miktarının hesaplanabilmesi için şebekeden alınan suyun sıcaklığının bilinmesi gerekmektedir. Yerin 100 cm altında 2013 yılına ait saatlik toprak sıcaklığı verisi Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir [43]. Temin edilen saatlik veri kullanılarak günlük ortalama şebeke suyu sıcaklığı hesaplanmıştır. Daha sonra, konutta günlük tüketilen sıcak suyun miktarı Eş.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$m_{ss} = \frac{Q_{ss}}{c \times \Delta T} \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

m_{ss} :Tüketilen günlük sıcak su miktarı, kg/gün
 ΔT :Sıcak suyun derecesi - Şebeke suyu sıcaklığı, °C
 c :Suyun öz ısısı, kWh/kg-°C

Konutta tüketilen sıcak su miktarı, sıcak su talebi için harcanan DG miktarı ve güneş enerjisi sisteminin karşıladığı sıcak su talebi ile ilgili detaylı hesaplamalar Gugul G. N. ve Aydınalp Köksal M. [44] tarafından yapılan çalışmada detaylı açıklanmıştır.

Senaryolar ile elde edilen enerji tasarruflarından kaynaklanan CO₂ salımındaki azalmayı hesaplayabilmek için doğalgaz salım faktörü (DSF) ve elektrik için salım faktörü (ESF) kullanılmıştır [45-47]. CO₂ salımındaki azalma miktarı enerji tasarrufu ve salım faktörü kullanılarak Eş.2 ile hesaplanmıştır.

$$CSA_i = ET_i \times SF_e \quad (2)$$

Bu eşitlikte;

CSA_i :CO₂ salımındaki azalma, kg/yıl
 ET :Enerji tasarrufu, m³/yıl, kWh/yıl
 i :Senaryo tipi
 SF :Salım faktörü, kg-CO₂/m³,kg-CO₂/kWh
 e :Enerji tipi, Elektrik-doğalgaz

Ayrıca öngörülen senaryolar için ilgili firmalardan teknik özellik ve maliyet verileri temin edilmiştir. Senaryoların ekonomik analizi sırasında ise yatırım maliyet verileri, elektrik tarifesi, doğalgaz tarifesi ve faiz verileri kullanılmıştır.

2.3. Modelin Oluşturulması (Development of the Model)

Bölüm 2.2'de tespit edilen veriler kullanılarak konutun ESP-r bina enerji simülasyon programı ile ısıtma amaçlı enerji talep tahmini modeli oluşturulmuştur. ESP-r, İngiltere'de Strathclyde Üniversitesi bünyesinde bulunan Energy Systems Research Unit tarafından geliştirilmiş açık kodlu enerji kullanımı modelleme yazılımıdır [39]. ESP-r'ın seçilme nedeni bu yazılımın binaların enerji talebini simüle edebilen, en gelişmiş bilgisayar kodlarından ve modelleme araçlarından birisi olmasıdır. ESP-r enerji talebi ve ısıtma havalandırma hava şartlandırma eşitliklerini anlık çözebilme kabiliyetine sahiptir. Buna ek olarak ESP-r'ın yaklaşık 20 yıldır kullanılıyor olması teknik riskini düşürmekte ve yazılımı daha istikrarlı kılmaktadır [48]. Yazılımın bu özelliklerinden dolayı bu çalışmada ESP-r bina enerji kullanımının modellenmesi aracı olarak seçilmiştir. Porto Üniversitesi'nde yapılan bina enerji simülasyon yazılımlarının karşılaştırıldığı bir çalışmada EnergyPlus, ESP-r, IDA ICE, IES-VE ve TRNSYS yazılımlarının en iyi, dolayısıyla en kompleks ve deneyim gerektiren yazılımlar olduğu sonucuna varılmıştır [49]. The Pontificia Universidad Católica de Chile'de yine bina enerji simülasyon programlarının karşılaştırıldığı bir çalışmada ise ESP-r'ın, EnergyPlus'a kıyasla daha az kullanıcı dostu fakat daha fazla araştırma odaklı bir bina enerji performans simülasyon programı olduğu sonucuna varılmıştır [50]. Bu sebepler bu çalışmada ESP-r programının tercih edilmesinde rol oynamıştır.

Konutun ESP-r ortamında 2013 yılı iklim verisi ile ısıtma amaçlı enerji kullanım modeli oluşturulduktan sonra, oluşturulan model 2013 yılı süresince günlük olarak ölçülen ısıtma amaçlı DG tüketim verisi ile kalibre edilmiştir. Ölçülen doğalgaz (DG) tüketiminin ısıtma, yemek pişirme ve sıcak su temin etme amacı ile kullanılmasına sebebi ile ölçülen doğalgaz tüketim verisinde ısıtma amaçlı kullanılan doğalgaz tüketimi hesaplanmıştır. Konutun havalandırma miktarı, bina enerji simülasyon programı ile tahmin edilen ısıtma talebinin ölçülen ısıtma amaçlı doğalgaz tüketim verileri ile karşılaştırılması ile belirlenmiştir. Gugul G. N. [51] konutun modelinin oluşturulması ve yapılan hesaplamalar hakkında detaylı bilgiyi içermektedir.

2.4. Senaryoların Uygulanması (Application of the Scenarios)

Konutlarda enerji tasarruf yöntemlerinin araştırıldığı çalışmaların incelenmesi sonucunda Ankara iklimine uygun olan enerji kullanımını azaltma yöntemleri gözden geçirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda konutun fiziksel yapısında iyileştirmeler yapılmasını öngören senaryolar Tablo 2’de listelenmiştir. Konutun enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanmasını öngören senaryolar ise Tablo 3’de görülmektedir.

2.5. Ekonomik Analiz (Economic Analysis)

Senaryoların ekonomik olarak uygulanabilirliğinin tespit edilmesi amacı ile her bir senaryonun Geri Ödeme Süresi (GÖS) hesaplanmıştır. İlk olarak mevcut sistemlerin ve kullanılması öngörülen sistemlerin maliyet hesabı ilgili firmalardan talep edilmiştir. Konutta enerji kullanım ölçümlerinin 2013 yılının sonunda tamamlanması sebebi ile firmalardan fiyat teklifleri 2014 yılının başında alınmıştır. Buna ek olarak GÖS’nin hesaplanması aşamasında gelecek yılların elektrik ve doğalgaz fiyat bilgisi gerekmektedir. Son sekiz yıla ait elektrik verisi TEDAS-Elektrik Tarifesi [53]

veri tabanından ve son on yıla ait doğalgaz verisi Başkent Doğalgaz-Doğalgaz Tarifesi [54] veri tabanından temin edilmiştir. Daha sonra veri tabanlarından temin edilen konutlara satış fiyatı verilerinin eğim çizgisi denklemi kullanılarak önümüzdeki yıllara ait elektrik ve doğalgaz fiyat verisi tahmini yapılmıştır.

2.5.1. Elektrik tarifesi (Electricity tariff)

Gelecek yılların elektrik fiyat bilgisini tahmin etmek amacı ile son sekiz yıla ait konutlara elektrik satış fiyatı TEDAS-Elektrik Tarifesi [53] veri tabanından temin edilmiştir. Konutlara satış fiyatı verilerinin eğim çizgisi denkleminin oluşturulması ile önümüzdeki yıllara ait elektrik fiyat verisi tahmini yapılmıştır. Farklı tarih aralığındaki elektrik verileri kullanılarak her aralık için eğri denklemi oluşturulmuş ve bu denklemler kullanılarak gelecek yıllara ait elektrik fiyatı tahmin edilmiştir. Farklı tarih aralıkları için elde edilen elektrik fiyat tahmin denklemleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4’de “Eşitlik” sütununda görülen eşitliklerde x hesaplamının yapıldığı güne ait tarihi, y ise hesaplamının yapıldığı gün için elektrik fiyatı tahmin sonucunu

Tablo 2. Konutun enerji kullanımını azaltmak için uygulanan yapısal iyileştirme senaryoları
(Construction improvement scenarios applied to reduce the energy utilization of the housing)

