



## 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

Hasan Tunay Cengiz<sup>1\*</sup>, Gülay Zorer Gedik<sup>2</sup>, Ezgi Korkmaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Interior Design, Vocational School, Haliç University, 34060, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Architecture, Faculty of Architecture, Yıldız Technical University, 34349, İstanbul, Türkiye

### Highlights:

- Comparison of various energy retrofit methods in two different climate zones
- Cooling loads calculation
- Comparison of cost analyses

### Keywords:

- Energy-efficient retrofit
- Building energy efficiency
- Glazing area interventions
- Solar shading implementation
- Phase change materials

### Article Info:

Research Article

Received: 03.08.2023

Accepted: 29.12.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1337385

### Correspondence:

Author: Hasan Tunay Cengiz

e-mail:

tunaycengiz@halic.edu.tr

phone: +90 532 547 9769

### Graphical/Tabular Abstract

The building and construction sector accounts for 36% of global energy consumption and 39% of CO<sub>2</sub> emissions, contributing to climate change. To mitigate this impact, improvements are needed in the building stock, particularly through energy-efficient retrofits to the existing structures. This study focuses on a residential building in İstanbul and Diyarbakır in Turkey to analyze their behavior and the effects of implemented retrofits on energy efficiency. As climate change leads to increasing temperatures in Turkey, the importance of reducing cooling loads during summers becomes more evident in building retrofits. Therefore, various retrofit methods, such as adding solar shading systems (GK1 & GK2), replacing glass with solar low-e systems (C), and using phase-changing materials (FDM). These retrofit methods have shown promising results in reducing summer cooling loads in both cities. Cost per unit reductions of selected retrofit methods of the study can be seen in Figure A.

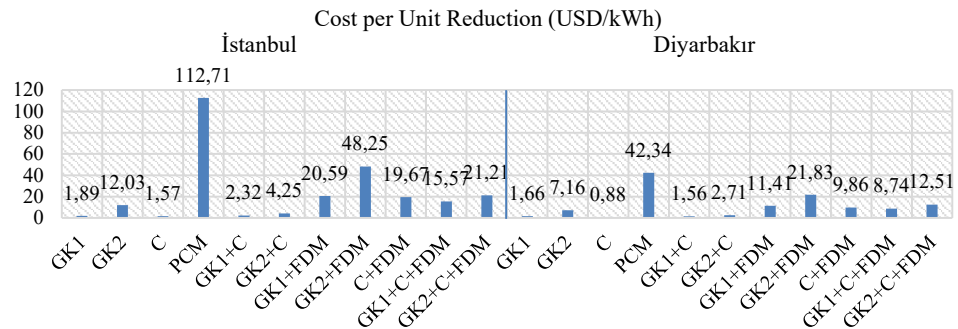


Figure A. Cost per unit reductions for retrofit methods of the study

**Purpose:** This study aimed to compare and show the feasibility of improvement methods for reducing cooling loads in the face of increasing summer temperatures in two cities of Turkey.

**Theory and Methods:** With a step-by-step approach, different retrofit methods are examined using building energy simulation (BES) models, and the costs of each method and combined scenario are revealed. The BES software used in the study utilizes EnergyPlus with TurTMY weather data.

**Results:** Of all the single and combined improvement scenarios studied, the most successful method in reducing cost and cooling loads for both cities is the replacement of the glass system with solar low-e glass. This method alone reduced the cooling loads by approximately 42% in İstanbul and approximately 15% in Diyarbakır, while doing so at a unit price of 1.57 and 0.88 USD per kWh, respectively.

**Conclusion:** The energy models created within the scope of the study show that the cooling loads of the buildings can be greatly reduced if the right interventions are selected. The results show that changing the glass system from a low-e system to a solar low-e system as a single intervention (C) is the most cost-effective way to reduce cooling loads in both provinces. When looking at the combined improvement scenarios, the most effective combination in reducing cooling loads is the option where fixed sunshade (GK1), glass replacement (C) and FDM are used together for both cities. However, the cost-effectiveness of this scenario is quite low.



## Yapıların cam alanlarının enerji etkin iyileştirilmesi ve FDM uygulamasının enerji performansına etkisinin değerlendirilmesi: İstanbul ve Diyarbakır örnekleri

Hasan Tunay Cengiz<sup>1\*</sup>, Gülay Zorer Gedik<sup>2</sup>, Ezgi Korkmaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Haliç Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İç Mekân Tasarımı Programı, 34060, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 34349, İstanbul, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- İki farklı iklim bölgesinde çeşitli enerji iyileştirme yöntemlerinin karşılaştırılması
- Soğutma yüklerinin hesaplanması
- Maliyet analizlerinin karşılaştırılması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 03.08.2023

Kabul: 29.12.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1337385

### Anahtar Kelimeler:

Enerji etkin iyileştirme,  
bina enerji verimliliği,  
cam alan müdahalesi,  
güneş kırıcı uygulaması,  
faz değiştiren malzemeler

### ÖZ

Bina ve inşaat sektörü, dünyada toplam enerji tüketiminin %36'sından ve CO<sub>2</sub> salımının %39'undan sorumludur. Bu salımların iklim değişikliğine doğrudan etkisi olduğu bilinmektedir. Sektörün enerji tüketimi ve sera gazı salımını azaltmak için yapı stokunun iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu iyileştirme için uygulanabilecek yöntemlerden birisi, enerji etkin iyileştirmeler ile mevcut binaların yapı kabuğu özelliklerini güçlendirmektir. Öte yandan, iklim değişikliği etkisiyle Türkiye'de sıcaklıkların giderek artacağı, özellikle yaz dönemindeki artışların kış dönemindekilerden fazla olacağı bilinmektedir. Bu eğilimden ötürü mevcut binaların iyileştirilmesinde yaz dönemindeki soğutma yüklerinin düşürülmesinin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de Toplu Konut İdaresi Başkanlığı'na ait bir tip proje, ılıman-nemli iklime sahip İstanbul ve sıcak-kuru iklime sahip Diyarbakır şehirleri için çeşitli enerji iyileştirmeleriyle DesignBuilder bina enerji simülasyonu yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Araştırma, iyileştirmelerin enerji verimliliği üzerindeki etkisini incelemiş, bu iyileştirmelerin maliyet analizi yapılmıştır. Seçilen iyileştirmeler, güneş kırıcı sistemlerin eklenmesi, cam sisteminin solar low-e sistemle değiştirilmesi ve yapının ısıl ataletini artırmak için faz değiştiren malzeme kullanımı ile sınırlıdır. Bu iyileştirmeler sonucunda, her iki şehirde de yaz dönemi soğutma yüklerinde azalma gözlemlenmiştir. Sonuçlar tekil olarak cam değişikliğinin hem soğutma yüklerini azaltmada hem de maliyet açısından en etkili yol olduğunu göstermektedir. Birleştirilmiş iyileştirme senaryolarının soğutma yükünü düşürmede çok etkin olduğu görülse de maliyet açısından etkinliği oldukça düşüktür.

## 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

### HIGHLIGHTS

- Comparison of various energy retrofit methods in two different climate zones
- Cooling loads calculations
- Comparison of cost analyses

### Article Info

Research Article

Received: 03.08.2023

Accepted: 29.12.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1337385

### Keywords:

Energy efficient retrofit,  
building energy efficiency,  
glazing area interventions,  
solar shading  
implementation,  
phase change materials

### ABSTRACT

The building and construction sector accounts for 36% of global energy consumption and 39% of CO<sub>2</sub> emissions, contributing to climate change. To mitigate this impact, improvements are needed in the building stock, particularly through energy-efficient retrofits to the existing structures. The study focuses on a residential building in İstanbul (temperate-humid climate) and Diyarbakır (hot-dry climate) in Turkey to analyze their behavior and the effects of implemented retrofits on energy efficiency. As climate change leads to increasing temperatures in Turkey, the importance of reducing cooling loads during summers becomes more evident in building retrofits. The study explores various improvement methods, such as adding solar shading systems, replacing glass with solar low-e systems, and using phase-changing materials to increase thermal inertia. These improvements have shown promising results in reducing summer cooling loads in both cities. Cost analysis of the improvements revealed that individually changing the glass system is the most effective and cost-efficient method. However, combined retrofit scenarios offer significant cooling load reductions, though their cost-effectiveness is relatively lower. Overall, this research highlights the urgent need to enhance the energy efficiency of buildings to combat climate change and emphasizes the importance of tailored approaches considering the specific climate conditions of different regions.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*tunaycengiz@halic.edu.tr, gzorer@hotmail.com, korkmaz.ezgi@gmail.com /  
Tel: +90 532 547 9769

## 1. Giriş (Introduction)

Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) raporuna göre dünyada karbon dioksit, metan ve azot dioksit gibi sera gazlarının atmosferik konsantrasyonu 1750'li yıllardan itibaren insan aktiviteleri nedeniyle artmaktadır [1]. Fosil yakıt kullanımı, atmosferik sera gazı salımının önemli nedenlerinden birini oluşturmaktadır. 1750 ile 2019 yılları arasında yalnızca CO<sub>2</sub> konsantrasyonu %47,3 oranında (131,6 ± 2.9 ppm) artmıştır [2]. Ayrıca 2018 yılı verilerine göre bina ve inşaat sektörü enerji bazlı CO<sub>2</sub> salımının %39'undan sorumludur. Bu oranın önemli kısmı konut yapılarına aittir [3].

Türkiye'de 2021 yılındaki toplam sera gazı salımı 564,4 milyon ton (Mt) CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu salımın %71,3'ü enerji bazlı olup enerji tüketiminin %40'ı konut ve ticaret sektöründen kaynaklanmaktadır [4, 5]. Bu oranlar dünyanın geneliyle paralellik göstermektedir. Türkiye'de 2008 yılında yürürlüğe giren ısı yalıtımı ve enerji performans yönetmeliklerinde ele alınan ve önerilen önlemlerin inşaat sektöründe sera gazı salımına neden olan enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik etkileri bulunmaktadır. Bu önlemler temelde binaların kış dönemlerindeki performanslarını artırmaya yöneliktir. Fakat 1750'li yıllardan beri süregelen salımlar dünyada sıcaklıkların düzenli olarak artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle soğutma yüklerinin düşürülmesine yönelik önlemlerin yönetmeliklerde yer alması ve tasarımda uygulanması önem taşımaktadır.

Dünya'da ve Türkiye'de yıllık ortalama sıcaklıklar 1971 ile 2020 yılları arasında sürekli bir artış göstermiştir (Şekil 1) [7].

