



An approach for cost and energy efficient retrofitting of a lower secondary school building

Yiğit Yılmaz^{1*}, Gül Koçlar Oral²

¹Bahcesehir University, Faculty of Architecture and Design, Istanbul, 34022, Turkey

²Istanbul Technical University, Faculty of Architecture, Taskisla, Taksim, Istanbul, 34437, Turkey

Highlights:

- Modeling calibration of energy model
- Energy and cost efficient building retrofits
- Life-cycle cost optimization

Keywords:

- Energy modelling
- Calibration
- Energy efficiency
- Cost optimality
- Optimization

Article Info:

Research Article
Received: 27.06.2017
Accepted: 05.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416503

Acknowledgement:

Correspondence:

Author: Yiğit Yılmaz
e-mail:
yigit.yilmaz@arc.bau.edu.tr
phone: +90 212 381 5543

Graphical/Tabular Abstract

In this study, an approach was proposed to improve the cost and energy performance of a school building stock in the selected region through an example building application. In this context, an example school building was designated as a representative base case. The required data to produce the base case's energy model was collected via field studies. The energy model was calibrated according to ASHRAE Guideline 14 to reach accurate results through the energy simulations. Then, energy efficient retrofitting scenarios were determined to apply into the life-cycle cost optimization through the calibrated energy model. GenOpt optimization tool was integrated to Energy Plus simulation tool to calculate and optimize the energy and cost performances. The results were evaluated in terms of energy and cost performances as reported in Figure A to obtain the cost optimal level and frontier cases as recommended packages for energy efficient retrofitting.

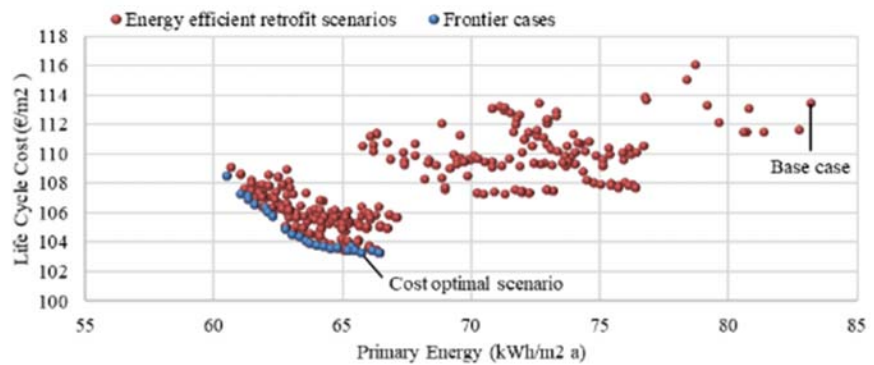


Figure A. Life-cycle cost and primary energy performance of the retrofit scenarios

Purpose: This study aims to propose an approach to enhance energy performance of a school building stock in the selected region through life cycle cost optimization of an example school building case.

Theory and Methods: Energy model of the selected school building case was calibrated via the whole building calibrated simulation method in ASHRAE Guideline 14. In order to designate the efficient range of variables of retrofitting parameters, sensitivity analysis method was applied to the energy calculation results. Lastly, multi-dimensional optimization method was used to achieve the cost and energy efficient scenarios.

Results: In the optimization process the scenarios achieved a reduction between 43,47% and 58,80% for the energy performance and between 14,51% and 23,93% for the life cycle cost (LCC).

Conclusion: In conclusion, it is observed that active system retrofitting such as the application of condensing boiler and LED tubes has great impact to achieve the cost and energy efficient performance levels due to the low investment cost and high energy efficiency.



Bir ortaokul binasının maliyet ve enerji etkin yenilenmesi için bir yaklaşım

Yiğit Yılmaz^{1*}, Gül Koçlar Oral²

¹Bahçeşehir Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Beşiktaş, İstanbul, 34022, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Taskışla, Taksim, İstanbul, 34437, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Mikro Enerji modeli kalibrasyonu
- Enerji ve maliyet etkin bina yenilemesi
- Yaşam döngüsü maliyet optimizasyonu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.06.2017

Kabul: 05.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416503

Anahtar Kelimeler:

Enerji modeli,
kalibrasyon,
enerji etkinlik,
maliyet optimum,
yaşam döngüsü maliyeti,
optimizasyon

ÖZET

Küresel ısınma sorununu kontrol altına almak için Dünya’da ve ülkemizde protokoller imzalanmakta, tedbir planları oluşturulmaktadır. Bu bağlamda, toplam tüketilen enerjinin yaklaşık %40’ını temsil eden binalarda enerjinin etkin kullanımı küresel ölçekte sera gazı salınımlarının azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Binalarda enerjinin etkin kullanımını sağlamak için ulusal ve uluslararası ölçekte birçok yaptırım ve uygulama gerçekleştirilmekte ve kamusal binaların bu tür uygulamalara öncülük etmesi hedeflenmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada kamusal ilkökul ve ortaokul binalarının enerji etkin dönüşümünü amaçlayan bir yöntem önerisi sunulmaktadır. Yöntemde, öncelikle belirlenen bir pilot alanda yer alan ilkökul ve ortaokul binalarının analizleri doğrultusunda, belirlenmiş bir örneklem ortaokul binasının enerji ve fiziksel veri envanteri toplanmış, bu envantere göre enerji modellemesi yapılmış ve ASHRAE Guideline 14’e göre enerji modeli kalibre edilmiştir. Kalibre edilmiş enerji modeli üzerinden enerji yenileme senaryoları ve kontrol stratejileri geliştirilerek, geliştirilen senaryolar yaşam döngüsü maliyetine göre optimize edilmiştir. Böylelikle önerilen yaklaşımda, mevcut binaların enerji ve maliyet etkin yenilenmeleri için bütüncül bir model sunulmaktadır.

An approach for cost and energy efficient retrofitting of a lower secondary school building

H I G H L I G H T S

- Modeling calibration of energy model
- Energy and cost efficient building retrofits
- Life-cycle cost optimization

Article Info

Research Article

Received: 27.06.2017

Accepted: 05.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416503

Keywords:

Energy modelling,
calibration,
energy efficiency,
cost-optimality,
Life-cycle cost,
optimization

ABSTRACT

In order to control the issue of global warming, some significant protocols are signed and precautionary proposals are prepared in Turkey and worldwide. In this context, efficient use of energy in buildings is quite essential for decreasing the greenhouse emissions globally, since building stock accounts for about 40% of total energy consumption. The codes and implementations are carried out by local and international authorities to ensure energy efficiency in building stock, where the public buildings are supposed to lead. Therefore, in this study energy efficient retrofitting of public primary and lower secondary school building stock is targeted through the proposed methodology. In the proposed methodology, firstly, a representative educational school building was determined among primary and lower secondary school building stock in the selected pilot area according to analyses of the educational buildings, and its energy model was done and calibrated via ASHRAE Guideline 14 by collected physical and energy performance data. Then, calibrated energy model was used to develop retrofit scenarios with control strategies, which were optimized through life cycle cost evaluation. Hereby, the methodology proposed a whole evaluation approach in which existing buildings are subject to have cost optimal energy retrofits.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: yigit.yilmaz@arc.bau.edu.tr, kgul@itu.edu.tr / Tel: +90 212 381 5543

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada teknolojinin gelişimine paralel olarak insanların konforlu binalarda yaşam isteğinin artması; bina stokunun büyümesine, yeşil alanların tahribatına, fosil enerji kaynaklarının kullanımının artmasına sebep olmaktadır ve bu durum hava kirliliği, küresel ısınma ve doğal kaynakların tükenme tehdidi gibi enerji ve çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunlar karşısında çağdaş bir çözüm olarak ortaya çıkan sürdürülebilirliğin sağlanması için küresel tedbir planlarını içeren toplantılar yapılmakta ve sözleşmeler imzalanmaktadır. Küresel ölçekte en önemli tedbir planlarından biri olarak, sera gazı salınımlarına küresel ölçekte kotalar koyan Kyoto Protokolü'ne imza atan ülkeler arasında Türkiye de yer almaktadır. Bilindiği gibi, fosil enerji kaynaklarının kullanımı kaynaklı sera gazı emisyonları küresel ısınmanın başlıca sebeplerinden birini oluşturmaktadır. Dünyada tüketilmekte olan fosil enerji kaynaklarının ise yaklaşık %40'ı binalarda ısıtma, soğutma ve aydınlatma ihtiyaçları için kullanılmaktadır [1]. Bu durum ise binalarda enerjinin verimli tüketiminin önemini göstermektedir. 2002 yılında Avrupa Birliği tarafından yayınlanmış olan 2002/91/EC sayılı Bina Enerji Performansı Direktifi (EPBD) [2], binalarda enerji verimli tüketiminin ve mevcut binaların enerji etkin yenilenmesinin önemini vurgulamaktadır. 2010 yılında yenilenen direktif ise (2010/31/EU) [3], binalarda maliyet etkin enerji iyileştirme önerilerinin geliştirilmesini, 2018 yılı itibari ile kamusal yapıların ve 2020 yılı itibari ile tüm yeni binaların sıfır-net-enerji binalar olarak tasarlanmasını hedeflemiştir.