Senaryo	Senaryo Kodu	Mevcut Durum	Uygulanacak Durum
Pencere Camı	S.1-a	12 mm hava boşluklu çift cam	Argon ile doldurulmuş, 16 mm boşluklu, şeffaf çift cam
	S.1-b		Argon ile doldurulmuş, 16 mm boşluklu, şeffaf üç kat cam
Yalıtım	S.2-a	Dış duvarda 80 mm yalıtım ($k=0,04$ W/mK) bulunmaktadır	90 mm polistren köpük yalıtım ($k=0,04$ W/mK)
	S.2-b		80 mm Foamboard 2500 P (XPS) yalıtım ($k=0,035$ W/mK)
	S.2-c		90 mm yalıtım ($k=0,035$ W/mK)
	S.2-d	Çatıda yalıtım bulunmamaktadır	100 mm XPS yalıtım ($k=0,035$ W/mK) [52]
Cam ve Yalıtım	S.3	12 mm hava boşluklu çift cam Dış duvarda 80 mm yalıtım Çatıda yalıtım bulunmamaktadır	Argon ile doldurulmuş, 16 mm boşluklu, şeffaf üç kat cam Dış duvara 90 mm ($k=0,035$ W/mK) yalıtım Çatıya 100 mm ($k=0,035$ W/mK) yalıtım [52]

Tablo 3. Konutun enerji kullanımını azaltmak için uygulanan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması senaryoları
(Utilization of renewable energy resources scenarios applied to reduce the energy utilization of the housing)

Senaryo	Senaryo Kodu	Mevcut Durum	Uygulanacak Durum
Güneş Paneli (GP)	S.4	Konutta GP bulunmamakta	Konutun güneydoğu ve güneybatıya bakan çatısına GP eklenmesi
Güneş Enerjisi ile Sıcak Su (GES)	S.5	Sıcak su doğalgazlı kombi ile temin edilmekte	Konuta güneş enerjisi sisteminin eklenmesi
Toprak Kaynaklı Isı Pompası (TKIP)	S.6	Isıtma ihtiyacı doğalgazlı kombi ile sağlamakta	Konutun ısıtma ihtiyacını karşılamak için TKIP eklenmesi

vermektedir. Tablo 4’de bulunan denklemlerin kullanılması ile gelecek yıllar için yapılan elektrik fiyat tahmini eğrileri tahminin yapıldığı her tarih aralığı için Şekil 2’de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

Diğer iki tahminin ortasında olması sebebi ile senaryoların GÖS hesaplanırken, E2 kodlu fiyat tahmini kullanılmıştır.

2.5.2. Doğalgaz tarifesi (Natural gas tariff)

Gelecek yılların doğalgaz fiyat bilgisini tahmin etmek amacı ile son on yıla ait doğalgazın konutlara satış fiyatı verisi Başkent Doğalgaz-Doğalgaz Tarifesi [54] veri tabanından temin edilmiştir. Konutlara satış fiyatı verilerinin eğim çizgisi denklemi kullanılarak ise önümüzdeki yıllara ait doğalgaz fiyat verisi tahmini yapılmıştır. Farklı tarih aralığındaki doğalgaz verileri kullanılarak her aralık için eğri denklemi oluşturulmuş ve bu denklemler kullanılarak gelecek yıllara ait doğalgaz fiyatı tahmin edilmiştir. Farklı tarih aralıkları için elde edilen doğalgaz fiyat tahmin denklemleri Tablo 5’de verilmiştir. Tablo 5’de “Eşitlik”

sütununda görülen eşitliklerde x hesaplamasının yapıldığı güne ait tarihi, y ise hesaplamasının yapıldığı gün için doğalgaz fiyatı tahmin sonucunu vermektedir. Tablo 5’de bulunan denklemlerin kullanılması ile gelecek yıllar için yapılan doğalgaz fiyat tahmini eğrileri Şekil 3’de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

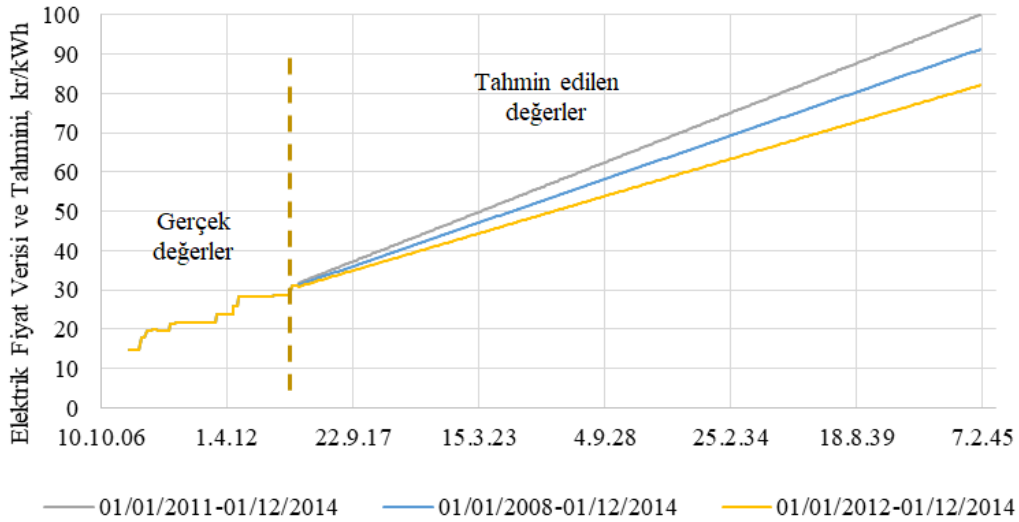
Diğer iki tahminin ortasında olması sebebi ile senaryoların GÖS hesaplanırken, E2 ve D2 kodlu fiyat tahminleri kullanılmıştır.

2.5.3. Yapısal iyileştirme senaryolarının ekonomik analizi (Economic analysis of construction improvement based scenarios)

Yapısal iyileştirilmenin öngörüldüğü senaryolarda, ekonomik analiz konutun orijinal halinde kullanılan malzemenin 2014 yılı maliyeti ile senaryoda kullanılan öngörülen malzemelerin fiyatı ve elde edilen enerji tasarrufu göz önüne alınarak yapılmıştır. Uygulanması öngörülen senaryolardan konutta hâlihazırda bulunan senaryolar için (pencere camı ve dış duvar yalıtımı), öngörülen senaryoların

Tablo 4. Farklı tarih aralıkları için elektrik fiyat tahmin denklemleri (Electricity price estimation equations based on various time periods)

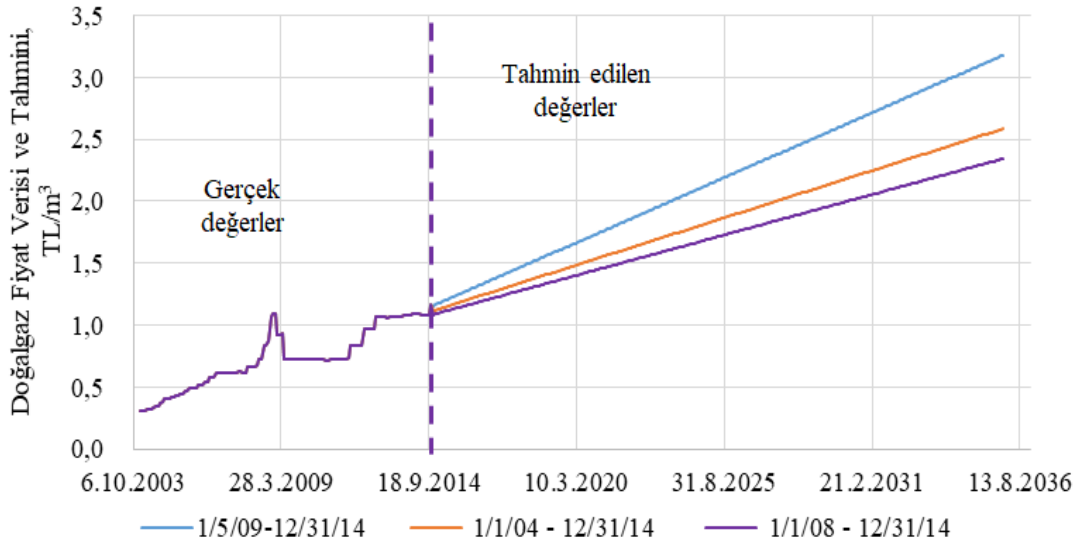
Tahmin No	Elektrik Fiyat Tahmini İçin Kullanılan Veri Aralığı	Eşitlik
E1	01.01.2011-01.04.2015	$y = 0,0063x - 2$
E2	01.01.2008-01.14.2015	$y = 0,0055x - 2$
E3	01.01.2012-01.04.2015	$y = 0,0047x - 1$



Şekil 2. Elektrik fiyat verisi ve tahmini (Electricity price data and forecast)

Tablo 5. Farklı tarih aralıkları için doğalgaz fiyat tahmin denklemleri (Natural gas price estimation equations based on various time periods)