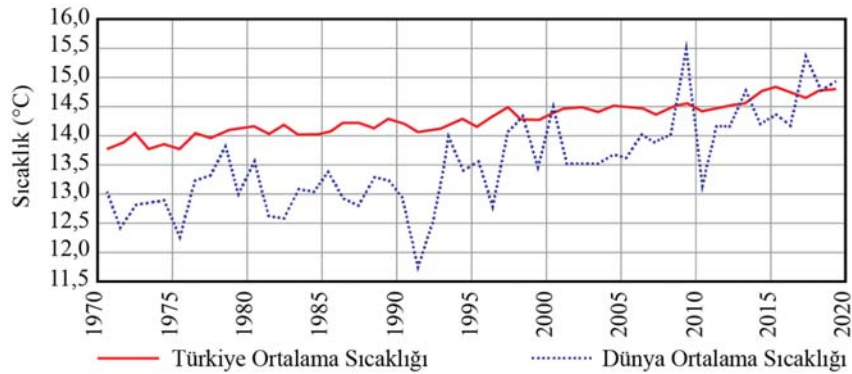
2012'de yayınlanan Türkiye'nin İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planına göre Türkiye'de ortalama sıcaklıkların 2,5 ila 4°C yükselmesi ve bu yükselişin iklimin daha kurak ve dengesiz yağışlı olmasına neden olması beklenmektedir [6]. Meteoroloji Genel Müdürlüğü verilerine göre, planın yayınlanmasından bugüne ortalama sıcaklıkların beklenen yükseliş eğiliminde olduğu görülmektedir ve ileriye yönelik sıcaklık artışlarında mevsimsel değişiklikler beklenmektedir.

IPCC'nin beşinci değerlendirmesinde yer alan Temsili Konsantrasyon Rotalarına (RCP: Representative Concentration Pathways) göre 2016 ve 2100 yılları arasında yaz dönemlerindeki sıcaklık artışları, kış dönemlerine göre daha yüksek olacaktır [8]. Türkiye özelinde ilkbahar, yaz ve kış ortalama sıcaklıklarında 1950-2010 döneminde meydana gelen önemli artışlar bu rotaları desteklemektedir [9]. Bu nedenle yaz dönemlerinde soğutma yüklerinde önemli artışlar olacağı görülmektedir.

İklim değişikliğinin bu etkilerine uyum sağlamak ve olumsuz etkileri azaltmak için yeni yapıların enerji verimli olacak şekilde tasarlanarak inşa edilmesi ve mevcut yapı stokunun %60'ının 2050 yılına kadar kullanımında olacağı düşünülerek, söz konusu yapıların fiziki özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir [10]. Türkiye'de iklim değişikliğiyle mücadelede kullanılan strateji çoğunlukla mevcut yapıları yıkip yeniden yapmaktır. Bu yöntem, kaynakların verimsiz şekilde kullanılmasına, ek enerji tüketimine ve soylulaşmaya yol açabilmektedir [11]. Güçlendirme projelerinin de dâhil olduğu bina enerji iyileştirme projeleri ise, kaynakların daha verimli şekilde kullanılmasına ve ek enerji tüketimini önlemeye yönelik kullanılmaktadır [12].

Mevcut binaların yaz dönemlerindeki enerji performanslarını artırmak için birçok farklı uygulama bulunmaktadır. Cam alanlar yaz dönemlerinde fazla ısınmaya neden olduğundan, soğutma dönemi için yapılan enerji iyileştirmeleri çoğunlukla şeffaf yüzeylerde yapılmaktadır. Bu iyileştirmelerdeki ana hedef, doğrudan güneş ışınımının bina içerisine ulaşmasını engellemektir. Bu amaçla mevcut binaların cephelerinde yer alan şeffaf yüzeylere güneş kırıcı sistemlerinin ve sıcak dönemlere yönelik filtrelemeler sunan farklı cam türlerinin uygulanması temel iyileştirmelerdir. Öte yandan teknolojinin gelişmesi ile ortaya çıkan akıllı malzemelerden biri olan faz değiştiren malzemelerin (FDM) gizli ısı depolarının iç mekânlarda kullanılması da literatürde güncel dönemde sıklıkla yapılan çalışmalardandır.

FDM'nin bina iyileştirmelerindeki etkileri birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Koschenz ve Kuznik vd. çalışmalarında FDM'nin mevcut binalarda uygulanmasını ele almışlar ve sonuçta FDM kullanımının binanın ısıl ataletini artırarak büyük iç mekân sıcaklık değişimlerini önlediğini göstermişlerdir [13, 14]. Biswas vd. binaların çatı yenilemelerinde alternatif metotlar geliştirmek için bir dizi deney yapmıştır. Önerilen FDM ile bütünlük fotovoltaik çatı uygulaması binanın tavan arası hacminde ısıtma yüklerini %30, soğutma yüklerini %40 oranında düşürmüştür [15]. Ascione vd. iyileştirme projelerinde FDM uygulamasının enerji verimliliği ve ısıl konfor üzerindeki etkilerini incelemiş ve FDM'nin etkisinin yaz aylarında yüksek sıcaklıklara sahip yarı kurak Akdeniz bölgesi ikliminde daha fazla olduğunu ortaya koymuştur [16]. Bu çalışmanın devamında Ascione vd., İtalya'nın Benevento kentindeki bir tarihi üniversite binasına yapılması planlanan enerji iyileştirme müdahale yöntemlerini değerlendirmiş, çalışmada bina enerji tüketiminde yıllık toplam %39 azalma ile en verimli enerji kullanımı sağlayan yöntemin pencere sisteminin düşük salımlı (low-e) cam sistemiyle değiştirilip aynı zamanda FDM'nin de binaya eklendiği yöntem olduğu sonucunu elde etmiştir [17]. Andrés vd., çalışmalarında hafif konstrüksiyonlu yapıların giderek daha fazla benimsenmesini ve azalan ısıl atalet



Şekil 1. Dünya'da ve Türkiye'de Yıllık Ortalama Sıcaklıklar (Annual Average Temperatures in the World and in Turkey) [7]

nedeniyle ısı konforu ve enerji verimliliğini korumanın zorluğunu tartışmıştır. İç mekan duvar kaplamalarında FDM kullanımına odaklanan çalışma, İspanya'nın Valladolid şehrinde, FDMli sıvaların, iç mekan sıcaklık dalgalanmalarının azalmasına, daha düşük enerji tüketimine ve bina verimliliğinin artmasına yol açtığını ve daha sürdürülebilir ve verimli bina çözümleri yaratma potansiyelini ortaya koymaktadır [18]. Çalışma, inşaat sektörünün küresel enerji tüketimi ve emisyonlardaki rolünü vurgulayarak, özellikle tarihi binalar için enerji verimli çözümlere duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. Baccega ve Bottarelli, bina kaplamalarının ısı performansını arttırmak için sıvaya eklenen parafin bazlı FDM'lerin kullanımını araştırmıştır. Deneysel ve simülasyonlar, uygulamanın, enerji talebini %9 ila %18 arasında düşürdüğünü göstermiştir [19]. Imafidon ve Ting, ısı akışını ve enerji tüketimini azaltmak için Ottawa, Kanada'da yenilenen bir binanın duvarlarında bal peteği FDM'nin kullanımını araştırmıştır. 20°C pik erime sıcaklığına sahip FDM'nin, tipik bir yaz gününde bina duvarlarından ısı kazanımını %41 oranında ve ısı kaybını %96 oranında azalttığını ortaya koymuştur [20]. Aynı araştırmacılar 2023 yılında yaptıkları çalışmada iyileştirme projelerinde kullanılan prefabrik bir panele FDM katmanı ekleyerek potansiyel enerji tasarrufunu değerlendirmiş ve uygulamanın hem Kanada ikliminde hem de tropikal iklimde en uygun konumunu belirlemiştir. Sonuçlar FDM'yi iç mekana daha yakın yerleştirmenin her iki iklimde de etkili olduğunu göstermektedir [21]. Li vd., Çin'de FDM'nin enerji iyileştirme projelerindeki etkinliğini araştırmış, malzemenin konumu, erime noktası ve kalınlığının yapıların enerji verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Bulgular, FDM'lerin çalışma yapılan bölgede bina çatılarının iç yüzeyine yerleştirilmesinin uygun olduğunu ve bu şekilde konforsuz saatlerin %38'e kadar azaltılabileceğini göstermektedir [22].

Gölgeleme elemanlarının soğutma yüklerini ve toplam bina enerji tüketimini düşürdüklerini gösterir birçok çalışma bulunmaktadır. Mohammed vd.'nin Avustralya'nın Darwin kentinde yaptıkları çalışma, bir belediye binasının soğutma yükünü azaltmak amacıyla farklı tipteki gölgeleme cihazlarının etkisini incelemiştir [23]. Araştırma sonuçları, yatay güneş kırıcıların binanın soğutma yükünü %5 azalttığını, ancak açılı ve uzunluk ayarlarıyla bu azaltımın %8'e

çıkartılabildiğini göstermektedir. Alhuwayil vd.'nin çok katlı bir otel binasının iklim ve coğrafi konumunun enerji tüketimi üzerindeki etkilerini incelediği çalışması, pasif gölgeleme ve yüksek performanslı yalıtımın enerji performans potansiyelini vurgulamaktadır [24]. Sonuçlar, sıcak bir iklimde yer alan binalarda güneş kırıcıların, soğuk iklimde yer alan bir binada ise yüksek performanslı yalıtımın enerji potansiyelinin daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Dokhanian vd.'nin İran'ın Sabzevar şehrinde bir okul binasında yaptığı çalışmada, farklı malzemelerle yapılmış altı farklı dış gölgeleme tipinin yaşam döngüsü boyunca enerji, ekonomik ve sera gazı performansı incelenmiştir [25]. Uygun gölgeleme seçeneği olarak, 1 m çıkmalı ve ufukla 10 derece açı yapan basit bir beton güneş kırıcı önerilmiş ve bu seçeneğin enerji verimliliği, ekonomik açıdan uygunluğu ve sera gazı emisyonları açısından dengeli olduğu belirtilmiştir.

Yapılan literatür araştırmasında çeşitli enerji iyileştirme yöntemlerinin farklı ülkelerde ele alındığı görülmüştür. Yapı stokunun enerji performansının iyileştirilmesi için genellikle mevcut binaların yıkılıp yeniden yapıldığı Türkiye'de, artışı sürdüren yaz sıcakları ile birlikte güçlendirme projeleri de dikkate alındığında mevcut binaların soğutma yüklerini düşürmeye yönelik iyileştirme müdahaleleri önem kazanmaktadır. Bu nedenle çalışma, Türkiye'nin sıcak yaz koşullarına sahip iki farklı iklim bölgesinde yer alan binalara uygulanan çeşitli enerji iyileştirmelerin enerji tüketimi üzerindeki etkisini göstermeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda Toplu Konut İdaresi Başkanlığı'na (TOKİ) ait bir tip proje İstanbul ve Diyarbakır'da çalışılmış ve çalışma yapı kabuğundaki şeffaf alanlara güneş kırıcı eklenmesi, mevcut yapıda cam değişikliği yapılması, bina iç mekân yüzeylerine FDM uygulanması ve bunların birlikte uygulama seçenekleri ile sınırlandırılmıştır.

