



Özgür Bayata

TÜBİTAK, ozgur.bayata@tubitak.gov.tr, Ankara-Turkey

İzzettin Temiz

Mersin University, itemiz@mersin.edu.tr, Mersin-Turkey

<http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2017.12.1.1A0369>

BİNA TASARIM SÜRECİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ OPTİMİZASYONU İÇİN BİR MODEL VE YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ: ANKARA'DA BİR UYGULAMA

ÖZ

Binalar dünyada ve Ülkemizde tüketilen enerjinin yaklaşık %40'ından sorumludur. Enerjisinin büyük kısmını ithal eden bir ülke olarak binaların enerji tüketimi ve çevresel etkilerinin azaltılmasının çok önemli iki hedef olduğu açıktır. Bunlara ek olarak serbest piyasada büyük önem arz eden ilk yatırım maliyetinin göz önüne alınmasıyla, üç amaçlı ve standart bir binada kullanılan sistemleri kapsayan çok amaçlı bir bina optimizasyon problemi ortaya çıkmıştır. Çözümü oldukça zor olan söz konusu problem için, inşaat sürecinin başında, karar verici için yol gösterici olacak bir model ve iki yazılım geliştirilmiştir. Bina Enerji Tüketimi Hesaplama Programı (BETH) kullanıcı tarafından tanımlanan parametre ve değişkenlere göre binanın yıllık enerji tüketimi, ilk yatırım maliyeti ve yıllık CO₂ emisyonu değerini hesaplamaktadır. Bina Enerji Optimizasyon Programı (BEOP) ise çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan genetik algoritma temelli bir yazılımdır. Geliştirilen model ve yazılımlar örnek bir bina için uygulanmıştır. Sonuçlar model ve yazılımların kapsamlı ve değişik bina optimizasyon problemi için uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Verimliliği, Bina Enerji Optimizasyon Problemi, Çok Amaçlı Optimizasyon, Genetik Algoritma, Ankara

DEVELOPING A MODEL AND SOFTWARE FOR ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION IN BUILDING DESIGN PROCESS: CASE STUDY IN ANKARA

ABSTRACT

Buildings are responsible for about 40% of the primary energy consumption in the World and in our country. As an energy importing country energy efficiency and environmental impact of buildings are two very important criteria for our country. By considering the initial investment cost with its importance for investors, a problem with three objective functions has emerged. The aim of this work is to develop a methodology and software to solve multi-objective building optimization problems. Thus two different software tools have been developed. First one Building Energy Consumption Calculation Program (BECCP) is used to calculate buildings annual energy consumption, initial cost and annual CO₂ emissions. Second one Building Energy Optimization Program (BEOP) is a multi-objective optimization program which uses genetic algorithm for minimization of objectives. In this study multi-objective optimization of a sample building has been conducted. The results demonstrate that developed model and software tools are generic and time efficient.

Keywords: Energy Efficiency, Building Energy Optimization Problem, Multi-objective Optimization, Genetic Algorithm, Ankara

How to Cite:

Bayata, Ö. and Temiz, İ., (2017). Bina Tasarım Sürecinde Enerji Verimliliği Optimizasyonu İçin Bir Model ve Yazılım Geliştirilmesi: Ankara'da Bir Uygulama, **Engineering Sciences (NWSAENS)**, 12(1):1-28, DOI: 10.12739/NWSA.2017.12.1.1A0369.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji kaynaklarının verimli kullanılmaması ve sonucunda oluşan iklim değişikliği çağımızda insanlığın karşı karşıya olduğu en büyük problemlerin başında gelmektedir. Avrupa'da ve dünyada yapılan çalışmalar binaların toplam enerji tüketiminin %40'undan sorumlu olduğunu göstermiştir [1]. Enerji kaynaklarının büyük bir kısmını ithal eden ülkemiz için enerji tüketiminin azaltılması büyük bir önem arz etmektedir. Bu kapsamda TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardında değişiklikler yapılmış, hem çevreye verilen etkiyi azaltmak hem de enerji verimliliğinin sağlanması için "Binalarda Enerji Performans Yönetmeliği" AB'nin 2002/91/EC sayılı "Binaların Enerji Performansı Direktifi" baz alınarak hazırlanmıştır. Söz konusu gelişmeler sayesinde konu ile ilgili akademik çalışmalar artmıştır. Bina performans ile ilgili çeşitli iyileştirmeleri amaçlayan problemler literatürde genel olarak Bina optimizasyon problemi (BOP) olarak adlandırılmaktadır. BOP ile ilgili yapılan çalışmalar genel olarak optimize edilmesi planlanan kriterler ve göz önüne alınan sistemlere göre farklılık göstermektedir. Bu farklar problemin amaç fonksiyonlarını, karar değişkenlerini ve mühendislik hesaplarını etkilemektedir.

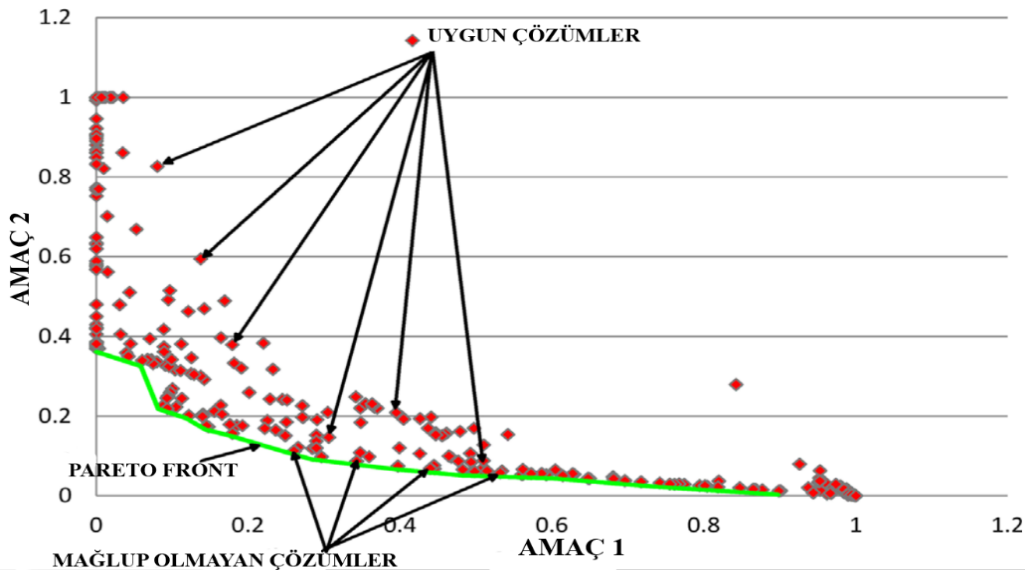
Kolokotsa ve ark. yaptıkları çalışmada binalarda enerji verimliliği için karar metodolojilerini incelemişler ve bu çalışma sonucunda: a) enerji ilişkili: temel enerji tüketimi, ısıtma soğutma yükü, elektrik tüketimi, b) maliyet ilişkili: ilk yatırım maliyeti, direkt maliyet, net bugünkü değer, yaşam çevrimi maliyeti, c) çevre ilişkili: yıllık salımlar, küresel ısınma, ömür boyu çevresel potansiyeli, d) konfor ilişkili: iç ortam sıcaklığı ve nemi, CO₂ oranı, havalandırma oranı, gün ışığı ve gürültü seviyeleri, e) diğer: inşaat süresi ve güvenliği gibi 6 farklı kategoride değerlendirme yapılabileceğini belirtmişlerdir [5]. Diakaki ve ark. enerji tüketimi ve ilk yatırım maliyetini dikkate alarak çok amaçlı optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde karar değişkenleri olarak pencere tipi, yalıtım malzemesi ve duvar kalınlığı kullanılmıştır [1]. Daha sonra yaptıkları çalışmada önceki çalışmalarını geliştirerek binanın enerji sistemleri ve ısı katmanlarını da modele eklemişlerdir. Ayrıca amaç fonksiyonunda enerji tüketimini, ilk yatırım maliyetini ve CO₂ emisyonunu kullanmışlardır [6]. Juan ve ark. yaptıkları çalışmada genetik algoritma tabanlı bir karar destek sistemi geliştirmiş ve ev tadilatında maliyet ve kalite dengesini araştırmışlardır [7].