Tahmin No	Doğalgaz Fiyat Tahmini İçin Kullanılan Veri Aralığı	Eşitlik
D1	01.05.09 - 01.01.15	$y=0,00026x - 9,8$
D2	01.01.04 - 01.01.15	$y=0,00019x - 6,9$
D3	01.01.08- 01.01.15	$y=0,00016x - 5,7$



Şekil 3. Doğalgaz fiyat verisi ve tahmini (Natural gas price data and forecast)

maliyetinden konutta bulunan mevcut yapının maliyeti çıkarılarak senaryo maliyeti elde edilmiştir. GÖS'nin hesaplanması için öncelikle yıllık Net Nakit Akışı (NNA) hesaplanmalıdır. Yıllık NNA Eş.3 ile hesaplanmıştır.

$$NNA_j^{yi} = OYYET_j - SYET_j \quad (3)$$

Bu eşitlikte;

NNA_j^{yi} :Belirli bir yılda yapısal iyileştirme senaryosu için net nakit akışı, TL/yıl

j :Yıl

yi :Yapısal iyileştirme senaryosu

OYYET:Orijinal yapı ile yıllık enerji kullanım maliyeti, TL/yıl

SYET :Senaryolu yapı ile yıllık enerji kullanım maliyeti, TL/yıl

Faiz değerinin yıllar bazında sabit kalması durumunda [55] Net Bugünkü Değeri (NBD) Eş.4 ile hesaplanabilir.

$$NBD = \frac{NNA_1}{(1+nf)} + \frac{NNA_2}{(1+nf)^2} \dots + \frac{NNA_N}{(1+nf)^N} = \sum_{j=1}^N \frac{NNA_j}{(1+nf)^j} \quad (4)$$

Bu eşitlikte;

NBD :Net Bugünkü Değer, TL

NNA_j :Belirli bir yılda net nakit akışı, TL/yıl

nf :Nominal faiz

j :Yıl

N :Sistemin işletim süresi, yıl

NBD'nin pozitif değer almasını sağlayan en düşük j değeri, Geri Ödeme Süresi (GÖS) olarak tanımlanmıştır [55].

2.5.4. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması senaryolarının ekonomik analizi

(Economic analysis of utilization of renewable energy resources based scenarios)

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının öngörüldüğü senaryolarda maliyet çözümlemesi; yatırım maliyeti, güç üretim maliyeti ve GÖS olmak üzere üç başlık altında incelenmiştir. Yatırım maliyetinin hesaplanmasında güneş paneli (GP), güneş enerjisi ile sıcak su temini (GES) ve toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP) sistemlerine ait ilgili firmalardan fiyat teklifi alınmıştır.

NBD, sistemin kendisini ne kadar sürede geri ödeyeceğinin hesaplanmasında kullanılan başlıca ölçüttür. Yatırım maliyetinden, sistemin NNA'ı her işletim dönemi için çıkartılarak NBD Eş.4 ile hesaplanabilir. NBD'in pozitif olduğu durumda sistem kendisini geri ödemiştir. İlgilenilen yıl (j) için NNA, sistemin ürettiği enerji sayesinde kazanılan para ile sistem için harcanan paradan artı kalan miktardır.

Güneş paneli sistemi için NNA Eş.5 ile hesaplanabilir.

$$NNA_j^{GP} = NG_j^{GP} - NC_j^{GP} = (f_{e,j}(E_{gp} - E_{gpk})) \quad (5)$$

Bu eşitlikte;

NNA_j^{GP} :Belirli bir yılda GP senaryosu için net nakit akışı, TL/yıl

NG_j^{GP} :Belirli bir yılda GP senaryosu için nakit girişi, TL/yıl

NC_j^{GP} :Belirli bir yılda GP senaryosu için nakit çıkışı, TL/yıl

j :Yıl

gp :Güneş paneli
 f_c :Elektrik satış fiyatı, TL/kWh
 E_{gp} :GP tarafından üretilen elektrik, kWh/yıl
 E_{gpk} :GP'nin kendisi için kullandığı elektrik miktarı, kWh/yıl

TKIP için NNA Eş.6 ile hesaplanabilir.

$$NNA_j^{TKIP} = NG_j^{TKIP} - N\dot{C}_j^{TKIP} = (E_K \times f_{dg,j}) - (E_{TKIP,k} \times f_{e,j}) \quad (6)$$

Bu eşitlikte;

NNA_j^{TKIP} :Belirli bir yılda TKIP senaryosu için net nakit akışı, TL/yıl
 NG_j^{TKIP} :Belirli bir yılda TKIP senaryosu için nakit girişi, TL/yıl
 $N\dot{C}_j^{TKIP}$:Belirli bir yılda TKIP senaryosu için nakit çıkışı, TL/yıl
 j :Yıl
 E_K :Konutta TKIP kullanmadan önce, konut kombi ile ısıtılırken ısıtma için enerji talebi, m³/yıl
 f_{dg} :Doğalgaz satış fiyatı, TL/m³
 $E_{TKIP,k}$:TKIP'nin kendisi için kullandığı elektrik, kWh/yıl
 f_c :Elektrik satış fiyatı, TL/kWh

Sıcak su üreten güneş enerjisi sistemi için NNA Eş.7 ile hesaplanabilir.

$$NNA_j^{GES} = NG_j^{GES} - N\dot{C}_j^{GES} = (SSTD \times f_{dg,j}) - (SIM_j^{GES} + (DG_{gey} \times f_{dg,j})) \quad (7)$$

Bu eşitlikte;

NNA_j^{GES} :Belirli bir yılda GES Senaryosu için net nakit akışı, TL/yıl
 NG_j^{GES} :Belirli bir yılda GES Senaryosu için nakit girişi, TL/yıl
 $N\dot{C}_j^{GES}$:Belirli bir yılda GES Senaryosu için nakit çıkışı, TL/yıl
 j :Yıl

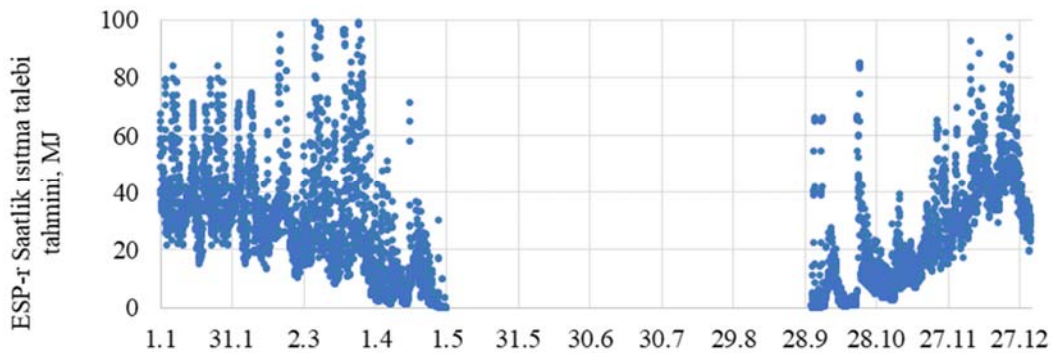
f_{dg} :Doğalgaz satış fiyatı, TL/m³
 $SSTD$:Mevcut durumda sıcak su için tüketilen doğalgaz miktarı, m³/yıl
 SIM_j^{GES} :Sistem İşletim maliyeti, TL/yıl
 DG_{gey} :Güneş enerjisi yetersiz iken sıcak su temini için doğalgaz tüketimi, m³/yıl

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

2013 yılı saatlik iklim verileri kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarına göre ESP-r'nin yıllık ısıtma talebi tahmini 141 GJ/yıl olarak hesaplanmıştır. 2013 yılı iklim verisi ile ESP-r simülasyon sonuçlarından elde edilen saatlik ısıtma amaçlı enerji kullanımı Şekil 4'de gösterilmiştir.