Aynı zamanda Avrupa Birliği uyum sürecinde bulunan Türkiye'de, EPBD doğrultusunda, 2008 yılında Bina Enerji Performansı Yönetmeliği yayınlanmış [4] ve devamında Ulusal Bina Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi ve BEP-TR Bina Enerji Kimlik Belgesi programı 2011 Ocak itibariyle yürürlüğe girmiştir. 1 Ocak 2011 tarihinden itibaren yeni yapılan binalar için Bina Enerji Kimlik Belgesi (EKB) zorunlu kılınmış, mevcut binalar için ise 2017 yılına kadar EKB düzenlemeleri şart koşulmuştur. Son yıllarda, mevcut bina enerji davranış analizlerine ait yürütülmekte olan çalışmalar artış göstermektedir. Santoumouris ve arkadaşları [5] pilot bir alanda okul binalarının fiziksel ve enerji envanteri analiz edip önerdikleri kümeleme yöntemine göre okulların enerji etkin dönüşümü için enerji sınıflarına ayırmıştır. Dall'O ve Sarto [6] ise kuzey İtalyadaki okul binalarının enerji kullanımlarını inceledikten sonra geliştirdikleri enerji etkin yenileme senaryoları ile özellikle ısıtma enerjisinde önemli kazanımlar elde etmişlerdir. Ertürk [7] Ankara'da bulunan binaların dış duvar ısı geçirgenlik değerlerini, ısı yalıtımı ve hava boşluğu ekleyerek oluşturduğu farklı dış duvar alternatifleriyle geliştirmiş, yalıtımsız duruma göre yaşam döngüsü maliyeti %28 ve sera gazı salınımlarından %80 kazanım sağlamıştır. Binaların yapı kabuğu ve aktif sistemleri haricinde kullanıcı davranışlarının bina enerji performansına ciddi etkileri bulunmaktadır. Harputlugil [8] kullanıcı davranışlarından bina enerji performansını etkileyen en belirgin davranışın

pencerelerinin açılıp kapanması (yüksek miktarda ısı kayıp ve kazançları meydana gelebilmektedir) olduğunu ortaya koymuştur Bunun yanı sıra literatürde yer alan birtakım çalışmalarda, farklı bina tipolojileri ve iklim bölgeleri için, yeni yapılacak binaların enerji etkin tasarlanması ve var olan binaların enerji ve maliyet etkin yenilenmesi için yaklaşım modelleri önerilmektedir [9,10]. Mangan ve Oral [11] konut binaları için geliştirdikleri enerji etkin tasarım alternatifleriyle binaların enerji performanslarını %19 ile %23 arasında daha verimli hale getirmişlerdir. Çalışma, bu kapsamda, belirli bir bölgede var olan bina stokunun envanter analizleri üzerinden uygulanacak enerji ve maliyet etkin yenileme stratejilerinin geliştirilmesi, makro ölçekteki enerji verimliliği hedeflerine ulaşılması açısından bütüncül bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, seçilen pilot bölgedeki bir örneklem bina üzerinden, enerji etkin yenileme senaryolarının yaşam döngüsü maliyetine göre optimizasyonu ile var olan ve yeni yapılacak yapılar için örneklem yenileme paketlerine ulaşılabilecek bir yaklaşım geliştirilmesidir. Böylece, yazarlar tarafından daha önce gerçekleştirilmiş olan çalışmada [12] ele alınan okul binasının sınırlı sayıda ve sadece enerji etkinlik üzerinden yapılan yenileme değerlendirmeleri, hassasiyet analizleri ile oluşturulan 4400 enerji etkin yenileme senaryosu ile oldukça genişletilmiş ve yaşam döngüsü maliyet optimizasyonu ile maliyet ve enerji açısından optimum, etkin sınırdaki yer alan (var olan ve yeni yapılacak yapılar için örneklem teşkil edecek) yenileme senaryolarına ulaşılmıştır.

2. YÖNTEM (METHOD)

Çalışmada öncelikle, seçilen bir pilot bölgede yer alan eğitim binalarına ilişkin fiziksel veriler derlenerek, enerji analizleri yapılmış, örneklem olarak seçilen bir eğitim binasının enerji modeli oluşturularak sonraki hesaplamalarda gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi için kalibrasyon yapılmıştır. Daha sonra kalibre edilmiş model üzerinden enerji etkin yenileme senaryoları geliştirilmiş, mevcut durumdaki kullanıcı konforu analizleri aracılığıyla, kullanıcı konforu ve bina enerji performansını artırmak amaçlı kontrol stratejileri entegre edilmiştir. Kontrol stratejilerine bağlı olarak mevcut durum ve enerji etkin yenileme senaryoları için yaşam döngüsü maliyet analizleri yapılarak, yaşam döngüsü maliyetine göre enerji etkin yenileme senaryoları optimize edilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. Aşağıda araştırma yönteminin adımları ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.1. Pilot Alan Tespiti ve Analizi ve Örneklem Bina Seçimi (Analyses of Pilot Area and Determination of Base Case Building)

Pilot alan tespitinde; alanın çalışmanın hedefleriyle örtüşmesi, alana ulaşılabilirlik, alandan veri elde edilebilirliği ve verinin kararlılığı göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada, ılımlı nemli iklim bölgesinde yer alan İstanbul ilinin iki merkez ilçesi olan Şişli ve Beşiktaş, pilot alan olarak seçilmiştir.

Pilot alanda yapılan analizlerde, Şişli ve Beşiktaş'ta yer alan ilkokul ve ortaokul binaları tespit edilmiş, bu okulların mevcut durumda, enerji performanslarını birincil enerji tüketimlerine bağlı olarak karşılaştırmalı olarak değerlendirmek için gerekli veriler (yapım yılları, inşaat alanları, aynı zaman aralığına ait elektrik ve doğal gaz sarfiyatları) Milli Eğitim Müdürlükleri'nden elde edilmiştir.

Elde edilen enerji sarfiyatları öncelikle elektrik ve doğal gaz için nihai enerji tüketimine, sonrasında toplam enerji tüketimlerini elde etmek için birincil enerjiye çevrilmiştir. Böylelikle, Şekil 1'de görüldüğü gibi, birincil enerji tüketimlerini dağılımı gösterilmektedir. Şişli'de yer alan okulların büyük bir çoğunluğu 2000'li yıllarda TS 825 standardına uygun olacak şekilde yeniden inşa edildiği için bu okulların enerji performansının Beşiktaş'taki okullara göre daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, örneklem bina stokunda yer alan okul binalarının birim alana düşen birincil enerji tüketimi 41,52 ile 160,97 kWh/m².yıl arasında değişmekte ve ortalama birincil enerji tüketimi 92,03 kWh/m².yıl olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmada mevcut enerji performansı en düşük binalar arasında yer alan (birincil enerji tüketimi 147,17 kWh/m².yıl) Gazi Mustafa Kemal Ortaokulu, mevcut enerji performansının düşük olmasından dolayı enerji etkin yenilenmesi öncelikli bir bina olması nedeniyle, örneklem okul binası olarak belirlenmiştir.

2.2. Örneklem Enerji Modellemesi

(Energy Modelling of the Base Case)

Gazi Mustafa Kemal Ortaokulu, detaylı dinamik hesaplama yöntemine dayanan Energy Plus simülasyon programı

kullanılarak modellenmiştir. Örneklem okul binasının Energy Plus simülasyon programı ile üç aşamada enerji modelleme süreci gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, binanın mimari özellikleri, bina elemanlarına ait optik ve termofiziksel veriler simülasyon programında tanımlanmıştır. Sonraki aşamada, binada kullanılmakta olan aktif sistemlere (iklimlendirme ve aydınlatma sistemleri) ait veriler enerji modeline tanımlanmış, son aşamada ise kullanıcı davranışları ve işleyiş çizelgeleri oluşturulmuştur.

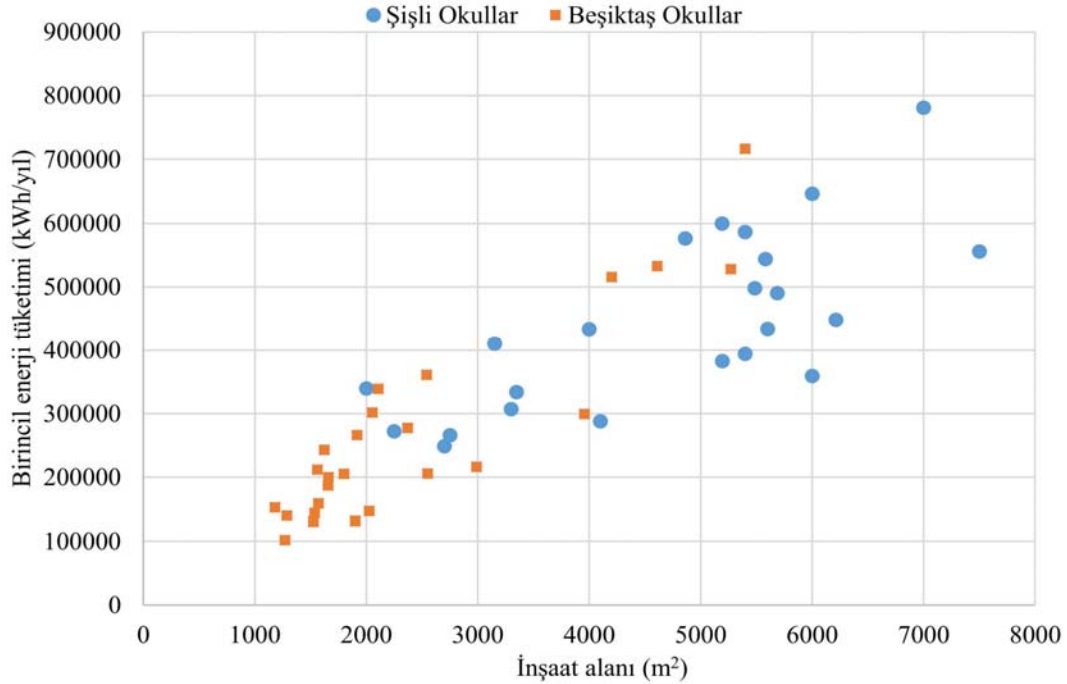
2.2.1. Enerji modeli girdileri (Input of the energy model)

Bina 1998 yılında betonarme karkas sistem üzerine beşik çatılı olarak inşa edilmiştir. Binaya ait üç boyutlu görsel ve vaziyet planı Şekil 2'de yer almaktadır.