## 2. Metodoloji (Methodology)

FDM'nin performansı, uygulanan binanın bulunduğu bölgenin iklim koşullarına göre değişmektedir. Bu nedenle Türkiye'nin iki farklı iklim kuşağına sahip bölgesinde yer alan İstanbul ve Diyarbakır uygulama alanı olarak seçilmiş ve Şekil 2'de gösterilen adımlar,



Şekil 2. Çalışmada geliştirilen yaklaşımın adımları

çalışma kapsamında seçilen iyileştirmelerin etkilerini göstermek için her iki bölgeye de uygulanmıştır.

Çalışmada, Toplu Konut İdaresi Başkanlığı'na ait bir tip proje uygulama örneği olarak seçilmiştir. Bu seçimde projenin Türkiye'nin herhangi bir ilinde uygulanabilirliği ve malzemelerin / inşaat tekniklerinin net bir şekilde tanımlanmış olması gözletilmiştir. Seçilen proje, ilk aşamada ısı geçişi hesaplamalarında kullanılan DesignBuilder bina enerji simülasyonu (BES) yazılımı ile yaz döneminde ılıman-nemli iklime sahip İstanbul ve sıcak-kuru iklime sahip Diyarbakır şehirleri için modellenmiş ve seçilen iki bölgede binaların mevcut durumlarının enerji tüketim değerleri hesaplatılmıştır. DesignBuilder, Energy Plus hesaplama yöntemi için geliştirilen bir arayüz programıdır. Energy Plus'ın algoritmasını kullanarak dinamik rejimde hesap yapılmaktadır. İkinci aşamada ise binanın soğutma yüklerini düşürmek için iyileştirme yöntemleri farklı senaryolar üzerinden tanımlanmıştır.

Yaz döneminde binalarda aşırı ısınmanın en önemli nedenlerinden biri yapı kabuğundaki cam alanlardan yapı içerisine ulaşan direkt güneş ışınlardır. Çalışmanın amacı gereği binanın bu alanlarının iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu iyileştirme için seçilen ilk yöntem güneş kırıcı uygulamasıdır. Çalışmada güneş kırıcı uygulaması sabit ve hareketli olmak üzere iki şekilde uygulanmıştır. Şeffaf alanların yaz dönemi performanslarının iyileştirilmesi için seçilen diğer yöntem mevcut 4+16+4 mm detaya sahip cam sisteminin solar düşük salımlı (low-e) camlarla değiştirilmesidir. İkinci temel iyileştirme adımı olarak kullanılacak faz değiştiren malzeme, erime sıcaklığına ve gizli ısı depolama kapasitesine göre seçilmiş ve ardından binanın şartlandırılmış mahallerinde dış duvarların iç yüzeylerine ve tavanlara uygulanmıştır.

Her tekil iyileştirme sonrasında enerji tüketim değerleri hesaplatılmış, binanın enerji verimliliğine katkısı değerlendirilmiştir. Tekil müdahalelerin etkileri ortaya koyulduktan sonra, kombinasyonları çalışılmış ve seçilen iklim bölgeleri için BES sonuçları kullanılarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın son adımı olarak iyileştirmelerin maliyet analizleri yapılmış ve fizibiliteyi sunulmuştur.

### 3. Bina Enerji İyileştirmelerinde Cam Alanların Enerji Etkin İyileştirmesi ve FDM Uygulamasının Etkileri (Effects of Energy-efficient Glazing Area Interventions and PCM Application in Building Energy Retrofits)

Sürdürülebilirlik, 21. yy ile birlikte yeni yapılacak yapılarda mimari tasarımı ve inşaat uygulamalarının odak noktalarından biri haline gelmiştir. Ancak IEA verilerine göre mevcut bina stokunun %60'ının 2050 yılına kadar kullanılacağı öngörüldüğünden, bina iyileştirmelerine de benzer şekilde odaklanmak gerekmektedir [10]. Ayrıca, yeni binalar ya eskilerin yıkılmasını ya da yeni arazilerin geliştirilmesini gerektirecek, bu da dolaylı enerji tüketimine ve daha fazla gömülü enerjiye neden olacaktır.

Türkiye'de, ısı yalıtımı ve enerji performansı yönetmelikleri 2008 yılında yürürlüğe girdiğinden, bu yıldan önceki mevcut bina stokunun fiziki özelliklerinin zayıf olduğu düşünülebilir. Bu nedenle binaların yeniden inşa edilmesinin ana çözüm olarak görüldüğü Türkiye'de yapılacak olan bina iyileştirme projelerinin ülkede toplam enerji tüketimini azaltma potansiyeli bulunmaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında seçilen tip proje ve iyileştirme yöntemleri mevcut binaların fiziki koşullarının iyileştirilmesinin enerji tüketimine etkisinin görülmesi açısından önem taşımaktadır.

#### 3.1. Mevcut Bina Özellikleri-MB (Properties of the Existing Building)

Çalışmada uygulama örneği olarak seçilen Toplu Konut İdaresi Başkanlığı'na ait tip konut projesi bir bodrum kat, zemin kat ve üç normal kattan oluşmakta olup, bodrum kat üzerinde her katta iki adet 3+1 daire bulunmaktadır. Binanın kat planları ve güney cephesi Şekil 3'te verilmiştir.

Yapı kabuğunda; tuğla veya betonarme gövde, EPS ısı yalıtımı üzerine (i) sıva, (ii) yapay taş ya da (iii) elyaf takviyeli çimento (fibercement) kaplama olmak üzere üç ana dış duvar tipi kullanılmaktadır. Projede kullanılan cam sistemi, düşük salımlı (low-e) 4+16+4 mm ısı kontrol camlı PVC pencerelerdir. Mevcut binanın mimari projesi ve mekanik raporundan alınan yapı kabuğu detayları Tablo 1'de gösterilmiştir. Çalışmanın devamındaki iyileştirme müdahaleleri Tablo 1'de yer alan tüm yapı bu kabuğu detaylarına eklenecek şekilde düşünülmüştür.

#### 3.2. Çalışmanın Değişkenleri (Variables of the Study)

##### 3.2.1. İklimsel bölgeler (Climatic zones)

Çalışmanın amacı özellikle yaz aylarında mevcut binaların enerji yüklerini azaltmak olduğu için yaz soğutma yükleri yüksek olan iki iklim bölgesi seçilmiştir. İklim bölgeleri seçilirken gece-gündüz sıcaklık farklılıkları dikkate alınmıştır. Çünkü FDM'nin performansının yükseltilebilmesi için erime-katılma döngüsünün bir gün içinde tamamlanması gerektiği bilinmektedir. Başka bir deyişle, yaz döneminde gündüz ve gece arasındaki sıcaklık farkının yüksek olmasının -bağıl nemin düşük olmasının- FDM'nin neden olacağı soğutma yükü düşüşünü artırması beklenmektedir [26]. Ayrıca iyileştirme projelerinin nüfus yoğunluğu nedeniyle enerji verimliliği üzerindeki kümülatif etkisi ve uygulanabilirliği oldukça önemli görülmektedir. Bu nedenle seçilen bölgelerin yoğun nüfusa sahip olması gerekmektedir.

Bu iki nedenden ötürü uygulama örneği için belirlenen bölgeler ılıman-nemli İstanbul ili ve yazları kuru-sıcak iklime sahip Diyarbakır ilidir. Seçilen bölgeler, Köppen-Geiger İklim Sınıflandırma sistemine [27] göre "kuru-yaz subtropikal" Akdeniz iklimine sahiptir ancak bölgelerin bağıl nemleri ve ortalama en yüksek sıcaklıkları arasındaki fark, iki bölgenin iklimsel özelliklerinin farkını daha net ortaya koymaktadır. Meteoroloji Genel Merkezi'nden edinilen veriler Tablo 2'de gösterilmiştir.

##### 3.2.2. Bina mekanik sistemini tanımlanması (Identification of building mechanical system)

Çalışmada kullanılan uygulama örneğinde mimari proje ve mekanik raporda tanımlanmış bir iklimlendirme sistemi bulunmamaktadır. Ancak iç mekanı belirlenen sıcaklıklarda tutmak için gerekli soğutma yükünü hesaplamak amacıyla simülasyonda temel bir split klima tanımlanmıştır. İklimlendirme sistemlerinin performansı bina toplam yükü üzerinde etkiliyse de, çalışma karşılaştırma üzerinden yapıldığı ve her senaryoda aynı tip sistem kullanıldığı için seçilen sistemin performans katsayısının (CoP) karşılaştırma sonuçlarını değiştirmeyeceği kabul edilmiştir.

Binada seçilen ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerine ait temel bilgiler Tablo 3'te özetlenmiştir.

##### 3.2.3. Güneş kırıcı uygulaması (Solar shading application)

Sera etkisi nedeniyle yaz döneminde aşırı ısınmanın en önemli nedenlerinden biri saydam alanlardır. Bu nedenle sıcak dönem olan Mart ve Eylül ekinoksları arasında saydam alanlardan direkt güneş



Şekil 3. Uygulama Örneğinin Kat Planları ve Güney Cephesi (Floor Plans and South Elevation of the Building)

Tablo 1. TOKİ Projesinin Yapı Kabuğu Detayları (Building Envelope Details of the TOKİ Project)

Konum	Detay Kodu	Tanım	U-değeri (W/m <sup>2</sup> K)
Dış Duvarlar	DD1_A	Tuğla, Sıva	0,432
	DD1_B	Betonarme, Sıva	0,553
	DD2_A	Tuğla, Yapay Taş Kaplama	0,432
	DD2_B	Betonarme, Yapay Taş Kaplama	0,548
	DD3_A	Tuğla, Fibercement Kaplama	0,413
	DD3_B	Betonarme, Fibercement Kaplama	0,518
Saydam Alanlar	P	4+16+4 Low-e PVC Pencere	1,900
	DK	Alüminyum Doğrama Dış Kapı	4,000
Çatı	Ç	Betonarme, Taş Yünü Isı Yalıtımı	0,359
Temel	T	Proje Temel Detayı	0,452

ışınımının binaya girişinin engellenmesi önemlidir. Dışarıdan güneş kırıcı uygulaması, cam alanlar yoluyla binaya güneş ışınımını fiziksel olarak sınırlamanın veya engellenmenin en etkili yoludur. Bina cephelerini doğrudan güneş ışınlarından belirli bir süre korumak için güneş diyagramları kullanılır. Bu çalışmada iki tip güneş kırıcı sistemi kullanılmıştır: bunlardan ilki sabit, diğeri ise güneşin konumuna göre yön değiştiren dinamik güneş kırıcılardır.

### 3.2.3.1. Sabit güneş kırıcı-GKİ (Fixed solar shading)

Yıl boyunca sabit olan en etkili güneş kırıcı boyutlandırması için iki şehir için de güneş diyagramları hazırlanmış ve şemalar üzerinde gölge açıları işaretlenmiştir. Güney cephesinde gölge açısının belirlenmesi binanın yer aldığı enlem ile doğrudan ilişkilidir. Doğu ve batı cephelerindeki güneş kırma açılarını belirlemek için ise Akgöz ve

Berköz vd.'nin çalışmalarından yararlanılmıştır [29, 30]. İstanbul ve Diyarbakır için yapay soğutmanın istendiği dönemler belirlenerek her iki şehir için güneş kırıcının doğrudan güneş ışınımını engellediği dönemler kararlaştırılmıştır.