Chantrelle ve ark. binaların tadilatı için genetik algoritma kullanan enerji tüketimi, ısıl konfor, maliyet ve çevresel etkiyi içeren ara yüzü olan bir yazılım geliştirmişlerdir [3]. Hamdy ve ark. yaptıkları çalışmada simülasyon bazlı üç aşamalı bir çok amaçlı optimizasyon modeli geliştirmiş, bir evin ve iklimlendirme sisteminin çevresel etkilerinin ve maliyetinin minimize edilmesi için çalışmışlardır [8]. Fesanghary ve ark. yaşam çevrimi maliyeti ve CO₂ emisyonunu amaç fonksiyonunda kullanmış ve harmony search algoritması ile çözüme ulaşmışlardır [9]. Asadi ve ark. yaptıkları çalışmada amaç fonksiyonu olarak enerji tasarrufunun maksimizasyonu ve tadilat maliyetinin minimizasyonunu kullanmışlardır [10]. Evins bina tasarımında kullanılan hesaplamalı optimizasyon metodlarını incelemiş ve çalışması sonucunda optimizasyon metodlarının özellikle çok amaçlı optimizasyon metodlarının kullanımının oldukça arttığını, en çok kullanılan optimizasyon metodunun genetik algoritmalar olduğunu, enerji tüketimi ve ilk yatırım maliyetinin amaç fonksiyonunda en fazla yer aldığını göstermiştir [11]. Malatji ve ark. enerji tasarrufunun maksimizasyonu ve geri ödeme süresinin minimizasyonunu genetik algoritma ile araştırmış ve sonrasında bir duyarlılık analizi yapmışlardır [12]. Nyugen ve ark. yaptıkları çalışmada bina performans

analizi ile ilgili yapılan çalışmalarını detaylı bir şekilde incelemiş ve bina tasarımında kullanılan simülasyon temelli optimizasyon çalışmalarında yaşanan en büyük güçlüklerin problemlerin karmaşıklığı, hesaplama zorlukları, parametre belirsizlikleri olduğunu belirtmişlerdir [2]. Karmellos ve ark. yaptıkları çalışmada mevcut ve yeni binalarda enerji verimliliğinin artırılması için çok amaçlı karışık tam sayılı doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak enerji tüketiminin ve ilk yatırım maliyetinin minimizasyonunu kullanmışlardır. Daha sonra problemin çözümü için bir yazılım geliştirmiş ve bunu 2 farklı uygulamada kullanmışlardır. Gelecek çalışmalarda amaç fonksiyonunda CO₂ emisyonunun ve yaşam çevrimi maliyetinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir [13].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bina optimizasyonu problemleri içinde en yaygın olanların başında enerji optimizasyonu problemi yer almaktadır. Ülkemizde ve dünyada BOP ile yapılan çalışmaların çoğunda parametrik yöntem kullanılmakta olup, bu yöntem değişkenlerden birinin değerinin değiştirilerek amaç fonksiyonu üzerinde oluşan etkinin değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu yöntem hem değişkenleri tek tek değiştirerek, amaç fonksiyonu üzerindeki etkileri değerlendirildiği için zaman alıcı, hem de gerçek hayat problemlerinin karmaşık yapısı nedeniyle yetersizdir. Yapılan çalışmalar BOP'ta ortalama 15.1 karar değişkeni kullanıldığını ve %60'ında amaç fonksiyonlarını tek amaçlı olduğunu göstermiştir [2]. Ancak gerçek hayat problemlerinde karar vericiler bir biriyle çelişen pek çok amacı bir arada değerlendirmek zorundalardır. Maliyet sınırı olmadan, enerji tüketimi oldukça düşük seviyelere getirilebilir. Fakat piyasa koşullarında yatırımcı için bunun uygun bir seçenek olmayacağı açıktır. Çok amaçlı optimizasyonun devreye girmesi ile birlikte BOP'un karmaşıklığı çok fazla artmakta ve klasik yöntemler yetersiz kalmaktadır. Çözüm için en çok kullanılan iki yöntem "Ağırlıklandırma" ve "Pareto Optimizasyonu"dur. Bu çalışmada uygulaması kolay olan "Ağırlıklandırma" metodu yerine karar verici için daha detaylı bilgi sunan ve karar esnekliği sağlayan "Pareto Optimizasyonu" kullanılmıştır.



Şekil 1. Pareto frontun ve uygun çözümlerin gösterimi [4]

(Figure 1. Pareto front and feasible solutions [4])