Gazi Mustafa Kemal Ortaokulu 2053 m² brüt alana sahip olup ana bina ve ek bina olmak üzere iki ayrı binadan oluşmaktadır. Okula ait gelen özellikler aşağıdaki gibidir;

- Ana bina; yarı bodrum, zemin ve birinci katlar olmak üzere 3 kattan oluşmaktadır. Ana binada 13 adet sınıf, iki adet laboratuvar, 1 adet anasınıfı, çok amaçlı salon, yönetim ve servis odaları bulunmaktadır.
- Ek bina; zemin, birinci ve ikinci katlar olmak üzere 3 kattan oluşmaktadır. Ek binada 3 adet sınıf, bir yönetim ve bir servis mahalli yer almaktadır.

Binanın kuzey ve güney cephelerinin pencere/duvar yüzey alanı oranı yaklaşık %25, doğu ve batı cephelerinin ise %7'dir. Bina kabuğunun opak bileşeni olan dış duvarlarda, çatı ve bodrum döşemesinde ısı yalıtımı bulunmamaktadır.



Şekil 1. Okul Binalarının Birincil Enerji Tüketimleri ve İnşaat Alanları
(Primary Energy Use of and Construction Area of the School Buildings)

Yapı kabuğunun saydam bileşeni olarak da çift cam kullanılmıştır. Yapı kabuğunun opak ve saydam bileşenlerine ait optik ve termo-fiziksel özellikler Tablo 1 ve Tablo 2’de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Binada, prizmatik üç geçişli gaz yakıtlı sıcak su kazanı bulunmakta ve bina radyatörler vasıtasıyla ısıtılmaktadır. Kazan ana binada yer almakta, yer altından geçen izole borular vasıtasıyla ek binayı da ısıtmaktadır. Bina içinde sıcak su iletimini yapan borular izole edilmemiştir. Kullanım sıcak su hazırlama sıhhi tesisatı mevcut değildir ve kazan sadece ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Yapıda herhangi bir mekanik havalandırma sistemi de bulunmamaktadır.

Yönetim odalarında, yaz döneminde soğutma amaçlı kullanılmak üzere split klimalar bulunmaktadır. Klimalara

ait sıcaklık sensörü ya da termostatik kontrol paneli bulunmamakta, kullanıcı tarafından manuel olarak kumandalar vasıtasıyla kullanılmaktadır.

Aydınlatma, $7,27 \text{ W/m}^2$ güç yoğunluğu ile kurulmuş T5 floresanlar (36 W) tarafından sağlanmaktadır. Her hacmin aydınlatması kendi içinde yer alan tekli anahtar ile yönetilmekte ve herhangi bir ışık sensörü veya loşlaştırma sistemi yer almamaktadır.

Kullanıcı yoğunluğu, kullanıcı davranışı ve işleyiş çizelgelerinin oluşturulabilmesi için okul yönetimden veriler talep edilmiş, yönetim ve öğretmenlerle görüşmeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir;

- Okulda 24 öğretmen ve 382 öğrenci bulunmaktadır (ortalama sınıf başına 24 öğrenci düşmektedir). Eylül



Şekil 2. (sol) Vaziyet Görünüm, (sağ üst) Ana Bina 3 Boyutlu Görünüm, (sağ alt) Ek Bina 3 Boyutlu Görünüm ((left) Site View, (up right) 3ds View of Main Building, (down right) 3ds View of Additional Building)

Tablo 1. Örneklem İlkokul Binası Saydam Bileşenine (Dış Pencere) Ait Optik ve Termo-fiziksel Özellikler (Base Case Building Window Glazing Thermal and Optical Properties)

Saydam Bileşen	U Değeri (W/m ² K)	Güneş Enerjisi Geçirgenlik Katsayısı	Gün Işığı Geçirgenlik (%)
Pencereler	$U_{dışpen}=2,70$	0,86	80

Tablo 2. Örneklem İlkokul Binası Opak Bileşenlerine Ait Termo-fiziksel Özellikler (Base Case Building Opaque Surfaces Thermal Properties)

Opak Bileşen	Malzeme	Kalınlık (m)	Isıl İletkenlik (W/mK)	U Değeri (W/m ² K)
Dış Duvar	Dış sıva	0,030	0,80	$U_{dışduvar}=1,149$
	Tuğla	0,190	0,42	
	İç sıva	0,020	0,50	
Döşeme (Toprak ile Temas eden)	Betonarme	0,150	2,50	$U_{döşeme}=2,498$
	Şap	0,050	0,40	
	Seramik kaplama	0,010	1,20	
	Kiremit	0,025	1,00	
Çatı	Hava boşluğu	(ısıl geçirgenlik direnci: 0,15 m ² K/W)		$U_{çatı}=1,879$
	Keçe – Su yalıtımı	0,005	0,19	
	Ahşap panel	0,019	0,10	

ortasında başlayan ilk dönem eğitim ve öğretimi Ocak sonunda bitmektedir. 10 Şubat'ta başlayan ikinci dönem ise 14 Haziran'da son bulmaktadır. Öğrenciler resmi tatiller ve hafta sonları dışında 09:00 – 15:20 saatleri arası okulda bulunmakta, yönetim (2 yönetici ve 5 memur) ise 08:00 – 17:00 saatleri arası okulda bulunmaktadır.

- Isıtma kazanı okulda görevli bir memur tarafından çalıştırılmaktadır. Isıtma sistemi, tatil ve hafta sonları dışında çalışmakta ve 06:30 – 17:00 saatleri arasında kullanılmaktadır.
- Aydınlatma sistemi genel olarak sınıflarda öğretmenlerin, koridorlarda nöbetçi öğretmenlerin kontrolünde kullanılmaktadır.
- Sınıflarda doğal havalandırma, pencerelerin çoğunlukla öğretmenler tarafından kontrolü ile sağlanmaktadır. Davranışsal olarak, iç ve dış sıcaklık farkı arttıkça pencerelerin açılma oranı düşmektedir. Anketler yoluyla pencerelerin açık kaldığı süreler tespit edilmiş, kullanıcı davranışları dış ve iç hava sıcaklığı farkına göre modüle edilmiştir [12].

2.3. Enerji Modelinin Kalibrasyonu (Calibration of the Energy Model)

Enerji modelinin kalibrasyonu için ASHRAE Guideline 14'te önerilen yöntem kullanılmıştır. Yöntemde önerilmekte olan 5 adım, aşağıda sıralandığı gibi çalışmada uygulanmıştır;

- Kalibrasyon aşamasının adımlarının belirlenmesi
- Binayla ilgili veri toplanması
- Sayısal enerji modelinin oluşturulması
- Simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçlarının kıyaslanması
- Enerji modelini kabul edilebilir hata payı ulaşıncaya kadar iyileştirme [13],

Okul binasına ait enerji modelinde bazı parametrelere ait değerler belirsizlik göstermektedir. Bu durum genel olarak kullanıcı davranışı ve eskiyen ekipmanların enerji modelinde tanımlanmasında meydana gelmektedir. Enerji modelinin kalibre edilebilmesi için bu parametrelere ait olası değer aralıkları belirlenmesi, bu değerlere göre oluşan enerji modeli kombinasyonlarının sonuçlarıyla gerçek ölçümler arasındaki hata paylarının minimuma indirilmesi ve kalibre edilmiş değerlere ulaşılması gerekmektedir. Okul binası için oluşturulan enerji modeli, alan çalışması ile elde edilmiş aylık ısıtma enerjisi giderlerine göre kalibre edilmiştir. Isıl performans kalibrasyonunu sağlayan bu adımda, ASHRAE Guideline 14'de önerilen yöntem (Whole Building Calibrated Simulation Approach) kullanılmış, ölçüm ve hesaplamalar arasındaki hata payları MBE (mean bias error) ve CV(RMSE) (coefficient of variation of the root mean square error) denklemlerine göre (Eş. 1 ve 2 aşağıda yer almaktadır) hesaplanmıştır. Bu yöntemde göre bir enerji modelinin aylık verilerle kalibre olabilmesi için ölçümlerle simülasyonlar arasındaki hata paylarının MBE için %5'i, CV(RMSE) için ise %15'i geçmemesi gerekmektedir [13]. Eş. 1 ve 2'de yer alan M_i faturalardan elde edilmiş aylık ölçülen nihai ısıtma enerjisini, S_i simülasyon sonucu

hesaplanan aylık ısıtma tüketim değerini, N_p kullanılan aylık veri adetini, M_p ise mevcut durumda aylık ortalama ısıtma enerji tüketimini simgelemektedir.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} M_i} \quad (1)$$

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} ((M_i - S_i)^2 / N_p)}}{M_p} \quad (2)$$

Okul binasına ait aylık nihai enerji giderleri 2014 yılına aittir. Bu yüzden, enerji modelinin kalibrasyonunda doğru sonuçlar elde edilmesi için Meteoroloji Genel Müdürlüğünden 2014 yılına ait İstanbul hava durumu bilgileri temin edilerek simülasyonlarda kullanılmak üzere simülasyon programı hava durumu veri tabanına işlenmiştir.