Tablo 2. İstanbul ve Diyarbakır İllerine Ait Yaz Dönemi Bağıl Nem ve Ortalama En Yüksek Sıcaklıklar [25]  
(Relative Humidity and Average Maximum Temperatures of Istanbul and Diyarbakır Provinces)

	Bağıl Nem	Ortalama En Yüksek Sıcaklık (Haziran-Ağustos)
İstanbul	%70	30,23°C
Diyarbakır	%30	37,33°C

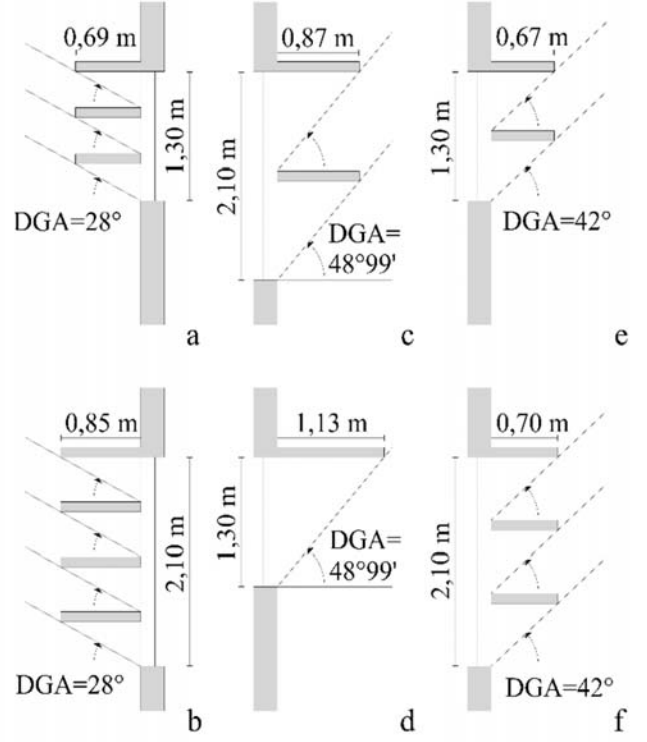
**Tablo 3.** Çalışmada kullanılan mekanik sistem verileri [31]  
(Mechanical system data used in the study)

Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme Sistemi	Radyatörlü ısıtma, split klima
Isıtma	Açık
Yakıt	Doğal Gaz
Isıtma sistemi mevsimsel performans katsayısı (CoP)	0,85
Soğutma	Açık
Yakıt	Şebekeden Elektrik
Soğutma sistemi mevsimsel performans katsayısı (CoP)	1,8

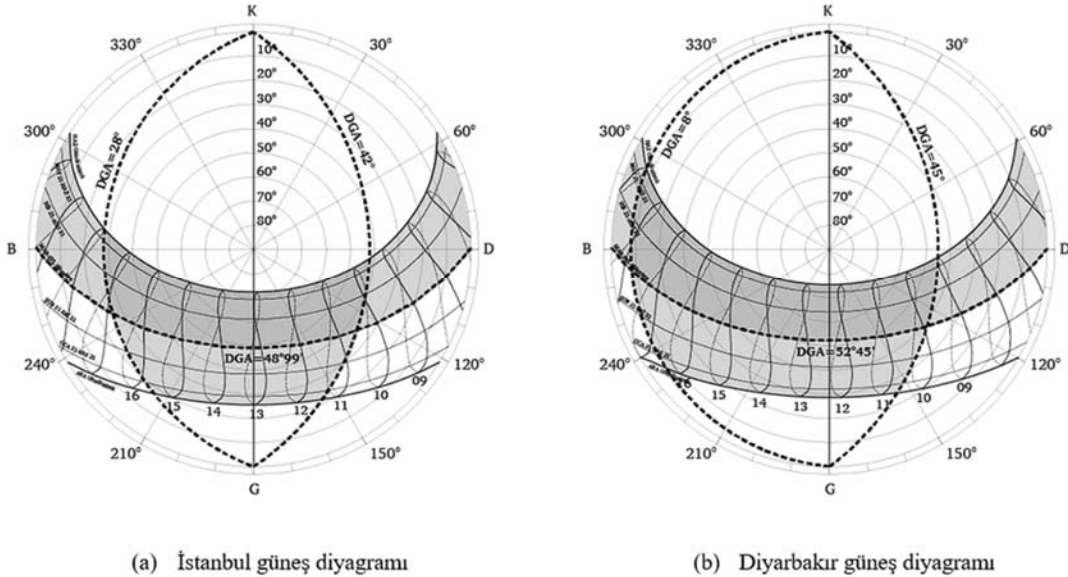
İstanbul ve Diyarbakır için tasarlanan güneş kırıcılar için güneş diyagramları Şekil 4'te gösterilmiştir [31]. Diyagramlara göre tasarlanan güneş kırıcıların düşey gölge açıları (DGA) Tablo 4'te, iki şehir için ölçülendirmeler ise kısmi kesitler üzerinde Şekil 5 ve 6'da gösterilmiştir.

### 3.2.3.2. Dinamik güneş kırıcı-GK2 (Dynamic solar shading)

Güneş ışığını ve ısı kazancını kontrol etmenin karmaşıklığı, güneş ışınlarının gün içerisinde değişken açılarla gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bu güneş kazanımları, dinamik güneş kırma çözümleri ile kontrol edilebilmektedir. Söz konusu cihazlar kordonlar, zincirler, çubuklar veya krank kolları ile elle çalıştırılabilirler gibi elektronik olarak çalışan zamanlayıcı veya koşullu otomasyona da sahip olabilmektedirler. Etkili dinamik gölgelemenin, iyileştirilmiş bir ıslık iç mekân iklimi sağlaması beklenmektedir. Çalışmada bina enerji simülasyon yazılımında saydam alanların dış kısmında, Mayıs-Ekim ayları arasında gün içerisinde dik gelen güneş ışınlarını dinamik olarak engelleyecek güneş kırıcı sistemi tanımlanmıştır.



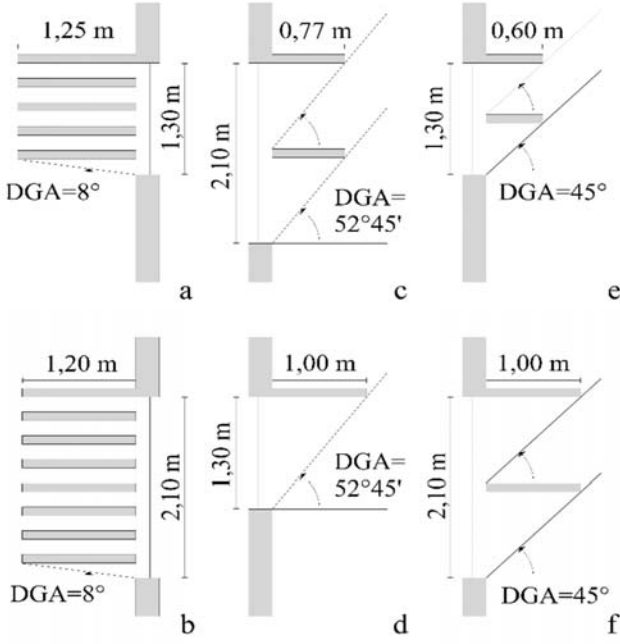
**Şekil 5.** İstanbul ili için güneş kırıcı ölçüleri: a,b: batı cephesi, c,d: güney cephesi, e,f: doğu cephesi  
(Solar shading dimensions for İstanbul province: a, b: west elevation, c, d: south elevation, e, f: east elevation)



**Şekil 4.** İstanbul ve Diyarbakır illeri için güneş diyagramı (Sun path diagram of İstanbul and Diyarbakır provinces)

**Tablo 4.** Yönlere göre tasarlanan güneş kırıcıların düşey gölge açıları (DGA)  
(Vertical shading angles of solar shading devices according to orientations)

Şehir	Batı cephesi için DGA	Güney cephesi için DGA	Doğu cephesi için DGA
İstanbul	28°	48°99'	42°
Diyarbakır	8°	52°45'	45°



**Şekil 6.** Diyarbakır ili için güneş kırıcı ölçüleri: a,b: batı cephesi, c,d: güney cephesi, e,f: doğu cephesi  
(Solar shading dimensions for Diyarbakır province: a,b: west elevation, c,d: south elevation, e,f: east elevation)

### 3.2.4. Cam sistemi değişikliği-C (Refurbishment of the glazing system)

Çalışmadaki ikinci iyileştirme, mevcut cam sisteminin binaların soğutma yüklerini azaltacak şekilde tasarlanmış bir sistemle değiştirilmesidir. Binadaki mevcut cam sistemi, kış dönemlerinde ısıtma yüklerini düşürmeye yönelik low-e kaplamalı, %75 güneş enerjisi toplam geçirgenlik değerine (SHGC) ve 1,900 W/m<sup>2</sup>K U-değerine sahiptir. Çalışmada amaç yaz döneminde binanın enerji performansının artırılması olduğundan, iyileştirme projesi senaryosu için önerilen cam sistemi düşük güneş enerjisi toplam geçirgenliğine sahip olan solar low-e kaplamalı bir sistemdir. Bu sistemin doğrudan güneş ısı kazanımından kaynaklanan soğutma yüklerini azaltması beklenmektedir. Seçilen sistem, iyileştirme projesinde yalnızca cam sisteminin değişmesi, doğramaların aynı kalmasını sağlayacak şekilde mevcut sistemle aynı boyutlarda (4+16+4 mm) seçilmiş olup sistemin performans özellikleri bu boyutlarda üretim yapan bir firmanın teknik şartnamesinden literatürdeki değerlerle karşılaştırılarak belirlenmiştir [32]. Tablo 5, mevcut sistem ile iyileştirme senaryosundaki cam sisteminin (C) performans değerlerini göstermektedir.

### 3.3. Faz değiştiren malzeme kullanımı (Phase change material application)

FDM belirli bir aralıktaki sıcaklıkları kontrol etmek için faz değişimindeki gizli ısıdan yararlanır. Bir malzeme erirken ya da

buharlaşırken sabit bir sıcaklıkta çevresinden ısı emer. Emilen enerji malzemeyi oluşturan parçacıkların enerjisini artırır ve atomik bağlarını zayıflatır. Böylece işlem, malzemenin erime noktasında sıvı faza ya da kaynama noktasında gaz faza değişimi ile sona erer. Tersine faz değişiminde, donma ve buharlaşma sırasında malzeme çevresine ısı yayar, parçacıkların enerjisi azalır ve malzeme donma noktasında katı faza ya da yoğunlaşma noktasında sıvı faza geçer [26, 33]. Bina enerji uygulamalarında, istenilen iç mekân sıcaklıklarından ötürü genellikle erime-donma döngüsü kullanılmaktadır.