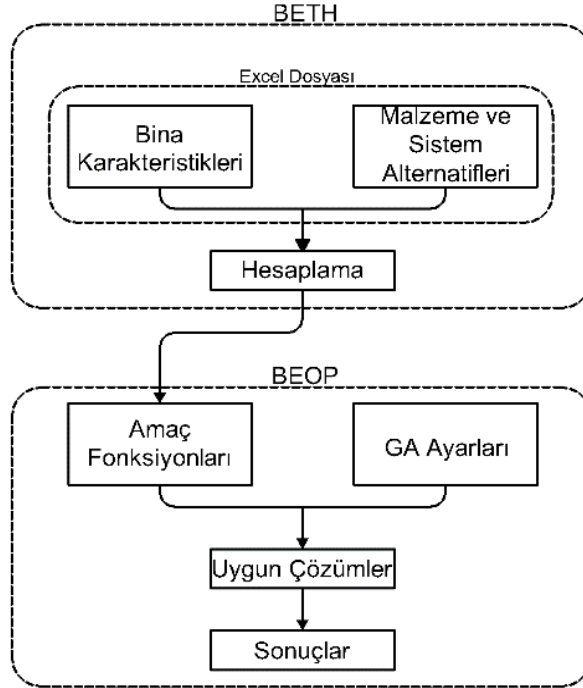
Ağırlıklandırma metodunda amaçlar belirlenen ağırlıklar ile çarpılarak problem tek amaçlı hale getirilirken, Pareto optimizasyon metodunda tüm amaçlar eşit ağırlıktadır ve her bir amaç kendi başına hesaplanır. Bu yöntem hesaplama zorluğu yaratsa da yeterli performansı veren algoritmalar ile uygun çözümlerden oluşan pareto set belirlenir. Bir çözüm amaç fonksiyonlarından en az birini daha kötü hale getirmeden, diğerlerini iyileştiremiyor ise pareto optimal çözüm olarak adlandırılır. Söz konusu çözüm kümesi içinden optimal çözüme en yakın sınırı oluşturan noktalar pareto front veya pareto eğrisini oluşturur. Pareto front Şekil 1'de görülebildiği gibi iki amaçlı problemler için genelde bir eğriden meydana gelirken, üç amaçlı olan bizim problemimiz için yüzeylerden oluşmaktadır ve buna pareto yüzeyi denir [3]. Bu bağlamda bu çalışmada BOP probleminin çözümü için enerji tüketimi, CO₂ emisyonu ve ilk yatırım maliyetinin amaç fonksiyonu değerlerini hesaplayan BETH (Bina Enerji Tüketimi Hesaplama Programı) yazılımı geliştirilmiştir. İkinci aşamada söz konusu amaç fonksiyonlarının minimizasyonunu amaçlayan, klasik yöntemler ile kesin sonuca ulaşmanın çok zor, bazı durumlarda ise imkânsız olması nedeni ile NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) temelli bir yazılım olan BEOP (Bina Enerji Optimizasyon Programı) geliştirilmiştir. Örnek bir proje için her iki yazılımın uygulaması yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

3. ÇOK AMAÇLI BİNA OPTİMİZASYONU SÜRECİ (MULTI-OBJECTIVE BUILDING OPTIMIZATION PHASES)

BOP çözüm süreci genel olarak ön işleme prosesi, optimizasyon prosesi ve son işleme prosesi olarak üç aşamaya ayrılabilir [2]. Bu çalışmada da aynı süreç takip edilmiş olup, tüm süreçlerin otomasyonu için iki farklı yazılım geliştirilmiştir. İlk süreç bina karakteristiklerinin ve kullanılacak malzeme ve sistem alternatiflerinin belirlenmesi aşamasını kapsamaktadır. Bu aşamada projesi hazırlanan binaya ait bina karakteristikleri ve binada kullanılması planlanan ve karar değişkenlerini oluşturacak yapı, yalıtım malzemesi alternatifleri ve ısıtma, sıcak su, soğutma vs. gibi sistem alternatiflerinin excel dosyasına girilmesi gerekmektedir. Veri girişlerinin tamamlanmasının ardından Matlab ile yazılan ve BETH adını verdiğimiz yazılım çalıştırılır. Yazılım excel dosyasındaki bilgileri okuyarak binanın ısıtma, soğutma, sıcak su, aydınlatma ve cihazların tükettiği enerji değerlerini karar değişkenlerini koruyarak hesaplamaktadır. Benzer şekilde toplam maliyetini ve CO₂ emisyonu değerlerini karar değişkenlerini belirterek verir. BETH yazılımı karar değişkenleri ile birlikte üç adet amaç fonksiyonunu otomatik olarak hesaplamaktadır.

İkinci süreç optimizasyon süreci olarak adlandırılmaktadır. İlk süreçte elde edilen amaç fonksiyonu ve kısıtların çözülmesi sürecidir. Klasik hesaplama yöntemleri BOP problemlerinin karmaşıklığı nedeni ile yetersiz kalmaktadır. BOP için optimizasyon her zaman global optimum noktanın bulunması anlamına gelmez zira problemin doğası gereği uygunsuz olabilir [14]. Hatta konuyla ilgili bazı çalışmalarda "optimizasyon" sub optimal çözümleri bulmaya yarayan iteratif gelişmeler olarak tanımlanmıştır [15, 16 ve 17]. Bu yüzden genel olarak bu tip çalışmaların optimizasyon aşamasında yakınsama (convergence) tabiri kullanılır. Çünkü çoğu problemde global minimum noktasına değil, sadece algoritmanın sonlandırma şartlarına ulaşılabilir. Algoritmanın performansı yerel optimumlara yakalanmaması ve global optimuma ne kadar hızlı yakınsadığıyla ölçülmektedir. Bu çalışmada BEOP yazılımında çözüm konusunda en iyi performanslardan birini veren genetik algoritmalarından biri olan NSGA-II algoritması kullanılmıştır [2 ve 18].

Üçüncü süreçte optimizasyon sürecinde elde edilen sonuçlar karar vericinin rahatça algılayabileceği biçimde grafik, tablo, diyagram vs. haline getirilerek sunulur. Bu konuda en çok kullanılan gösterim yöntemi olan saçılım grafiği BEOP'ta da kullanılmıştır [19]. Ayrıca yazılım bir excel dosyasında her bir jenerasyon için gerekli bilgileri kaydetmektedir.



Şekil 2. Önerilen metodun şematik gösterimi
(Figure 2. Schematic structure of the proposed methodology)

4. ÇOK AMAÇLI BİNA OPTİMİZASYON MODELİ (MULTI-OBJECTIVE BUILDING OPTIMIZATION MODEL)

Geliştirilen model ile ilgili genel açıklamalar bu bölümde yapılmış olup, modelin matematiksel ifadesi için EK-A'ya bakınız.

Karar Değişkenleri (Decision Variables)

Binada enerji tüketimine sebep olan iki temel değişken bina dış kabuğu iken ikincisi bina enerji sistemleridir. Modelimizde kullanılan karar değişkenleri de temel olarak bina dış kabuğu, bina enerji sistemleri, aydınlatma sistemleri ve elektrikli cihazlardan oluşmaktadır. Bina dış kabuğunu oluşturan bileşenler bina duvarları, tabanı, tavanı, pencereler ve kapıları içermektedir. Bu bileşenler binanın ısıtma ve soğutma ihtiyacını ısı iletim katsayıları nedeniyle en fazla etkileyen bileşenlerdir. Kapı ve pencere tiplerine göre ısı iletim katsayıları sabitken, duvar, tavan ve taban çeşitli katmanlardan oluşmaktadır. Katmanların durumuna ve kalınlığına göre ısı iletim katsayıları değişmektedir. Bu gibi malzemeler için bazı temel katmanların kalınlıkları önceden belliyken, özellikle yalıtım katmanının kalınlıkları bir başka karar değişkeni olarak modelde belirlenmiştir. BEOP yazılımı bina bileşenleri ile birlikte optimum yalıtım kalınlıklarını da belirlemektedir.

İkinci temel enerji tüketim kaynağı olan bina enerji sistemleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır.

- **Isıtma Sistemleri:** Elektrikli ve elektrikli olmayan sadece ısıtma için kullanılan sistemler.
- **Soğutma Sistemleri:** Sadece elektrikli olan ve sadece soğutma için kullanılan sistemler.



