



Near East University

Journal of Near Architecture

Volume/Cilt
10
Issue/Sayı
2

Received:
11.05.2026

Yakın Mimarlık Dergisi

ISSN
2547-8729

Accepted:
24.07.2026

Toplu Konutlarda Enerji Performansı İyileştirme Stratejilerinin Maliyet-Etkinlik Analizi Kapsamında Değerlendirilmesi: Siirt Örneği

Cost-Effectiveness Analysis of Energy Performance Improvement Strategies in Mass Housing; The Case of Siirt

Servet ŞEKER İNALCAN ^{1*} 
Hava ÖZYILMAZ ² 

ÖZET

Enerji tüketiminin önemli bir bölümünden sorumlu olan konutlarda, enerji talebini azaltmaya yönelik iyileştirme stratejilerinin belirlenmesi ve bu stratejilerin ekonomik açıdan değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, Siirt ili Evren Mahallesi'ndeki Toplu Konut İdaresi Başkanlığı (TOKİ) konut yerleşimini örnek alarak, enerji performansı iyileştirme senaryolarının kapsamlı bir maliyet-etkinlik analizini sunmayı amaçlamaktadır. Siirt Evren Toplu Konut İdaresi Başkanlığı (TOKİ) yerleşimi Autodesk Revit'te üç boyutlu (3B) modellenerek Bina Enerji Modeli (BEM) oluşturulmuş, Green Building XML (gbXML) ile Autodesk Green Building Studio (GBS) bulut platformuna aktarılmış ve entegrasyonla her senaryo için ısıtma/soğutma/aydınlatma/donanım yükleri ile toplam tüketim aylık ve yıllık hesaplanmıştır. Analizlerde Siirt'in yerel iklim verileri (sıcaklık, nem, güneş ışınımı, rüzgar hızı ve yönü) dikkate alınmış; bina kabuğu özellikleri (duvar, çatı, pencere, döşeme), yönlenme, gölgeleme etkileri ve iç kazançlar simülasyon ortamında tanımlanarak gerçekçi enerji tüketim projeksiyonları elde edilmiştir. Elde edilen simülasyon çıktılarıyla her bir senaryo, uygulama maliyeti ve sağladığı enerji tasarrufu üzerinden değerlendirilerek makul geri ödeme süreleri tespit edilmiştir. Geliştirilen metodoloji ve Siirt özelinde ulaşılan bulgular, benzer özellikteki konut stokları için en uygun maliyetli enerji iyileştirme paketlerinin tasarlanmasına ve kaynakların verimli dağıtılmasına yönelik karar destek mekanizmalarına katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Autodesk revit simülasyon programı, Enerji performansı, İyileştirme stratejileri maliyet-etkinlik analizi, geri ödeme süresi

¹ Dicle Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Böl., Diyarbakır, Türkiye. servetinalcan@gmail.com ORCID: 0000-0002-8299-4330

² Dicle Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Böl., Diyarbakır, Türkiye. havvaozy@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0002-1252-0359

ABSTRACT

In residential buildings, which are responsible for a significant portion of energy consumption, determining improvement strategies to reduce energy demand and evaluating these strategies from an economic perspective is of great importance. This study aims to present a comprehensive cost-effectiveness analysis of energy performance improvement scenarios, using the Housing Development Administration (TOKİ) housing complex in Evren Neighborhood of Siirt Province as an example. The Siirt Evren Housing Development Administration (TOKİ) complex was modeled in three dimensions (3D) in Autodesk Revit to create a Building Energy Model (BEM), transferred to the Autodesk Green Building Studio (GBS) cloud platform using Green Building XML (gbXML), and heating/cooling/lighting/equipment loads and total consumption were calculated monthly and annually for each scenario through integration. In the analyses, local climate data of Siirt (temperature, humidity, solar radiation, wind speed and direction) were taken into consideration; building envelope characteristics (wall, roof, window, floor), orientation, shading effects and internal gains were defined in the simulation environment to obtain realistic energy consumption projections. With the simulation outputs obtained, each scenario was evaluated in terms of implementation cost and energy savings, and reasonable payback periods were determined. The developed methodology and the findings obtained specifically for Siirt contribute to the design of the most cost-effective energy improvement packages for similar housing stocks and to decision support mechanisms for the efficient allocation of resources.

Keywords: *Autodesk Revit simulation program, Energy performance, Improvement strategies, Cost-effectiveness analysis, Payback period*

GİRİŞ

Enerji korunumu ilkesi, yalnızca enerji tüketiminin azaltılmasını değil, aynı zamanda mevcut enerji akışlarının optimize edilmesini ve her bir birim enerjinin maksimum fayda sağlayacak şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Bu yaklaşım, kaynakların sınırlı olduğu ve enerji maliyetlerinin arttığı günümüz koşullarında, özellikle konut sektörü için hayati önem taşımaktadır. Türkiye'de mevcut konut stoğunun önemli bir bölümü enerji performansı açısından yetersiz kalmaktadır. Bu durum hem ulusal enerji dengesi üzerinde baskı oluşturmakta hem de hane halkları için yüksek işletme maliyetlerine yol açmaktadır.

Küresel enerji dönüşümü, yenilenebilir kaynaklara yönelimi hızlandırırken, enerji korunumunu da her zamankinden daha kritik bir hedef haline getirmiştir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, Türkiye'de binalar toplam enerji tüketiminin %35-40'ından sorumlu olup, bu tüketimin yaklaşık %70'i ısıtma ve soğutma amaçlıdır (Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı, 2015).

Bu nedenle, mevcut konut stoğunun performansının iyileştirilmesi, hem ulusal enerji verimliliği hedeflerine ulaşmak hem de hane halklarının yüksek enerji yükünü hafifletmek için temel bir strateji olmaktadır.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın (ÇŞİDB) yönetmelikleri de bu yönde adımlar atarak, yeni binalarda enerji performans sınıfı ve yenilenebilir enerji kullanım zorunluluklarını artırmış ve "Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar" (NSEB) hedefine kademeli bir geçişi öngörmektedir.

Enerji korunumunu sağlamaya yönelik iyileştirme stratejileri, teknik olarak mevcut olsa da, uygulamada en büyük engel genellikle ekonomik fizibilitedir. İdeal enerji performansı hedefleri, sınırlı bütçeler ve yatırım geri dönüş beklentileri ile çelişebilmektedir. Bu noktada, enerji iyileştirmelerinin gerçek değerini anlamak için salt enerji tasarrufu miktarlarının ötesine geçmek, her bir stratejinin maliyet-etkinliğini yani birim enerji tasarrufu başına düşen maliyeti analiz etmek gerekmektedir. Bu analiz, kıt kaynakların en verimli şekilde dağıtılmasına ve uzun vadede en yüksek toplam tasarrufun elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Sıcak-kurak iklim kuşağında yer alan Siirt gibi illerde, bu gereklilik daha da belirginleşmektedir. Yaz aylarında yoğunlaşan soğutma ihtiyacı, enerji faturalarını önemli ölçüde artırmakta ve mevcut binalarda ısı konforu sağlamak pahalı hale gelmektedir. Bölgenin kendine özgü iklim koşulları, yapı stoku ve yerel malzeme-işçilik maliyetleri, genel geçer iyileştirme önerilerinin yetersiz kalmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla, Siirt özelinde enerji korunumu hedeflerine ulaşmak, evrensel stratejilerin değil, yerel verilere dayalı, ekonomik açıdan uygulanabilir ve kademeli bir yol haritasının belirlenmesini gerektirmektedir.

Enerji korunumu ile ekonomik fizibilite arasındaki kritik kesişim kapsamında, Siirt ili Evren Mahallesi'ndeki TOKİ konutlarını örnek alan bu çalışmada, mevcut bir konut bloğunda uygulanabilecek çok sayıda pasif iyileştirme stratejisini (yalıtım artırımı, pencere değişimi, gölgeleme, fotovoltaik sistemler vb.) enerji simülasyonları ile test etmek ve her bir senaryonun yaşam döngüsü maliyet analizini gerçekleştirmek, istenmektedir. Temel amaç, salt teknik optimizasyon değil, ekonomik optimizasyon yapmaktır; yani Siirt koşullarında, sınırlı bir bütçe ile maksimum enerji tasarrufu ve konfor iyileştirmesi sağlayacak strateji paketlerini ve uygulama önceliklerini belirlemektir.

Bu kapsamda çalışma, politika yapıcılar, tasarımcılar ve nihai kullanıcılar için, enerji korunumuna yönelik yatırım kararlarını rasyonel bir temele oturtacak ampirik bir veri seti ve analitik bir çerçeve sunmayı hedeflemektedir. Böylece, enerji verimliliği hedefleri ile ekonomik gerçekler arasında bir denge kurularak, sürdürülebilir iyileştirmelerin yaygınlaşmasına katkıda bulunulması sağlanacaktır.

1.1. Çalışmanın Problemi

Türkiye’deki mevcut konut stokunun önemli bir bölümü, enerji performansı açısından yetersiz durumdadır ve yüksek oranda enerji tüketimine neden olmaktadır. Özellikle sıcak-kurak iklim kuşağında yer alan Siirt gibi illerde, yaz aylarındaki yoğun soğutma ihtiyacı enerji talebini ve hanelerin enerji giderlerini kritik düzeylere taşımaktadır. Mevcut binaların enerji verimliliğini artırmaya yönelik çok sayıda teknik iyileştirme stratejisi (yalıtım, yüksek performanslı pencere, gölgeleme, güneş enerjisi sistemleri vb.) bulunmakla birlikte, bu stratejilerin uygulanması önemli bir ilk yatırım maliyeti gerektirmektedir. Bu noktada ortaya çıkan temel sorun; hangi iyileştirme stratejisinin veya strateji paketinin, Siirt'in yerel iklim ve pazar koşullarında, en düşük yatırım maliyeti ile en yüksek enerji tasarrufu ve konfor artışı sağladığının belirsizliğidir. Maliyetler ve faydalar arasındaki bu ilişkinin net olarak ortaya konmaması, hem bireysel mülk sahiplerinin hem de yerel yönetimlerin iyileştirme kararlarını geciktirmekte veya etkinsiz yatırımlar yapılmasına yol açabilmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın genel amacı, sıcak-kurak iklim bölgesindeki mevcut bir konutun enerji performansını iyileştirmek için uygulanabilecek farklı stratejileri, hem enerji tasarrufu potansiyelleri hem de ekonomik fizibiliteleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Çalışmanın özel amacı ise, Siirt ili koşulları özelinde, tipik bir mevcut konut üzerinde simüle edilen çeşitli iyileştirme senaryolarının (yalıtım artışı, pencere değişimi, gölgeleme, güneş paneli vb.) maliyet analizini yaparak, en maliyet-etkin (cost-effective) iyileştirme paketini ve optimum yatırım sıralamasını önermektir. Bu sayede, bina sahipleri, tasarımcılar ve politika yapıcılar için, sınırlı kaynaklarla maksimum fayda sağlayacak, bölgeye özgü ve kanıta dayalı bir iyileştirme kılavuzu geliştirilmesi hedeflenmektedir.

1.3. Çalışmanın Kapsamı

Çalışma, Siirt en son etap olarak inşa edilen TOKİ blokları için yapılacaktır. İyileştirme stratejileri, başlıca bina kabuğuna yönelik pasif müdahalelerle sınırlandırılmıştır. Bunlar: dış duvar/çatı yalıtım kalınlık ve kalite artışı, pencere sistemlerinin değişimi (çift/üçlü cam, düşük geçirimli kaplama), pencere boyutlarının optimize edilmesi, sabit gölgeleme elemanları (saçak, ışık rafı) ve fotovoltaik güneş paneli sistemleridir.

Analiz parametreleri olarak, enerji performansı (yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi talebindeki değişim - kWh/m²yıl) ve ekonomik performans (ilave yatırım maliyeti, enerji tasarrufundan kaynaklı yıllık nakit akımı, basit geri ödeme süresi, yaşam döngüsü net bugünkü değeri) olarak belirlenmiştir.

Zaman ve coğrafi kapsam olarak, maliyet analizleri 2024 yılı piyasa fiyatları üzerinden yapılacak, enerji simülasyonları için Siirt'e ait tipik meteorolojik yıl (TMY) verileri kullanılacaktır. Yaşam döngüsü 25 yıl olarak kabul edilecektir.