Eğer FDM'nin erime sıcaklığı istenilen iç mekân konfor sıcaklığına yakınsa, bu ısısal döngü binanın iç yüzey sıcaklıklarını değiştirerek iç mekân sıcaklığını gün içinde dengelemeye ve dolayısıyla ısıtma ve soğutma yüklerini düşürmeye yardımcı olmaktadır [34]. Bundan dolayı, FDM ısısal kütlesi düşük yapıların ısı kapasitelerini artırabilir ve bu özelliğinden ötürü bina enerji iyileştirmelerinde kullanılabilir anahtar malzemelerden biri olmaktadır [35].

Uygulanacak FDM'nin seçimi için en önemli kriter erime noktasıdır. Bu seçim için binanın mevcut halinde soğutma döneminde ısısal konfor simülasyonu yapılmış ve güneş ışınımının iki şehir için de en yüksek olduğu Temmuz ayında iç sıcaklığın 26 ila 28°C arasında dalgalandığı gözlenmiştir. Cengiz'in 2021 yılında yapmış olduğu "The effects of glazing area interventions and PCM application in building energy retrofits (Bina enerji iyileştirmelerinde cam alan değişimlerinin ve FDM uygulamasının etkileri)" başlıklı yüksek lisans tezinde farklı erime noktalarına sahip FDM'lerle bir dizi simülasyon çalışması yapılmış, uygulama örneği için uygun FDM'nin 27°C erime noktasına sahip olması gerektiği görülmüştür [31].

### 3.4. Bina enerji simülasyon modelinin oluşturulması (Generation of the building energy simulation model)

Senaryolar, DesignBuilder bina enerji simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiş ve hesaplanmıştır. Binanın mimari projesi ve mekanik raporunda belirtilen bina kabuğu detayları BES yazılımında tanımlanmıştır. Mimari projede çizilmiş ve mekanik raporda tanımlanmış dış duvar detayları Şekil 7'de yer almaktadır.

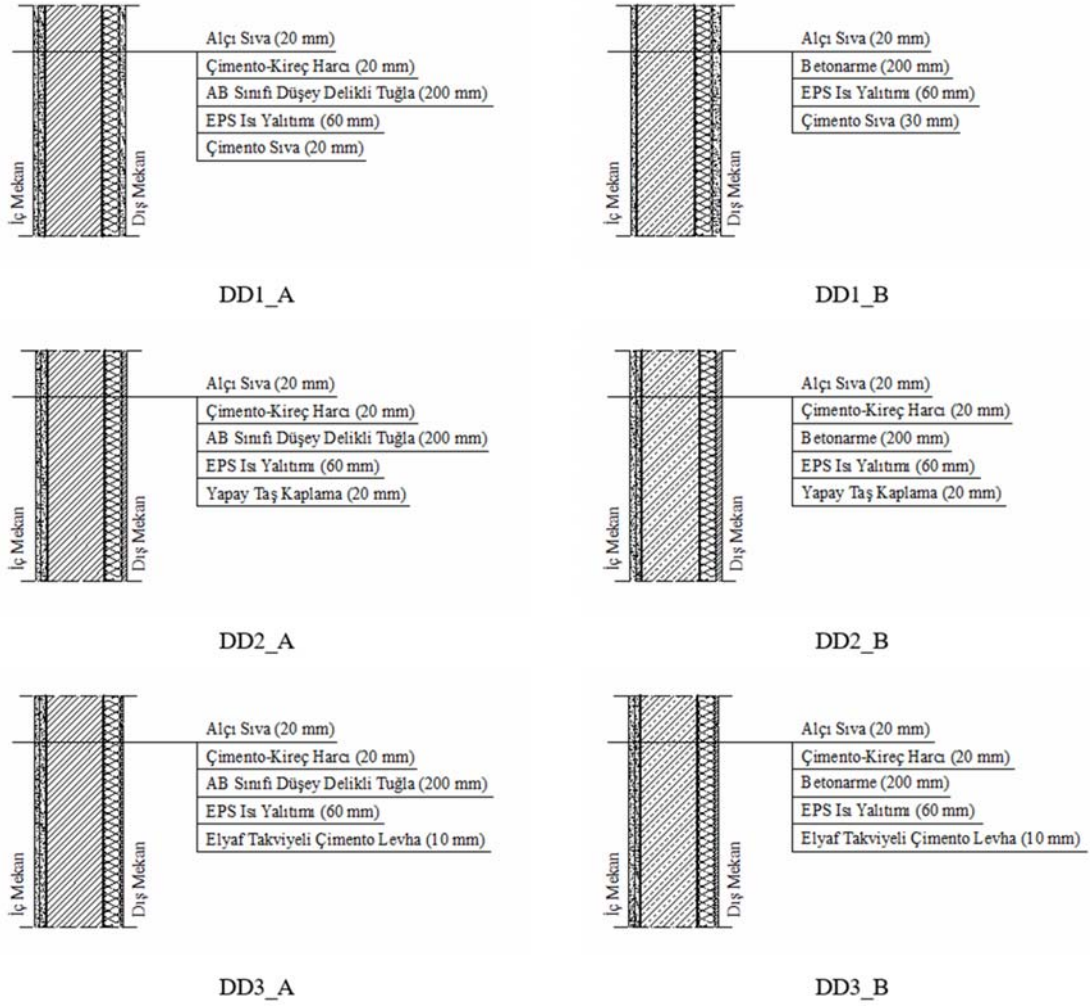
Simülasyonda kullanılan iklim verileri, Pusuat vd.'nin Türkiye'deki tipik meteorolojik yılın oluşturulması üzerine olan çalışmasına dayanan TurTMY (Tipik Meteorolojik Yıl) iklim veri setinden alınmıştır [36]. Hesaplanan yükler ısıtma, soğutma ve iç aydınlatma yüklerinden oluşmaktadır. İç aydınlatma yüklerinin hesaba dahil edilmesinin nedeni, lambaların ısı enerjisi üretme özelliğinden dolayıdır. Binanın doğal aydınlatmasını etkileyen herhangi bir iyileştirme müdahalesi, yapay aydınlatma sürelerini de etkileyerek ısıtma ve soğutma yüklerini etkileyecektir.

Çalışma için belirlenen çevresel kontrol değişkenleri, Ingersoll ve Huang [37], Turner ve Gruber [38], Mozer vd. [39], Tariku vd. [40], Moon ve Han [41], Parker [42], Martinaitis vd. [43], Date vd. [44] ve Jacquet vd.'nin [45] literatürdeki ısısal konfor çalışmaları esas alınarak belirlenmiştir. Bu değişkenler Tablo 6'da yer almaktadır.

**Tablo 5.** Çalışmada kullanılan cam sistemlerinin performans değerleri [32]  
(Performance values of glazing systems used in the current study)

	Güneşli Geçirgenliği	Dışa Yansıtma	SHGC	U-değeri (W/m <sup>2</sup> K)
Mevcut cam sistemi	%80	%17	%75	1,900
C	%71	%10	%44	1,300





Şekil 7. Yapı Kabuğu Dış Duvar Detayları (Building Envelope External Wall Details)

**Tablo 6.** Çalışmanın çevresel kontrol değişkenleri (Environmental control variables of the study)

Değişken	Atanan Değer
Isıtma ayar sıcaklığı	21°C
Isıtma geri dönüş sıcaklığı	17°C
Soğutma ayar sıcaklığı	26°C
Soğutma geri dönüş sıcaklığı	28°C

#### 4. Tekil İyileştirmeler ve Birleştirilmiş İyileştirme Senaryoları Sonuçları (Single and Combined Retrofit Scenario Results)

##### 4.1. Mevcut binanın yıllık enerji tüketimleri (Annual energy consumptions of existing building)

Mevcut durum sonuçlarına göre, soğutma yüklerinin binanın toplam yüklerini doğrudan etkilediği ve iki il arasında belirgin fark olduğu görülmektedir. İstanbul (a) ve Diyarbakır'daki (b) mevcut binanın aylık sistem yükü değerleri Şekil 8'de gösterilmiştir.

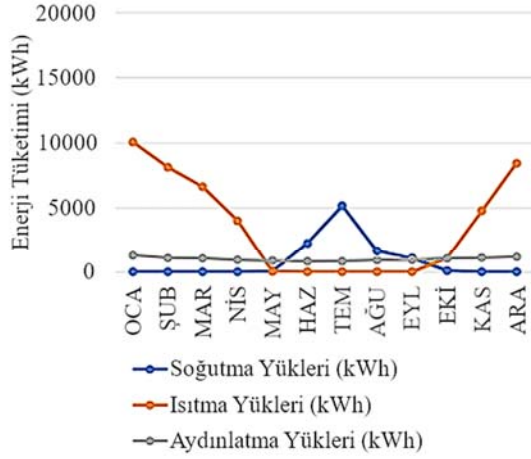
##### 4.2. Tekil iyileştirme senaryoları (Single retrofit scenarios)

Bu çalışmada öncelikle iyileştirmeler sabit (GK1) ve hareketli (GK2) güneş kırıcı eklenmesi, cam sistemi değişikliği (C) ve faz değiştiren malzeme (FDM) uygulamasıdır. Her iki il için mevcut durumların (MB) ve tekil senaryoların elde edilen enerji tüketim değerleri Tablo

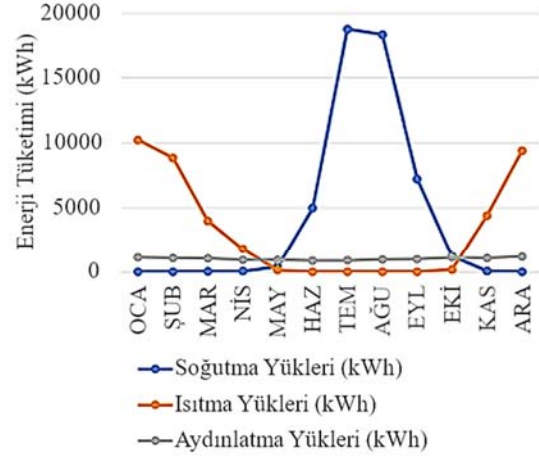
7'de, grafiği ise Şekil 9'da gösterilmiştir. Sonuçlara göre bütün iyileştirmeler soğutma yüklerini baz senaryo tüketim değerlerine göre düşürmüştür. Tekil bir müdahale olarak cam sistemi değişikliği İstanbul ve Diyarbakır'da binanın soğutma yüklerini göre düşürmede en etkili yöntem olmuştur: bir yıl boyunca yükler sırasıyla %42,32 ve %15,17 oranında azalmıştır. Ancak sabit güneş kırıcı sistemi ve cam değişimi aynı zamanda iki şehirde de ısıtma yüklerini artırmıştır. Çalışmada dinamik güneş kırıcı sisteminin çalışma dönemi, güneş radyasyonunun yüksek olduğu Mayıs-Ekim ayları aralığında seçilmiş, optimum olarak dik güneş ışınımını engelleyecek bir çalışma sistemi seçilmiştir. Sabit güneş kırıcı sistemine göre soğutma yüklerindeki performans farkının nedeni, sabit güneş kırıcıların aynı dönemde iç mekana hiç güneş ışınımı almamasıdır. Ancak iki sistem için toplam yüklerin oldukça yakın oluşması, sabit güneş kırıcı için alınan en yüksek performanslı soğutma yükü kararının yılın kalan dönemindeki ısıtma ve aydınlatma yükleriyle dengelendiğini göstermektedir. Toplam yüklerle bakıldığında ise faz değiştiren malzemenin tekil olarak kullanıldığı senaryo, İstanbulda %5,50, Diyarbakır'da %4,62 ile iki şehir için de enerji tüketimini en çok düşüren müdahale yöntemidir.