2.3.1. Kalibrasyona ilişkin varsayımlar (Assumptions related with calibration)

Okul binasının enerji modelinde yer alan belirsiz değere sahip parametrelerden (varsayımlardan) bir tanesi, sıcak su kazanının verim değeri olarak belirlenmiştir. Binada 2003 yılında imal edilmiş prizmatik üç geçişli gaz yakıtlı sıcak su kazanı bulunmaktadır. Kazan verim değeri aralığı tespitinde, üst değer için firmanın ürün broşüründe yer alan %93,3 kabul edilmiş, alt değer için ise muhtemel eskime payına göre firmadan alınan %85 verimlilik değeri kabul edilmiştir. Aynı zamanda EN 15316 [14] standardı ile kazanın yapım yılına ve tipine göre olası verimlilik değeri hesaplanmıştır. Standartta yer alan hesaplama sonucu elde edilen %89,7 verim değeri ise üçüncü olası değer (ara değer) olarak, kalibrasyon için oluşturulan enerji modeli varyasyonlarına dahil edilmiştir.

Bina kabuğu hava geçirimsizliği, diğer bir belirsiz değere sahip parametreyi oluşturmaktadır. Alan çalışmaları sonucu elde edilmiş detay çizimleri, anket ve gözlemlere göre binanın hava geçirimsizlik performansı zayıftır. Bu yüzden, enerji modeli dosyasında hava geçirimsizlik değeri aralığı, Uluslararası Enerji Ajansı tarafından yayınlanan 'Hava infiltrasyonu ve doğal havalandırma hesaplamaları için sayısal veriler' [15] raporuna göre hazırlanmış, beş seçenek içerisinden en kötü iki seçenek olarak belirlenmiştir [16]. Bu seçeneklere ait akış katsayısı ve akış üssü gibi sızıntı değerleri farklı yapı elemanları için Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.

Binada ısıtma kazanı herhangi bir kontrol paneli ile yönetilmemekte ve radyatörlerde termostatik vana yer almamaktadır. Bu sebeple ısıtma set sıcaklığı da belirsiz değere sahip parametrelere aittir. Anket ve gözlemlere dayanarak, ısıtma set sıcaklık değeri yüksek kabul edilmiştir.

Doğal havalandırma için enerji modelinde sabit bir pencere açılış kapanış zaman çizelgesi düzenlemek, mevsimsel davranış farklarından dolayı doğru sonuçlara ulaşmayı engellemektedir. Bu sebeple, anketlerden elde edilen kullanıcı davranışları temel alınarak, iç sıcaklık ile dış

sıcaklık farkına göre pencerelerin açık kalma süresi modüle edilmiştir. Davranış farklarına sebep olan iç sıcaklık dış sıcaklık farklarının üst ve alt limitleri ise belirsiz değere sahip parametrelerdendir ve kalibrasyon kapsamında kabul edilen parametre aralıkları ve değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Sonuç olarak, kalibre edilmiş enerji modelini elde edebilmek için 5 belirsiz değere sahip parametre tespit edilmiştir. Bu parametrelerin olası değerlerinden dolayı oluşan 486 adet enerji modeli varyasyonu simüle edilmiş, ASHRAE Guideline 14'te verilmiş olan MBE ve CV(RMSE) denklemlerine göre hata oranları hesaplanmıştır.

Tablo 3. Yapı bileşenleri için sızıntı değerleri – Zayıf (Leakage values for components – Poor) [15]

Yapı bileşeni	Tip	Akış katsayısı (kg/s,m crack @ 1 Pa)	Akış üssü
Duvar	Dış	0,00020	0,70
	İç	0,00500	0,75
Döşeme	Dış	0,00100	1,00
	İç	0,00200	0,70
Pencereler	Dış	0,00100	0,60
	İç	0,00180	0,60
Kapılar	Dış	0,00180	0,66
	İç	0,00200	0,60
Menfezler	Dış	0,01000	0,66
	İç	0,00900	0,60
Çatılar	Dış	0,00015	0,70

Tablo 4. Yapı bileşenleri için sızıntı değerleri – Çok zayıf (Leakage values for components – Very poor) [15]

Yapı bileşeni	Tip	Akış katsayısı (kg/s,m crack @ 1 Pa)	Akış üssü
Duvar	Dış	0,00040	0,70
	İç	0,01900	0,75
Döşeme	Dış	0,00200	1,00
	İç	0,00300	0,70
Pencereler	Dış	0,00300	0,60
	İç	0,00300	0,60
Kapılar	Dış	0,00300	0,66
	İç	0,00200	0,60
Menfezler	Dış	0,04000	0,66
	İç	0,02000	0,60
Çatılar	Dış	0,00020	0,70

Tablo 5. Kalibrasyonda Kullanılan Belirsiz Değerlere Sahip Parametreler için kabuller
(Assumption of The Input Parameters with Uncertain Values)

Belirsiz Parametreler	Birim	Değer aralık	Ara miktarı	Kalibre Değer
Kazan verimlilik değeri	%	(85 – 93)*	-	89,7
Hava geçirimsizlik	Akış katsayısı (kg/s m crack @ 1 Pa)	Zayıf – Çok zayıf	-	Çok zayıf
Isıtma set sıcaklık	°C	24 - 26	1	26
Doğal havalandırma için minimum iç sıcaklık	°C	16 - 20	2	18
Pencere açılım modülasyonu için sıcaklık farkı – yüksek değer**	°C	1-5	2	3
Pencere açılım modülasyonu için sıcaklık farkı - düşük değer**	°C			

* Ara değer 89,7%'dir .

** İç ve dış sıcaklık farkına göre pencere açılım modülasyonunu ayarlamak için kullanılan yüksek sıcaklık farkı ve düşük sıcaklık farkı

2.3.2. Kalibrasyon sonuçları (Results of calibration)

Elde edilen sonuçlara göre, Şekil 3'te görüldüğü gibi 486 enerji modeli varyasyonunun 75'i MBE (azami %5) ve CV(RMSE) (azami %15) değerleri açısından kalibre olmuş alanda yer almaktadır.

486 enerji modeli varyasyonu arasında en iyi sonuç, mevcut enerji tüketim değerlerine oldukça yakın çıkmıştır. Kalibrasyon sonucu seçilen enerji modelinin MBE hata payı %0,64 ve CV(RMSE) hata payı %1,43'tür. Çalışmada minimum hata paylarına sahip varyasyonun belirsiz parametre değerleri Tablo 5'te yer almaktadır, çalışma kalibre edilmiş bu varyasyon üzerinden devam ettirilmiştir.

2.4. Enerji Etkin Yenileme Senaryolarının Geliştirilmesi (Determination of Energy Efficient Retrofit Scenarios)

Okul binasına ait bina kabuğunun ısı performansını (hava geçirimsizlik performansı düşük, dış duvarlar yalıtımsız) düşük olması sebebiyle enerji giderleri oldukça yüksektir. Bu nedenle enerji etkin yenileme senaryoları oluştururken öncelikle bina kabuğunun optik ve termo-fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Dış duvar, çatı ve bodrum döşemesi için ısı yalıtım alternatifleri, pencereler için ise farklı cam kombinasyonları geliştirilmiştir.

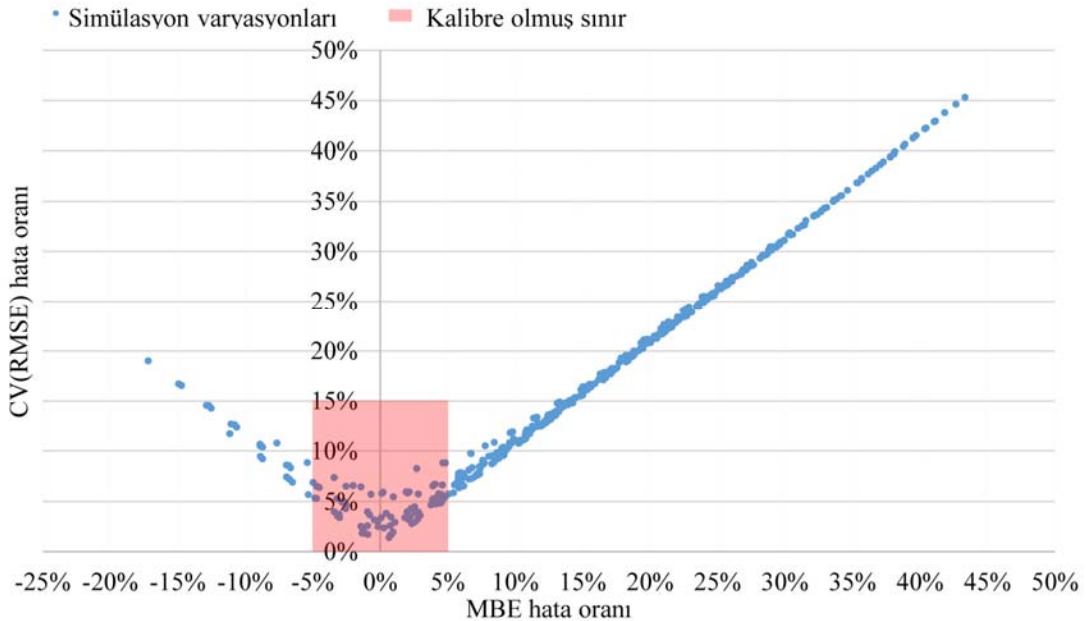
Pasif iklimlendirme stratejilerinin değerlendirilmesini yapan Stefanovic [17] bina kabuğunun ısı performansını arttırmak için yapılan ısı yalıtım uygulamalarının en verimli yöntem olduğunu vurgulamıştır. Bu sebeple binanın bulunduğu iklim, kullanım şekli ve ağırlıklı enerji giderlerine göre uygulanabilecek optimum ısı yalıtım kalınlığı aralığı belirlenmelidir. Çalışmada bina kabuğuna uygulanması söz konusu olan ısı yalıtım kalınlığı ve pencere alternatifleri;

pazar araştırması, TS 825 (Binalarda ısı yalıtım kuralları)'in belirlediği limit değerler ve verimlilik analizlerine göre tespit edilmiştir. TS 825'e göre ikinci iklim bölgesinde yer alan binanın yapı bileşenlerinin olması gereken minimum U-değerleri; dış duvarlar için 0,57 W/m²K, çatısı için 0,38 W/m²K ve zemine oturan döşemesi için 0,57 W/m²K ve pencereler için 1,8 W/m²K'dir. Bu duruma göre dış duvara en az 5 cm, zemine oturan döşemeye en az 6 cm, çatıya ise en az 9 cm'lik 150 kg/m³'lük taş yünü ısı yalıtımı eklenmesi öngörülmüştür [18]. Sektörde yer alan ürünlerden, yüksek yangın (EN 13501-1'e göre A1-A2 yangın dayanım sınıfı) ve nem (EN 12086'ya göre 1-1.3 μ -değeri) dayanımı nedeniyle taş yünü seçilmiştir [19].