1.4. Çalışmanın Yöntemi

Çalışma, nicel verilere dayalı, modelleme ve simülasyon ağırlıklı bir araştırma yöntemi benimsemektedir. Araştırma aşamaları şu şekilde sıralanabilir:

1. Dijital Modelin Oluşturulması: Siirt'te en son etap olarak inşa edilen TOKİ bloklarının (geometri, kat yüksekliği, mekan organizasyonu, malzeme özellikleri - U değerleri) Autodesk Revit yazılımı kullanılarak üç boyutlu (3B) dijital modeli oluşturulacaktır. Bu model, binanın fiziksel ve geometrik özelliklerini yüksek doğrulukla temsil eden bir Bina Enformasyon Modeli (BIM) niteliğindedir. Revit içerisinde tanımlanan bina kabuğu özellikleri (duvar, çatı, pencere, döşeme), yönlenme, gölgeleme etkileri ve iç kazançlar, sonraki enerji analizleri için temel veri setini oluşturacaktır. Oluşturulan bu model, enerji analiz yazılımlarıyla uyumlu bir veri alışveriş formatı olan gbXML (Green Building XML) dosyası olarak dışa aktarılacaktır.
2. Enerji Simülasyonu ve İyileştirme Senaryolarının Tanımlanması: Oluşturulan gbXML dosyası, Autodesk Green Building Studio bulut tabanlı enerji analiz platformuna entegre edilecektir. Green Building Studio, binanın enerji performansını, yerel iklim verileri (sıcaklık, nem, güneş ışıınımı, rüzgar hızı ve yönü) ile bina özelliklerini dikkate alarak simüle eden gelişmiş bir hesaplama motoruna sahiptir. Bu entegrasyon sayesinde, mevcut durumdaki bina için ısıtma, soğutma, aydınlatma ve iç donanım kaynaklı enerji yükleri ile toplam enerji tüketimi aylık ve yıllık bazda hesaplanacaktır. Ardından, literatür ve piyasa araştırmasına dayalı olarak, uygulanabilir 9 adet iyileştirme senaryosu (yalıtım, pencere gölgeleme, PV sistem) ve bu senaryoların entegre edildiği kombinasyon paketleri tanımlanacaktır. Her bir senaryo için model üzerinde gerekli parametre değişiklikleri (örneğin, yalıtım kalınlığının artırılması, pencere tipinin değiştirilmesi) yapılarak enerji simülasyonları tekrarlanacak ve enerji tasarruf potansiyelleri nicel olarak karşılaştırılacaktır.
3. Maliyet-Etkinlik Analizi: Her senaryo için, uygulama maliyeti ve sağladığı yıllık enerji tasarrufu üzerinden basit geri ödeme süresi ve 25 yıllık yaşam döngüsü maliyet analizi yapılacak, birim tasarruf maliyeti (TL/kWh) hesaplanacaktır. Bu analizler sonucunda senaryolar, enerji tasarrufu başına maliyet etkinliği açısından sıralanacak ve Siirt'in yerel iklim, topoğrafya ve mevcut yapısal koşulları bağlamında en yüksek enerji verimliliğini en uygun maliyetle sağlayan optimum iyileştirme yol haritası önerisi geliştirilecektir.

2. ALAN ÇALIŞMASI

Bu bölümde, Siirt ilinde seçilen örnek bir toplu konut alanında enerji performansını iyileştirmeye yönelik stratejilerin maliyet-etkinlik analizi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çalışma alanı ve seçim kriterleri tanımlanmış, ardından mevcut binaların enerji tüketim profili Autodesk Revit ve Green Building Studio simülasyon araçlarıyla belirlenmiştir. Dokuz ana iyileştirme senaryosu ve alt varyasyonları modellenerek, her birinin enerji tasarrufu potansiyeli, uygulama maliyeti ve geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular tablolar eşliğinde sunulmuş ve karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır.

2.1. Çalışma Alanı Tanımı

Çalışma alanı tanımı kapsamında; Siirt ili genel yerleşim özellikleri ile örneklem alanının seçim kriterlerine yer verilmiştir.

2.1.1. Siirt İli Genel Yerleşim Özellikleri

Siirt; geçmişte Esart, Sairt, Siird gibi farklı şekil ile sert, üç yer, sırt gibi farklı anlamlarda kullanılmaktadır. Bu durumun nedeni, Anadolu ve Mezopotamya'nın birleştiği noktada farklı kültürlerle sahip uygarlıkların (Sami, Babil, Asur, Med, Pers, Roma, Part, Sasani) hüküm sürmesidir.

Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yer alan Siirt ili, 41° doğu boylamı ile 37° kuzey enlemi üzerinde bulunur. 5473 km² yüzölçümüyle Türkiye topraklarının % 0.71'ini oluşturan Siirt; kuzey yönünde Bitlis, doğu yönünde Van ile Hakkari, güney yönünde Şırnak ile Mardin, batı yönünde ise Batman iline komşu olmaktadır (Şekil 2.1).

Siirt ilinin iklimi, genel olarak Karasal İklim ile Akdeniz İklimi arasında bir geçiş özelliği göstermektedir. Ancak ağırlıklı olarak, 1991-2020 iklim periyodu dikkate alındığında, Karasal İklim etkisi hâkim olmaktadır (Meteoroloji Genel Müdürlüğü).

Siirt ilinin kara üzerindeki yer şekli oluşumlarına bakıldığında doğu ve güney yönünde dağlık bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Siirt ilinin kuzey yönü ulaşım elverişli yer yapısına sahip olmasına rağmen, yapılan yatırımların azlığı nedeniyle şehir bu yönde gelişim gösterememiştir. Siirt ilinden Batman iline doğru yer alan arazinin jeomorfolojik yapısına bakıldığında yer yer ova şeklinde düzlüklere rastlanılmaktadır. Bu durumun doğal sonucu olarak, Siirt ilinin doğu yönüne kıyasla batı yönünde daha çok gelişim gösterdiği gözlenmiştir.

Siirt kentinin planlama tarihi 1964 yılında başlamış olup, ilk planlarda kuzey ve kuzeybatı yönünde gelişim öngörülmüştür. 1992 yılında onaylanan revizyon planıyla kentin doğu ve güneydoğu kesimlerine yönelik yeni gelişme alanları belirlenmiş, askeri bölgelerin plana dahil edilmesi, sanayi alanları oluşturulması ve Bağtepe yerleşiminin düzenlenmesi gibi önemli kararlar alınmıştır. 1995'te hazırlanan revizyon planı ise nüfus projeksiyonunu artırarak konut ve altyapı alanlarını genişletmiştir.

Günümüzde ise kent, plansız gelişen alanların da eklenmesiyle geleneksel dokunun yanında modern site yerleşmelerini içeren, farklı yapılaşma dokularının bir arada bulunduğu bir görünüm sergilemektedir. Konut alanları; meskun alanlar, ifrazlı alanlar ve planlı konut gelişim alanları olarak üçe ayrılmakta olup, kentsel doku içinde ulaşım, yeşil alan ve sosyal donatı dağılımı plan kararlarıyla şekillenmektedir (Siirt (Merkez) Revizyon-İlave İmar Planı Açıklama Raporu, 1995).



Şekil 2.1 Türkiye Haritası (Renkli Türkiye Siyasi Haritası ile Kapsamlı, Detaylı Bölgeler ve İller Atlası, 2022)

2.1.2. Örneklem Alanının Seçim Kriterleri ve Genel Özellikleri

2023 yılında, Siirt il merkezinin Evren Mahallesinde, 258 adet konuttan oluşan yerleşim alanı örnek olarak seçilmiştir. Enerji korunumu özelinde düşünüldüğünde, bu seçimin yapılma nedenleri;

- Blokların günümüz yapı malzemesi, tekniği ve teknolojisi kullanılarak, yakın geçmişte (2023) inşa edilmesidir.

- Eğimli arazi üzerinde yer alan toplu konutlara yönelik çalışmaların az sayıda bulunması ile arazi yapısına bağlı blokların gölge etkisinin incelenmek istenmesidir.

- Blokların aynı iklim koşulları (sıcak-ılıman) ile aynı ada içerisinde yer almalarıdır.

- Blokların benzer topoğrafik arazide (eğimli) yer almalarıdır.

- Blokların benzer plan formunda (dikdörtgen şekilli) olmasıdır.

Çalışma alanı A ve B olmak üzere iki farklı plan tipinden oluşmaktadır (Şekil 2.2, Şekil 2.3, Şekil 2.4, Şekil 2.5).

A plan tipi 2 farklı kat planından oluşmaktadır. Birinci tür kat planları bodrum, zemin, 1. kat ile 2. Kat ve 3.kattan oluşmaktayken, ikinci tür kat planları 2.bodrum kat, 1.bodrum kat, zemin kat, 1. Kat ile 2.kat, 3.kat ve 4.kattan oluşmaktadır.

B plan tipi 2 farklı kat planından oluşmaktadır. Birinci tür kat planları 3.bodrum kat, 2.bodrum kat, 1.bodrum kat, zemin kat, 1. Kat ile 2.kat ve 3.kattan oluşmaktayken, ikinci tür kat planları 2.bodrum kat, 1.bodrum kat, zemin kat, 1. Kat ile 2.kat, 3.kat ve 4.kattan oluşmaktadır.



Şekil 2.2 Çalışma alanı (Url-1)





Şekil 2.4 A plan tipi



Şekil 2.5 B plan tipi

2.2. Mevcut Yerleşim Düzeninde Enerji Etkin İyileştirme Stratejileri

Enerji kaynaklarının doğru yönlendirilmesini katkıda bulunmak ile bu yönde yapılan yatırımların en yüksek getiriye sağlanması amaçları doğrultusunda, enerji korunumu bazında, birtakım uygulamalar aşağıda sıralanmıştır.

Bloklarda ısıtma yükünü azaltmak için;

Kuzey-Kuzeydoğu-Kuzeybatı yönlerinde yer alan cephelerdeki salon, mutfak, yatak odası enerji verimliliğini arttırmak amacıyla yapılacak uygulamalar;

- Güneş iç mekanlara pencereler aracılığıyla ulaşmaktadır. Bu nedenle enerji verimliliğini arttırmak amacıyla, ilk odaklanılacak nokta pencere tasarımları olmaktadır.
- Kuzey-Kuzeydoğu-Kuzeybatı yönlerinde yer alan pencere boyutlarını küçültmek, ısı iletiminde dengeyi sağlamaktadır.
- Pencerelerde performansın iyileştirilmesi çift cam (double glazing) ,üçlü cam triple glazing) ünitelerin kullanımı ile ısıtma yükünde düşüş sağlanır.
- Özel cam kaplama malzeme kullanımı (düşük emisyonlu (low-e) kaplamalı cam) kışın güneş enerjisini iç mekana çekmektedir. Bu tür iyileştirmelerin soğutma yükünde %15-25 oranında azalma sağlayabileceği farklı iklim bölgelerinde yapılan çalışmalarla doğrulanmıştır (Cengiz, Zorer Gedik & Korkmaz, 2024).
- Kış güneşinin iç mekanlara girişini kolaylaştıracak saçak uygulamaları güneş enerjisinden kazanç sağlamaktadır.
- Blokların Kuzey-Kuzeydoğu-Kuzeybatı cephelerine yerleştirilen fotovoltaik güneş panellerinin kış aylarına göre açi ayarlarının yapılması, ısıtma yükünü azaltmaktadır.

Bloklarda soğutma yükünü azaltmak için;

Güney-Güneydoğu-Güneybatı yönlerinde yer alan cephelerdeki salon, mutfak, yatak odası enerji verimliliğini arttırmak amacıyla yapılacak uygulamalar;

- Güney-Güneydoğu-Güneybatı yönlerinde yer alan pencere boyutlarını büyütmek, ısı iletiminde dengeyi sağlamaktadır.
- Kışın alçak açıdan gelen güneş ışığını yakalayarak iç mekanın derinliklerine (tavan yardımıyla) yansıtan, böylece yapay aydınlatma ihtiyacını azaltan ışık rafı (light shelf) kullanımı, güney cephelerde hem aydınlatma enerjisinde hem de dolaylı olarak soğutma yükünde kazancı artırmaktadır. Yazın yüksek açıdan gelen güneş, bu rafın yapısına bağlı olarak genellikle rafın üzerinden geçer ve doğrudan iç mekana girmez, bu da aşırı ısınmayı engeller.
- Pencerelerde performansın iyileştirilmesi çift cam (double glazing) ,üçlü cam triple glazing) ünitelerin kullanımı ile soğutma yükünde düşüş sağlanır.
- Özel cam kaplama malzeme kullanımı (düşük emisyonlu (low-e) kaplamalı cam) yazın güneş enerjisini iç mekandan uzaklaştırmaktadır.