##### 4.3. Birleştirilmiş iyileştirme senaryoları (Combined retrofit scenarios)

Sonraki aşamada iyileştirme müdahalelerinin birlikte uygulandığı durumlar BES kullanılarak hesaplanmıştır. Her iki il için senaryoların



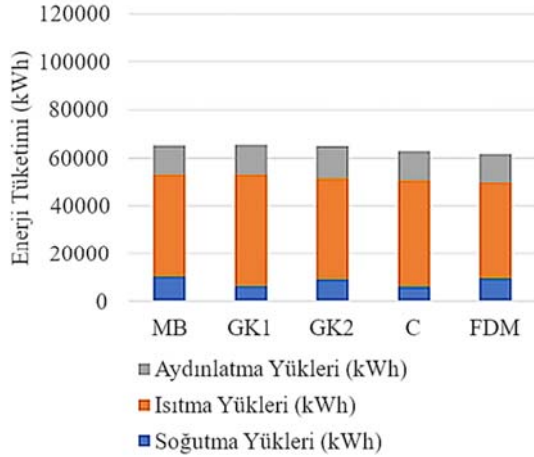
(a) İstanbul Baz Senaryo Sistem Yükleri



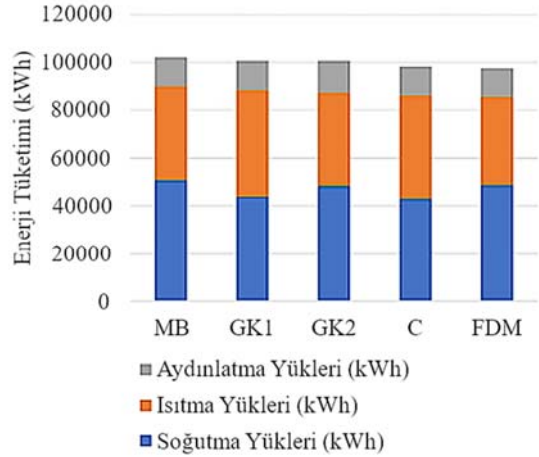
(b) Diyarbakır Baz Senaryo Sistem Yükleri

**Şekil 8.** Baz Senaryonun Aylık Sistem Yükleri (Monthly System Loads of Base Case Scenarios)**Tablo 7.** İstanbul ve Diyarbakır'da mevcut bina ve tekil iyileştirme senaryolarının yıllık enerji tüketim değerleri (Single Retrofit Intervention Scenario Loads of İstanbul and Diyarbakır Provinces)

	Soğutma Yükleri (kWh)	Isıtma Yükleri (kWh)	Aydınlatma Yükleri (kWh)	Toplam Yükler (kWh)
MB <sub>Ist</sub>	10251,97	43166,39	12103,33	65521,69
GK1 <sub>Ist</sub>	6072,80	47327,61	12366,97	65767,39
GK2 <sub>Ist</sub>	9089,27	42641,74	13575,83	65306,83
C <sub>Ist</sub>	5913,55	45086,08	12154,37	63154,00
FDM <sub>Ist</sub>	9459,59	40486,11	11973,58	61919,27
MB <sub>Diy</sub>	51025,52	38962,60	12181,71	102169,83
GK1 <sub>Diy</sub>	44149,92	44209,90	12308,48	100668,31
GK2 <sub>Diy</sub>	48578,71	38692,14	13402,06	100672,92
C <sub>Diy</sub>	43282,63	42715,71	12207,11	98205,46
FDM <sub>Diy</sub>	48916,01	36486,85	12045,10	97447,96



(a) İstanbul Tekil İyileştirme Senaryo Sistem Yükleri



(b) Diyarbakır Tekil İyileştirme Senaryo Sistem Yükleri

**Şekil 9.** Tekil iyileştirme senaryonun yıllık sistem yükleri (Annual system loads of base case scenarios)

simülasyonlardan elde edilen enerji tüketim değerleri Tablo 8'de gösterilmektedir.

Sonuçlar, sabit güneş kırıcı, cam sistemi değişikliği ve faz değiştiren malzeme uygulamasının birlikte yapıldığı senaryonun (GK1+C+FDM) soğutma yüklerinin azaltılmasında önemli etkisi olduğunu göstermektedir. Bu kombinasyon Diyarbakır'da soğutma yüklerinde bir yılda 9.746,39 kWh azalmaya yol açmıştır. Her iki ilin

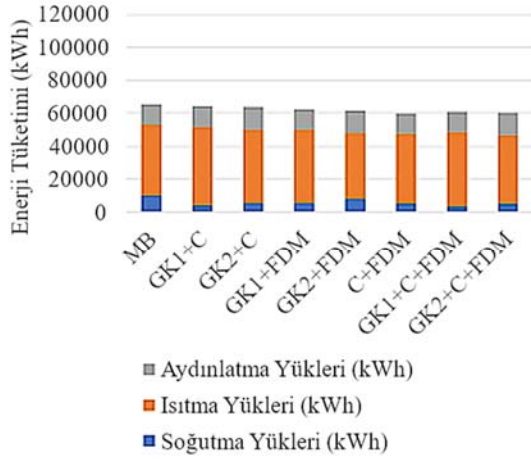
kombinasyon senaryolarında tükettikleri yıllık sistem yükleri, mevcut duruma karşılaştırılarak Şekil 10'da özetlenmiştir.

## 5. İyileştirme Müdahalelerinin Maliyetlerinin Belirlenmesi (Cost Analysis of the Retrofit Interventions)

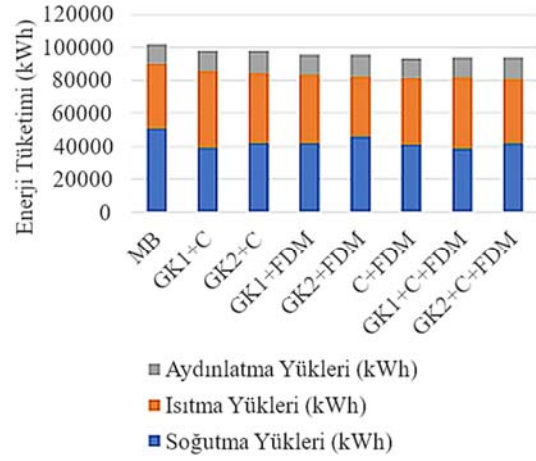
Çalışma kapsamında incelenen iyileştirme müdahalelerinin soğutma döneminde binaların enerji verimliliğini arttırdığı yapılan BES

**Tablo 8.** İstanbul ve Diyarbakır’da Birleştirilmiş İyileştirme Senaryolarının Yıllık Enerji Tüketim Değerleri  
(Combined Retrofit Scenario Loads of İstanbul and Diyarbakır Provinces)

	Soğutma Yükleri (kWh)	Isıtma Yükleri (kWh)	Aydınlatma Yükleri (kWh)	Toplam Yükler (kWh)
MB <sub>Ist</sub>	10251,97	43166,39	12103,33	65521,69
GK1+C <sub>Ist</sub>	3915,21	47962,93	12441,19	64319,33
GK2+C <sub>Ist</sub>	5576,93	44596,20	13686,23	63859,36
GK1+FDM <sub>Ist</sub>	5530,20	44532,42	12231,05	62293,68
GK2+FDM <sub>Ist</sub>	8111,18	40011,74	13565,32	61688,25
C+FDM <sub>Ist</sub>	5364,77	42283,38	12024,40	59672,55
GK1+C+FDM <sub>Ist</sub>	3571,56	45078,89	12304,55	60955,00
GK2+C+FDM <sub>Ist</sub>	5062,31	41801,97	13556,39	60420,67
MB <sub>Diy</sub>	51025,52	38962,60	12181,71	102169,83
GK1+C <sub>Diy</sub>	39313,13	46480,54	12350,03	98143,70
GK2+C <sub>Diy</sub>	42049,60	42416,70	13675,65	98141,96
GK1+FDM <sub>Diy</sub>	42192,07	41547,15	12167,51	95906,72
GK2+FDM <sub>Diy</sub>	46131,64	36242,22	13410,47	95784,33
C+FDM <sub>Diy</sub>	41279,13	40059,78	12070,62	93409,52
GK1+C+FDM <sub>Diy</sub>	38722,90	43111,99	12199,72	94034,61
GK2+C+FDM <sub>Diy</sub>	41939,94	38808,15	13362,39	94110,48



(a) İstanbul Kombinasyon Senaryoları Sistem Yükleri



(b) Diyarbakır Kombinasyon Senaryoları Sistem Yükleri

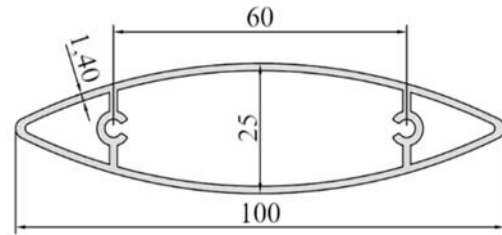
**Şekil 10.** Birleştirilmiş iyileştirme senaryolarının yıllık sistem yükleri (Annual system loads of combined retrofit scenarios)

çalışması sonrasında literatürü destekler nitelikte gösterilmiştir. Bu müdahalelerin maliyetlerini sağladıkları performanslarına göre değerlendirmek ve ortaya çıkarmak, iyileştirme projelerinde yol gösterici olmasından ötürü önemlidir. FDM dışındaki malzemelerin rayiç bedellerine Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayınlamış olduğu 2023 Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları Kataloğundan ulaşılabilmektedir. Ancak FDM maliyeti için uluslararası literatürden yararlanılmış olduğundan, birimlerin karşılaştırılması açısından TL olan maliyetler çalışma sırasındaki USD / TL kuru olan 23,66 üzerinden karşılaştırılmıştır. İyileştirmelerin maliyetleri Tablo 9'da özetlenmiştir.