Şekil 4'de görüldüğü gibi ısıtma sistemi 1 Mayıs - 1 Ekim tarihleri arasında çalıştırılmamaktadır. Isıtma sistemi kış mevsiminde Aralık, Ocak, Şubat; ilkbahar mevsiminde Mart, Nisan; sonbahar mevsiminde ise Ekim, Kasım aylarında çalıştırılmaktadır. 2013 yılının ısıtma eşiği 18°C olarak varsayılmış ve 2.563 derece günlük IDG değeri için ısıtma alanı başına ısıtma talebi 0,28 GJ/yıl-m² olarak hesaplanmıştır. Doğalgaz tüketiminin 2013 yılı süresinde ölçülmesi ile konutta toplam 6.729 m³ doğalgaz tüketildiği görülmüştür. Yapılan hesaplamalar sonucunda bu tüketim içerisinde yılda 135 m³ doğalgaz yemek pişirme, 2.045 m³ doğalgaz sıcak su temin etme, 4.549 m³ doğalgaz ise ısıtma amacı ile kullanıldığı görülmüştür. Gugul G. N. ve Aydınalp Köksal M. [44] ve Gugul G. N. [51] tarafından yapılan çalışmalarda hesaplamalar hakkında detaylı bilgi verilmiştir. 2013 yılı için ESP-r simülasyon sonuçlarından elde edilen ve aynı yılda ölçülen aylık ısıtma amaçlı doğalgaz tüketimi Şekil 5'de gösterilmiştir.

Şekil 5'de görüldüğü gibi özellikle ilkbahar-yaz geçiş ayı olan Nisan ayında, hane halkının iklim koşullarına bağlı olarak tahmin edilenden fazla enerji kullanması sebebi ile ısıtma amaçlı ölçülen doğalgaz tüketimi ESP-r tahmininden yüksek olmuştur. Model tamamlandıktan sonra, modelin performansının izlenmesi amacı ile Regresyon analizi yöntemi ile verilerin regresyon katsayısı (R²) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE) hesaplanmıştır [56]. Bu



Şekil 4. ESP-r tarafından tahmin edilen 2013 yılı için saatlik ısıtma talebi
(Hourly heating demand estimated by ESP-r for 2013)

yöntemler ile elde edilen değerlendirme analizlerinin sonuçları ısıtma sisteminin çalıştırıldığı her ay için ayrı ayrı ve tüm ısıtma ayları için hesaplanmış ve Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6'da görüldüğü gibi konutun bütün yıl için ortalama regresyon katsayısı 0,95, ortalama mutlak hata yüzdesi ise %24 olarak hesaplanmıştır. Isıtma sisteminin çalıştığı son ay olan Nisan ayında, ölçüm yapılan konutta ısıtma sisteminin belirli günlerde açılıp kapatılması sebebi ile verilerde hata oranı en yüksek değere ulaşmıştır. Diğer çalışmalarda, yapılan ölçümler ve simülasyon programı tarafından üretilen verilerin analizi için farklı yöntemler kullanılmıştır. On altı yaşında bir güneş panelinin performansının araştırıldığı bir çalışmada ölçülen ve simülasyon ile hesaplanan elektrik üretim verisi arasında regresyon katsayısı (R^2) 0,95 olarak hesaplanmıştır [57]. Isıtma ve soğutma amaçlı enerji talebinin ölçüldüğü ve simülasyon programı ile tahmin edildiği başka bir çalışmada ise simülasyon sonuçları ile elde edilen veri arasında soğutma talebinde %5, ısıtma talebinde ise %3 hata olduğu hesaplanmıştır. Bu çalışmada geçiş ayı olmayan Ocak ayında 3 hafta süresince saatlik ısıtma amaçlı enerji kullanımı, Haziran ayında ise 3 hafta süresince saatlik soğutma amaçlı enerji kullanımı ölçülmüştür. Ölçümün saatlik olması ve geçiş mevsimi olmayan dönemde kısa bir süre için (3 hafta) yapılması sebebi ile simülasyon sonuçlarında hata oranı oldukça düşük çıkmıştır [25].

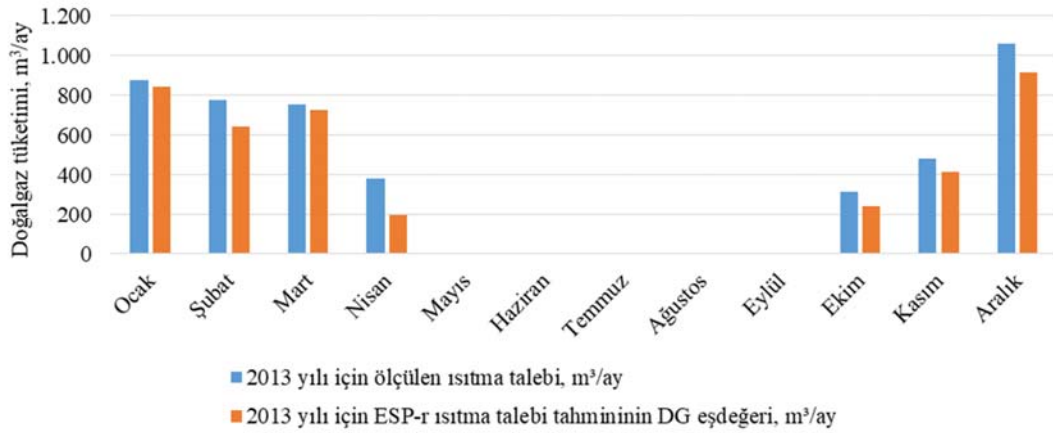
3.1. Senaryo Sonuçları (Scenario Results)

Senaryoların ortalama bir yılı göstermesi amacı ile senaryolar normal iklim verisi kullanılarak yapılmıştır. Normal iklim verisi kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarına göre konutun ısıtma talebi 182 GJ/yıl olarak tahmin edilmiştir.

3.1.1. Yapısal iyileştirme senaryoları (Construction improvement scenarios)

Yapısal iyileştirme senaryolarının yıllık enerji kazanç değerleri, maliyeti, geri ödeme süresi (GÖS) ve bu senaryo ile elde edilecek CO₂ salımındaki azalma miktarları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7'de görüldüğü gibi en düşük GÖS, %12 ve %15 enerji tasarrufu ile pencere camında argon boşluklu çift cam (S.1-a) ve argon boşluklu üçlü cam (S.1-b) kullanılması durumunda elde edilmiştir. Elde edilen enerji tasarrufu oranı argon boşluklu pencere camının hem binaların iyileştirilmesinde hem de yeni yapılan binalarda kullanılmasının gerekli olduğu sonucuna varılmasına sebep olmuştur. Konutta hâlihazırda bulunan dış duvar yalıtımının iyileştirilmesinin (S.2-a, S.2-b, S.2-c) GÖS'nin yüksek olması ve enerji kazancının düşük olması sebepleri ile gerekli olmadığı sonucuna varılmıştır. Konutta çatı yalıtımı



Şekil 5. 2013 yılı için ESP-r tarafından tahmin edilen ve ölçülen aylık ısıtma talepleri
(Monthly heating demand estimated by ESP-r and monitored for 2013)

Tablo 6. Analiz sonuçları (Results of the analyses)

Aylar	Regresyon Katsayısı, R^2	Ortalama mutlak hata yüzdesi, MAPE
Ocak	0,99	%18
Şubat	0,93	%25
Mart	0,96	%22
Nisan	0,90	%33
Ekim	0,96	%26
Kasım	0,95	%28
Aralık	0,96	%19
Tüm Isıtma Ayları	0,95	%24

Tablo 7. Yapısal iyileştirme senaryolarının enerji ve CO₂ salım tasarrufları ve ekonomik analizleri
(Energy and CO₂ emissions savings and economic analyses of the construction improvement based scenarios)

Senaryo Kodu	Senaryo Açıklaması	Senaryo ile elde edilecek enerji kazancı, GJ/yıl	Senaryo ile elde edilecek enerji kazancı, %	Yatırım Maliyeti, TL	GÖS, yıl	CO ₂ Azalması, kg/yıl
S.1-a	Pencere	22	12	5.599	1	1.342
S.1-b	Camı	27	15	8.614	5	1.646
S.2-a	Yalıtım	2	1	3.670	23	122
S.2-b		4	2	9.102	>40	244
S.2-c		5	3	11.065	>40	305
S.2-d		51	28	5.928	4	3.110
S.3	Cam + Yalıtım	84	46	25.607	8	5.122

Tablo 8. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması senaryolarının enerji ve CO₂ salım tasarrufları ve ekonomik analizleri
(Energy and CO₂ emissions savings and economic analyses of the utilization of renewable energy sources based scenarios)

Senaryo Kodu	Senaryo Açıklaması	Senaryo ile elde edilen enerji kazancı, GJ/yıl	Senaryo ile elde edilen enerji kazancı, %	Yatırım Maliyeti, TL	GÖS, yıl	CO ₂ Azal., kg/yıl
S.4	GP	30	53	48.944	27	3,725
S.5	GES	49	68	10.000	8	2,993
S.6	TKIP	126	69	44.000	>40	4,207

olmaması sebebi ile çatıya uygulanan yalıtım senaryosunda (S.2-d) ise %28 enerji tasarrufu sağlamış ve GÖS dört yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple çatı yalıtımının oldukça yüksek enerji tasarrufu sağladığı ve ekonomik olarak uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. S.3 kodlu senaryonun ise (S.1-b, S.2-c ve S.2-d'nin birlikte uygulanması senaryosu) enerji tasarrufunun %46 ve GÖS yedi yıl olması sebepleri ile uygulanması en çok tercih edilebilecek olan yapısal iyileştirme senaryosu olduğu sonucuna varılmıştır. S.3 kodlu senaryo; pencerelerde argon ile doldurulmuş 16 mm boşluklu şeffaf üç kat cam kullanılması, dış duvara 90 mm kalınlıkta XPS (k=0,035 W/mK) ve çatıya 100 mm kalınlıkta XPS (k=0,035 W/mK) yalıtım uygulanması senaryosudur.