- Doğru boyutlandırılmış sabit saçaklar, yazın yüksek açıdan gelen güneş ışınlarını engelleyerek soğutma yükünü azaltırken; kışın alçak açıdan gelen güneş ışınlarının saçak altından iç mekana girmesine izin vererek pasif ısıtma kazancı sağlamaktadır. Bu strateji yalnızca güneye bakan cephelerde etkilidir; kuzey cephelerde kışın doğrudan güneş olmadığı için saçakların herhangi bir ısıtma katkısı yoktur.
- Blokların Güney-Güneydoğu-Güneybatı cephelerine yerleştirilen fotovoltaik güneş panellerinin yaz aylarına göre açısı ayarlarının yapılması, soğutma yükünü azaltmaktadır.

Toplam enerji yükünü azaltmak için, dört mevsim geçerli olabilecek en önemli uygulama, blokların çatı ile duvarlarına uygun kalınlık ve kalitede yalıtım malzemesinin kullanılmasıdır. Ankara örneğinde optimum yalıtım kalınlığının yaşam döngüsü maliyet analizi ile belirlendiği bir çalışmada, başlangıç maliyetinin 3-5 yıl içinde enerji tasarrufuyla karşılanabileceği, ancak bu sürenin iklim koşullarına ve kullanılan yakıt türüne göre değiştiği ifade edilmiştir (Emekçi, 2022).

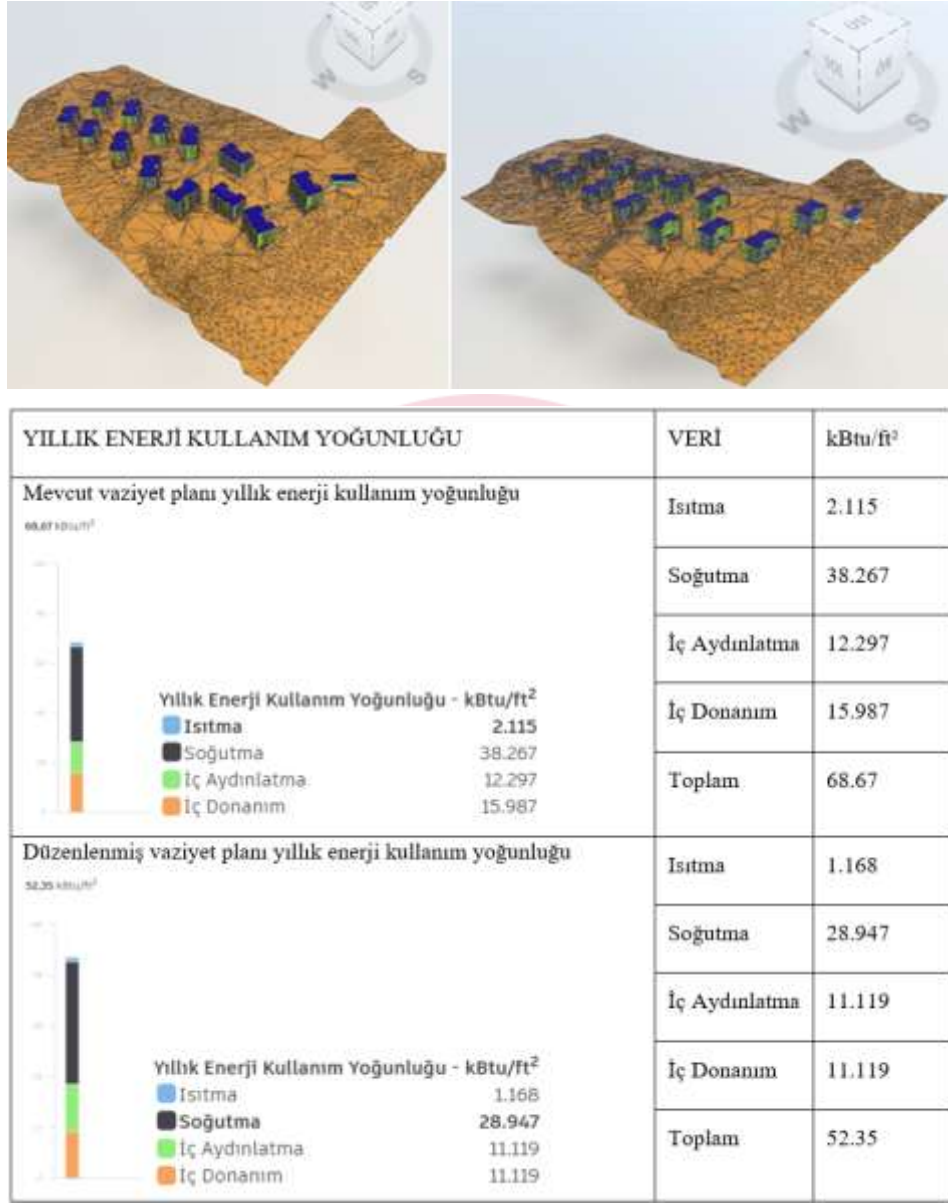
Enerji etkin iyileştirme stratejilerinin uygulanmasına yönelik dokuz adet ana senaryo belirlenmiştir. Bunlar;

- Yalıtım malzemesi kalınlığında artış,
- Yalıtım malzemesi kalitesinde artış,
- Kuzeye bakan cephelerde pencere boyutlarını küçültmenin enerji etkileri,
- Güneye bakan cephelerde pencere boyutlarını büyütmenin enerji etkileri,
- Pencereelerde üçlü cam üniteleri kullanmanın enerji etkileri,
- Pencereelerde ışık rafı (light shelf) kullanımının enerji etkileri,
- Pencereelerde özel cam kaplama malzeme kullanımının enerji etkileri,
- Pencereelerde gölgeleme amaçlı saçak uygulamasının enerji etkileri,
- Güneş paneli sistemleri olmaktadır.

Türkiye’de çok katlı mevcut konut binalarının en maliyet-optimal iyileştirme senaryolarını araştıran bir çalışma, dış duvar yalıtımı ve pencere değişiminin birlikte uygulandığı paketlerde geri ödeme süresinin 6 yılın altına düştüğünü göstermiştir (A comprehensive cost-optimal approach, 2017). Bu bulgular, aşağıda detaylandırılan senaryoların Siirt özelinde uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Mevcut yerleşim dokusuna müdahale kapsamında kısıtlı sayılan ya da tekrar inşa edilmesi mümkün olmayan yapılarda yönlenme, enerji performansını artırmak için tercih edilmemektedir. Ancak, bina kabuğu bileşenlerinin ve malzeme özelliklerinin optimizasyonu ile mevcut doku iyileştirme stratejilerine yeni bir boyut kazandırılmaktadır. Bu anlamda, kısıtlı müdahale senaryoları, Siirt özelinde uygulanmıştır (Koç, Kalfa; 2021).

Ana senaryolara bağılı alt senaryolar geliştirilerek, analiz çalışmaları iki aşamada yürütülmüştür. Enerji performansı simülasyonu analizi ile maliyet etkin tasarım analizi aracılığıyla, elde edilen veriler, uygulama kapsamında, tablolara yerleştirilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Yıllık enerji kullanım yoğunluğu hesap ekranı

2.2.1. Yalıtım Malzemesi Kalınlığında Artış

Çalışma alanındaki blokların mevcut durumunda, dış duvarlarda 5 cm kalınlığında standart EPS kullanıldığı tespit edilmiştir. Yapılan simülasyon analizleri, bu kalınlığın artırılmasına yönelik senaryoları ve bunların enerji tüketimi ile ekonomik geri dönüş üzerindeki etkilerini detaylı olarak ortaya koymuştur.

Mevcut 5 cm EPS uygulaması, Siirt ilinin dahil olduğu 2. Derece Gün Bölgesi için Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (BEP-TR) ve TS 825 "Binalarda Isı Yalıtım Kuralları" standardında öngörülen asgari ısı direnç (R) ve ısı geçirgenlik (U) değerlerini karşılamaktadır.

Ancak, bu değerler yasal izin verilen minimum seviyeyi temsil etmekte olup, Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemleri (LEED, BREEAM) veya daha ileri ulusal hedefler (Sıfır Enerji Bina) gibi yüksek performans standartlarından oldukça uzak kalmaktadır.

Nitekim Türkiye’de termal yalıtımın bina enerji verimliliğine etkisini değerlendiren bir araştırmada, dış duvarlarda 10 cm yerine 15 cm yalıtım kullanılmasının yıllık enerji tüketimini %12 daha azalttığı, buna karşın geri ödeme süresinin iki yıl uzadığı hesaplanmıştır (Çetintaş, 2019).

Yalıtım malzemesi kalınlığında artış; ısıtma yükünde (%30-40) büyük oranda iyileşme, soğutma yükünde (%10-20) orta seviyede iyileşmeye neden olmakla birlikte iç aydınlatma yükü ve iç donanım yükü sabit kalmaktadır.

+%50 kalınlık ekonomik başlangıç, +%100 kalınlık optimum seçim, +%150 kalınlık premium performans sağlamaktadır. Ankara özelinde yapılan bir optimum yalıtım kalınlığı çalışmasında da, farklı yakıt türleri (doğal gaz, kömür, elektrik) için geri ödeme sürelerinin 2 ile 7 yıl arasında değiştiği, en uygun kalınlığın 8-12 cm aralığında olduğu tespit edilmiştir (Determination of Optimum Insulation Thickness, 2021). Bu bulgu, çalışmamızda +%100 kalınlık artışına (5 cm’den 10 cm’ye) karşılık gelen optimum seçimi desteklemektedir.

Yalıtım seviyesinde +%100 kalınlık seçim nedenleri;

- Anlamlı enerji tasarrufu (%10.6),
- İyi geri ödeme süresi (3.5-4.5 yıl),
- Uzun vadeli karlılık,
- Yüksek konfor iyileştirmesi olmaktadır (Tablo 2.1).

Önerilen kalınlık artışları (+%50, +%100, +%150), BEP-TR’nin asgari şartlarının ötesine geçerek binanın potansiyel Enerji Kimlik Belgesi (EKB) sınıfını C’den B veya A’ya yükseltebilecek iyileştirmelerdir. Bu yaklaşım, AB’nin Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD) ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tavsiyeleri ile uyumlu olup, mevcut bina stokunun yenilenmesi yoluyla enerji tüketiminin ve karbon salımının azaltılması hedefine hizmet etmektedir.

AB Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD) ve Sıfır Enerjili Bina (NZEB) hedefi doğrultusunda, tablodaki en iyi senaryo (+%150) dahi mutlak anlamda bir NZEB seviyesini garantilemez, çünkü NZEB, kalan az enerji ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasını da şart koşar. Ancak, +%100 ve +%150 senaryoları, NZEB hedefine giden yolda birincil enerji ihtiyacını kritik ölçüde düşürerek temel bir ön koşulu yerine getirmektedir.

Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemleri (LEED, BREEAM), enerji performansının referans binalara (ASHRAE 90.1 gibi) kıyasla iyileştirme yüzdesi üzerinden puan vermektedir. +%100 kalınlık senaryosunun sağladığı >%10'luk toplam iyileşme, LEED veya BREEAM kredileri için önemli bir katkı sağlayarak, +%150 senaryosu ise en yüksek puanları almaya aday yapacaktır.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve IPCC önerilerinden iklim değişikliği azaltım senaryoları, bina sektöründe enerji talebinde derin ve hızlı azalmalar gerektiğini vurgulamaktadır. Mevcut durumdan +%100 iyileştirme senaryosuna geçiş, birim alandaki enerji tüketimini %10'un üzerinde düşürerek bu yönde somut bir adımı temsil etmektedir. Özellikle soğutma enerjisindeki düşüş (38.27'den 32.61'e), iklim değişikliği nedeniyle artması beklenen soğutma talebini yönetmek açısından stratejik öneme sahip olmaktadır.

Tablo 2.1 Yalıtım malzemesi kalınlıkları

Yalıtım Seviyesi	Isıtma Tüketimi(kBtu/ft ²)	Soğutma Tüketimi(kBtu/ft ²)	Toplam Tüketim (kBtu/ft ²)	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
Mevcut Durum	2.115	38.267	68.67	-	-
+%50 Kalınlık	1.690	35.440	65.42	Düşük	2-3 yıl
+%100 Kalınlık	1.480	32.614	61.38	Orta	3-5 yıl
+%150 Kalınlık	1.270	30.614	59.17	Yüksek	5-7 yıl

2.2.2. Yalıtım Malzemesi Kalitesinde Artış

Mevcut bir yapıda enerji iyileştirmesi yapılırken seçilecek yalıtım malzemesinin; maliyeti, performansı ve uygulanacağı alanın fiziksel çevre ile yapı çevre koşulları dikkate alınmalıdır.