### 5.1. Sabit güneş kırıcı sistem maliyeti (Cost of the fixed solar shading system)

İstanbul ve Diyarbakır için yapılan güneş diyagramlarından yola çıkarak yapılan güneş kırıcı boyutlandırmalarına göre metraj hesabı yapılmıştır. Hesaplamalarda binaya statik olarak az yük getirmesi için kg/m oranı 0,968 olan Şekil 11'de kesiti gösterilmiş alüminyum profil kullanılmıştır [46]. Buna göre tasarlanan güneş kırıcı ağırlıkları İstanbul ve Diyarbakır illeri için sırasıyla 1169,05 kg ve 1691,97 kg olarak hesaplanmıştır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayınlamış olduğu 2023 Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları kataloğunda yer alan 15.460.1001 poz numaralı "naturel-mat

eloksallı profillerle ısı yalıtımsız alüminyum doğrama imalatı yapılması ve yerine konulması" işinin fiyatı kg başına 6,76 USD'dir (159,86 TL) [47].

**Şekil 11.** Güneş kırıcı sistemde kullanılan profil detayı [46]  
(Profile detail used in the solar shading system)

Buna göre iyileştirme projesinde toplam maliyetler İstanbul için toplam 7.902,78 USD, Diyarbakır için toplam 11.437,72 USD'dir.

### 5.2. Hareketli güneş kırıcı sistem maliyeti (Cost of the dynamic solar shading system)

Çalışmada kullanılan ikinci tip güneş kırıcı sistemi, güneşin konumuna göre açısını ayarlayan hareketli güneş kırıcı sistemidir.

**Tablo 9.** Çalışmada uygulanan iyileştirme seçeneklerinin maliyetleri  
(Costs of the retrofit interventions implemented in the study)

İyileştirme Seçenekleri	Miktarı	Özellikleri	Birim Fiyat	Maliyet
Sabit Güneş Kırıcı-İstanbul (GK1 <sub>İst</sub> )	1169,05 kg	Naturel-mat eksenli profillerle ısı yalıtımsız alüminyum	6,76 USD	7.902,78 USD
Sabit Güneş Kırıcı-Diyarbakır (GK1 <sub>Diy</sub> )	1691,97 kg	doğrama imalatı yapılması ve yerine konulması.		11.437,72 USD
Hareketli Güneş Kırıcı-İstanbul (GK2 <sub>İst</sub> )	38 adet motor	Sabit güneş kırıcı sistemindeki alüminyum doğramalara ek olarak motor eklenmesi.	6,76 USD + güneş kırıcı bölgesi başına 160 USD	13.982,78 USD
Hareketli Güneş Kırıcı-Diyarbakır (GK2 <sub>Diy</sub> )				17.517,72 USD
Cam Sistemi Değişikliği (C)	177,64 m <sup>2</sup>	PVC ve alüminyum doğramaya profil ile 4+4 mm kalınlıkta 16 mm ara boşluklu ilk camı güneş ve ısı kontrol kaplamalı çift camlı pencere ünitesi takılması.	38,26 USD/	6.796,51 USD
Faz Değiştiren Malzeme (FDM)	1807,92 m <sup>2</sup>	BioPCM M91Q27, 287,07 W/m <sup>2</sup> gizli ısı kapasitesine sahip faz değiştiren malzeme uygulanması.	49,40 USD	89.311,35 USD

Tedarikçi ve uygulamacı bir firmayla yapılan özel görüşmede alınan bilgiye göre, her güneş kırıcı bölgesi için alüminyum güneş kırıcı profillerine ek olarak motor eklenmesi gerektiği bilgisi alınmış ve ek ekipmanlarla birlikte her bölgede ek olarak 160 USD maliyet gerektirdiği öğrenilmiştir.

İyileştirme projesinde 38 bölgede güneş kırıcı uygulaması yapılmıştır. Buna göre projede güneş kırıcı profillere ek maliyet toplam 6080 USD'dir. Hareketli güneş kırıcı sistemi için toplam maliyetler İstanbul için 13.982,78 USD, Diyarbakır için de 17.517,72 USD'dir.

### 5.3. Cam sistemi değişikliği maliyeti (Cost of the glazing system change)

2023 Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları kataloğuna göre iyileştirme projesinde kullanılan 15.470.1419 poz numaralı "PVC ve alüminyum doğramaya profil ile 4+4 mm kalınlıkta 16 mm ara boşluklu ilk camı güneş ve ısı kontrol kaplamalı çift camlı pencere ünitesi takılması" işinin birim fiyatı m<sup>2</sup> başına 38,26 USD'dir (905,13 TL) [47].

Projede cam alanı 177,64 m<sup>2</sup>'dir. Yapılan iyileştirme müdahalesinin toplam maliyeti 6.796,51 USD'dir.

### 5.4. Faz değiştiren malzeme uygulama maliyeti (Cost of phase change material application)

Çalışmada kullanılan FDM'nin Türkiye pazarındaki kesin fiyatını belirlemek, güncel bir teknoloji olması nedeniyle ithal edilmesi gerektiği için ve dalgalı döviz piyasası nedeniyle zordur. Bu nedenle, malzemenin fiyatı, Kosny'nin FDM ile geliştirilmiş bina kabuğunun maliyet analizi üzerine yapılan çalışmasından alınmıştır. FDM'nin satın alınması, taşınması ve kurulumu için 49,40 USD/m<sup>2</sup> belirlenmiştir [48].

Projede faz değiştiren malzemelerin uygulandığı alan 1807,92 m<sup>2</sup>'dir. Faz değiştiren malzeme uygulamasının toplam maliyeti 89.311,35 USD'dir.

### 5.5. İyileştirme senaryolarında soğutma yükü azaltımı ve maliyet analizi (Cooling loads reduction and cost analysis of retrofit scenarios)

Bina enerji simülasyonları sonuçları mevcut binada Diyarbakır ilinin soğutma yüklerinin (51.025,52 kWh) İstanbul ilinden (10.251,97 kWh) yaklaşık beş kat daha yüksek olduğunu açıkça göstermektedir. 2406

Soğutma yüklerini ve dolaylı salımları azaltmak için her iki konumda da mevcut binaya dört farklı tekil iyileştirme senaryosu ve bu senaryoların kombinasyonları uygulanmış, soğutma yüklerine olan etkileri ve maliyetleri ortaya konmuştur. Elde edilen değerler Tablo 10'da gösterilmiştir.

## 6. Sonuçlar (Conclusions)

Yapılı çevre, iklim değişikliğine neden olan enerji kaynaklı sera gazı emisyonlarına doğrudan ve dolaylı olarak katkıda bulunmaktadır. Binaların iklim değişikliğine katkısının azaltımı için binaların enerji tüketiminin düşürülmesi ve iyileştirme stratejileri kullanılarak değişen şartlara uyumun sağlanması gerekmektedir.

Türkiye'de yapı kabuğu iyileştirmeleri çoğunlukla kış şartlarına karşı alınan önlemlerden oluşmaktadır. Binalarda Isı Yalıtımı ve Binalarda Enerji Performans yönetmelikleri bu konuda yön gösterici ve bağlayıcı niteliktedir. Ancak iklim değişikliğinin yaz sıcaklıklarını kademeli olarak artırması nedeniyle yaz dönemine yönelik iyileştirmelerin de önem kazanacağı bilinmektedir.

Çalışma kapsamında oluşturulan enerji modelleri, doğru müdahaleler seçildiğinde binaların soğutma yüklerinin büyük ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir.

Sonuçlar, tekil bir müdahale olarak cam sisteminin low-e sisteminden solar low-e sisteme değiştirilmesinin (C) her iki ilde de hem soğutma yüklerinin azaltılması hem de maliyet açısından en etkin yol olduğunu göstermektedir. Bu etkinlik Diyarbakır'daki müdahalede çok daha net bir şekilde görülmektedir. Öte yandan, yapıya sabit güneş kırıcı eklenmesinin (GK1), iki bölgede de soğutma yüklerinin azaltımı için oldukça etkili bir yöntem olduğu açıktır. Özellikle bulunduğu konumun yüksek enlemi nedeniyle daha küçük boyutlandırılan İstanbul'daki uygulama örneğinde maliyet de cam sistemi değişikliğine yakın olan bu yöntem, tekil müdahaleler arasında iyi bir ikinci alternatiftir.

Birim azaltım maliyetleri göz önüne alındığında tekil müdahale olarak faz değiştiren malzeme uygulaması, yaz döneminde sıcak kuru iklime sahip Diyarbakır'da aynı dönemde ılıman nemli iklime sahip İstanbul'a kıyasla yaklaşık 2,66 kat iyi performans göstermiştir. Bu sonuç, FDM'nin farklı iklim bölgelerindeki etkinliği hakkındaki literatürü destekler niteliktedir. Diyarbakır'da FDM uygulaması soğutma yüklerini 2.109,50 kWh (%4,13) azaltırken, İstanbul'da bu

**Tablo 10.** İstanbul ve Diyarbakır'da uygulanan iyileştirme senaryolarının soğutma yükleri üzerindeki etkileri ve birim azalma için maliyetleri

	Soğutma Yükleri (kWh)	Azaltım (kWh)	Azaltım Oranı (%)	İyileştirme Maliyeti (USD)	Birim Azaltım Maliyeti (USD/kWh)
MB <sub>Ist</sub>	10251,97	-	-	-	-
GK1 <sub>Ist</sub>	6072,80	4179,17	40,76	7902,78	1,89
GK2 <sub>Ist</sub>	9089,27	1162,70	11,34	13982,78	12,03
C <sub>Ist</sub>	5913,55	4338,42	42,32	6796,51	1,57
FDM <sub>Ist</sub>	9459,59	792,38	7,73	89311,35	112,71
GK1+C <sub>Ist</sub>	3915,21	6336,76	61,81	14699,29	2,32
GK2+C <sub>Ist</sub>	5576,93	4675,04	45,60	20799,29	4,25
GK1+FDM <sub>Ist</sub>	5530,20	4721,77	46,06	97214,13	20,59
GK2+FDM <sub>Ist</sub>	8111,18	2140,79	20,88	103294,13	48,25
C+FDM <sub>Ist</sub>	5364,77	4887,20	47,67	96107,86	19,67
GK1+C+FDM <sub>Ist</sub>	3571,56	6680,41	65,16	104010,64	15,57
GK2+C+FDM <sub>Ist</sub>	5062,31	5189,66	50,62	110090,64	21,21
MB <sub>Diy</sub>	51025,52	-	-	-	-
GK1 <sub>Diy</sub>	44149,92	6875,60	13,47	11437,72	1,66
GK2 <sub>Diy</sub>	48578,71	2446,81	4,80	17517,72	7,16
C <sub>Diy</sub>	43282,63	7742,88	15,17	6796,51	0,88
FDM <sub>Diy</sub>	48916,01	2109,50	4,13	89311,35	42,34
GK1+C <sub>Diy</sub>	39313,13	11712,39	22,95	18234,23	1,56
GK2+C <sub>Diy</sub>	42049,60	8975,92	17,59	24314,23	2,71
GK1+FDM <sub>Diy</sub>	42192,07	8833,45	17,31	100749,07	11,41
GK2+FDM <sub>Diy</sub>	46131,64	4893,88	9,59	106829,07	21,83
C+FDM <sub>Diy</sub>	41279,13	9746,39	19,10	96107,86	9,86
GK1+C+FDM <sub>Diy</sub>	38722,90	12302,62	24,11	107545,58	8,74
GK2+C+FDM <sub>Diy</sub>	41939,94	9085,58	17,81	113625,58	12,51

azalma 792,39 kWh (%7,73) olmuştur. Bununla birlikte, FDM'nin bina iyileştirme projelerinde diğer müdahalelere kıyasla çağdaş bir malzeme olması nedeniyle maliyet etkinliği, çalışmada incelenen diğer müdahalelerden çok daha düşüktür.