- **Sıcak Su Sistemleri:** Sadece elektrikli olan ve sadece sıcak su üretimi için kullanılan sistemler.
- **Isıtma-Soğutma Sistemleri:** Sadece elektrikli olan ve ısıtma soğutma amacı ile kullanılan sistemler.
- **Isıtma-Sıcak Su Sistemleri:** Elektrikli veya elektrikli olmayan ısıtma ve sıcak su üretimi için kullanılan sistemleri.
- **Güneş Enerjisi Sistemleri:** Sıcak su üretimi için kullanılan güneş enerjili sistemler.
Üçüncü enerji tüketim bileşeni olarak aydınlatma ve cihazlar modelde kullanılmıştır.

Amaç Fonksiyonları (Objective Functions)

Modelde çevresel ve ekonomik etkiler göz önüne alınarak, 3 adet amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Bunlar:

- Amaç 1: Yıllık Enerji Tüketiminin Minimizasyonu (kWh/Yıl)
- Amaç 2: İlk Yatırım Maliyetinin Minimizasyonu (TL)
- Amaç 3: Yıllık CO₂ Emisyonunun Minimizasyonu (kg eşdeğer CO₂/Yıl)

Kısıtlar (Constraints)

Binada seçilmesi gereken karar değişkenlerinden sadece bir tipin kullanılması gerekmektedir. Kısıtlar bunu belirtecek şekilde tüm karar değişkenleri için oluşturulmuştur. Yalıtım kalınlığı değerleri 0 cm-10 cm aralığında olacak şekilde belirlenmiştir.

5. UYGULAMA (CASE STUDY)

Ankara ilinde örnek bir bina projesi üzerinde, yıllık enerji tüketim minimizasyonu, ilk yatırım maliyeti minimizasyonu ve yıllık CO₂ emisyonunun minimizasyonu için geliştirmiş olduğumuz model ve BETH ve BEOP yazılımları uygulanmış elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Hesaplama kolaylığı açısından bina tek zon olarak planlanmış, ısıtma ve yalıtım hesaplarında TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı kullanılmıştır.

5.1. Bina Karakteristik Verilerinin Girilmesi (Entering The Building Characteristic Data)

BETH yazılımı tarafından binaya ait amaç fonksiyonlarının hesaplanmasında kullanılmak üzere binaya ait karakteristik verilerin girilmesi gerekmektedir. BETH yazılımı Şekil 3'te projesi sunulan örnek bina için, bir excel dosyasına girilen verileri okuyarak amaç fonksiyonu değerlerini hesaplamaktadır. Excel dosyasına girilen bina karakteristik değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. Söz konusu tabloda alanlar ve hacim bilgileri bina tasarımından alınmakta olup, iç ortam ve dış ortam sıcaklıkları ilgili mühendis tarafından belirlenmektedir. Elektrik ve doğalgaz için emisyon değerleri literatürde doğalgaz ve elektrik salım faktörü olarak da isimlendirilmektedir. Elektrik emisyon değeri üretim şekline bağlı olarak değişmekte olup, bu çalışmada 0.446 kg eşdeğer CO₂/kWh kullanılmıştır [20]. Doğalgaz için ise 0.374 kg eşdeğer CO₂/kWh değeri kullanılmıştır [21].

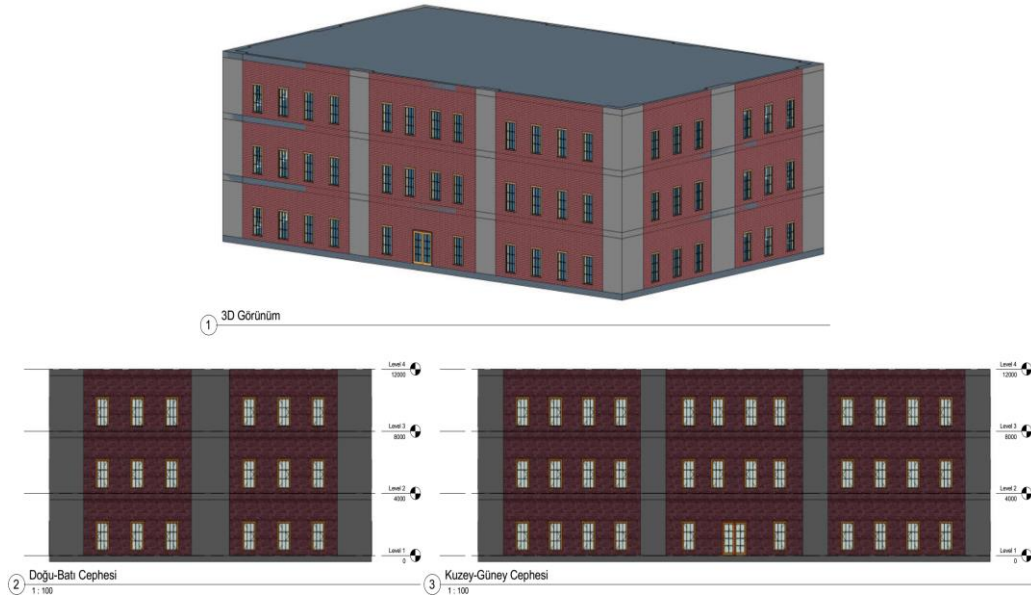
Tablo 1. Bina karakteristik değerleri
(Table 1. Building characteristic values)

Bina Bilgileri		
Duvar Alanları	Miktar	Birim
1. Dış Duvar Alanı	1008.04	m ²
2. Beton Duvar	393.6	m ²
Döşeme Alanları	Miktar	Birim
1. Taban Alanı	1032.09	m ²
Tavan Alanı	Miktar	Birim
1. Tavan	1032.09	m ²
Pencere Alanları	Miktar	Birim
1. Güney Cephesi	56.93	m ²
2. Kuzey Cephesi	56.93	m ²
3. Doğu Cephesi	30.14	m ²
4. Batı Cephesi	30.14	m ²
Toplam Pencere Alanı	174.14	m ²
Kapı Alanları	Miktar	Birim
1. Dış Kapı Alanı	7.8	m ²
Isı Kaybeden Toplam Alan	3647.76	m ²
Isıtılan Brüt Hacim	12385.08	m ³
İç Ortam Tasarım Sıcaklığı (Kış)	21	Derece
İç Ortam Tasarım Sıcaklığı (Yaz)	26	Derece
CO ₂ Emisyon Değeri (Elektrik)	0.446	kg eşdeğer CO ₂ /kWh
CO ₂ Emisyon Değeri (Doğalgaz)	0.374	kg eşdeğer CO ₂ /kWh

5.2. Binaya Ait Karar Değişkenlerinin Girilmesi

(Entering Decision Variables Belonging To The Building)

Önceki bölümlerde açıklandığı gibi binada enerji tüketimi, yatırım maliyeti ve CO₂ emisyonunu etkileyen karar değişkenleri bina dış kabuğu, bina enerji sistemleri, aydınlatma sistemleri ve elektrikli cihazlardan oluşmaktadır. Örnek binada kullanılması düşünülen malzeme ve sistem alternatifleri Tablo 2-5'te verilmiş olup, karar değişkenlerinin girilmesi ile modelimizdeki karar değişkeni sayısı 74 adet olup, kısıt sayısı 15 ve amaç fonksiyonu sayısı 3 olarak ortaya çıkmıştır. Bunlardan yalıtım kalınlıkları 0-10 cm arasında değer alabilirken, diğer değişkenleri 0-1 değeri almaktadır.