Standart EPS, ekonomik olması ve nispeten kuru cephelerde iyileştirmeler için tercih edilmelidir. Yüksek yoğunluklu EPS, maliyet ile performansın paralel olduğu ve standart EPS'ye kıyasla daha başarılı bir seçenek olmaktadır. XPS, zemine temas eden ya da nemli bölgelerde uzun vadede çözüm sunmaktadır. Poliüretan panel, yalıtımda istenen kalınlık değeri sağlanamıyor ya da maksimum düzeyde performans artışı isteniyorsa tercih edilmelidir.

Yalıtım malzemesi kalitesinde artış; ısıtma yükünde (%30-45) büyük oranda iyileşme, soğutma yükünde (%10-20) orta seviyede iyileşmeye neden olmakla birlikte iç aydınlatma yükü ve iç donanım yükü sabit kalmaktadır.

Kısa vadeli çözüm olarak, yüksek yoğunluklu EPS ile başlangıç; orta vadeli çözüm olarak, XPS malzeme tercihi olmaktadır.

Poliüretan Panel seçim nedenleri;

- Uzun vadeli çözüm
- Maksimum enerji verimliliği
- Bakım maliyetlerinde az olması olmaktadır (Tablo 2.2).

Aynı kalınlıkta farklı yalıtım malzemeleri kullanıldığında, malzemenin ısı iletkenlik (λ) değeriindeki iyileşmenin enerji tüketimi üzerindeki doğrudan ve ölçülebilir etkisini yapılan analiz çalışmasıyla ortaya konulmuştur.

Mevcut durumda kullanılan standart EPS’de toplam enerji tüketim değeri, 68.67 kBTu/ft² olmaktadır. Bu değer, BEP-TR'nin asgari şartlarını karşılayan tipik bir C sınıfı binayı temsil etmektedir. Yüksek Yoğunluklu EPS kullanımıyla toplam enerji tüketim değeri, 63.20 kBTu/ft² olmaktadır. Bu iyileşme, binanın EKB sınıfını C'den B'ye yükseltmektedir. XPS kullanımıyla toplam enerji tüketim değeri, 61.27 kBTu/ft² olmaktadır. Bu değer, binanın EKB sınıfını B'ye taşımakla kalmayıp, A sınıfı için iyi bir zemin oluşturmaktadır. Poliüretan Panel kullanımıyla toplam enerji tüketim değeri, 59.50 kBTu/ft² olmaktadır. BEP-TR'nin öngördüğü hedefin çok ilerisinde A sınıfı performansı elde edilmektedir.

Poliüretan Panel kullanımıyla, AB EPBD ve Sıfıra Yakın Enerjili Bina (NZEB) hedefi için de güçlü bir temel oluşturulur ve geri kalan enerji ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasıyla standartlara ulaşılabilir. Yeşil Bina Sertifikasyonları (LEED, BREEAM, DGNB) ile enerji performansının bir referans binaya göre iyileştirilme yüzdesi üzerinden puanlama yapılmaktadır. Yüksek Yoğunluklu EPS ile sağlanan %8'lik iyileşme, önemli bir kredi kazanımı için yeterli olabilir. XPS ile sağlanan >%10'luk iyileşme, enerji kategorisinde yüksek puan almayı garantiler. Poliüretan Panel ile sağlanan >%13'lük iyileşme, bu kategoride "liderlik" seviyesinde puan alınmasını sağlayabilir.

Malzeme kalitesi artışı, kalınlık artışına göre genellikle daha iyi uzun vadeli performans sağlamakla birlikte ilk yatırım maliyeti daha yüksek olmaktadır. En iyi çözüm yöntemi ise yalıtım malzemesinin uygun kalınlık ile kalitede kombinasyonu olmaktadır.

Tablo 2.2 Yalıtım malzeme kalitesi

Malzeme Kalitesi	Termal İletkenlik (λ)	Isıtma Tüketimi(kBTu/ft ²)	Soğutma Tüketimi(kBTu/ft ²)	Toplam Tüketim	Maliyet Farkı	Geri Ödeme Süresi
Standart EPS	0.040 W/mK	2.115	38.267	68.67	Referans	3-5
Yüksek Yoğunluklu EPS	0.033 W/mK	1.480	34.440	63.20	+%15-25	2-4

XPS	0.030 W/mK	1.370	32.614	61.27	+%30- 40	3-5
Poliüretan Panel	0.025 W/mK	1.160	30.614	59.50	+%50- 70	4-7

2.2.3. Kuzeye Bakan Cephelerde Pencere Boyutlarını Küçültme

Yapıların Kuzey cephelerinde kışın güneş kazanımı düşük olmaktadır. Isıl kayıplar da bu olumsuz durumuna eklenince, pencere boyutu optimizasyonu gerekliliği önem kazanmaktadır.

Kuzeye bakan cephelerde pencere boyutlarını küçültmenin enerji etkileri; ısıtma yükünde (%5-20) oranda iyileşme, soğutma yükünde (%0.5-3) oranda iyileşmeye neden olmakla birlikte iç aydınlatma yükü (%1-8) ihtiyacı artar. İç donanım yükü ise değişmez.

Senaryo detay açıklamaları;

1. Küçük optimizasyon

Uygulama: Mevcut pencerelerin %10-15 küçültülmesi

Etki: Sınırlı enerji tasarrufu, mimari değişim minimal

Önerilen: Mevcut binalarda küçük iyileştirmeler için

2. Orta optimizasyon

Uygulama: Pencerelerin %20-30 oranında küçültülmesi

Etki: Orta seviye tasarruf, görsel değişim fark edilir

Önerilen: Kapsamlı renovasyon projelerinde

3. Radikal küçültme

Uygulama: Pencerelerin %40-50 küçültülmesi

Etki: Yüksek tasarruf ancak aydınlatma maliyeti artıyor

Önerilen: Sadece enerji odaklı, estetik kaygısı düşük projeler

4. Akıllı optimizasyon

Uygulama: Stratejik küçültme + yüksek performanslı cam

Etki: Yüksek verimlilik, dengeli doğal aydınlatma korunuyor

Önerilen: Yeni bina tasarımlarında öncelikli seçenek

5. Kombinasyon çözümü

Uygulama: Pencere küçültme + LED aydınlatma + otomasyon

Etki: En yüksek net tasarruf, çok yönlü iyileştirme

Önerilen: Maximum enerji verimliliği hedeflenen projeler

Kuzey cephe pencere optimizasyonunda akıllı optimizasyon senaryosu en dengeli performansı sunması nedeniyle tercih edilmiştir. Kombinasyon çözümü en yüksek enerji tasarrufu sağlamakla birlikte en yüksek maliyete sahip olması nedeniyle tercih edilmemiştir (Tablo 2.3).

BEP-TR ve ilgili TS 825 standardı, pencere ile duvar arasındaki orana herhangi bir sınırlama getirmemekle birlikte, yapıların toplam ısı kaybı katsayısı üzerinden bu durumu kontrol etmektedir. Bu anlamda, Kuzey cephedeki aşırı cam alanı, yapıların Enerji Kimlik Belgesi (EKB) sınıfını düşürmektedir. BEP-TR için Akıllı Optimizasyon C'den B sınıfına geçişte etkili bir strateji olmaktadır.

LEED, BREEAM, WELL Standartları kapsamında, radikal küçültme senaryosu, enerji tasarrufu sağlasa dahi yetersiz gün ışığı nedeniyle puan kaybına neden olmaktadır.

Akıllı optimizasyon ve kombinasyon çözümü yüksek performanslı cam ve verimli aydınlatma ile puan kazancına yol açmaktadır. EN 17037'nin Gün Işığı Standardına göre küçük ve orta optimizasyon senaryoları bu standardı karşılarken, Radikal senaryo için risk yaratmaktadır. Pasif Ev Standartı'nda, akıllı optimizasyon senaryosu yüksek performanslı cam vurgusu özelliğiyle uyum sağlamaktadır.

Tablo 2.3 Kuzeye bakan cephelerde pencere boyutlarını küçültmenin enerji etkileri

Senaryo	Isıtma Tüketimi (kBtu/ft ²)	Soğutma Tüketimi (kBtu/ft ²)	Aydınlatma Tüketimi (kBtu/ft ²)	Yıllık Enerji Tasarrufu (kBtu)	Maliyet (₺)	Geri Ödeme Süresi
Küçük Optimizasyon	1.946	37.885	12.664	343-686	15000- 25000	8-12
Orta Optimizasyon	1.861	37.693	12.945	687-1.373	20000- 35000	6-10
Radikal Küçültme	1.798	37.500	13.096	1.030-1.717	30000- 50000	5-8
Akıllı Optimizasyon	1.819	37.578	12.789	1.236-2.062	40000- 60000	4-7
Kombinasyon Çözümü	1.692	37.113	12.419	2.403-3.433	60000- 80000	3-5

2.2.4. Güneye Bakan Cephelerde Pencere Boyutlarını Büyütme

Yapıların Güney cephelerinde güneş kazanımı kışın yüksek olmaktadır. Pencere boyutu artışıyla, bu duruma katkı sağlamak ile yazın soğutma ve aydınlatma yükünü azaltmak amaçlarıyla bu optimizasyon senaryosu oluşturulmuştur.

Güneye bakan cephelerde pencere boyutlarını büyütmenin enerji etkileri; ısıtma yükünde (%8-25) oranda iyileşme, soğutma yükünde (%3-20) oranda artış, iç aydınlatma yükünde (%4-15) oranda artış olmakla birlikte iç donanım yükü ise değişmez.

Senaryo detay açıklamaları;

1. Küçük artış

Uygulama: Pencereilerin %10-15 oranında büyültülmesi

Etki: Düşük seviye tasarruf, görsel değişim fark edilir

Önerilen: Kapsamlı renovasyon projelerinde

2. Orta artış

Uygulama: Pencereilerin %20-30 oranında büyültülmesi

Etki: Orta seviye tasarruf, görsel değişim fark edilir

Önerilen: Kapsamlı renovasyon projelerinde önemli elektrik tasarrufu

3. Büyük artış

Uygulama: Pencereilerin %40-50 oranında büyültülmesi

Etki: Yüksek seviye tasarruf, görsel değişim fark edilir

Önerilen: Maximum enerji verimliliği hedeflenen projeler

4. Optimize artış

Uygulama: Pencereilerin %25-35 oranında büyültülmesi

Etki: Yüksek seviye tasarruf, görsel değişim fark edilir

Önerilen: Yeni bina tasarımlarında öncelikli seçenek (Mevsimsel optimizasyon)

5. Kontrollü artış

Uygulama: Pencereilerin %15-25 oranında büyültülmesi

Etki: Düşük seviye tasarruf, görsel değişim fark edilir

Önerilen: Düşük risk + orta kazanç

Güney cephelerde pencere büyütme, doğru tasarlandığında enerji verimliliği açısından oldukça etkilidir. Optimize artış senaryosu en dengeli performansı sunarken, gölgeleme sistemleri ile desteklenmelidir (Tablo 2.4).

Tüm senaryolar ısıtma tüketiminde önemli düşüşler sağlamakla birlikte Optimize artış senaryosu, C sınıfı bir binayı B'ye hatta A'ya taşıyabilmektedir. BEP-TR'nin bütüncül değerlendirme mantığında, gölgeleme sistemleri kullanımı bu senaryoda desteklenmelidir. Bu anlayış, Pasif Ev Standartına uymaktadır.

LEED ve BREEAM'ın gün ışığı ve görsel konfor kapsamında, Güney cephedeki pencere alanının artırılması puan kazandırmakla birlikte, kamaşma kontrolü ile gölgeleme sistemleri olmayışı puan kaybettirmektedir. EN 17037 Gün Işığı Standardı ve DIN 5034'ün aşırı güneşlenme riski nedeni puan kaybettirmektedir.

Tablo 2.4 Güneye bakan cephelerde pencere boyutlarını büyütmenin enerji etkileri

Senaryo	Isıtma Tüketimi (kBtu/ft ²)	Soğutma Tüketimi (kBtu/ft ²)	Aydınlatma Tüketimi (kBtu/ft ²)	Yıllık Enerji Tasarrufu (kBtu)	Maliyet (₺)	Geri Ödeme (yıl)
Küçük Artış	1.861	39.415	11.560	687-2.062	20000- 30000	4-8
Orta Artış	1.692	40.761	10.822	1.373-3.433	30000- 45000	3-6
Büyük Artış	1.586	42.257	10.452	2.060-4.805	45000- 65000	3-5
Optimize Artış	1.650	40.049	10.577	3.433-6.180	50000- 75000	2-4
Kontrollü Artış	1.735	39.661	11.067	2.747-5.494	35000- 50000	2-3

2.2.5. Pencereelerde Üçlü Cam Üniteleri Kullanımı

Pencere sistemlerinin teknolojik gelişmişlik düzeyinin, binanın toplam enerji tüketimi ve ısı konforu üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğunu bilinmektedir.