Birleştirilmiş iyileştirme senaryolarına bakıldığında ise, soğutma yüklerini düşürmede en etkin olan kombinasyon her iki şehir için de sabit güneş kırıcı (GK1), cam değişikliği (C) ve FDM'nin birlikte kullanıldığı seçenektir. Ancak bu senaryonun maliyet etkinliği oldukça düşüktür.

Çalışmanın sonuçlarına göre İstanbul'daki iyileştirme müdahaleleriyle elde edilen soğutma yükü azaltımı oranlarının Diyarbakır'a göre oldukça yüksek oranda olduğu net bir şekilde görülebilir. Ayrıca Diyarbakır'da konumlanan mevcut binanın toplam soğutma yükü İstanbul'dakine göre yaklaşık beş kat fazladır. Bu nedenle, Diyarbakır için soğutma yükleri göz önüne alınarak tasarlanan (doğrudan güneş ışınlarını tamamıyla kesen) güneş kırıcı sistemi maliyet olarak İstanbul'dakinin yaklaşık 1,45 katı olmasına rağmen birim enerji azaltım maliyeti Diyarbakır'da daha düşüktür. Benzer farklar bütün müdahale yöntemleri için görülmektedir.

Bu çalışma, Türkiye'de iklim değişikliğinin etkileri nedeniyle binaların artan soğutma yüklerini azaltmak için birim azaltım maliyetine bakıldığında (USD/kWh) incelenen senaryolardan en uygun maliyetli ve elverişli senaryonun cam sisteminin değiştirilmesi olduğunu ve değişen koşullara uyum sağlamak için solar low-e sistemlerinin etkin bir şekilde kullanılması gerektiğini göstermektedir.

#### Kaynaklar (References)

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2021.
3. International Energy Agency, 2019 global status report for buildings and construction: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>. Yayın tarihi 2019. Erişim tarihi Ekim 31, 2022.
4. Türkiye İstatistik Kurumu, Sera gazı emisyon istatistikleri, 1990-2021. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672> Yayın tarihi Mart 29, 2023. Erişim tarihi Ekim 25, 2023.
5. Türkiye İstatistik Kurumu, İstatistiklerle çevre, 2018. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Istatistiklerle-Cevre-2018-33675>. Yayın tarihi Haziran 5, 2020. Erişim tarihi Ekim 31, 2022.
6. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Eylem planları. <https://iklim.gov.tr/eylem-planlari-i-19>. Erişim tarihi Ekim 31, 2022.
7. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 4.6 sıcaklık. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/sicaklik-i-85727>. Erişim tarihi Ekim 31, 2022.
8. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2014: synthesis Report. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Cenevre, İsviçre, 2014.
9. Türkeş M., Küresel iklim değişiklikleri ve başlıca nedenleri ile Dünya'da ve Türkiye'de gözlenen ve öngörülen iklim değişiklikleri ve değişkenliği, Küresel İklim Değişikliği ve Etkileri, Ankara, Türkiye Çevre Vakfı, 71-115, 2016.
10. International Energy Agency, Transition to Sustainable Buildings, 2013.
11. Uzun C.N., The impact of urban renewal and gentrification on urban fabric: Three cases in Turkey, Tijdschrift voor economische en sociale geografie, 94 (3), 363-375, 2003.
12. Keresticioğlu S., Özkan D., Hamamcıoğlu C., Yerliyurt B., Sakıncı E. and Hafızoğlu T., Reducing Cooling and Heating Loads in Existing Residential Buildings in the Context of Building Envelope: Beykoz-Kanlıca. Megaron, 10 (4), 451-469, 2015.
13. Koschenz M. ve Lehmann B., Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. Energy and buildings, 36 (6), 567-578, 2004.

14. Kuznik F., Virgone J. ve Johannes K. In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard, *Renewable Energy*, 36 (5), 1458-1462, 2011.
15. Biswas K., Miller W.A., Childs P.W., Kosny J. ve Kriner S., Performance evaluation of a sustainable and energy efficient re-roofing technology using field-test data. Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). Building Technologies Research and Integration Center (BTRIC), 2011.
16. Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., de' Rossi F. ve Vanoli G.P., Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. *Applied Energy*, 113, 990-1007, 2014.
17. Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., de' Rossi F. ve Vanoli G.P., Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value. *Energy and Buildings*, 95, 172-183, 2015.
18. Andrés M., Rebelo F., Corredera A., Figueiredo A., Hernández J. L., Ferreira V. M., Bujedo L.A., Vicente R., Morentin F. ve Samaniego J., Real-scale experimental evaluation of energy and thermal regulation effects of PCM-based mortars in lightweight constructions. *Applied Sciences*, 12 (4), 2091, 2022.
19. Baccega E. ve Bottarelli M., Granular PCM-enhanced plaster for historical buildings: experimental tests and numerical studies. *Energies*, 15 (3), 975, 2022.
20. Imafidon O.J. ve Ting D.S.K., Energy consumption of a building with phase change material walls – the effects of phase change material properties. *Journal of Energy Storage*, 52, 105080, 2022.
21. Imafidon O.J. ve Ting D.S.K., Retrofitting buildings with phase change materials (PCM) – the effects of PCM location and climatic condition. *Building and Environment*, 236, 110224, 2023.
22. Li W., Jing M., Li R., Gao J., Zhu J. ve Li R., Study of the optimal placement of phase change materials in existing buildings for cooling load reduction – take the central plain of China as an example. *Renewable Energy*, 209, 71-84, 2023.
23. Mohammed A., Tariq M.A.U.R., Ng A.W.M., Zaheer Z., Sadeq S., Mohammed M. ve Mehdi-zadeh-Rah H., Reducing the cooling loads of buildings using shading devices: a case study in Darwin. *Sustainability*, 14 (7), 3775, 2022.
24. Alhuwayil W.K., Almazid F.A. ve Mujeebu M.A., Energy performance of passive shading and thermal insulation in multistory hotel building under different outdoor climates and geographic locations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45, 102940, 2023.
25. Dokhanian F., Mohajerani M., Estaji H. ve Nikravan M., Shading design optimization in a semi-arid region: considering energy consumption, greenhouse gas emissions, and cost. *Journal of Cleaner Production*, 139293, 2023.
26. Fleischer A.S., *Thermal energy storage using phase change materials: fundamentals and applications*, Springer, 2015.
27. Kottke M., Grieser J., Beck C., Rudolf B. ve Rubel F., World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), 259-163, 2006.
28. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. İllere ait mevsim normalleri (1991-2020), <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H>. Erişim tarihi Haziran 14, 2023.
29. Akgöz E., Enerji etkin bina tasarım parametreleri için uygun değerlerin belirlenmesi: İstanbul örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.
30. Berköz E., Aygün Y.Z., Kocaaslan G., Yıldız E., Ak F., Küçükdoğu M., Enarun D., Ünver R., Yener K.A., Yıldız D., Enerji etkin konut ve yerleşme tasarımı. Tübitak İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu, Proje No: İntag 201, Tübitak Projesi, 1995.
31. Cengiz H.T., The effects of glazing area interventions and PCM application in building energy retrofits, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2021.
32. Isıcam, Isıcam sistemleri. <http://www.isicam.com.tr/tr/>. Erişim tarihi Haziran 14, 2023.
33. Pacheco-Torgal F., Granqvist C.G., Jelle B.P., Vanoli G.P., Bianco N., ve Kurnitski J., Cost-effective energy efficient building retrofitting: Materials, technologies, optimization and case studies, Woodhead Publishing, 2017.
34. Baetens R., Jelle B.P. ve Gustavsen A., Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42 (9), 1361-1368, 2010.
35. İlgar G., Terhan M., Effect of thickness and melting temperature of phase change material integrated into exterior wall on building energy performance and CO2 emission reduction, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (2), 959-976, 2023.
36. Pusa S., Ekmekçi İ. ve Akkoyunlu M.T., Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey. *Renewable Energy*, 75, 144-151, 2015.
37. Ingersoll J. ve Huang J., Heating energy use management in residential buildings by temperature control. *Energy and Buildings*, 8 (1), 27-35, 1985
38. Turner C.S. ve Gruber K., Residential thermostat management practices: an investigation of setback behavior. *Proceedings of the ACEEE: Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Human Dimensions*, 2, 2-151, 1990.
39. Mozer M., Dodier R., Miller D., Anderson M., Anderson J., Bertini D., Bronder M., Colagrosso M., Cruickshank R. ve Daugherty B., The adaptive house. IEE Seminar Digests, IET. 11059, 1-39, 2005.
40. Tariku F., Kumaran M. ve Fazio P., Thermostat setback effect in whole building performance. *Proceedings of Building Physics Symposium, Leuven, Belgium*, 1-5, 2008.
41. Moon J.W. ve Han S.H., Thermostat strategies impact on energy consumption in residential buildings. *Energy and Buildings*, 43 (2-3), 338-346, 2011.
42. Florida Solar Energy Center, Parker D.S., Determining appropriate heating and cooling thermostat set points for building energy simulations for residential buildings in North America, 2013.
43. Martinaitis V., Zavadskas E.K., Motuziene V. ve Vilutiene T., Importance of occupancy information when simulating energy demand of energy efficient house: a case study. *Energy and Buildings*, 101, 64-75, 2015.
44. Date J., Athienitis A.K. ve Fournier M., A study of temperature set point strategies for peak power reduction in residential buildings. *Energy Procedia*, 78, 2130-2135, 2015.
45. Jacquet S., Le Bel C. ve Monfet D., In situ evaluation of thermostat setback scenarios for all-electric single-family houses in cold climate. *Energy and Buildings*, 154, 538-544, 2017.
46. Burak Alüminyum, Mimari sistemler kataloğu, güneş kırıcı. <https://www.burak.com.tr/YuklenenDosyalar/UrunDosyaları/c7a68fb2-2a3b-4a11-84c3-e4b7b4eeab43.pdf>. Erişim tarihi Haziran 14, 2023.
47. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023 yılı inşaat ve tesisat birim fiyatları. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/2023-b-r-m-f-yatları-1-20230130125553.pdf>. Erişim tarihi Haziran 14, 2023.
48. Kosny J., Shukla N. ve Fallahi A., Cost analysis of simple phase change material-enhanced building envelopes in southern US climates. *Teknik rapor*, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO, ABD, 2013.