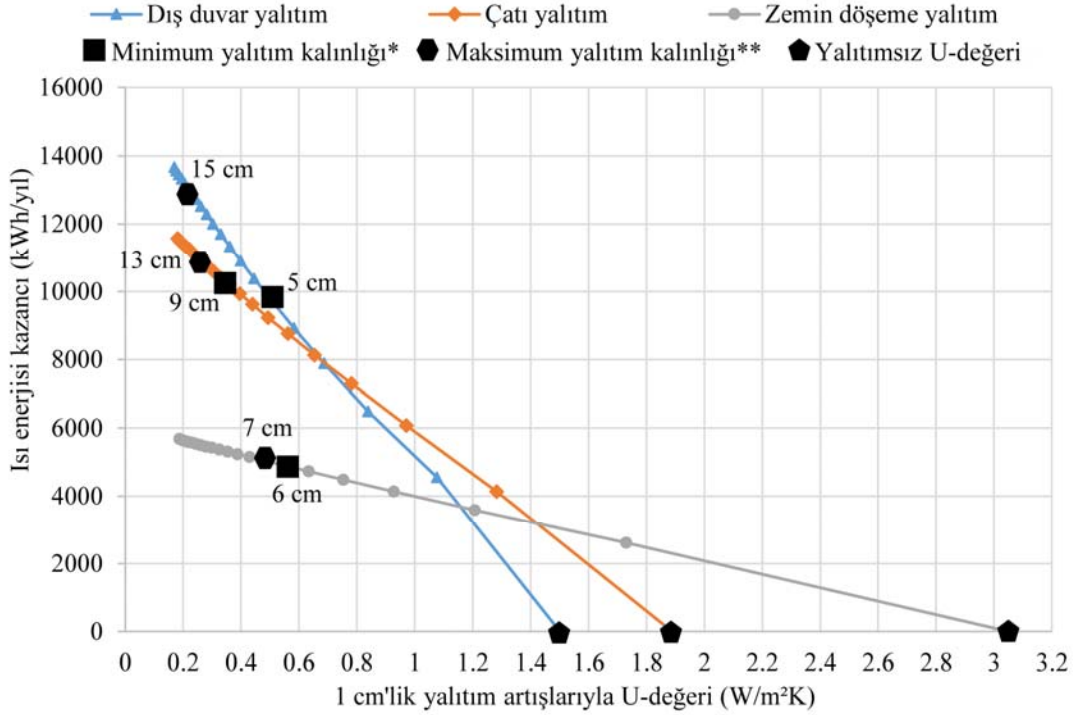
Enerji etkin yenileme senaryoları oluşturmak için dış duvar, zemine oturan döşeme ve çatıya eklenecek optimum ısı yalıtım kalınlığının belirlenebilmesi için bu bina elemanlarına 1 cm'den 20cm'e kadar birer cm değişim ile ısı yalıtımı eklenerek simülasyonlar aracılığıyla ısıtma enerjisindeki düşüş hesaplanarak verimlilik analizi yapılmıştır. Isı yalıtım kalınlığında minimum değer daha önce bahsedildiği gibi TS 825'e göre, maksimum değer ise 1 cm yalıtım artışında ısıtma enerjisindeki düşüş %0,2'in altında kaldığı noktaya göre belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4'te yer almaktadır.

Pencere alternatifleri sektörde yer alan ürünler arasında ısı performansını dengeli dağılacak pencereler seti olarak seçilmiştir. Seçilen 5 pencere alternatifine ait optik ve termo-fiziksel özellikler Tablo 6'da yer almaktadır.

Enerji etkin yenileme senaryolarına aktif sistemlerin enerji ve yaşam maliyeti performansına etkisini analiz edebilmek amaçlı var olan ısıtma kazanının yoğunlaşmış kazan ile değiştirilmesi (verimlilik değeri 0,97 olarak hesaplamalarda



Şekil 3. CV(RMSE) ve MBE Hata Oranlarına göre Kalibrasyon Sonuçları (Calibration Results of the Building Variants for CV(RMSE) and MBE Indices)



* TS 825'e göre minimum değer.

** Hassasiyet analizine göre maksimum değer.

Şekil 4. Isı yalıtımının Çatı, Dış Duvar ve Zemin Döşemesinde 1 cm ile 20 cm Kalınları Arasındaki Verimlilik Eğrisi (Energy Efficiency Curves of Thermal Insulation Applications from 1 to 20 Centimetres for Exterior Walls, Roof and Ground Floor)

Tablo 6. Enerji Etkin Yenileme Senaryoları için Belirlenen Pencere Alternatifleri (Window Alternatives for Retrofit Scenarios)

Alternatif	Tip	Ara katman	Kombinasyon (mm)	Gün Işığı Geçirgenlik (%)	Güneş Enerjisi Geçirgenlik Katsayısı	U-değeri (W/m²K)
W1	Çift cam	Hava	4 + 16 + 4	80	0,86	2,7
W2	Çift cam	Hava	4 + 12 + 4	79	0,64	1,6
W3	Çift cam	Argon	4 + 12 + 4	79	0,64	1,3
W4	Çift cam	Argon	4 + 16 + 4	71	0,51	1,1
W5	Üçlü cam	Argon	4 + 12 + 4 + 12 + 4	71	0,59	0,8

kullanılmıştır [14]) ve var olan T5 floresanların LED tüplü aydınlatmalarla (16 W) değiştirilme alternatifleri eklenmiştir.

2.5. Enerji Etkin Kontrol Stratejilerinin Geliştirilmesi (Determination of Energy Efficient Control Strategies)

Okul binasına ait ısıtma sistemi 06:30 – 19:00 saatleri arasında çalıştırılmaktadır. Isıtma sistemini destekleyici kontrol stratejileri uygulanmamaktadır. Oysa kontrol stratejileri aktif sistemlerin verimliliği ve kullanıcı konforu için oldukça önemlidir. Var olan durumda iç ortam sıcaklıkları ve ısı konfor düzeyini tespit etmek amacı ile, seçilen (kuzey yönünde) bir sınıf hacminin saatlik sıcaklık değerleri, saatlik dinamik simülasyon sonuçları üzerinden EN 15251 standardına göre incelenmiştir. EnergyPlus simülasyon programı ile hesaplanan iç sıcaklık değerlerinin

konfor kategorileri arasındaki dağılımı Şekil 5'te verilmektedir.

Şekil 5'teki saatlik iç ortam operatif sıcaklıklarına bakıldığında, binada meydana gelen yüksek düzeyde ısı kayıplarından kaynaklı olarak, binanın kullanılmadığı dönemler sonrasında ısı kütlesi tekrar istenilen sıcaklığa gelene kadar (timelag) ısı konforsuzluk meydana geldiği, aynı zamanda dış hava sıcaklığının nispeten yüksek olduğu ısıtma dönemlerinde ise yüksek iç ortam sıcaklıkları ve gereksiz enerji tüketimi gerçekleştiği fark edilmektedir. Bu sebeplerle ısıtma sistemine ait birincil kontrol stratejisi olarak, merkezi sıcak su kazanında kullanılmak üzere kontrol paneli ve radyatörlerde kullanılmak üzere termostatik vanaların ısıtma sistemine dahil edilmesi öngörülmüştür. Böylece ısıtma sistemi çalışma saatleri, set sıcaklıklarının ayarlanması ve aynı zamanda tatil sonrası ilk

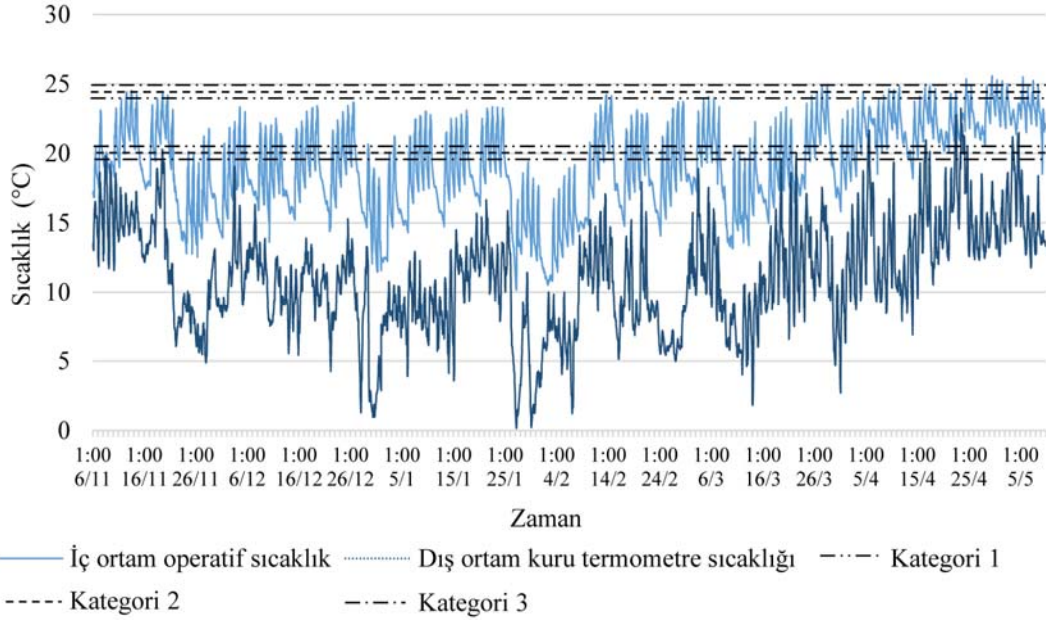
çalışma gününde ısıtma sisteminin daha erken saatte çalıştırılması hedeflenmiştir. Binada pencereler vasıtasıyla doğal havalandırma yapılmaktadır.