Pencereelerde üçlü cam üniteleri kullanmanın enerji etkileri; ısıtma yükünde (%25-60) oranda iyileşme, soğutma yükünde (%8-28) oranda iyileşmeye neden olmakla birlikte iç aydınlatma yükü ve iç donanım yükü sabit kalmaktadır.

Senaryo detay açıklamaları;

1. Standart üçlü cam

U Değeri: 1.4-1.8 W/m²K

Özellikler: 4-6-4-6-4 mm cam, hava dolgulu

Avantajlar: İyi ısı yalıtımı, orta maliyet

Uygulama: Standart konut projeleri

2. Yüksek performans üçlü cam

U Değeri: 1.0-1.4 W/m²K

Özellikler: Farklı cam kalınlıkları, optimize aralıklar

Avantajlar: Denge performans, iyi fiyat/performan

Uygulama: Enerji verimli binala

3. Üçlü cam + low-e kaplama

U Değeri: 0.8-1.2 W/m²K

Özellikler: Selektif yüzey kaplama, güneş kontrolü

Avantajlar: Mevsimsel optimizasyon, yaz/kış dengesi

Uygulama: İklimlendirme yükü yüksek binalar

4. Üçlü cam + gaz dolgulu + low-e

U Değeri: 0.6-0.9 W/m²K

Özellikler: Argon/Kripton gaz, çift Low-E kaplama

Avantajlar: Maksimum verim, uzun ömür

Uygulama: Pasif ev standartları, premium projeler

5. Tam optimize üçlü sistem

U Değeri: 0.4-0.6 W/m²K

Özellikler: Sıcak kenar, özel spacer, triple Low-E

Avantajlar: En yüksek performans, minimum enerji kaybı

Uygulama: Sıfır enerji binalar, özel projeler

Üçlü cam uygulamaları, özellikle 3'lü Cam + Gaz Dolgulu + Low-E seçeneği ile enerji verimliliğinde çok önemli kazanımlar sağlar. Mevcut yüksek soğutma yükü dikkate alındığında, doğru SHGC değerine sahip üçlü cam sistemleri toplam enerji tüketiminizi %25-33 oranında azaltabilir (Tablo 2.5, 2.6).

BEP-TR, konut yapılarının pencere sistemleri için genel olarak, maksimum 1.8-2.0 W/m²K civarında bir U değeri sınırı getirmektedir. Standart Üçlü Cam senaryosu (U=1.4-1.8 W/m²K), bu sınırı karşılamakla birlikte, EKB sınıfını B'ye yükseltmek için güçlü bir etkiye sahip olmaktadır. Üçlü Cam + Gaz Dolgulu + Low-E (U=0.6-0.9 W/m²K) ve Tam Optimize Sistem (U=0.4-0.6 W/m²K) senaryoları, EKB sınıfını A seviyesine çıkarmaktadır. Bu durum, Mevcut TOKİ bloklarının, kapsamlı bir yenilemeyle Pasif Ev performans seviyesine yaklaştırılabileceğini göstermektedir.

NZEB hedefi doğrultusunda, tam Optimize Üçlü Sistem en etkili senaryo olmaktadır. Sürdürülebilir Bina Sertifikasyonları (LEED, BREEAM) enerji performansı iyileştirme yüzdesi ve malzeme kalitesi üzerinden yapıya puan kazandırmaktadır.

Tablo 2.5 Pencereelerde üçlü cam üniteleri kullanmanın enerji etkileri

Senaryo	Isıtma Tüketimi (kBtu/ft ²)	Soğutma Tüketimi (kBtu/ft ²)	Toplam Tüketimi (kBtu/ft ²)	Yıllık Enerji Tasarrufu (kBtu)	Maliyet (₺)	Geri Ödeme (yıl)
Standart Üçlü Cam	1.375	33.675	61.35	687-2.062	40000-60000	3-5
Yüksek Performans Üçlü Cam	1.163	31.379	59.84	1.373-3.433	60000-80000	3-4

Üçlü Cam + Low-E Kaplama	1.058	29.848	58.20	2.060- 4.805	80000- 100000	2-4
Üçlü Cam + Gaz Dolgulu + Low-E	952	28.700	56.95	3.433- 6.180	100000- 120000	2-4
Tam Optimize Üçlü Sistem	846	27.552	55.70	2.747- 5.494	120000- 150000	2-3

Tablo 2.6 Malzemelerin termal performans karşılaştırması

Cam Tipi	U Değeri (W/m ² K)	Güneş Isı Kazanç Katsayısı (SHGC)	Işık Geçirgenliği	Ses Yalıtımı (dB)
Tek Cam	5.8-6.2	0.85-0.90	%88-91	20-25
Çift Cam	2.7-3.2	0.70-0.80	%80-85	30-35
Standart 3'lü	1.4-1.8	0.60-0.70	%75-80	35-40
3'lü + Low-E	0.8-1.2	0.40-0.55	%65-75	38-42
3'lü + Argon + Low-E	0.6-0.9	0.35-0.45	%60-70	40-45

2.2.6. Pencerelelerde Işık Rafı (Light Shelf) Kullanımı

Yapılarda görsel konforu sağlamak amacıyla gün ışığı önemli bir parametre olmaktadır. Bu anlamda, aydınlatma enerji yükünü pasif yöntemlerle azaltmak için doğru kurgulanmış tasarım stratejileri önemli olmaktadır.

Pencerelerde ışık rafı (light shelf) kullanımının enerji etkileri; aydınlatma yükünde (%15-45) oranda iyileşme, soğutma yükünde (%1-4) oranda iyileşmeye neden olmakla birlikte ısıtma yükü ve iç donanım yükü sabit kalmaktadır.

Senaryo detay açıklamaları;

1. İç ışık rafı

Tasarruf: Aydınlatmada %15-25 oranında düşüş

Maliyet: 150-300 ₺/m²

Kurulum: Kolay, mevcut binalara uygun

Etki: Doğal ışığın içeri yayılması

2. Dış ışık rafı

Tasarruf: Aydınlatmada %20-30 oranında düşüş

Maliyet: 300-500 ₺/m

Kurulum: Orta zorluk, dış cephe işi

Etki: Gölgeleme + ışık yönlendirme

3. Kombine ışık rafı

Tasarruf: Aydınlatmada %25-35 oranında düşüş

Maliyet: 400-600 ₺/m²

Kurulum: Profesyonel gerektirir

Etki: En iyi ışık dağılımı

4. Akıllı ışık rafı

Tasarruf: Aydınlatmada %30-40 oranında düşüş

Maliyet: 600-900 ₺/m²

Kurulum: Karmaşık, otomasyon entegrasyonu

Etki: Mevsimsel ve günlük ayar

5. Entegre sistem

Tasarruf: Aydınlatmada %35-45 oranında düşüş; Soğutmada %1-2 oranında düşüş

Maliyet: 800-1.200 ₺/m²

Kurulum: Kompleks, tasarım entegrasyonu

Etki: Çok yönlü enerji optimizasyonu

Işık rafı sistemleri, özellikle kombine ışık rafı çözümü ile aydınlatma enerjinizde %25-35 tasarruf sağlayabilir. Mevcut yüksek aydınlatma yükü (12.297 kBTu/ft²) dikkate alındığında, bu önemli bir enerji tasarrufu potansiyeli sunar. Soğutma yükündeki hafif artış, aydınlatma tasarrufu yanında minimize kalmaktadır (Tablo 2.7).

(BEP-TR), aydınlatma enerjisi ihtiyacını, binanın toplam birincil enerji tüketiminin bir bileşeni olarak hesaplamaktadır.

Mevcut durumda 12.297 kBTu/ft² olan aydınlatma tüketimi, "Kombine Işık Rafı" senaryosu ile 7.993-9.223 kBTu/ft²'ye, "Entegre Sistem" ile ise 6.763-7.993 kBTu/ft²'ye kadar düşmektedir. Bu düşüş, EKB sınıfının B ile A seviyesine ulaşmasında etkili olmaktadır. Doğal ışığın iç mekanlara homojen dağılımı bu senaryoda sağlanarak, BEP-TR'nin örtük olarak hedeflediği iç mekan enerji iyileştirmeleri sağlanılmaktadır.

LEED, BREEAM, WELL Standartlarının Gün Işığı ve Görsel Konfor başlıkları altında puanlama yapılmaktadır. Gün Işığı Alanı kriterinde, derin mekanlarda gün ışığının ulaştığı alan yüzdesi arttırımı puan kazandırmaktadır. Kamaşma Kontrolü kriterinde, gün ışığı iç mekanların tavanlarına yansıtılarak kamaşma önlenir ve bu sayede puan kazanılır. Aydınlatma Enerjisi Yoğunluğu kriterinde, %15-45'lik aydınlatma enerjisi tasarrufu puan kazandırmaktadır. EN 17037 Gün Işığı Standartında, gün ışığı yoğunluğu, yönlendirilmesi, kontrolü gibi kriterleri içermektedir. Bu doğrultuda, kombine ışık rafı çözümü etkili olmaktadır.

Tablo 2.7 Pencereelerde ışık rafı (light shelf) kullanımının enerji etkileri

Senaryo	Isıtma Enerjisi (kBtu/ft ²)	Soğutma Enerjisi (kBtu/ft ²)	Aydınlatma Enerjisi (kBtu/ft ²)	Toplam Enerji (kBtu/ft ²)	Yıllık Enerji Tasarrufu (kBtu)	Maliyet (₺)	Geri Ödeme (yıl)
Mevcut Durum	2.115	38.267	12.297	68.67	-	-	-
İç Işık Rafı	2.115	38.650-38.650	9.223-10.452	65.99-66.22	2.060-3.433	150000-300000	2-4
Dış Işık Rafı	2.115	39.034-39.415	8.608-9.838	64.76-65.37	2.747-4.805	300000-500000	2-3
Kombine Işık Rafı	2.115	39.034-39.797	7.993-9.223	64.14-65.14	3.433-5.494	400000-600000	2-3
Akıllı Işık Rafı	2.115	38.650-39.034	7.378-8.608	63.14-63.76	4.120-6.180	600000-900000	2-3
Entegre Sistem	2.115	37.883-37.883	6.763-7.993	61.76-62.99	5.494-7.555	800000-1200000	2-3

2.2.7. Pencereelerde Özel Cam Kaplama Malzeme Kullanımı

Cam teknolojisi ısı iletkenliği (U değeri) üzerinde etkili olduğu gibi güneş enerjisinin kontrolünü (SHGC) ile görsel ışık geçirgenliği üzerinde de etkili olmaktadır. Bu anlamda, bina enerji dengesine yönelik hassas ayarlar mevsimsel olarak yapılabilmektedir.

Pencereelerde özel cam kaplama malzeme kullanımının enerji etkileri; ısıtma yükünde (%10-40) oranda iyileşme, soğutma yükünde (%10-35) oranda artış, iç aydınlatma yükünde (%1-8) oranda artış olmakla birlikte iç donanım yükü ise değişmez.

Senaryo detay açıklamaları;

1. Tek low-e kaplama

Özellikler: Tek yüzey kaplama, soft coating

U Değeri: 1.6-2.0 W/m²K

SHGC: 0.50-0.65

En İyi Kullanım: Denge iklim bölgeleri

2. Çift low-e kaplama

Özellikler: Çift yüzey kaplama, hard/soft coating

U Değeri: 1.2-1.6 W/m²K

SHGC: 0.40-0.55

En İyi Kullanım: Çoğu iklim bölgesi

3. Selektif kaplama

Özellikler: Görünür ışık optimize, IR bloke

U Değeri: 1.0-1.4 W/m²K

SHGC: 0.35-0.50

En İyi Kullanım: Yüksek performans binalar

4. Solar kontrol kaplama

Özellikler: Yüksek güneş reddi, özel metalik

U Değeri: 1.8-2.2 W/m²K

SHGC: 0.25-0.40

En İyi Kullanım: Sıcak iklimler, ofis binaları

5. Akıllı kaplama

Özellikler: Termokromik/elektrokromik, adaptif

U Değeri: 0.8-1.2 W/m²K (değişken)

SHGC: 0.30-0.60 (dinamik)

En İyi Kullanım: Premium projeler, sıfır enerji binalar

Özel cam kaplamalar, mevcut yüksek soğutma yükü dikkate alındığında Solar kontrol kaplama ile en yüksek tasarruf potansiyeli sunar (Tablo 2.8).