3.1.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması senaryoları

(Utilization of Renewable energy sources scenarios)

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması senaryolarının yıllık enerji kazanç değerleri, maliyeti, geri ödeme süresi (GÖS) ve bu senaryolar ile elde edilecek CO₂ salımındaki azalma miktarları Tablo 8'de verilmiştir.

Güneş Paneli Senaryosu (S.4)

Konutun elektrik ihtiyacının GP ile sağlanması senaryosu için 2013 yılında konutun elektrik tüketimi ölçülmüş ve 15.702 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Konutun çatısında GP eklenebilecek 45 m² uygun alan mevcuttur. Konutta güneydoğu ve güneybatıya bakan uygun çatı alanına GP eklenmesi ESP-r bina enerji simülasyon programında modellenmiştir. Ankara için normal iklim verisi kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarına göre 7,375 kWh/yıl, 2013

yılı iklim verisi kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarına göre ise 8.483 kWh/yıl elektrik üretileceği tahmin edilmiştir. Buna ek olarak, güneydoğu ve güneybatıya bakan çatıya yerleştirilen panellerin alanı ve teknik özellikleri tamamen aynı olmasına rağmen güneybatıya bakan panelin %12 daha fazla elektrik ürettiği görülmüştür.

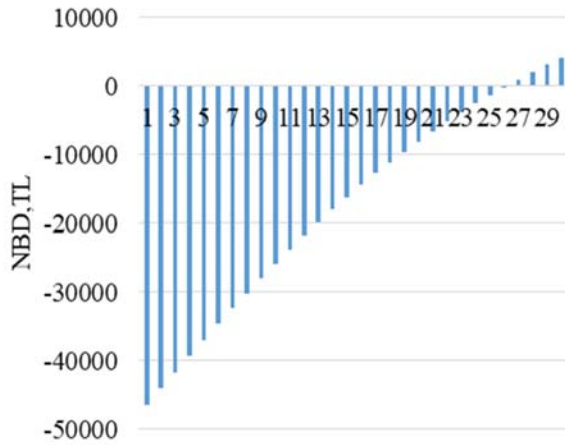
Elektrik fiyat tahmini için kullanılan geçmiş yıllara ait elektrik fiyat verisi aralığına göre GÖS değişmektedir. Farklı elektrik fiyatı tahmin eğrileri için GP senaryosunun geri ödeme süresinin 24-30 yıl arasında değiştiği görülmüştür ve bu değişim Tablo 9'da görülmektedir.

Tablo 9. Güneş paneli için Geri Ödeme Süresi'nin elektrik fiyat tahmini için kullanılan veri aralığına göre değişimi
(Change in payback period for photovoltaic panel according to data range used for electricity price estimation)

Tahmin No	GÖS, Yıl
E1	24
E2	27
E3	30

2013 yılı için nominal faiz 0,065 değerini almıştır [58]. 2013 yılı nominal faiz değeri kullanılarak yapılan hesaplamalara göre NBD'in 27. yılda pozitif değer alması sebebi ile güneş panelinin GÖS 27 yıl olarak hesaplanmıştır. NBD'in yıllara göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir.

İki numaralı elektrik fiyat tahmininin (E2) kullanılması ve nominal faizin 0,065 olması durumunda GÖS 27 yıldır. Fakat nominal faiz oranının 2013 yılında beklenenden yüksek olması sebebi ile geçmiş yıllara ait farklı nominal faiz değerleri için de Geri Ödeme Süreleri hesaplanmış ve Tablo 10'da bu değerler verilmiştir.



Şekil 6. Güneş paneli için net bugünkü değer'in yıllara göre değişimi (Annual change in net present value for photovoltaic panel)

Tablo 10. Güneş paneli için Geri Ödeme Süresi'nin nominal faiz oranına göre değişimi (Change in payback period of photovoltaic panel according to nominal interest rate)

Nominal Faiz Oranı	GÖS, Yıl
0,040	19
0,065	27
0,080	40

Bu hesaplamalar ile nominal faizin ve elektrik fiyat tahmininin değişik aralıklarda varsayılması durumunda güneş panelinin GÖS'nin 19-40 yıl arasında değişebileceği görülmektedir. GP'nin Türkiye'de maliyetinin yüksek olması sebebi ile GÖS Ankara iklimi için oldukça yüksek hesaplanmıştır. Bu sebeple İç Anadolu'da elektrik ihtiyacının şebekeden sağlanabileceği bölgelerde GP kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Güneş Enerjisi ile Sıcak Su Temini Senaryosu (S.5)

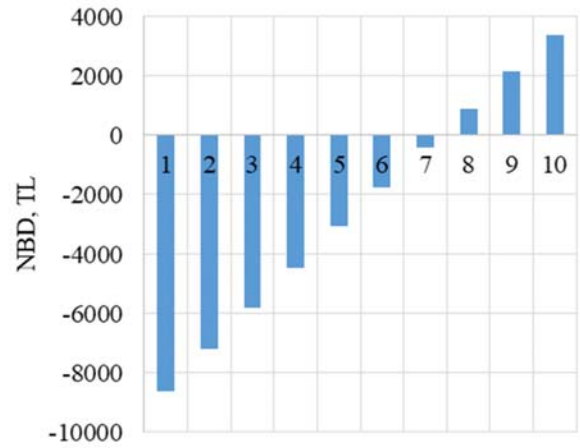
Konutta sıcak su ihtiyacı doğalgaz ile çalışan kombi ile sağlanmaktadır. Konutun ölçülen doğalgaz tüketiminde sıcak su temini için tüketilen doğalgaz miktarı hesaplanmıştır. Sıcak su temini için tüketilen yıllık enerji miktarı 2.045 m³/yıl (72 GJ/yıl) olarak bulunmuştur. Konutun günlük sıcak su tüketimi ortalama 1,2 ton/gün, kişi başı sıcak su tüketimi 172 kg/gün-kişi olarak hesaplanmıştır. Konutta sıcak su temini amaçlı güneş enerjisi sistemi (GES) kullanılması durumunda, güneşten temin edilen ve sıcak su temin etme amacı ile kullanılacak net güneş enerjisi ise 2013 radyasyon verisi ile 60 GJ/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu durumda GES konutun sıcak su temin etme amaçlı enerji talebinin %68'ini (49 GJ/yıl) karşılayabilmektedir. Doğalgaz fiyat tahmini için kullanılan veri aralığına göre GES'in GÖS değişmekte ve bu değişim Tablo 11'de görülmektedir. Farklı nominal faiz değerleri ile de Geri Ödeme Süreleri hesaplanmış ve bu değerler Tablo 12'de verilmiştir. Bu hesaplamalar ile nominal faiz ve doğalgaz fiyat tahmininin

değişik aralıklar için varsayılması ile GES'in GÖS'nin 7-8 yıl arasında değişebileceği görülmektedir. GES'in GÖS'nin 8 yıl olması ve %64 enerji tasarrufu sağlanabilmesi sebebi ile GES'in konutta uygulanmasının tercih edilebilir olacağı sonucuna varılmıştır.