Şekil 6'da simülasyon programı ile hesaplanan iç ortam CO₂ konsantrasyonunda, görüldüğü gibi, iç ortam ile dış ortam arasındaki sıcaklık farkı arttıkça pencerelerin açılma süreleri düştüğünden dolayı iç ortam CO₂ konsantrasyonu düzeyi konfor limitlerinin (1200ppm) üzerine çıkmaktadır. Bu yüzden, sınıflarda CO₂ sensörünün (1000 ppm) uyarıcı olarak kullanılacağı doğal havalandırma kontrol stratejisi uygulanması gerekli görülmüştür. Aydınlatma sistemini destekleyici kontrol stratejisi olarak sınıflarda gün ışığı sensörü kullanılması ön görülmüş, böylece aydınlatma enerji tüketiminde verimlilik sağlanması ve sınıf hacimlerinde gerekli aydınlık düzeyinin (300 lux) sağlanarak görsel

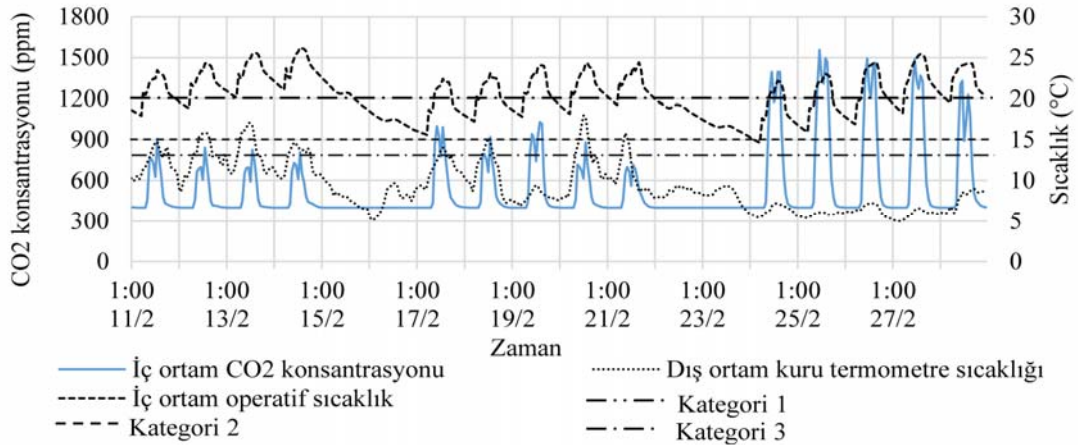
konforun artırılması hedeflenmiştir. Soğutma sisteminin kontrol stratejisiyle desteklenmesi için yönetime ait hacimlerde yer alan soğutma ekipmanlarının (split klima) termostatik kontrol panelleriyle kullanılması ve böylece uygun set sıcaklıklarının ayarlanabilmesi hedeflenmiştir. Böylece toplam 4 kontrol stratejisi binanın aktif sistem performansını arttırmak amaçlı enerji etkin yenileme senaryolarına eklenmiştir.

2.6. Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi (Life-Cycle Cost Analysis)

Yaşam döngüsü maliyeti (LCC) için NIST (Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü) tarafından yayınlanmış yaşam döngüsü maliyet hesap kılavuzunda yer alan hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Eş. 3'te yaşam döngüsü maliyeti formülü ve Eş. 4, 5 ve 6'da yaşam döngüsü



Şekil 5. Kuzeye bakan sınıf odasının için EN 15251 Konfor Kategorilerine göre Isıtma Sezonu Isıl Konfor Analizi (Thermal Comfort Evaluation of North Oriented Classroom in Heating Season according to EN 15251 Comfort Limits)



Şekil 6. Güneye bakan sınıf için EN 15251 Konfor Kategorilerine göre CO₂ Konsantrasyonu Analizi (Thermal Comfort Evaluation of South Oriented Classroom in Heating Season according to EN 15251 Comfort Limits)

maliyeti bileşenlerinin formülleri yer almaktadır. LCC yöntemi ile enerji etkin yenilemeye konu olan bina elemanlarının, ekipmanların ve malzemelerin ilk yatırım maliyetleriyle (C_I) yapı ömrü içindeki tekrarlanan bakım, işletme ve değişim maliyetlerinin (C_a) güncel değer faktörüyle (f_{pv}) çarpılarak güncel değerlerine çevrilip, yapı ömrü içinde oluşan enerji maliyetlerinin (C_{ao}) enerji fiyatlarındaki artışı hesaba katan güncel değer faktörüyle (f_{pvm}) çarpılmasıyla elde edilen güncel değer ile toplayarak, yapının yaşam ömrü (T) sonunda elde edilen hurda gelirinin güncel değerine çevrilerek (V_{T-f}) bu toplamdan çıkarılması ile yaşam döngüsü maliyeti hesaplanmış olmaktadır. Güncel değer faktörleri hesaplayabilmek için Tablo 7’de yer alan enflasyon (R_i), piyasa faiz (R) ve reel faiz (R_R) oranları ile enerji fiyat artışlarındaki oranı tespit etmek (R_c) gerekmektedir.

$$LCC(T) = C_I + \sum_{i=1}^T (C_{a(i)} \times f_{pv}(i)) + \sum_{i=1}^T (C_{ao(i)} \times f_{pvm}(i)) - \sum_{j=1}^T V_{T-f}(j) \quad (3)$$

$$f_{pv}(n) = \frac{1 - (1 + R_R)^{-n}}{R_R} \quad (4)$$

$$f_{pvm}(n) = \left(\frac{1 + R_c}{R_R - R_c} \right) \times \left[1 - \left(\frac{1 + R_c}{1 + R_R} \right)^n \right] \quad (5)$$

$$R_R = \frac{R - R_i}{1 + R_i} \quad (6)$$

Avrupa Birliği Komisyonu tarafından yayınlanmış “Binalarda Enerji Performans Direktifleri” binaların enerji etkin yenilemelerinde maliyet etkinlik hesaplamaları için EN 15459 standardında yer alan Global Maliyet yöntemini önermektedir. Bu yöntemde enerji fiyatlarındaki artış enflasyon artışıyla sabit alınmaktadır. Fakat enerji fiyatlarındaki artış enflasyon artışından farklı ise bu yöntem yaşam döngüsü maliyeti ve geri ödeme süreleri hesaplamalarında ciddi sapmalara neden olmaktadır. Lohse ve diğerleri [20] enerji etkin yenileme senaryolarının yaşam döngüsü maliyetlerini farklı enerji fiyatlarındaki artış oranı (0, 2, 4) ile hesapladıklarında, 2 ve 4 enerji fiyatlarındaki artış oranında enerji etkin yenileme senaryoları ekonomik çıkmakta fakat 0 enerji fiyatlarındaki artış oranında

ekonomik çıkmamaktadır. Bu sebepten Global Maliyet yöntemi yerine NIST tarafından yayınlanmış yaşam döngüsü hesaplama yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 7’de yer alan ekonomik parametreler için çalışmada kullanılan oranlar için son 5 yıllık ortalamaları alınmıştır.

2.7. Optimizasyon (Optimization)

Bina Performans Optimizasyonu (BPO), belirlenmiş kriterler ve sınırlamalarla kullanılan matematiksel algoritmalar üzerinden olasılıklar içinden optimum sonuçlara ulaşmak amaçlı kullanılan performans etkin bir sürece sahip yöntemdir. Son yıllarda bina performans optimizasyon yöntemleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Attia ve diğerleri [25] BPO yazılımlarını simülasyon tabanlı (GenOpt and modeFrontier vb.) ve bağımsız (BeOpt and Opt-E-Plus, vb.) programlar olarak iki grupta sınıflandırmıştır. Çalışmada EnergyPlus simülasyona programı ile entegre edilebilen GenOpt bağımsız optimizasyon programı içeriğinde yer alan ileri matematiksel algoritmaların çalışmanın amaçlarıyla örtüşmesi sebebiyle kullanılmak üzere seçilmiştir. GenOpt Lawrence Berkeley Ulusal laboratuvarlarında geliştirilmiş jenerik bir optimizasyon programıdır. Program entegre olarak çalıştığı simülasyon programlarına (SPARK, EnergyPlus, DOE-2, TRNSYS vb.) tanımlanmış maliyet fonksiyonu aracılığı ile kullanıcı tarafından belirlenen parametrelerin değerlerini minimize eder [26].

Çalışmada optimizasyona konu olan bağımsız değişkenlerden ısı yalıtım kalınlıkları, kazan ve aydınlatma tipleri ayrı değerlerdir. Tablo 8’de yer alan GenOpt algoritmalarından sadece Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ayrı değerlerin optimizasyonu için kullanılmaktadır. Bu sebeple optimizasyon sürecinde minimum sayıda simülasyon ile minimum maliyet fonksiyonu değerlerine ulaşmak için PSO kullanılmıştır.