Özel cam kaplama senaryolarının tümünde görülen iyileşmeler, EKB sınıfını C'den B ile A'ya taşımada katkı sağlamaktadır. Siirt'in Sıcak-Kurak iklim bölgesi göz önüne alındığında, soğutma yükünü kontrol etmek birincil öncelik olmaktadır. Solar Kontrol Kaplama, yüksek SHGC kontrolü (0.25-0.40) sayesinde soğutma tüketimini referans duruma göre %35 (38.267'den 24.874'e) azaltarak en yüksek tasarrufu (10,300-15,101 kBTu) sağlar. Bu kaplama, BEP-TR'nin sıcak bölgeler için öngördüğü düşük g değerli cam gerekliliklerini karşılamada en uygun seçenek olmakla birlikte yüksek U değeri (1.8-2.2), Siirt'in ılıman kışları düşünüldüğünde dezavantaj olmaktadır. Çift Low-E Kaplama ise, iyi bir U değeri (1.2-1.6) ve dengeli bir SHGC (0.40-0.55) ile hem ısıtmada hem de soğutmada anlamlı iyileşme sağlayarak (%8,240-12,360 kBTu tasarruf) daha genel bir çözüm sunmakla birlikte yönetmeliğin farklı mevsimler için olan şartlarına uyum göstermektedir.

LEED ve BREEAM Enerji Performansı ve Gün Işığı kriterlerinde, enerji tüketimindeki mutlak düşüşün yanı sıra, gün ışığından yararlanmak için yeterli görünür ışık geçirgenliği (VLT) gerekmektedir. Selektif Kaplama ve Çift Low-E Kaplama, yüksek ışık/yanma oranları (1.63-2.00) ile bu dengeyi en iyi kuran seçenekler olmaktadır. Solar Kontrol Kaplama ise düşük VLT'si (%40-60) nedeniyle gün ışığı kredilerinden tam puan almayı zorlaştırmakla birlikte enerji performansındaki üstün iyileşmeyle avantaj sağlamaktadır.

Pasif Ev Standartında, Siirt için Solar Kontrol Kaplama, ısıtma odaklı U değeri kriterinden ziyade, enerji tüketimini minimize etme hedefiyle daha uyum sağlamaktadır. Sıfır Enerji Bina (NZEB) hedefi doğrultusunda kullanılan Akıllı (Adaptif) Kaplamalar ile değişen mevsimsel ve günlük koşullara yanıt verecek SHGC ve U değerleri dinamik olarak ayarlanabilmektedir (Tablo 2.9).

Tablo 2.8 Kaplama türleri karşılaştırması

Senaryo	Isıtma Tüketimi (kBtu/ft)	Soğutma Tüketimi (kBtu/ft)	Aydınlatma Tüketimi (kBtu/ft ²)	Toplam Tüketimi (kBtu/ft ²)	Yıllık Enerji Tasarrufu (kBtu)	Yıllık Mali Tasarruf (₺)	Geri Ödeme Süresi (yıl)
Tek Low-E Kaplama	1.586	32.527	11.805	62.92	5.494-8.240	19.200-28.800	2-4
Çift Low-E Kaplama	1.375	29.848	11.560	59.84	8.240-12.360	28.800-43.200	2-3
Selektif Kaplama	1.480	28.700	11.927	58.20	9.623-13.734	33.600-48.000	2-3
Solar Kontrol Kaplama	1.798	24.874	11.314	56.95	10.300-15.101	36.000-52.800	2-3
Akıllı Kaplama	1.798	26.787	11.682	56.33	12.360-17.850	43.200-62.400	2-3

Tablo 2.9 Pencereelerde özel cam kaplama malzeme kullanımının enerji etkileri

Kaplama Tipi	U Değeri (W/m ² K)	SHGC	Görünür Işık Geçirgenliği	Güneş Isı Kazanç Kontrolü	Işık/Yük Oranı
Standart Cam	2.7-3.2	0.70-0.80	%80-85	Düşük	1.14-1.21
Tek Low-E	1.6-2.0	0.50-0.65	%70-78	Orta	1.40-1.56
Çift Low-E	1.2-1.6	0.40-0.55	%65-75	İyi	1.63-1.88
Selektif Kaplama	1.0-1.4	0.35-0.50	%60-70	Çok İyi	1.71-2.00

Solar Kontrol	1.8-2.2	0.25-0.40	%40-60	Mükemmel	1.60-2.40
Akıllı Kaplama	0.8-1.2	0.30-0.60	%50-75	Adaptif	1.67-2.50

2.2.8. Pencerelede Gölgeleme Amaçlı Saçak Uygulaması

Pasif güneş kontrolünün temel bir elemanı olarak kullanılan saçaklar, soğutma yükünün yüksek olduğu iklimlerde birincil olarak tercih edilmekle birlikte yapıların enerji performansını ve ısıl konforunu iyileştirme önemli bir role sahip olmaktadır.

Pencerelede gölgeleme amaçlı saçak uygulamasının enerji etkileri; ısıtma yükünde (%1-12) oranda iyileşme, soğutma yükünde (%8-28) oranda artış, iç aydınlatma yükünde (%0-4) oranda artış olmakla birlikte iç donanım yükü ise değişmez.

Senaryo detay açıklamaları; ayarlanabilir saçak, ile optimize saçağa ek saçak genişlikleri 50 cm, 75 cm, 100 cm ile 125 cm olmak üzere altı farklı senaryo incelenmiştir. Ayarlanabilir saçak esneklik isteyen projeler için önerilirken, optimize saçak premium projeler için önerilir. Bu noktada, yüksek performanslı binaların enerji tasarım stratejilerinin ele alındığı bir derlemede, sabit gölgeleme elemanları (saçak, ışık rafı) ile hareketli gölgeleme sistemlerinin maliyet karşılaştırması yapılmış; sabit sistemlerin ilk yatırımı daha düşük olmasına rağmen, esnek sistemlerin yıllık enerji kazancında %5-10 daha etkili olduğu belirtilmiştir (Ashrafian, 2019).

Saçak malzemesi olarak ise kompozit malzeme kullanımı tercih edilmelidir (Tablo 2.10, 2.11, 2.12).Saçak uygulamaları, özellikle 100 cm sabit saçak çözümü ile mevcut yüksek soğutma yükünde %12-22 tasarruf sağlayabilir. Yatırım geri ödeme süresi 2-3 yıl arasındadır ve Güney cephelerde en yüksek verim elde edilir. Kış ısıtma etkisini minimize etmek için aç ve malzeme optimizasyonu kritik önem taşır.

Saçak genişliği arttıkça soğutma tüketiminde belirgin bir düşüş (38.267'den 26.787 kBTu/ft²'ye kadar) olmakla birlikte kışın güneşe engel teşkil ettiğinden dolayı ısıtma tüketiminde hafif bir artışa neden olmaktadır. Toplam enerji tüketiminde görülen düşüşler EKB sınıflarını iyileştirici etkide bulunmaktadır. BEP-TR, binayı bir sistem olarak ele alır. Saçaklar, pencere performansının (U değeri ve SHGC) bir parçası olarak değerlendirildiğinde, Doğru tasarlanmış bir saçak, yüksek SHGC'li bir camın yaz performansını iyileştirebilir ya da düşük SHGC'li bir cam kış performansını koruyabilir. Bu bütünsel yaklaşım, yönetmeliğin özünü teşkil etmektedir.

Saçak açısı ve genişliğinin hesaplanması, Pasif Ev tasarım sürecinin ayrılmaz bir parçası olmaktadır. LEED, BREEAM ve WELL Standartlarında yer alan "Pasif Tasarım" ile "İleri Enerji Verimliliği" kriterlerinde güneş kontrolü saçaklar için puan verilmektedir.

"Ayarlanabilir Saçak" senaryosu, mevsimsel ve günlük değişimlere uyum sağlayarak bu kredileri kazanmada en yüksek potansiyele sahip olmakla birlikte "Optimum Saçak" simülasyona dayalı tasarımı temsil edecek şekilde puanlanmaktadır. EN 17037 Gün Işığı Standardı ve Güneşten Korunma kriterlerinde, güneş ışığının kontrolünü sağlayan saçaklar puan kazandırmaktadır.

Mevcut Pencere Boyutları ve Saçak Tasarım Esasları:

Çalışma alanındaki A ve B tipi bloklarda, güney cephelerde yer alan pencerelerin mevcut ölçüleri 150 cm (genişlik) x 150 cm (yükseklik) olarak tespit edilmiştir (pencere altı kotu: zemin seviyesinden itibaren 90 cm). Saçak tasarımı, bu pencere ölçüleri ve Siirt'in coğrafi konumu (37°K enlemi) dikkate alınarak aşağıdaki geometrik esaslara göre kurgulanmıştır:

Kış (21 Aralık) Güneş Açısı (Öğle vakti): Yaklaşık 29.5° (ufuktan yükseklik). Bu durumda saçak, mümkün olduğunca kısa tutulmalı veya eğimi, güneş ışınlarının pencereye dik gelecek şekilde ayarlanmalıdır.

Yaz (21 Haziran) Güneş Açısı (Öğle vakti): Yaklaşık 76.5° (ufuktan yükseklik). Bu durumda saçak, güneş ışınlarını tamamen engelleyecek derinlikte olmalıdır.

Tasarım Hesaplama Yöntemi:

Her bir saçak genişliği için, pencere üst kotundan (lento) itibaren saçak ucuna kadar olan düşey mesafe sabit tutulmuş (pencere yüksekliği 150 cm), yatay uzaklık ise değişken olarak alınmıştır. Aşağıdaki Tablo 2.10'da verilen "Gölgeleme Açısı", saçak ucunun pencere altına göre yaptığı arktanjan ($\tan^{-1}$) hesabıyla bulunmuştur. Örneğin; 100 cm saçak için, lento kotu (pencere üstü) ile saçak ucu arasındaki düşey mesafe 150 cm, yatay mesafe 100 cm olduğundan, gölgeleme açısı yaklaşık 56° olarak hesaplanır. Bu açı, güneşin yükseklik açısından (76.5°) büyük olduğu için yazın tam gölgeleme sağlar; kış açısından (29.5°) ise küçük olduğu için ışınlar geçer.

Mevcut Tablo 2.10'daki "Gölgeleme Açısı" sütununda verilen değerler, bu geometrik hesaplamalara dayanmaktadır. Örneğin:

50 cm saçak: 150 cm düşey / 50 cm yatay $\rightarrow$ açı $\approx 71.5^\circ$ (bu durumda 150 cm'lik pencere için 50 cm yetersiz kalır, bu nedenle etkinlik "Sınırlı" olarak işaretlenmiştir).

100 cm saçak: 150 cm / 100 cm $\rightarrow$ açı $\approx 56.3^\circ$ (yaz güneşini tam engeller, Tablo 2.10'da "Yüksek" etkinlik).

125 cm saçak: 150 cm / 125 cm $\rightarrow$ açı $\approx 50.2^\circ$ (en kapsamlı gölgeleme, "Çok Yüksek").

Tablo 2.10 Saçak genişliği ve açı optimizasyonu

Saçak Genişliği	Gölgeleme Açısı	Yaz Etkinliği	Kış Etkisi	Önerilen Uygulama
50 cm	45-60°	Sınırlı	Minimal	Küçük pencereler
75 cm	30-45°	Orta	Orta	Konut projeleri
100 cm	20-35°	Yüksek	Belirgin	Ofis binaları
125 cm	15-25°	Çok Yüksek	Yüksek	Ticari binalar

Tablo 2.11 Malzeme seçenekler

Malzeme Tipi	Dayanıklılık	Ağırlık	Maliyet	Estetik
Ahşap	Orta	Hafif	Düşük	Yüksek
Alüminyum	Yüksek	Orta	Orta	İyi
Kompozit	Çok Yüksek	Hafif	Yüksek	Mükemmel
Çelik	Yüksek	Ağır	Orta	Orta

Tablo 2.12 Pencerelerde gölgeleme amaçlı saçak uygulamasının enerji etkileri

Senaryo	Isıtma Tüketimi (kBtu/ft)	Soğutma Tüketimi (kBtu/ft)	Aydınlatma Tüketimi (kBtu/ft²)	Toplam Tüketimi (kBtu/ft²)	Yıllık Enerji Tasarrufu (kBtu)	Yıllık Mali Tasarruf (₺)	Geri Ödeme Süresi (yıl)
50 cm saçak	2.222	33.675	12.419	64.76	2.747-4.805	9.600-16.800	3-5
75 cm saçak	2.269	31.379	12.542-	62.92-	4.120-6.867	14.400-24.000	2-4
100 cm saçak	2.326	29.848	12.664	61.35	5.494-8.928	19.200-31.200	2-3
125 cm saçak	2.326	26.787	12.787-	59.84	8.240-12.360	28.800-43.200	3.8-5
Ayarlanabilir saçak	2.157	28.700	12.419	60.22	6.867-10.988	24.000-38.400	2-3
Optimize saçak	2.138	27.552	12.297	58.20	8.240-12.360	28.800-43.200	2-3

2.2.9. Güneş Paneli Sistemleri Kullanımı

Yapıların işletilmesinde kullanılan operasyonel enerji tüketimi üzerinde herhangi bir etkide bulunmamakla birlikte tüketimi karşılayan enerji kaynağını fosil yakıtlar ile elektrik kullanımından, yenilenebilir enerji kaynaklarına dönüştürerek, yapıların yaşam döngüsündeki karbon ayak izini ve enerji maliyetlerini düşeren bir strateji olarak, güneş paneli sistemleri kullanımı benimsenmelidir.