Tablo 11. Güneş enerjisi sistemi için Geri Ödeme Süresi'nin doğalgaz fiyat tahmini için kullanılan veri aralığına göre değişimi (Change in payback period of solar hot water system according to data range used for natural gas price estimation)

Tahmin No	GÖS, Yıl
D1	7
D2	8
D3	8

D2 kodlu fiyat tahmininin kullanılması durumunda GES için NBD'in yıllara göre değişimi Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. GES için Net Bugünkü Değer'in yıllara göre değişimi (Annual change in net present value for GES)

Tablo 12. Güneş enerjisi sistemi için Geri Ödeme Süresi'nin nominal faiz oranına göre değişimi (Change in payback period of solar hot water system according to nominal interest rate)

Nominal Faiz Oranı	GÖS, Yıl
0,040	7
0,065	8
0,080	8

Toprak Kaynaklı Isı Pompası Senaryosu (S.6)

ESP-r'da konutun ısıtma ihtiyacının TKIP ile karşılanması durumu modellenmiş ve TKIP'nın elektrik tüketim eşdeğeri 56 GJ/yıl (15.485 kWh/yıl) olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple, konutun ısıtma ihtiyacının TKIP ile sağlanması durumunda 126 GJ/yıl (%69) enerji tasarruf elde edileceği görülmüştür. Konutun mevcut ısıtma talebi doğalgaz kullanan kombi ile sağlanmaktadır ve TKIP uygulanması durumunda ısıtma talebi için elektrik enerjisi kullanılacaktır. Bu sebeple TKIP senaryosunda GÖS hesaplanırken hem doğalgaz hem de elektrik fiyat tahminlerinin kullanılmış,

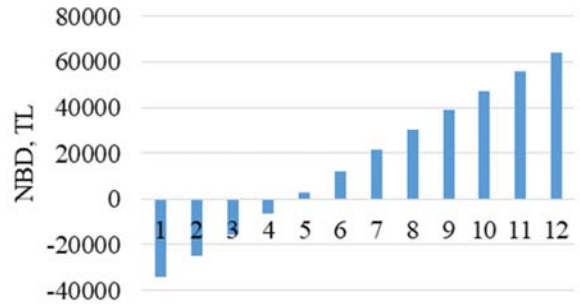
ısıtma talebinin tamamının doğalgaz ile karşılanmanın, kısmen elektrik enerjisi kullanan TKIP ile karşılamaya kıyasla az farkla daha pahalı olduğu görülmüştür. Fakat fiyat farkının az olması ve TKIP sisteminin ilk yatırım maliyetinin yüksek olması sebebi ile TKIP sisteminin GÖS 40 yıldan fazla olmaktadır. Bu sebeple konutta TKIP kullanılmasının uygun olmayacağı sonucuna varılmıştır. TKIP'nin yüksek oranda elektrik kullanması sebebi ile doğalgazlı kombiye kıyasla yeterli tasarruf sağlamamıştır. Bu sebeple konutun ilk etapta ısıtma sisteminin doğalgazlı kombi yerine elektrikli kombi olması durumu ile TKIP kullanılması durumu da kıyaslanmıştır. Konutta ısıtma talebinin karşılanması amacı ile elektrikli kombi, doğalgazlı kombi ve TKIP kullanılması durumlarında, doğalgaz ve elektrik fiyat tahminleri kullanılarak yapılan hesaplamalara göre yıllık ısıtma talebi bedeli Şekil 8'de görülmektedir. Konutun mevcut ısıtma sisteminin elektrik enerjisi ile çalışan kombi olduğunun varsayılması durumunda, ısıtma sisteminin TKIP ile değiştirilmesi senaryosunun farklı elektrik fiyat tahminleri için GÖS hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 13'de verilmiştir.

Tablo 13. Toprak Kaynaklı Isı Pompası için Geri Ödeme Süresi'nin elektrik fiyat tahmini için kullanılan veri aralığına göre değişimi (Change in payback period of ground source heat pump according to data range used for electricity price estimation)

Tahmin No	GÖS, Yıl
E1	5
E2	5
E3	5

İki numaralı elektrik fiyat tahmininin kullanılması ve nominal faizin 0,065 olması durumunda GÖS 5 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu durumda NBD'in yıllara göre değişimi Şekil 9'da verilmiştir. Farklı nominal faiz değerleri için de GÖS hesaplanmış ve bu değerler Tablo 14'de verilmiştir.

Bu hesaplamalar ile farklı aralıklarda yer alan nominal faiz ve elektrik fiyat tahminleri ile TKIP'nin GÖS'nin 5 yıl olduğu görülmektedir.



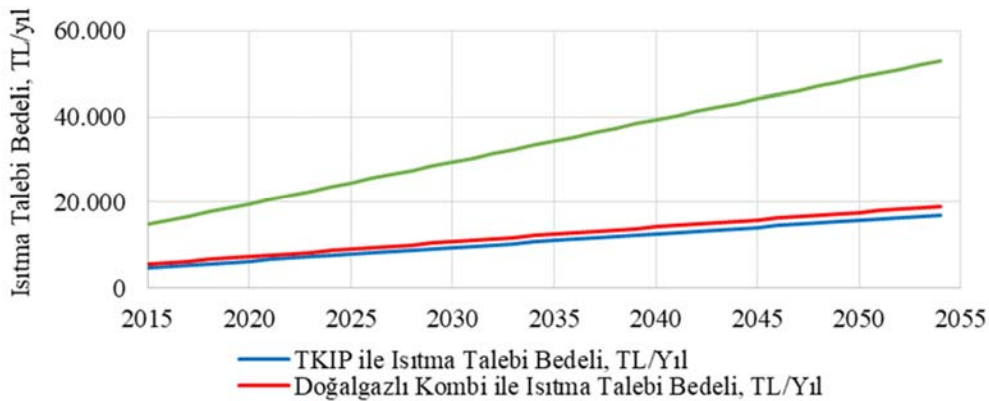
Şekil 9. Toprak Kaynaklı Isı Pompası için Net Bugünkü Değer'in yıllara göre değişimi (Annual change in net present value for Ground Source Heat Pump)

Tablo 14. Toprak Kaynaklı Isı Pompası için Geri Ödeme Süresi'nin nominal faiz oranına göre değişimi (Change in payback period of Ground Source Heat Pump according to nominal interest rate)

Nominal Faiz Oranı	GÖS, Yıl
0,040	5
0,065	5
0,080	5

3.2. Konutun Enerji ve Sera Gazı Salım Sınıfı (Energy and Greenhouse Gas Emission Class of Housing)

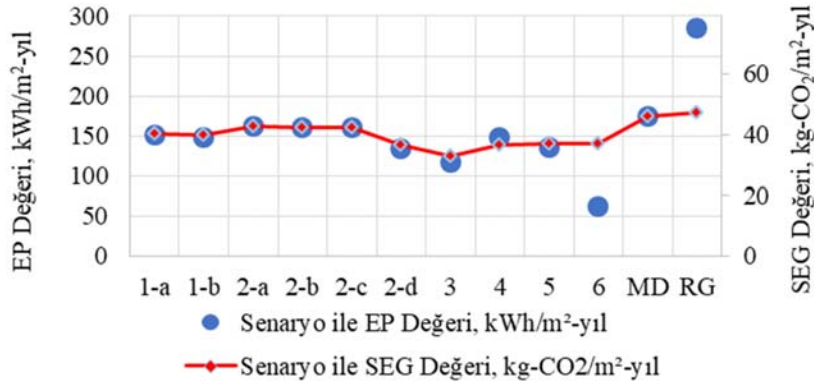
Konutun ölçülen yıllık elektrik tüketimi 15.702 kWh'dir. Ölçülen yıllık doğalgaz tüketimi ise 6.729 m³/yıl'dır (65.807 kWh/yıl). Bu durumda 2013 yılında konutta toplam 81.509 kWh/yıl enerji kullanılmıştır. Normal iklim verisi ile konutun ısıtma talebi ESP-r tarafından 182 GJ/yıl (50.640 kWh/yıl) olarak tahmin edilmiştir. Elektrik tüketimi (15.702 kWh/yıl) ile yemek pişirme (1.320 kWh/yıl) ve sıcak su temin etme (19.999 kWh/yıl) amaçlı doğalgaz tüketiminin 2013 yılı ile aynı olduğu varsayılırsa normal iklim verisi ile konutun toplam yıllık enerji kullanımı 87.661 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. 2013 yılı ve normal iklim verisi ile hesaplanan ve ölçülen konutun toplam enerji kullanımı, CO₂ salımı, EP ve SEG değerleri verilmiştir.