Şekil 3. Örnek binanın genel görünümü
(Figure 3. Sample building general views)

Tablo 2. Bina dış kabuğu malzeme alternatifleri
(Table 2. Building envelope alternatives)

Önerilen Duvar Yapısı	Katman	Malzeme
Duvar Yapısı 1	1	Sıva
	2	Yatay Delikli Tuğla
	3	Sıva
	4	Yalıtım
	5	Sıva
Duvar Yapısı 2	1	Sıva
	2	Yatay Delikli Tuğla
	3	Yalıtım
	4	Yatay Delikli Tuğla
	5	Sıva
Önerilen Beton Duvar Yapısı	Katman	Malzeme
Beton Duvar Yapısı 1	1	Sıva
	2	Beton
	3	Sıva
	4	Yalıtım
	5	Sıva
Beton Duvar Yapısı 2	1	Sıva
	2	Beton
	3	Yalıtım
	4	Sıva
Önerilen Taban Yapısı	Katman	Malzeme
Taban Yapısı 1	1	PVC Döşeme
	2	Şap
	3	Yalıtım
	4	Tesviye Şapı
	5	Beton
Taban Yapısı 2	1	Seramik
	2	Şap
	3	Yalıtım
	4	Tesviye Şapı
	5	Beton
Önerilen Tavan Yapısı	Katman	Malzeme
Tavan Yapısı 1	1	İç Sıva
	2	Donatılı Beton
	3	Yalıtım
	4	Şap
Tavan Yapısı 2	1	Alçı Sıva
	2	Donatılı Beton
	3	Yalıtım
	4	Şap
	5	Mozaik
Önerilen Yalıtım Malzemeleri		
1 (Ekstrüde Polistiren Köpük) (XPS)		
2 (Ekspande Polistiren Köpük) (EPS)		
3 (Poliüretan Sert Köpük) (PUR)		
Önerilen Pencere Çeşitleri	Alt Çeşitler	
1 Ahşap Doğrama (Sert Ağaçlar)	Tek Camlı Pencere	
	Çift Camlı Pencere (Ara boşluk 9mm)	
	Low-e Kaplamalı Çift Camlı Pencere (Ara boşluk 9mm)	
2 Plastik Doğrama (2 Odacıklı)	Tek Camlı Pencere	
	Çift Camlı Pencere (Ara boşluk 9mm)	
	Low-e Kaplamalı Çift Camlı Pencere (Ara boşluk 9mm)	
3 Alüminyum Doğrama	Tek Camlı Pencere	
	Çift Camlı Pencere (Ara boşluk 9mm)	
	Low-e Kaplamalı Çift Camlı Pencere (Ara boşluk 9mm)	
Önerilen Kapı Çeşitleri		
1 Ağaç Kapı		
2 Plastik Kapı		
3 Metal (Yalıtımlı) Kapı		
4 Metal (Yalıtımsız) Kapı		

Tablo 3. Bina enerji sistemleri alternatifleri
(Table 3. Building energy systems alternatives)

Önerilen Isıtma Sistemleri
Elektrikli Sistemler
1 Elektrikli Kombi A
2 Elektrikli Kombi B
Elektrikli Olmayan Sistemler
1 Doğalgazlı Kazan A
2 Doğalgazlı Kazan B
Önerilen Soğutma Sistemleri
Elektrikli Sistemler
1 Hava Soğutmalı Çiller A
2 Hava Soğutmalı Çiller B
Önerilen Isıtma-Soğutma Sistemleri
Elektrikli Sistemler
1 Isı Pompası
2 VRF Klima
Önerilen Sıcak Su Sistemleri
Elektrikli Sistemler
1 Elektrikli Boyler A
2 Elektrikli Boyler B
Önerilen Isıtma-Sıcak Su Sistemleri
Elektrikli Sistemler
1 Elektrikli Kombi A
2 Elektrikli Kombi B
Elektrikli Olmayan Sistemler
1 Doğalgazlı Kazan-Boyer A
2 Doğalgazlı Kazan-Boyer B
Önerilen Güneş Kolektörleri
1 Bakır Kolektör
2 Alüminyum Kolektör
3 Selektif Yüzeyle Kolektör

Tablo 4. Bina aydınlatma alternatifleri
(Table 4. Building lighting alternatives)

Önerilen Lamba Çeşitleri
1 Florasan Lamba A
2 Florasan Lamba B
3 LED Lamba

Tablo 5. Cihaz alternatifleri
(Table 5. Electrical appliances alternatives)

Buzdolabı Alternatifleri	Çamaşır Makinesi Alternatifleri	Bulaşık Makinesi Alternatifleri
Önerilen Buzdolabı Çeşitleri	Önerilen Çamaşır Makinesi Çeşitleri	Önerilen Bulaşık Makinesi Çeşitleri
1 Buzdolabı A	1 Çamaşır Mak. A	1 Bulaşık Mak. A
2 Buzdolabı B	2 Çamaşır Mak. B	2 Bulaşık Mak. B

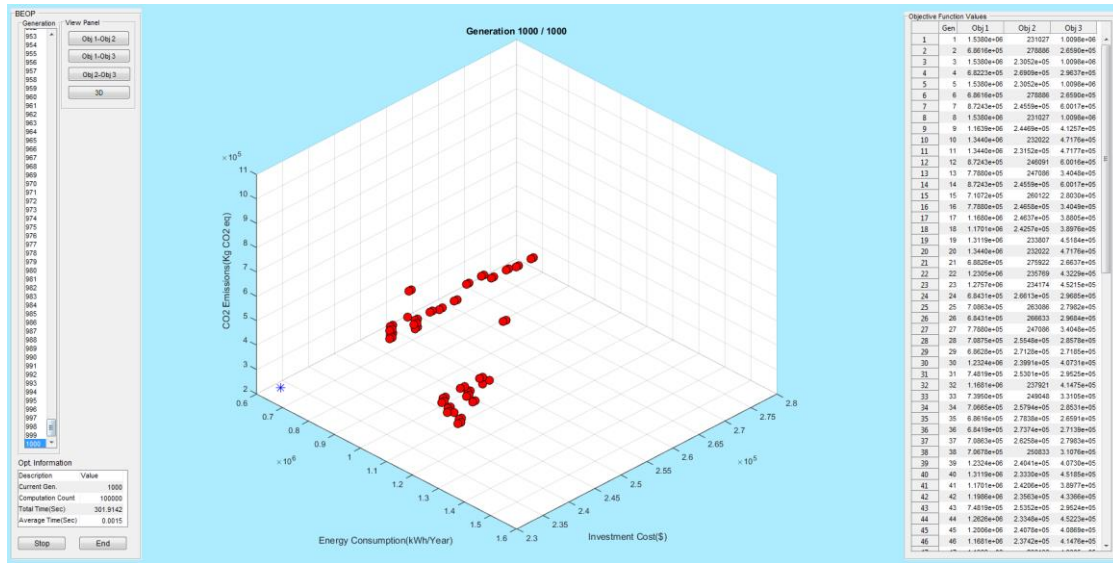
5.3. BETH Yazılımının Çalıştırılması (Running BECCP Software)

BETH yazılımı çalıştırılarak binanın ısıtma tüketimleri, soğutma tüketimleri, sıcak su tüketimleri, aydınlatma tüketimleri ve cihaz tüketimleri amaç fonksiyonu katsayıları ve değişkenleri olarak hesaplanarak kullanıcıya sunulmaktadır. Aynı zamanda ikinci amaç fonksiyonu olan ilk yatırım maliyeti ve üçüncü amaç fonksiyonu CO₂ emisyonu değerleri hesaplanır. Bu aşamada hesaplanan bu değerler

gerekli optimizasyon hesaplamalarının yapılabilmesi için BEOP yazılımına girilir.