Güneş paneli sistemleri kullanımının enerji etkileri; ısıtma yükünde, soğutma yükünde, iç aydınlatma yükünde ve iç donanım yükünde herhangi bir değişim olmamaktadır. Senaryolar, 5346 Sayılı Yenilenebilir Enerji Kanunu ve Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği kapsamında şekillendirilmiştir. Bu düzenlemeler, konutlarda kurulan GES'lerin ürettiği fazla elektriğin şebekeye satışını 10 yıl süreyle garanti altına alarak yatırım kararlarını olumlu etkilemektedir (5346 Sayılı Kanun, 2005; Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği, 2010).

Senaryo detay açıklamaları;

1. Temel sistem (10-15 kW)

Panel Alanı: 50-90 m²

Yıllık Üretim: 14.000-21.000 kWh

Öz Tüketim: 4.200-8.400 kWh

Şebekeye Satış: 9.800-12.600 kWh

Geri Ödeme Süresi (yıl): 4-6

Önerilen: Başlangıç yatırımı, küçük-orta binalar

2. Orta sistem (20-30 kW)

Panel Alanı: 100-180 m²

Yıllık Üretim: 28.000-42.000 kWh

Öz Tüketim: 11.200-21.000 kWh

Şebekeye Satış: 16.800-21.000 kWh

Geri Ödeme Süresi (yıl): 3-5

Önerilen: Orta ölçekli binalar, iyi ROI (Return on Investment),(Yatırımın Geri Dönüşü).

Binalarda çatı üstü güneş enerjisi potansiyeli ve geri ödeme sürelerini araştıran SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi raporunda (2023), Türkiye'nin güneydoğu illerinde (Siirt dahil) 20-30 kW'lık bir sistemin ortalama 4 yılda kendini amorti ettiği ve kalan ömrü boyunca net kazanç sağladığı hesaplanmıştır.

3. Kapsamlı sistem (40-50 kW)

Panel Alanı: 200-300 m²

Yıllık Üretim: 56.000-70.000 kWh

Öz Tüketim: 28.000-42.000 kWh

Şebekeye Satış: 28.000-28.000 kWh

Geri Ödeme Süresi (yıl): 3-4

Önerilen: Büyük binalar, yüksek enerji bağımsızlığı

4. Tam öz tüketim (60-80 kW)

Panel Alanı: 300-480 m²

Yıllık Üretim: 84.000-112.000 kWh

Öz Tüketim: 50.400-78.400 kWh

Şebekeye Satış: 33.600-33.600 kWh

Geri Ödeme Süresi (yıl): 3-4

Önerilen: Maximum enerji özerkliği

5. Enerji fazlası (100+ kW)

Panel Alanı: 500+ m²

Yıllık Üretim: 140.000+ kWh

Öz Tüketim: 98.000+ kWh

Şebekeye Satış: 42.000+ kWh

Geri Ödeme Süresi (yıl): 3-4

Önerilen: Ticari gelir amaçlı, büyük projeler

Devlet teşvikleri ve yasal çerçeve kapsamında; 5346 sayılı yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanun ile vergi usul kanunu genel tebliği (KDV istisnası düzenlemeleri) aşağıdaki tabloda detaylandırılmıştır (Tablo 2.13).

Güneş paneli sistemleri, mevcut yüksek enerji tüketiminizde %40-50 tasarruf potansiyeli sunar. 20-30 kW kurulu güç ile başlangıç yapmanız, 3-5 yıl geri ödeme süresi ve %20-30 ROI ile en dengeli çözümdür. Yaz aylarındaki yüksek soğutma ihtiyacı, güneş enerjisi üretim zirvesi ile örtüşerek maksimum fayda sağlar.

Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı kapsamında BEP-TR, binaların birincil enerji ihtiyacını ve karbon emisyonunu değerlendirmektedir. Buna göre, yapıların çatılarına kurulmuş GES'ler aracılığıyla birincil enerji tüketimleri azaltılmaktadır. Bu anlamda, EKB'lerde yer alan karbon emisyonu değerini yenilenebilir enerji kaynak kullanımıyla iyileştirilmektedir.

Güneş enerjisi entegrasyonu, küresel sürdürülebilirlik anlayışının temelinde yer alan bir strateji olmaktadır. Avrupa Birliği'nin Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD) ve küresel net sıfır taahhütleri, binaların fosil yakıtsız ve yüksek oranda yenilenebilir enerji kaynaklı olmasını hedeflemektedir. "Tam Öz Tüketim" (60-80 kW) ve "Enerji Fazlası" (100+ kW) senaryoları, binanın yıllık elektrik ihtiyacının büyük kısmını veya tamamını karşılayarak, NZEB için temel oluşturmaktadır.

Yeşil bina sertifikaları (LEED, BREEAM, DGNB), “Yenilenebilir Enerji” kategorisindeki yüzdesel iyileştirmeler için önemli kredi puanları sunmaktadır. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA 7), GES projelerini, operasyonel karbon emisyonlarının azaltılması nedeniyle desteklemektedir.

Tablo 2.13 Mevcut teşvikler özet tablosu

Teşvik Türü	Kapsam	Fayda	Başvuru Koşulları
KDV İstisnası	%8 KDV muafiyeti	Doğrudan maliyet düşüşü	Lisanssız GES projeleri
Gümrük Vergisi Muafiyeti	Ekipman ithalatında	%5-20 maliyet azalımı	Yerli olmayan ekipmanlar
Lisanssız Üretim	1 MW'a kadar	Basit prosedür	Tüketim yeri aynı olmalı
Şebekeye Satış Garantisi	10 yıl alım garantisi	Gelir güvencesi	Dağıtım şirketi anlaşması
Yerli Üretim Teşviki	Ek %5-10 destek	Yerli katkı primi	Yerli malı belgesi

Uygulama ve Yerleşim Detayları: Çalışma kapsamında önerilen güneş enerjisi sistemlerinin (GES) fiziksel olarak uygulanabilirliğini netleştirmek amacıyla, panellerin bina üzerindeki konumları, montaj açıları ve mimari bütünleşme stratejileri aşağıda detaylandırılmıştır. Önerilen tüm sistemler, Siirt'in yerel iklim verileri ve bina geometrisi (A ve B plan tipleri) dikkate alınarak kurgulanmıştır.

Montaj Yerleri ve Yönlenme Esasları: Siirt, Kuzey Yarımküre'de (37°K enlemi) yer aldığından, maksimum güneş ışıınımı alabilmek için tüm fotovoltaiik (PV) panellerin tam güney yönüne (azimut açısı 0°) bakacak şekilde konumlandırılması temel kuraldır.

Çatı Montajı (Birincil Strateji): Blokların mevcut çatıları (genellikle düz veya az eğimli teras çatı) değerlendirilmiştir. Siirt enlemi için yıllık maksimum enerji üretimini sağlayan optimum panel eğim açısı (tilt açısı) 30°-35° olarak hesaplanmıştır. Paneller, çatı yüzeyinden 15-20 cm yükseltilerek, kuzey-güney doğrultusunda sıralar halinde yerleştirilecektir. Sıralar arası mesafe (gölgelemeyi önlemek için) en az 1.5 metre olacak şekilde düzenlenmiştir. (Şekil 2.x: Çatı Yerleşim Planı Önerisi).

Cephe Montajı (İkincil / Yardımcı Strateji): Daha önceki bölümlerde (Sayfa 9'daki ifadeye istinaden) belirtilen “cepheye yerleştirilen” paneller, kesinlikle kuzey cephelerde değil; yalnızca Güney, Güneydoğu ve Güneybatı cephelerinde uygulanabilir.

Mevcut Durumda (Mevcut Binalar): Cephe panelleri, bina kabuğuna düşey (90°) veya 75° - 80° açı ile monte edilen özel taşıyıcı konsol sistemler aracılığıyla yerleştirilecektir. Bu sistem, özellikle balkon parapetleri veya perde duvar yüzeyine entegre edilebilir. Düşey cephe panellerinin verimi, çatıya göre yaklaşık %20-25 daha düşük olmakla birlikte, bina yüzeyindeki kullanılmayan alanları değerlendirmesi açısından avantajlıdır.

"Açı Ayarlama" Mekanizması: Metinde bahsedilen "açı ayarı" ifadesi, sabit sistemler için değil, mevsimsel veya günlük ayar imkânı sunan hareketli (tracker) sistemler için geçerlidir. Bu çalışmada önerilen, maliyet etkinliği nedeniyle sabit açılı sistemlerdir. Ancak, cephede kullanılacak paneller için, kış aylarında (21 Aralık) güneşin ufukla yaptığı yaklaşık 29° 'lik açıya ve yaz aylarında (21 Haziran) yaklaşık 76° 'lik açıya göre manuel olarak ayarlanabilen menteşeli taşıyıcı sistemler (2 pozisyonlu: Kış/Yaz modu) tasarlanmıştır. Bu ayar, alt taşıyıcı kolun uzatılıp kısaltılmasıyla sağlanmaktadır.

3. BULGULAR

Stratejiler, pasif iyileştirmeler (yalıtım güçlendirme, pencere değişimi, güneş kontrol elemanları) ile teknolojik entegrasyon (GES'ler) kapsamında oluşturulmuş olup, ulusal yönetmelikler ile uluslararası standartlar ve sertifikasyonlara uyum konusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Bu durum, çalışmanın sadece bir teşhis olmanın ötesinde, yol gösterici bir harita niteliği kazanmasını sağlamaktadır.

Yapılan detaylı analizler çalışmalarıyla, Siirt mevcut TOKİ konut bloklarının enerji performansını iyileştirmek için birbirini tamamlayan çok sayıda etkin ve ekonomik strateji bulunduğunu ortaya koymuştur. Stratejilere yönelik geliştirilen senaryolarda; ulusal yönetmelik değerlendirmeleri ile uluslararası standartlara uyum kriterleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca, kullanıcı konforunu artırma temelinde yatırım geri dönüş sürelerine de senaryolarda yer verilmiştir.

Mevcut yerleşim düzeninde, enerji etkin iyileştirme stratejilerinin uygulanması sonucu, çalışma alanı enerji tüketim değerlerinde düşüş olduğu, yapılan analiz çalışmalarıyla doğrulanmıştır. Bu anlamda, geliştirilen dokuz ana senaryoya bağlı alt senaryolar içerisinde en verimli olanları seçilerek aşağıdaki tabloya yerleştirilmiştir (Tablo 3.1).

Kaynakların verimli dağıtımı ve uzun vadeli enerji güvenliği için, maliyet-etkinlik analizine dayalı entegre yaklaşım anlayışı benimsenmelidir. Siirt için entegre uygulama önerisi olarak; belirlenen stratejilerin aşamalı ve birbiriyle bütünlük bir uyum içerisinde uygulanması gerekmektedir.

1. Aşama (Temel İyileştirme); dış cephe yalıtım kalınlığının 10 cm'ye çıkarılması ve solar kontrol kaplamalı yeni camlar ile pencere sistemlerinin değiştirilmesi gerekmektedir.

2. Aşama (Pasif Kontrol); güney cephelere 100 cm sabit saçak, uygun iç mekanlara ise kombine ışık rafı sistemlerinin eklenmesi gerekmektedir.

3. Aşama (Aktif Üretim); çatı yüzeyine, binanın kalan yıllık elektrik ihtiyacını karşılayacak şekilde 20-30 kW gücünde fotovoltaiik panel sistemi kurulmalıdır.