Şekil 8. Kombi ve Toprak Kaynaklı Isı Pompası kullanılması durumunda ısıtma talebi bedeli, TL/yıl (Heating demand price in case of using boiler and Ground Source Heat Pump, TL/year)

Tablo 15. Konutun toplam enerji kullanımı, CO₂ salımı, EP ve SEG değerleri
(Total energy consumption, CO₂ emission, EP and SEG values of housing)

	Enerji kullanımı, kWh/yıl	CO ₂ Salımı, kg-CO ₂ /yıl	EP Değeri, kWh/m ² -yıl	SEG Değeri, kg-CO ₂ /m ² -yıl	EP Sınıfı	SEG Sınıfı
2013 İklim Verisi	81.509	21.452	163	43	B	C
Normal İklim Verisi	87.661	22.803	175	46	B	C

**Şekil 10.** Senaryoların uygulanmasından önce ve sonra EP ve SEG değerleri
(EP and SEG values before and after the application of the scenarios)

Tablo 15'de görüldüğü gibi konutun her iki iklim verisi ile enerji sınıfı B, sera gazı salım sınıfı ise C'dir. Konutta S.6 (TKIP senaryosu) kodlu senaryonun uygulanması durumunda konutun enerji sınıfı B'den A'ya yükseltilenektir. S.2-d, S.3, S.4, S.5 ve S.6 kodlu senaryoların uygulanması ile ise konutun sera gazı salım sınıfını C'den B'ye yükseltebilecektir. Enerji Performansı yönetmeliğine göre EP ve SEG değerleri Şekil 10'da senaryoların uygulanmasından sonra, binanın mevcut durumda (MD) ve Ankara iklimi için referans gösterge değerleri (RG) verilerek kıyaslanmıştır. Şekil 10'da görüldüğü gibi konutun EP değeri en fazla S.6 (TKIP Senaryosu) ile düşmüştür. Fakat bu senaryoda yüksek oranda elektrik enerjisi kullanılması sebebi ile SEG değeri aynı oranda azalmamıştır. S.3 (Yapısal iyileştirmelerin birlikte uygulanması senaryosu) kodlu senaryoda ise hem EP hem de SEG değeri benzer oranda azalmış ve en düşük SEG değeri elde edilmiştir.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

DG	: Doğalgaz
DSF	: Doğalgaz Salım Faktörü
EP	: Enerji Sınıfı
ESF	: Elektrik Salım Faktörü
GES	: Güneş Enerjisi İle Sıcak Su Sistemi
GÖS	: Geri Ödeme Süresini
GP	: Güneş Paneli
k	: Isıl iletkenlik katsayısı, W/mK
NBD	: Net Bugünkü Değeri
NNA	: Net Nakit Akışı, TL/yıl
SEG	: Sera Gazı Salım Sınıfı

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Ankara Beytepe'de bulunan müstakil tekil bir konut model olarak seçilmiş ve konutun ESP-r bina simülasyon programı ile ısıtma enerjisi talep modeli oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre 2013 yılı saatlik ısıtma talebi 141 GJ/yıl olarak tahmin edilmiş, bu talebin doğalgaz eşdeğeri 3.998 m³/yıl olarak hesaplanmıştır. Daha sonra modele fiziksel yapıda iyileştirmeler öneren ve enerji talebinin yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlandığını varsayan senaryolar uygulanmıştır. Fiziksel yapıda iyileştirme yapılmasını öngören senaryolardan olan pencerelerin iyileştirilmesi senaryolarında yılda 22 GJ (%12) ve 27 GJ (%15) enerji tasarrufu sağlanacağı görülmüştür. Konutun dış duvarının izolasyonunun iyileştirildiği senaryolarda yılda 2 GJ (%1) ile 5 GJ (%3) arasında enerji tasarrufu edilebileceği hesaplanmıştır. Konutun çatısına yalıtım eklenmesi durumunda ise 51 GJ (%28) yıllık enerji tasarrufu elde edilebileceği hesaplanmıştır. Son olarak, pencere, duvar ve çatı senaryolarının birlikte kullanılması ile yılda 84 GJ (%46) enerji tasarrufu elde edilebileceği hesaplanmıştır.

Konutun enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanmasının öngörüldüğü senaryolardan olan konutun çatısına güneş paneli (GP) yerleştirilmesi senaryosu ESP-r bina enerji simülasyon programı ile modellenerek panelin elektrik üretim ESP-r tarafından tahmin edilmiştir. Yapılan hesaplamada GP ile konutun elektrik ihtiyacının %53'ünün karşılanabileceği görülmüştür. GP senaryosunda farklı elektrik tarifesi ve faiz aralıkları için yapılan hesaplamalar sonucunda GÖS'nin 19-40 yıl arasında değişebileceği

görülmüştür. GP'in Türkiye'de maliyetinin yüksek olması sebebi ile İç Anadolu iklimi için GÖS oldukça yüksek hesaplanmıştır. Bu sebeple elektrik ihtiyacının şebekeden sağlanabileceği bölgelerde İç Anadolu iklimi için GP kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Konutta güneş enerjisi ile sıcak su temini sistemi (GES) kullanılmasının öngörüldüğü senaryoda konutta sıcak su temin etmek amaçlı enerji kullanımında %68 tasarruf sağlanacağı görülmüştür. GES'in GÖS'nin kısa (8 yıl) olması ve maliyetinin düşük olması sebepleri ile konutta uygulanmasının makul olacağı sonucuna varılmıştır. Konutun ısıtma ihtiyacını TKIP ile karşılaması senaryosunda, ESP-r'da konutun ısıtma sistemi TKIP olarak modellenmiştir. Konutun ısıtma ihtiyacının TKIP ile karşılanması durumunda %69 enerji tasarrufu elde edileceği görülmüştür. Fakat yatırım maliyetinin oldukça yüksek olması ve sistemin yüksek miktarda elektrik kullanması sebepleri ile TKIP'nin GÖS 40 yıldan fazla hesaplanmıştır. Bu sebeple konutta TKIP kullanılmasının ekonomik olarak uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Modele senaryoların uygulanmasından sonra konutun enerji sınıfı ve sera gazı salım sınıfı belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda konutun B enerji sınıfında, C sera gazı salım sınıfında olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023. <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/01/20180102M1-1-1.pdf>. Yayın tarihi Kasım 11, 2017. Erişim tarihi Temmuz 25, 2018.
2. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Türkiye Enerji Denge Tabloları. <http://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Denge-Tabloları/Denge-Tabloları>. Yayın tarihi Kasım 15, 2017. Erişim tarihi Nisan 21, 2018.
3. TUIK, TUIK Bölgesel İstatistikler. <https://biruni.tuik.gov.tr/bolgeselistatistik/>. Yayın tarihi Kasım 15, 2017. Erişim tarihi Haziran 7, 2018.
4. Yılmaz Ö., Kösem L., Türkiye' de yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli, kullanımı ve dışa bağımlılığı, T.C. Ege Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi İktisat Bölümü , İzmir, 2011.
5. Good J. T., Ugursal V. I., Fung A. S., Modeling and technical feasibility analysis of a low-emission residential energy system, *International Journal of Green Energy*, 4(1), 27-43, 2007.
6. Syed A. M., Fung A. S., Ugursal V. I., Taherian H., Analysis of PV/wind potential in the Canadian residential sector through high-resolution building energy simulation, *International Journal of Energy Research*, 33 (4), 342-357, 2009.
7. Maurer C., T. E. Kuhn, Variable g value of transparent facade collectors, *Energy and Buildings*, 51, 177-184, 2012.
8. Karkare A., Dhariwal A., Puradhat S., Jain M., Evaluating Retrofit Strategies For Greening Existing Buildings By Energy Modelling & Data Analytics, *Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, Taipei-Tayvan, 1-4, 23-25 Nisan, 2014.
9. Nikoofard S., Ugursal V. I., Beausoleil-Morrison I., An investigation of the technoeconomic feasibility of solar domestic hot water heating for the Canadian housing stock, *Solar Energy*, 101, 308-320, 2014.
10. Rogers J., Cooper S., O'Grady Á., McManus M., Howard H., Hammond G., The 20% house – An integrated assessment of options for reducing net carbon emissions from existing UK houses, *Applied Energy*, 138, 108-120, 2015.
11. Mihai M., Tanasie V., Badea C. D. A., Vidu R., Passive house analysis in terms of energy performance, *Energy and Buildings*, 144, 74-86, 2017.
12. Asae S. R., Ugursal V. I., Beausoleil-Morrison I., Techno-economic assessment of solar assisted heat pump system retrofit in the Canadian housing stock, *Applied Energy*, 190, 439-452, 2017.
13. Parker D. S., Huang Y. J., Konopacki S. J., Gartland L. M., Sherwin J. R., Gu L., Measured and simulated performance of reflective roofing systems in residential buildings, *Florida Solar Energy Center, Florida*, 1998.
14. Florides G., Kalogirou S., Tassou S., Wrobel L., Modeling of the modern houses of Cyprus and energy consumption analysis, *Energy*, 25 (10), 915-937, 2000.
15. Koroneos C., Kottas G., Energy consumption modeling analysis and environmental impact assessment of model house in Thessaloniki-Greece, *Building and Environment*, 42 (1), 122-138, 2007.
16. Sailor D., A green roof model for building energy simulation programs, *Energy and Buildings*, 40(8), 1466-1478, 2008.
17. Dias D., Machado J., Leal V., Mendes A., Impact of using cool paints on energy demand and thermal comfort of a residential building, *Applied Thermal Engineering*, 65(1-2), 273-281, 2014.
18. Höseggen R., Wachenfeldt B., Hanssen S., Building simulation as an assisting tool in decision making: Case study: With or without a double-skin façade?, *Energy and Buildings*, 40(5), 821-827, 2008.
19. Yıldız Y., Arsan Z. D., Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates, *Energy*, 36, 4287-4296, 2011.
20. Friess W. A., Rakhshan K., Hendawi T. A., Tajerzadeh S., Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency, *Energy and Buildings*, 44, 26-32, 2012.
21. Appelfeld D., McNeil A., Svendsen S., An hourly based performance comparison of an integrated micro-structural perforated shading screen with standard shading systems, *Energy and Buildings*, 50, 166-176, 2012.
22. Gustafsson M., Gustafsson M. S., Myhren J. A., Bales C., Holmberg S., Techno-economic analysis of energy renovation measures for a district heated multi-family house, *Applied Energy*, 177, 108-116, 2016.
23. Skarning G. C. J., Hviid C. A., Svendsen S., Roadmap for improving roof and facade windows in nearlyzero-energy houses in Europe, *Energy and Buildings*, 116, 602-613, 2016.