5.4. BEOP Yazılımının Çalıştırılması (Running BEOP Software)

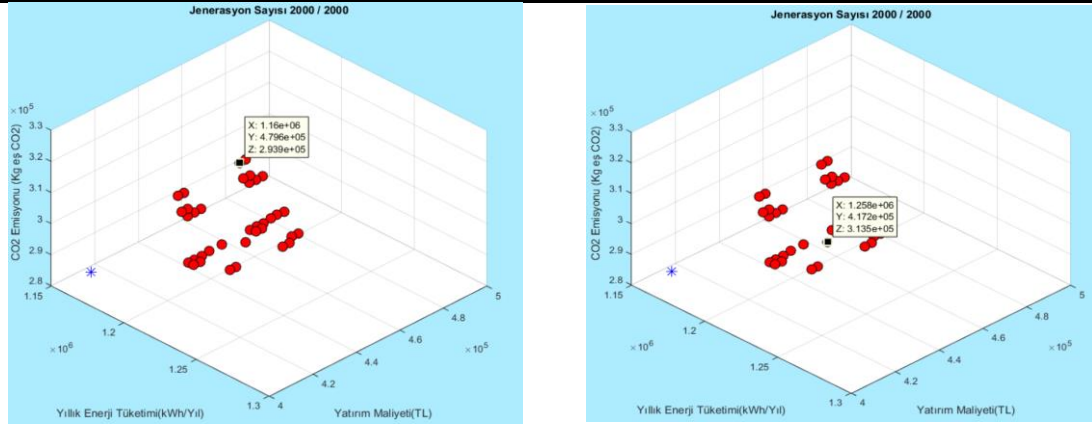
BEOP yazılımına amaç fonksiyonu ve kısıtlar girilerek çözüm işlemi başlatılır. BEOP yazılımına amaç fonksiyonu ve kısıtlar girilerek çözüm işlemi başlatılır. Burada popülasyon büyüklüğü 50, jenerasyon sayısı 2000, çaprazlama oranı 2, mutasyon oranı 0.5 ve mutasyon küçültme oranı 1 olarak girilerek çözüm başlatılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. BEOP'ta arka planda hesaplama işlemleri sürerken Şekil 4'te görülebileceği üzere ara yüzde yer alan panellerden jenerasyon sayısı, amaç fonksiyonu değerleri, hesaplama zamanı ve ortalama hesaplama zamanı takip edilebilir. Yazılım çözümleri yaparken aynı zamanda bir text dosyasına tüm verileri kaydetmektedir.



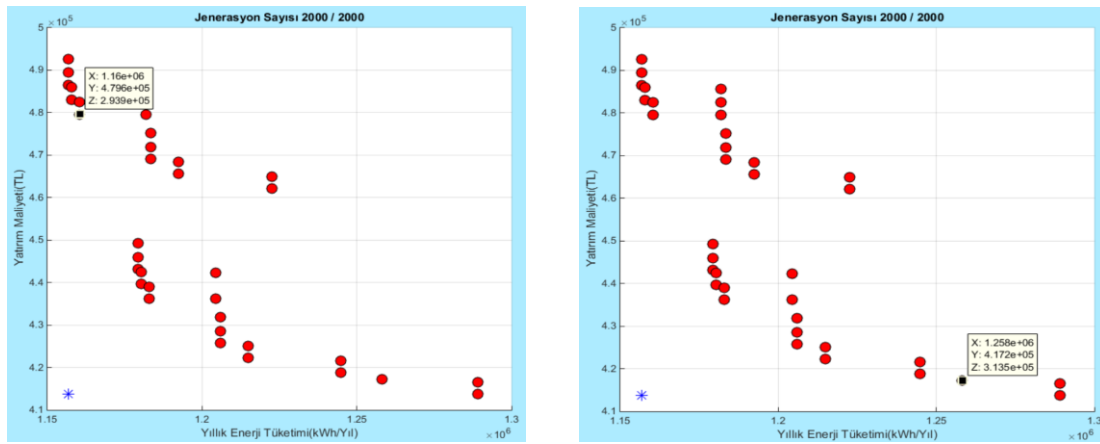
Şekil 4. BEOP arayüzü
(Figure 4. BEOP interface)

6. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

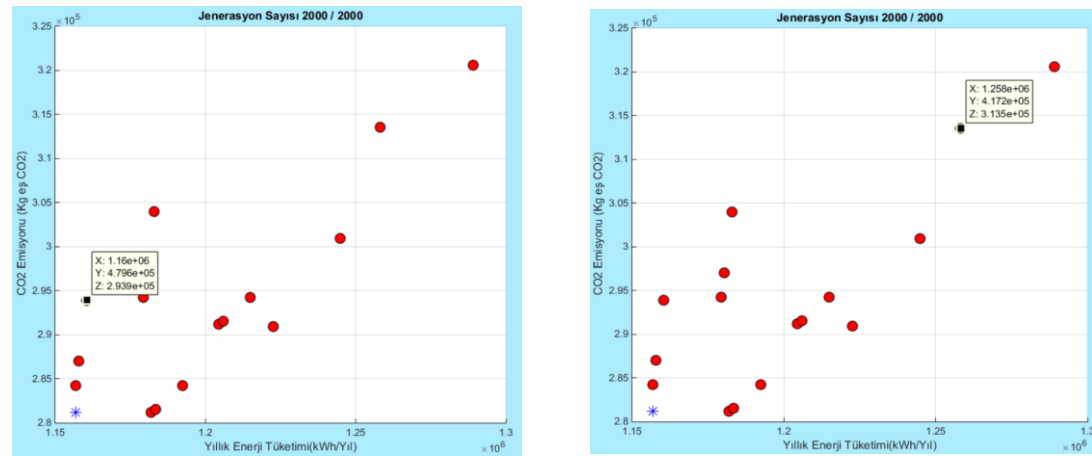
BEOP ara yüzünde gösterilen uygun çözümler arasından birisinin üzerine tıklanarak Şekil 5'te görülebileceği gibi amaç fonksiyonu değerleri incelenebilir. Karar verici ara yüz üzerinden uygun çözümler arasından seçim yapabilmektedir. Ayrıca text dosyasında her bir amaç fonksiyonu için kullanılacak ekipmanların seçimi ve optimum yalıtım kalınlıkları belirlenmiştir. Yazılımın çalıştırılması sonucunda ortaya çıkan pareto optimal çözümlerden iki tanesi seçilerek değerlendirme ve tartışma için kullanılacaktır. Söz konusu iki adet örnek çözüme ait amaç fonksiyonu değerleri Şekil 6-8'de görülebilmektedir. Çözüm 1 için amaç fonksiyonu değerleri sırasıyla 1160430 kWh, 479550 TL, 293922 kg eşdeğer CO₂ olarak bulunmuştur. Çözüm 2 için ise 1258170 kWh, 417219 TL, 313530 kg eşdeğer CO₂ olarak bulunmuştur.