Bu aşamalarda, strateji maliyetleriyle birlikte maksimum verim eldesi önemli olmakla birlikte esas olan kullanıcı konforunu arttırmaktır.

Tablo 3.1 Enerji etkin iyileştirme stratejilerinin uygulanması

ENERJİ ETKİN İYİLEŞTİRME STRATEJİLERİ	UYGULAMA	VERİ	kBtu/ft ²	MALİYET	TASARRUF
	Blok dış kabuk yalıtım kalınlığını 2 katına çıkarmak.	Isıtma	1.480	Yapılan yalıtım maliyeti 3-5 yıl arasında, enerji tüketim maliyetini karşılayabilecektir.	%10.7 28 Konut
		Soğutma	32.614		
		İç Aydınlatma	12.297		
		İç Donanım	15.987		
		Toplam	61.38		
	Blok dış kabuk yalıtım malzemesi kalitesini arttırmak (Poliüretan Panel).	Isıtma	1.160	1. Sınıf kalitede malzeme maliyeti 5-10 yıl arasında, enerji tüketim maliyetini karşılayabilecektir.	%13.4 35 Konut
		Soğutma	30.614		
		İç Aydınlatma	12.297		
		İç Donanım	15.987		
		Toplam	59.50		
	Kuzeye bakan cephelerde pencere boyutlarını küçültmek(Akıllı Optimizasyon).	Isıtma	1.819	Yeni bina tasarımlarında öncelikli seçenek olarak tanımlanan, yöntem 4-7 yıl arasında enerji tüketim maliyetini karşılayabilecektir.	%3.1 8 Konut
		Soğutma	37.578		
		İç Aydınlatma	12.789		
		İç Donanım	15.987		
		Toplam	66.48		
	Güneye bakan cephelerde pencere boyutlarını büyültmek(Optimize artış).	Isıtma	1.650	Basit uygulanabilir ve düşük risk taşıması nedenleri ile yöntem 2-3 yıl arasında enerji tüketim maliyetini karşılayabilecektir.	%7.6 20 Konut
		Soğutma	40.049		
		İç Aydınlatma	10.577		
		İç Donanım	15.987		
		Toplam	63.12		
	Pencerelerde üçlü cam ünitelerini kullanmak (Yüksek Performans 3'lü).	Isıtma	1.163	Enerji verimli binalar kullanılan yöntem 3-4 yıl arasında enerji tüketim maliyetini karşılayabilecektir.	%12.9 34 Konut
		Soğutma	31.379		
		İç Aydınlatma	12.297		
		İç Donanım	15.987		
		Toplam	59.84		
	Pencerelerde ışık rafı (light shelf) kullanımı (kombine ışık rafı).	Isıtma	2.115	Maksimum verim için, tercih edilen ışık rafı, 2-3 yıl arasında enerji tüketim maliyetini karşılayabilecektir.	%6.5 17 Konut
		Soğutma	39.034		
		İç Aydınlatma	7.993		
		İç Donanım	15.987		
		Toplam	64.14		
	Pencerelerde özel cam kaplama malzeme kullanımı (Solar kontrol kaplama).	Isıtma	1.798	Premium projeler, sıfır enerji binalar için kullanılan yöntem 2-3 yıl arasında enerji tüketim maliyetini karşılayabilecektir.	%17.07 45 Konut
		Soğutma	24.874		
		İç Aydınlatma	11.314		
		İç Donanım	15.987		
		Toplam	56.95		

	Pencerelerde gölgeleme amaçlı saçak uygulaması yapmak.	Isıtma	2.326	100 cm saçak yöntemi 2-3 yıl arasında enerji tüketim maliyetini karşılayabilecektir.	%12.3 32 Konut
		Soğutma	29.848		
		İç Aydınlatma	12.664		
		İç Donanım	15.987		
		Toplam	61.35		
	Güneş paneli sistemleri kullanımı (Orta Sistem (20-30 kW))	Isıtma	2.115	Tam öz tüketim anlayışına sahip panellerle 3-4 yıl arasında enerji tüketim maliyeti karşılanabilecektir.	%100 262 Konut
		Soğutma	38.267		
		İç Aydınlatma	12.297		
		İç Donanım	15.987		
		Toplam	68.67		

4. SONUÇ

Mevcut doku için uygulanabilir iyileştirme olanaklarının varlığı kapsamında, yapılacak müdahalelerle enerji tüketiminde %3 ile %17 arasında değişen oranlarda tek başına iyileşmeler sağlanabileceğini görülmüştür. Özellikle yalıtım kalınlığının artırılması, güneş kontrol kaplamalı camlar ve gölgeleme saçakları gibi stratejiler, nispeten kısa geri ödeme süreleri (2-5 yıl) ile dikkat çekmektedir. Fotovoltaik panel sistemleri ise enerji üretimi yoluyla tüketimi dengeleyerek, mevcut yüksek tüketim değerlerini telafi etme potansiyeli taşımaktadır.

Autodesk Revit tabanlı enerji simülasyonları ve yaşam döngüsü maliyet analizleri yoluyla, dokuz ana iyileştirme kategorisine ait çok sayıda senaryo teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmiş, Siirt'in yerel koşullarına özgü optimum iyileştirme paketleri belirlenmiştir. Bu stratejilerin tasarruf potansiyelleri şu şekilde sıralanabilir:

- Blok dış kabuk yalıtım kalınlığını 2 katına çıkarmak %10.7,
- Blok dış kabuk yalıtım malzemesi kalitesini arttırmak (Poliüretan Panel) %13.4,
- Kuzeye bakan cephelerde pencere boyutlarını küçültmek (Akıllı Optimizasyon) %3.1,
- Güneye bakan cephelerde pencere boyutlarını büyütmek (Optimize artış) %7.6,
- Pencerelerde üçlü cam ünitelerini kullanmak (Yüksek Performans 3'lü) %12.9,
- Pencerelerde ışık rafı (light shelf) kullanımı (kombine ışık rafı) %6.5,
- Pencerelerde özel cam kaplama malzeme kullanımı (Solar kontrol kaplama) %17.07,
- Pencerelerde gölgeleme amaçlı saçak uygulaması yapmak %12.3 tasarruf sağlamaktadır. Güneş paneli sistemleri kullanımı (Orta Sistem (20-30 kW)) yönteminde ise mevcut enerji tüketim değerleri değişmemekle birlikte, üretim yoluyla tüketimin karşılanması hedeflenmektedir.

Siirt'in iklim koşullarında, mevcut konutların toplam enerji tüketiminde soğutma yükünün (%55.7) ısıtma yükünden (%3.1) çok daha baskın olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, iyileştirme stratejilerinin seçiminde ve optimizasyonunda öncelik soğutma yükünü azaltmaya verilmelidir.

Yapılan analizler, pencere sistemlerine yönelik iyileştirmelerin, özellikle solar kontrol kaplamalı camlar ve gölgeleme amaçlı sabit saçak uygulamalarının, Siirt koşullarında en kısa geri ödeme sürelerine (2-3 yıl) sahip olduğunu ve soğutma yükünde en yüksek mutlak düşüşü sağladığını göstermiştir. Yalıtım kalınlık/kalite artışı ve üçlü cam uygulamaları da önemli tasarruflar sağlamakla birlikte, ilk yatırım maliyetleri nedeniyle geri ödeme süreleri daha uzun olmaktadır.

Maksimum verimlilik ve ekonomik fizibilite için stratejilerin birbiriyle uyumlu paketler halinde uygulanması gerekmektedir. Çalışma kapsamında önerilen üç aşamalı entegre uygulama (temel kabuk iyileştirmesi + pasif güneş kontrolü + fotovoltaik sistem), toplam enerji tüketimini mevcut duruma kıyasla çok önemli oranda azaltarak, binayı "Neredeyse Sıfır Enerjili Bina" (NSEB) hedefine yaklaştırmaktadır.

Bina kabuğuna yönelik pasif iyileştirmeler, enerji talebini düşürürken, çatıya kurulacak PV sistemleri bu azaltılmış talebi yenilenebilir kaynaktan karşılayarak binanın karbon ayak izini ve enerji faturasını sıfırlama potansiyeli taşımaktadır. 20-30 kW'lık bir sistemin 3-5 yıllık geri ödeme süresi, bu yatırımı ekonomik açıdan cazip kılmaktadır.

Önerilen iyileştirme senaryolarının çoğu, mevcut Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (BEP-TR) gerekliliklerini aşarak, binanın Enerji Kimlik Belgesi (EKB) sınıfını C'den B veya A seviyesine yükseltme potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca, LEED, BREEAM gibi uluslararası yeşil bina sertifikalarının enerji ve konfor kriterlerine önemli katkı sağlayacak nitelikte olmaktadır.

Mevcut sosyal konut stokunun renovasyonu için bölgeye özgü, aşamalı ve sübvansiyonlu iyileştirme paketleri geliştirilmelidir. Öncelik, en kısa geri ödeme süresine sahip pencere ve gölgeleme iyileştirmelerine verilerek, hane halkının enerji yükü hızla hafifletilmelidir.

Enerji iyileştirme kararları alınırken, salt ilk yatırım maliyeti yerine yaşam döngüsü maliyeti ve geri ödeme süresi dikkate alınmalıdır. "Solar kontrol kaplamalı cam + sabit saçak" kombinasyonu, Siirt için başlangıç yatırımı olarak önerilmektedir.

Benzer iklim bölgelerindeki yeni projelerde, çalışmada vurgulanan "akıllı optimizasyon" prensipleri (yönlere göre pencere boyutu optimizasyonu, ışık rafı entegrasyonu, mevsimsel gölgeleme) tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada geliştirilen metodoloji, farklı iklim bölgeleri ve konut tipleri için uyarlanarak ülke çapında bir "en maliyet-etkin iyileştirme haritası"nın oluşturulmasına katkı sağlayabilecektir. Ayrıca, malzeme fiyatlarındaki değişim ve enerji tarifelerinin dinamik analizi, gelecek çalışmalarda modele entegre edilebilecektir.

Sonuç olarak, bu araştırma, enerji verimliliği yatırımlarının sadece teknik değil, aynı zamanda ekonomik fizibilitesinin kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır. Siirt özelinde sunulan kanıta dayalı ve kademeli iyileştirme yol haritası, benzer iklimsel ve sosyo-ekonomik koşullara sahip bölgelerdeki mevcut konut stokunun sürdürülebilir dönüşümü için karar vericilere, tasarımcılara ve nihai kullanıcılara rehberlik edecek değerli bir çerçeve sunmaktadır.



KAYNAKÇA

- A comprehensive cost-optimal approach for energy retrofit of existing multi-family buildings: Application to apartment blocks in Turkey. ScienceDirect, 2017.
- AB'nin Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD), 2002.
- Ashrafiyan, T. (2019). Konut binalarının enerji etkin iyileştirmesi için yeni bir uzun dönem yaklaşımı. MMO Binalarda Enerji Performansı ve Akıllı Binalar Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 15-28.
- Binalarda çatı üstü güneş enerjisi potansiyeli ve geri ödeme süreleri. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Raporu, 2023.
- Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA 7), 2015.
- Cengiz, H. T., Zorer Gedik, G. & Korkmaz, E. (2024). Evaluation of energy-efficient retrofits in glazing areas of building envelope and the impact of PCM application on energy performance: A case study in İstanbul and Diyarbakır. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39(4), 2395-2408.
- Çetintaş, K. F. (2019). Effect of thermal insulation on building energy efficiency in Turkey. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy, 172(2), 85-96. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB), (2025)
- Emekçi, Ş. (2022). Optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde yaşam döngüsü maliyet analizi ve optimizasyon kullanımı: Ankara örneği. Megaron, 16(2), 267-280.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı, 2015.
- Enerji Performansı Yönetmeliği (BEP-TR, 2008).
- EN 17037 Gün Işığı Standardı ve Güneşten Korunma, 2018.
- Koç, T., Kesmen, E. (2011). Kaz Dağı'nda Yüzeye Gelen Güneş Enerjisinin Dağılışı Topografyanın Etkisi. Coğrafi Bilimler Dergisi, 9(1), 101-115.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü, (1991-2020).
- Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (NSEB), 2022.
- Renkli Türkiye Siyasi Haritası ile Kapsamlı, Detaylı Bölgeler ve İller Atlası, 2022 5346 Sayılı Yenilenebilir Enerji Kanunu ve Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği, 2005.
- Siirt (Merkez) Revizyon-İlave İmar Planı Açıklama Raporu, 1995.
- Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), (2025).
- Url-1 <http://www.siirt.gov.tr/tarih> Erisim Tarihi: 20.05.2023