24. Burlacu A., Lazarescu C. D., Verdes M., Ciocan V., Barbuta M., Balan M. C., Innovative method for improving energy performance of buildings with glazed facades, *Procedia Engineering*, 181, 666-673, 2017.
25. Eskin N., Türkmen H., Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey, *Energy and Buildings*, 40, 763-773, 2008.
26. Dombaycı Ö. A., The prediction of heating energy consumption in a model house by using artificial neural networks in Denizli-Turkey, *Advances in Engineering Software*, 41 (2), 141-147, 2010.
27. Sozer H., Improving energy efficiency through the design of the building envelope, *Building and Environment*, 45 (12), 2581-2593, 2010.
28. Özkan D. B., Onan C., Optimization of insulation thickness for different glazing areas in buildings for various climatic regions in Turkey, *Applied Energy*, 88, 1331-1342, 2011.
29. Yaşar Y., Kalfa S. M., The effects of window alternatives on energy efficiency and building economy in high-rise residential buildings in moderate to humid climates, *Energy Conversion and Management*, 64, 170-181, 2012.
30. Yıldız Y., Göksal-Özbalta T., Eltez A., Energy-saving retrofitting of houses in cold climates, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 34 (1), 53-61, 2014.
31. Öztürk-Keresticioğlu F., Tümer-Özkan D. B., Hamamcıoğlu C., Yerliyurt B., Sakin E., Hafizoğlu T., Reducing cooling and heating loads in existing residential buildings in the context of building envelope: Beykoz-Kanlıca, *Megaron*, 10 (4), 451-469, 2015.
32. Gülmez R. A., Durmuş-Arsan R. Z., İzmir, Kaynaklar'da Hava Kaynaklı Isı Pompası ile İklimlendirilen Müstakil Bir Konutun İzlenmesi ve Modellenmesi, 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir-Türkiye, 2297-2316, 8-11 Nisan 2015.
33. Ertürk M., A new approach to calculate the energy saving per unit area and emission per person in exterior wall of building using different insulation materials and air gap, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(2), 395-406, 2016.
34. Harputlugil G. U., Harputlugil T., A research on occupant behaviour pattern of dwellings in the context of environmental comfort and energy saving, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 695-708, 2016.
35. Ganic Saglam N., Yılmaz A. Z., Becchio C., Corgnati S.P., A comprehensive cost-optimal approach for energy retrofit of existing multi-family buildings: Application to apartment blocks in Turkey, *Energy and Buildings*, 150, 224-238, 2017.
36. Cetiner I., Edis E., An environmental and economic sustainability assessment method for the retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*, 74, 132-140, 2014.
37. Cetiner I., Metin B., Economic performance assessment of residential building retrofits: a case study of Istanbul. *Energy Efficiency*, 10, 1061-1079, 2017.
38. HÜÇMB, Weather at Beytepe - Ankara, <http://www.metstation.hacettepe.edu.tr/>. Yayın tarihi Ocak 1, 2014. Erişim tarihi Ocak 1, 2014.
39. Energy Systems Research Unit, ESP-r, <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>. Yayın tarihi Ocak 1, 2017. Erişim tarihi Temmuz 7, 2017.
40. IBPSA-USA, ASHRAE Standard 62.1-2007, Atlanta, 2009.
41. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2013 Toprak Sıcaklığı Verisi, <http://www.mgm.gov.tr/>. Yayın tarihi Ocak 1, 2014. Erişim tarihi Ocak 1, 2014.
42. United States Department of Energy, Weather Data, <https://energyplus.net/weather>. Yayın tarihi Ocak 1, 2015. Erişim tarihi Nisan 9, 2015.
43. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2013 İklim Verisi, <http://www.mgm.gov.tr/>. Yayın tarihi Ocak 1, 2014. Erişim tarihi Ocak 1, 2014.
44. Gugul G.N., Aydınalp Köksal M., Alternatif Teknolojiler ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Müstakil Bir Konutta Kullanımının Tekno-Ekonomik Analizi, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir-Türkiye, 739-756, 21-23 Nisan 2017.
45. Intergovernmental Panel on Climate Change, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Yayın tarihi Mayıs 1, 2015. Erişim tarihi Aralık 17, 2015.
46. Arı I., Aydınalp-Köksal M., Carbon dioxide emission from the Turkish electricity sector and its mitigation options, *Energy Policy*, 39(10), 6120-6135, 2011.
47. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Dağılımı, http://www.enerji.gov.tr/Resources/Sites/1/Pages/Sayi_04/files/basic-html/page24.html. Yayın tarihi Nisan 1, 2014. Erişim tarihi Ocak 17, 2015.
48. Haltrecht D., Zmeureanu R., Beausoleil-Morrison I., Defining The Methodology For The Next-Generation Hot2000 Simulator, *Natural Resources Canada*, 1998.
49. Sousa J., Energy Simulation Software for Buildings: Review and Comparison, *Information Technology for Energy Applications 2012, Lizbon-Portekiz*, 57-68, 6-7 Eylül, 2012.
50. Molina G., Integrated Thermal and Lighting Analysis of Spaces with Controlled Complex Fenestration Systems and Artificial Lighting During the Design Stage, Master tezi, Pontificia Universidad Catoliga De Chile, Santiago-Şili, 2014.
51. Gugul G. N., Ankara'da Müstakil Bir Konutun Nihai Enerji Tüketimini En Aza İndirebilmenin Yollarının Araştırılması ve Tekno-Ekonomik Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2016.
52. Izocam Fiyat Listesi, <http://www.inceten.com/dokumanlar/izocam-fiyat-listesi-2014/> Yayın tarihi Mayıs 1, 2014. Erişim tarihi Eylül 9, 2014.

53. TEDAS Elektrik Tarifeleri, http://www.tedas.gov.tr/tedas/#!tedas_tarifeler. Yayın tarihi Ocak 1, 2015. Erişim tarihi Ocak 7, 2015.
54. Başkent Doğalgaz, Doğalgaz Tarifesi, <https://www.baskentdogalgaz.com.tr/Tarifeler/TR/5/29.aspx>. Yayın tarihi Ocak 1, 2015. Erişim tarihi Ocak 7, 2015.
55. Bernal-Agustín J. L., Dufo-López R., Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain, *Renewable Energy*, 31 (8), 1107-1128, 2006.
56. Anstett M., Kreider J.F., Application of neural networking models to predict energy use, *ASHRAE Transactions*, 99, 505-517, 1993.
57. Essah E. A., Arguelles A. R., Glover N., Assessing the performance of a building integrated BP c-Si PV system, *Renewable Energy*, 73, 1-10, 2014.
58. TUIK, Finansal yatırım araçlarının yıllara göre dönemsel reel getiri oranları, www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=769. Yayın tarihi Haziran 1, 2017. Erişim tarihi Temmuz 7, 2017