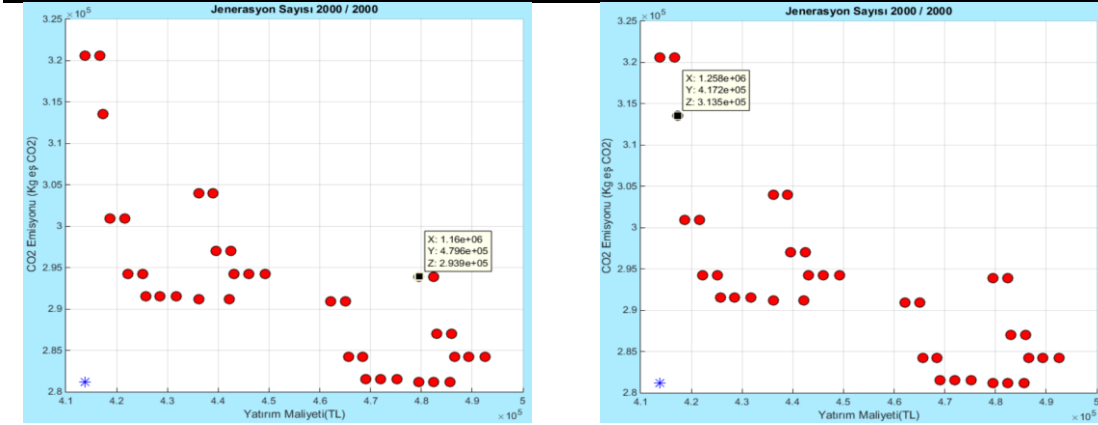
Şekil 5. Seçilen uygun çözümlerin 3d görünümü
(Figure 5. Chosen feasible solutions 3d view)



Şekil 6. Seçilen uygun Çözümlerin Amaç Fonksiyonu 1-2 için değerleri
(Figure 6. Chosen feasible solution values for objective 1 and objective 2)



Şekil 7. Seçilen uygun Çözümlerin Amaç Fonksiyonu 1-3 için değerleri
(Figure 7. Chosen feasible solution values for objective 1 and objective 3)



Şekil 8. Seçilen Uygun Çözümlerin Amaç Fonksiyonu 2-3 için değerleri
(Figure 8. Chosen feasible solution values for objective 2 and objective 3)

Seçilen iki farklı uygun çözüm için karar değişkeni değerleri Tablo 6'da sunulmuştur. Yazılım bina dış cephesinde kullanılması gereken duvar, beton, pencere, kapı, tavan ve taban yapılarını belirlemiş, bu yapılarda kullanılması gereken optimum yalıtım kalınlıklarını ve kullanılması gereken yalıtım malzemesini belirlemiştir. Ayrıca kullanılabilir birçok ısıtma, soğutma ve sıcak su sistemi içinden uygun olanları seçmiştir. Binada kullanılması gereken buzdolabı çamaşır makinesi gibi cihazlar ve aydınlatma da kullanılacak armatürler tasarım aşamasında en verimli olacak şekilde tespit edilmiştir. Tabloyu incelediğimizde iki farklı çözüm için yapı bileşeni ve malzeme seçimlerinin büyük oranda aynı olduğu görülmektedir. Yalıtım kalınlıkları her iki çözüm için de en yüksek değer olan 10 cm. olarak belirlemiştir. Bina kabuğu için tek fark pencere seçiminde gözlenmektedir. Çözüm 1 alüminyum doğrama/tek camlı pencere içermekteyken, çözüm 2 plastik doğrama/çift camlı pencere içermektedir. Bina enerji sistemlerine baktığımızda iki farklı tipte çiller seçimi yapıldığını görürüz. Aynı şekilde aydınlatma sistemleri için çözüm 1'de led lamba kullanılmışken, çözüm 2'de floresan lamba kullanılmıştır. İki farklı çözüm aslında iki farklı bina tasarımı anlamına gelmektedir. Tablo 16 incelendiğinde pencere, soğutma ve aydınlatma sistemlerinin seçiminde yapılan yaklaşık 62331 TL ek maliyet getiren ufak değişikliklerin senelik 97740 kWh enerji kazancı ve 19608 kg eşdeğer CO₂ emisyonu azalmasına sebep olduğu görülmektedir.

7. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

(CONCLUSION AND PERSPECTIVES FOR FUTURE WORK)

Dünyada ve Ülkemizde enerji kaynaklarının sınırlı olması ve çevresel etkileri nedeniyle enerji tasarrufu büyük önem kazanmıştır. Üretilen enerjinin yaklaşık %40'ının binalarda tüketildiği düşünüldüğünde özellikle tasarım aşamasında, enerji etkin binaların tasarımı ülkemiz ve geleceğimiz açısından büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda binaların tasarım aşamasında enerjiyi etkin bir şekilde kullanan, çevreye en az zararı veren, maliyeti uygun bir bina tasarlamak için karar vericiye yardımcı olan bir model ve yazılım geliştirilmiştir. Yazılımın gerçek bir projede uygulanması sonrasında kısa zamanda pareto çözümlere ulaştığı ve karar verici için oldukça yol gösterici olduğu gözlenmiştir.

Tablo 6. Seçilen uygun çözümler için karar değişkenleri ve amaç fonksiyonları karşılaştırması
(Table 6. Comparison of decision variables and objective functions for selected solutions)

Alternatifler	Uygun Çözüm 1	Uygun Çözüm 2
	Seçilen Malzeme ve Sistemler	Seçilen Malzeme ve Sistemler
Duvar	Duvar Yapısı 2	Duvar Yapısı 2
Beton Duvar	Beton Duvar Yapısı 2	Beton Duvar Yapısı 2
Taban	Taban Yapısı 2	Taban Yapısı 2
Tavan	Tavan Yapısı 1	Tavan Yapısı 1
Yalıtım	(Ekstrüde Polistiren Köpük) (XPS)	(Ekstrüde Polistiren Köpük) (XPS)
Pencere	Alüminyum Doğrama/Tek Camlı Pencere	Plastik Doğrama/Çift Camlı Pencere
Kapı	Plastik Kapı	Plastik Kapı
Aydınlatma	Led Lamba	Floraslan Lamba B
Buz Dolabı	Buz Dolabı A	Buz Dolabı A
Çamaşır Makinesi	Çamaşır Makinesi B	Çamaşır Makinesi B
Bulaşık Makinesi	Bulaşık Makinesi B	Bulaşık Makinesi B
Isıtma-Sıcak Su Sis.	Doğalgazlı Kazan-Boylar A	Doğalgazlı Kazan-Boylar A
Soğutma Sistemleri	Hava Soğutmalı Çiller A	Hava Soğutmalı Çiller B
Güneş Kolektörü	Alüminyum Kolektör	Alüminyum Kolektör
Duvar Yalıtım Kalınlığı	10 cm	10 cm
Beton Duv. Yal. Kal.	10 cm	10 cm
Taban Yalıtım Kalınlığı	10 cm	10 cm
Tavan Yalıtım Kalınlığı	10 cm	10 cm
Amaç Fonksiyonu 1	1160430 kWh	1258170 kWh
Amaç Fonksiyonu 2	479550 TL	417219 TL
Amaç Fonksiyonu 3	293922 kg eşdeğer CO ₂	313530 kg eşdeğer CO ₂