PSO, Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından balık ve kuş sürülerinin hareketlerinden esinlenerek geliştirilen popülasyona dayalı olasılıksal optimizasyon tekniğidir [28]. Kullanıcı tarafından tanımlanmış ve sınırlandırılmış noktalardan oluşan sete ait maliyet fonksiyon değeri her ilerleme adımında parçacıkların pozisyonunu minimuma

Tablo 7. Yaşam Döngüsü Maliyetinde Kullanılan Parametrelere ait Oran ve Değerler
(Rates and Values of Economic Parameters for LCC analyses)

Parameter	Birim	Değer
Enflasyon oranı, R_i [21]	%	7,4
Piyasa faiz oranı, R [22]	%	9,85
Doğal gaz fiyatındaki yıllık artış oranı [23]	%	9,52
Elektrik fiyatındaki yıllık artış oranı [24]	%	9
Doğal gaz birim fiyatı*	€/kWh**	0,026
Elektrik birim fiyatı*	€/kWh**	0,096
Hesaplama periyodu	Years	30

*Birim enerji fiyatları vergileri içermektedir.

** Euro (€) = 4,3 Türk Lirası (TL) olarak hesaplamalara katılmıştır (Uluslararası çalışmalara referans olabilmek ve kıyaslama yapılabilmesi için para birimi olarak € kullanılmıştır).

doğru yönlendirmesi ile optimum sonuçlar elde edilmektedir. Parçacıkların yeni pozisyonu o parçacığa ait en iyi konum ve tüm parçacıklar arasındaki en iyi konuma göre oluşturulan yeni ivmeye göre belirlenir ve böylece minimuma ulaşılır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Optimizasyon süreci; olası 4400 enerji etkin yenileme senaryosundan, 1440 iterasyon ile 591'inin simule edilmesi ile sonuçlanmıştır. Optimize edilmiş senaryolara ait yaşam döngüsü maliyeti ve birincil enerji tüketim değerleri Şekil 7'de verilmiştir.

Mevcut durumda okul binasının birincil enerji tüketiminin $147,17 \text{ kWh/m}^2$ yılı olduğu göz önüne alındığında enerji etkin yenileme senaryolarında minimum %43,47, maksimum %58,80 düşüş başarılmıştır. Maliyet optimum enerji etkin yenileme senaryosu $66,43 \text{ kWh/m}^2$ yılı birincil enerji tüketimi

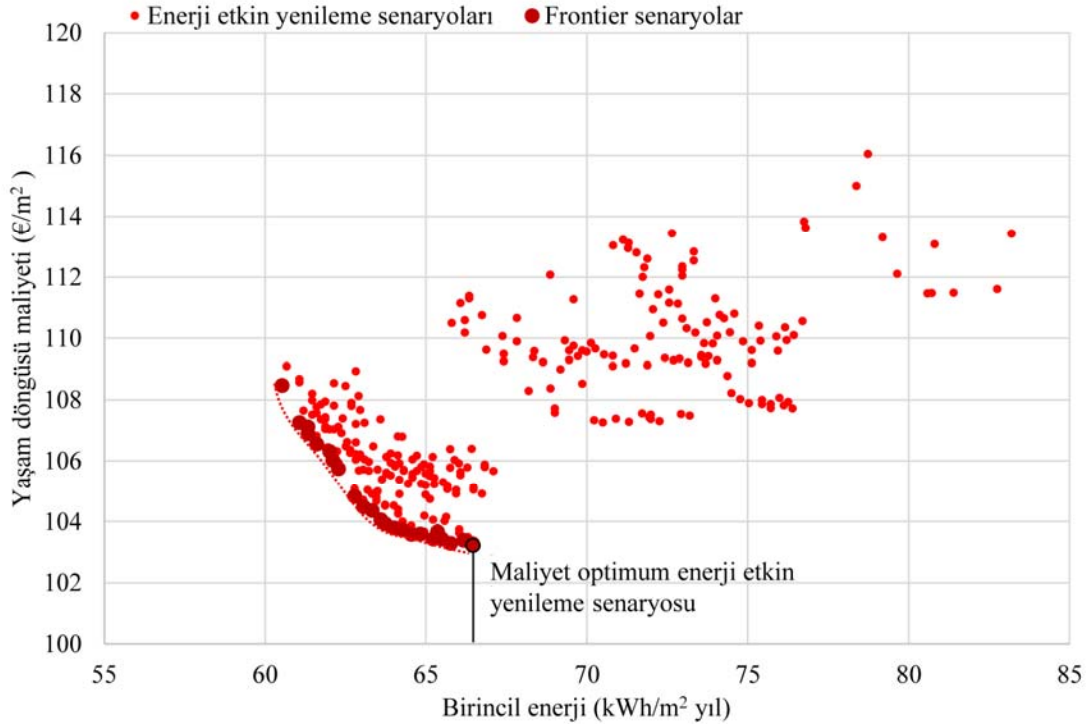
ile mevcut duruma göre %54,86 düşüş göstermiştir. TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kurallarında belirtilmiş minimum U-değerlerini taşıyan enerji etkin yenileme senaryosu $82,75 \text{ kWh/m}^2$ yılı birincil enerji tüketimi göstererek, mevcut duruma göre %43,78 az, maliyet optimum senaryoya göre ise %19,72 fazla enerji tüketim performansı göstermiştir.

Okul binasının enerji ve enerji etkin yenileme senaryoları için yaşam döngüsü maliyeti 30 yıllık periyot için $135,75 \text{ €/m}^2$ hesaplanmıştır. Enerji etkin yenileme senaryolarına ait yaşam döngüsü maliyeti mevcut duruma göre %14,51 ile %23,93 (maliyet optimum senaryo) arası azalmıştır. TS 825'in minimum değerlerini sağlayan senaryo mevcut duruma göre %17,79 daha düşük, maliyet optimum senaryoya göre %7,47 daha yüksek yaşam döngüsü maliyetine sahiptir.

Tablo 9'da sınırdaki yer alan enerji etkin yenileme senaryolarının yaşam döngüsü maliyeti ve birincil enerji performansları ve senaryolara ait komplikasyonlar

Tablo 8. GenOpt'ta Yer Alan Çok Boyutlu Optimizasyon Algoritmaları [27]
(The Algorithms for Multidimensional Optimization in GenOpt)

Algoritmalar	Bağımsız Parametre Türleri
Genelleştirilmiş model arama methodu	Devamlı
Ayrık Armijo eğim methodu	Devamlı
Parçacık sürü optimizasyonu	Devamlı ve/veya Ayrık
Parçacık sürü optimizasyonu ile Genelleştirilmiş model arama hibrit methodu	Devamlı veya Devamlı ve Ayrık
Nelder ve Mead'in basit algoritması	Devamlı



Şekil 7. Enerji Etkin Yenileme Senaryolarının Birincil Enerji ve Yaşam Döngüsü Performanslarına Göre Maliyet Optimizasyonu Analizi (Cost Optimality Analysis of Retrofit Scenarios from Primary Energy Use and LCC Point of Views)

Tablo 9. Etkin sınır yenileme senaryoları (Efficient-frontier retrofit scenarios)

No	Birincil Enerji (kWh/m ² yıl)	Yaşam Döngüsü Maliyeti (€/m ²)	Kazan Tipi	Aydınlatma Tipi	Dış Duvar Yalıtım Kalınlığı (cm)	Çatı Yalıtım Kalınlığı (cm)	Zemin Döşemesi Yalıtım Kalınlığı (cm)	Pencere Tipi
1	60,52	108,47			15	13	7	W5
2	61,06	107,25			12	13	7	W5
3	61,33	107,11			12	13	6	W5
4	61,33	106,89			11	13	7	W5
5	61,60	106,55			10	13	7	W5
6	62,01	106,31			12	13	6	W3
7	62,10	106,02			14	13	7	W1
8	62,28	105,73			10	13	7	W3
9	62,78	104,83			11	13	7	W1
10	63,05	104,48			10	13	7	W1
11	63,32	104,36			10	13	6	W1
12	63,59	104,06			9	13	6	W1
13	63,73	103,92			8	13	7	W1
14	64,00	103,78			8	13	6	W1
15	64,27	103,72			7	13	7	W1
16	64,54	103,58			7	13	6	W1
17	64,81	103,58			6	13	7	W1
18	65,35	103,66			6	10	7	W1
19	65,22	103,43			7	9	6	W1
20	65,49	103,42			6	9	7	W1
21	65,76	103,29			6	9	6	W1
22	66,16	103,39			5	9	7	W1
23								
*	66,43	103,26			5	9	6	W1

*Maliyet optimum senaryo

verilmiştir. 1 numaralı senaryo en yüksek enerji performansını gösterirken, numara ilerledikçe enerji performansı düşüp yaşam döngüsü maliyet performansı artmaktadır. Sınırdaki yer alan senaryolarda farklı ısı yalıtım kalınları bulunmasına rağmen hepsinde yoğunmalı kazan ve LED tüplü aydınlatma yer almaktadır. Bu da, aktif sistemleri yenilemenin enerji performansı ve yaşam döngüsü maliyeti açısından önemini göstermektedir.

Tablo 9'da görüldüğü gibi maliyet optimum senaryoda yer alan ısı yalıtımları TS 825 tarafından verilen minimum kalınlıktadır, ayrıca yoğunmalı kazan ile LED tüplü aydınlatma bulunmaktadır. Aktif sistemlerin enerji etkin olarak yenilenmesi birincil enerji tüketimini %20, yaşam döngüsü maliyetini ise %7 iyileştirmiştir.

Sınırdaki yer alan senaryolardan yaşam döngüsü maliyeti düşük olanlarda W1 (Mevcut çift cam) tipi pencere ve daha düşük kalınlıkta yalıtım, birincil enerji tüketimi düşük olanlarda ise W5 (üçlü cam) tipi pencere ve daha yüksek kalınlıkta yalıtım kullanımı gözlenmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışmada okul bina tipolojisine ait binalar pilot bölge olarak seçilen Şişli ve Beşiktaş'ta incelenmiş, enerji envanteri belirlenmiş ve sonrasında bina stokunu temsil eden bir

örneklem binanın kalibre edilmiş enerji modeli üzerinden enerji etkin yenileme senaryoları geliştirilmiş ve bu senaryolar yaşam döngüsü maliyeti ve birincil enerji tüketimlerine göre optimize edilmiştir.

Enerji modellemesinde elde edilen sonuçlar göstermektedir ki (Şekil 5'te görüldüğü gibi) kalibre edilmemiş enerji modellerinde yaklaşık %45'e varan hata payları oluşabilmektedir. Bu sebeple, enerji modelinin mevcut duruma ait ölçümlere göre kalibre edilmesi enerji etkin iyileştirme çalışmalarında yapılan hesaplamaların doğruluğu açısından oldukça önemlidir.

Enerji etkin senaryo oluşturulma aşamasında farklı opak bina elemanlarına uygulanacak farklı ısı yalıtım kalınlıkları ve farklı pencere alternatifleri sebebiyle çok sayıda enerji etkin yenileme senaryo seçeneği oluşturabilmektedir. Bu sayıyı en uygun değere getirebilmek için parametrelere ait değer aralıklarının hassasiyet analizleri ve var olan standartlara göre sınırlandırılması önem taşımaktadır. Böylece elde edilen kabul edilebilir sayıdaki senaryoları maliyet ve enerji etkinliği açısından optimize etmek ve sınır (frontier) senaryolara ulaşmak mümkün olmaktadır.

Enerji etkin yenileme çalışmalarında EPBD'de vurgulandığı gibi enerji performansı ile birlikte yaşam döngüsü maliyeti de göz önünde bulundurulmalıdır. Yaşam döngüsü maliyeti

hesaplamalarından yerel ekonomik değişkenlere göre, o değişkenlerin ihmal edilmediği doğru hesaplama yönteminin seçimi (EN 15251 standardında yer alan “Global Cost” yaşam döngüsü maliyet yöntemine göre enerji fiyatlarındaki artış ihmal edilmektedir) gerçekçi sonuçlara ulaşılması açısından önemlidir.

Çalışmada var olan binalara yapılacak enerji etkin yenilemelerde ve yeni yapılacak binalara kullanılacak maliyet ve enerji performansı açısından optimize edilmiş alternatiflere (Tablo 9’da verilmektedir) ulaşılmıştır. Bu sonuçlar göstermektedir ki özellikle yoğunlaşmış kazan ve LED tüplü aydınlatma kullanımının maliyet ve enerji etkinlik açısından büyük etkisi bulunmaktadır.

Sınır Frontier senaryolar göstermektedir ki, ısı yalıtım kalınlığı ve U-değeri yüksek pencere alternatiflerine gidildikçe enerji performansı artarken maliyet performansı azalmaktadır. Tam tersi durum için ise maliyet performansı artarken enerji performansı azalmaktadır. Kullanıcının maliyet ve enerji açısından hedeflerine göre senaryo seçimi mümkündür.

Optimizasyon sonucunda elde edilen senaryolarda mevcut duruma göre yaşam döngüsü maliyeti açısından %14,51 ile %23,93 arası azalım, birincil enerji tüketimi açısından %43,47 ile %58,80 arası azalım başarılmıştır. Bu durum bina kabuğunun optik ve termo-fiziksel olarak doğru tasarlanmasının ve aktif sistem verimliliğinin yapıların enerji ve yaşam döngüsü maliyeti performansları açısından önemini göstermektedir. Pilot alanda yer alan eğitim binalarından, optimizasyon sonucu elde edilen maliyet optimum senaryonun enerji tüketim seviyesinin (varsayılan eşik değer) üstünde yer alan binaların enerji yenileme ile eşik değere (66,43 kWh/m² yıl) getirilmesi durumunda, tüm bina stoğunun birincil enerji tüketimi yaklaşık %37,3 oranında iyileştirilmektedir. Bu durum ise EPBD hedeflerinin ötesindedir.

Çalışmada EPBD tarafından sunulan hedefler doğrultusunda belirli bir iklim bölgesindeki ilköğretim bina stokunun enerji ve maliyet etkin olarak yenilenmesi için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımın ve elde edilen sonuçların mevcut binaların enerji ve maliyet etkin yenilenmesi, yeni binaların maliyet ve enerji etkin yapılmasında kullanılabileceği ön görülmektedir. Ayrıca önerilen yaklaşımın ilerleyen çalışmalarda farklı iklim ve bina tipolojileri içinde geliştirilmesi olanaklıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. European Commission, Energy Statistical Pocketbook. <https://ec.europa.eu/energy>. Erişim tarihi Kasım 10, 2016.
2. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings, 2002.
3. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (recast), 2010.
4. Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, 5 Aralık 2009 (revizyon: 1 Nisan 2010).
5. Santamouris M., Mihalakakou G., Patargias P., Gaitani N., Sfakianaki K., Papaglastra M., Pavlou C., Doukas P., Primikiri E., Geros V., Assimakopoulos M.N., Mitoula R., Zerefos S., Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings, *Energy and Buildings (Energy Build.)*, 39 (1), 45-51, 2007.
6. Dall’O G., Sarto L., Potential and limits to improve energy efficiency in space heating in existing school buildings in northern Italy, *Energy and Buildings (Energy Build.)*, 67, 298-308, 2013.
7. Ertürk M., A new approach to calculate the energy saving per unit area and emission per person in exterior wall of building using different insulation materials and air gap, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 395-406, 2016.
8. Harputlugil U. G., Harputlugil T., Çevresel konfor ve enerji tasarrufu bağlamında konut kullanıcıları davranış profilleri üzerine bir araştırma *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 695-708, 2016.
9. Ascione F., Bianco N., De Stasio C., Mauro G.M., Vanoli G.P., A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance, *Energy and Buildings (Energy Build.)*, 88, 78-90, 2015.
10. Wang B., Xia X., Zhang J., A multi-objective optimization model for the life cycle cost analysis and retrofitting planning of buildings, *Energy and Buildings (Energy Build.)*, 77, 227-235, 2014.
11. Mangan S.D., Oral G.K., Assessment of residential building performances for the different climate zones of Turkey in terms of life cycle energy and cost efficiency, *Energy and Buildings (Energy Build.)*, 110, 362-376, 2016.
12. Yılmaz Y., Oral G.K., Örnek bir ilköğretim binası için enerji etkin yenileme analizleri, *Tesisat Mühendisleri Dergisi*, 157, 14-24, 2017.
13. ASHRAE, ASHRAE GUIDELINE 14-2002, Measurement of Energy and Demand Savings, 8400, 2002.
14. BS EN 15316-4-1-2008, Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies, 2002.
15. Orme M., Liddamen M.W. t, Wilson A., Numerical Data for Air Infiltration & Natural Ventilation Calculations, International Energy Agency, Air Infiltration and Ventilation Centre, 1995
16. DesignBuilder Software Ltd. DesignBuilder Help - Natural ventilation option. http://www.designbuilder.co.uk/helpv2/Content/Calculated_Natural_Ventilation_Options.htm. Erişim tarihi Şubat 29, 2016.
17. Stevanović, S., Optimization of passive solar design strategies: A review, *Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews (Renewable Sustainable Energy Rev.), 25, 177-196, 2013.
18. TS 825, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Aralık 2013.
 19. Schiavoni S., D'Alessandro F., Bianchi F., Asdrubali F., Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews (Renewable Sustainable Energy Rev.), 62, 988–1011, 2016.
 20. Lohse R., Staller H., Riel, M., The Economic Challenges of Deep Energy Renovation—Differences, Similarities, and Possible Solutions in Central Europe: Austria and Germany, ASHRAE Transactions, 122 (1), Atlanta, 69-87, 2016.
 21. Türkiye İstatistik Kurumu. Yurt İçi Üretici Fiyat Endeksi. <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=21728>. Erişim tarihi Haziran 5, 2016.
 22. Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası. Parasal ve finansal istatistikler. <http://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/6121b7aa79464353b0f29cbab7e289b2/Turk+Lirasi.html?MOD=AJPERES>. Erişim tarihi Haziran 5, 2016.
 23. Türkiye İstatistik Kurumu. Yurt içi üretici fiyat endeksi ve değişim oranı. www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=1645. Erişim tarihi Haziran 5, 2016.
 24. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. Tarife Uygulamaları. <http://www.epdk.org.tr/TR/Tuketici/Elektrik/TarifeUygulamalari>. Erişim tarihi Haziran 5, 2016.
 25. Attia S., Hamdy M., O'Brien W., Carlucci S., Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design, Energy and Buildings (Energy Build.), 60, 110–124, 2013.
 26. Wetter M., Design Optimization with GenOpt, Building Energy Simulation User News, 21, 19-28 2000.
 27. Wetter M., GenOpt, Generic Optimization Program – User Manual, Version 3.1.0. Simulation Research Group Building Technologies Department Environmental Energy Technologies Division Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, CA, USA, 2011.
 28. Kennedy J., Eberhart R., Particle swarm optimization, Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks 4, 1942-1948, 1995.