Geliştirilen yöntem oldukça genel olup, her türlü bina, malzeme ve sistem için kolayca uygulaması yapılabilmektedir. Ayrıca ilk defa 74 karar değişkeni, 3 amaç fonksiyonu ve 15 kısıt ile geniş bir malzeme ve sistem çeşitliliği oluşturulmuştur. İnşaat piyasasına uygun olarak yatırım maliyeti, enerji tüketimi ve CO₂ emisyonunun minimizasyonu amaçlanmıştır. Geliştirilen metodoloji ve yazılımların yaygınlaşması ile Ülkemiz açısından önem arz eden enerji tüketimi ve çevresel sorunların çözülmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir.

Gelecek çalışmalarda binada kullanılan malzeme ve sistem çeşitlerinin genişletilmesi, farklı amaç fonksiyonlarının modele dahil edilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Diakaki, C., Grigoroudis, E., and Kolokotsa, D., (2008). Towards a Multi-Objective Optimization Approach for Improving Energy Efficiency in Buildings. *Energy and Buildings*, 40(9), pp:1747-1754.
2. Nguyen, A.T., Reiter, S., and Rigo, P., (2014). A Review on Simulation-Based Optimization Methods Applied to Building Performance Analysis. *Applied Energy*. 113, pp:1043-1058.
3. Chantrelle, F.P., (2011). Development of a Multicriteria Tool for Optimizing the Renovation of Buildings. *Applied Energy*, 88(4), pp:1386-1394.
4. Machairas, V., Tsangrassoulis, A., and Axarli, K., (2014). Algorithms for Optimization of Building Design: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 31, pp:101-112.

5. Kolokotsa, D., (2009). Decision Support Methodologies on The Energy Efficiency and Energy Management in Buildings. *Advances in Building Energy Research*, 3(1), pp:121-146.
6. Diakaki, C., (2010). A Multi-Objective Decision Model for the Improvement of Energy Efficiency in Buildings. *Energy*, 35(12), pp:5483-5496.
7. Juan, Y.K., (2009). GA-based Decision Support System for Housing Condition Assessment And Refurbishment Strategies. *Automation in Construction*, 18(4), pp:394-401.
8. Hamdy, M., Hasan, A., and Siren, K., (2011). Applying a Multi-Objective Optimization Approach for Design of Low-emission Cost-Effective Dwellings. *Building and Environment*, 46(1), pp:109-123.
9. Fesanghary, M., Asadi, S., and Geem, Z.W., (2012). Design of low-emission and Energy-Efficient Residential Buildings Using a Multi-Objective Optimization Algorithm. *Building and Environment*, 49, pp:245-250.
10. Asadi, E., (2012). Multi-objective Optimization for Building Retrofit Strategies: A Model and an Application. *Energy and Buildings*, 44, pp:81-87.
11. Evins, R., (2013). A review of Computational Optimisation Methods Applied to Sustainable Building Design. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 22, pp:230-245.
12. Malatji, E.M., Zhang, J.F., and Xia, X.H., (2013). A Multiple Objective Optimisation Model for Building Energy Efficiency Investment Decision. *Energy and Buildings*, 61, pp:81-87.
13. Karmellos, M., Kiprakis, A., and Mavrotas, G., (2015). A Multi-Objective Approach for Optimal Prioritization of Energy Efficiency Measures in Buildings: Model, software and case studies. *Applied Energy*, 139, pp:131-150.
14. Manzano-Agugliaro, F., (2011). Optimization Methods Applied to Renewable and Sustainable Energy: A Review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 15(4), pp:14p.
15. Wong Nyuk, H. and Li, S., (2007). Facade Design Optimization for Naturally Ventilated Residential Buildings in Singapore. *Energy & Buildings*, 39(8), pp: 8p.
16. Sproul, A.B. and Jacob, D., (2011). Design optimisation for a low energy home in Sydney. *Energy & Buildings*, 43(7), pp:10p.
17. Haase, M. and Perino, M., (2013). Optimizing the Configuration of a facade Module for Office Buildings by Means of Integrated Thermal and Lighting Simulations in a Total Energy Perspective. *Applied Energy*, 108, pp:13p.
18. Deb, K., Agrawal, S., Paratap, A., and Meyarivan, T., (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions On Evolutionary Computation*, 6(2):182.
19. Attia, S., (2012). Computational Optimization Zero Energy Building Design: Interviews With 28 International Experts. International Energy Agency (IEA) Task 40: Towards Net Zero Energy Buildings Subtask B. Louvain la Neuve. Université Catholique de Louvain.
20. Güçül, G.N., (2016). Ankara'da Müstakil Bir Konutun Nihai Enerji Tüketimini En Aza İndirebilmenin Yollarının Araştırılması ve Tekno-Ekonomik Değerlendirilmesi. Hacettepe Üniversitesi Doktora Tezi.
21. Arı, I. and Aydinalp Koksal, M., (2011). Carbon dioxide emission from the Turkish electricity sector and its mitigation options. *Energy Policy*, 39(10), pp:6120-6135.

EK A (APPENDIX A)

PROBLEMİN MATEMATİKSEL MODELİ

A.1. Karar Değişkenleri

Modelimizde kullandığımız karar değişkenleri bu bölümde açıklanmıştır. Daha kolay anlaşılabilmesi için karar değişkenleri bina kabuğu, enerji sistemleri, aydınlatma ve cihazlar olarak ayrılmıştır.

A.1.1. Bina Kabuğu

a) Kapılar:

Modelimizde K adet kapı alternatifi olması durumunda $x_k^{Kapı}$ karar değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$x_k^{Kapı} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } k \text{ kapı alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

Önerilen kapı alternatifleri arasından yalnızca bir çeşidinin seçilebilmesi için;

$$\sum_{k=1}^K x_k^{Kapı} = 1$$

k= 1, ... , K

b) Pencereler:

Modelimizde P adet pencere alternatifi (ahşap doğrama, plastik doğrama, alüminyum doğrama vb.) ve Z adet alt çeşit (tek cam, çift cam, low-e vb.) olması durumunda x_{pz}^{Pen} karar değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$x_{pz}^{Pen} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } p \text{ pencere alternatifi ve } z \text{ alt çeşidi seçilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

Önerilen pencere alternatifleri arasından yalnızca bir çeşidinin seçilebilmesi için;

$$\sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z x_{pz}^{Pen} = 1$$

p= 1, ... , P

z= 1, ... , Z

c) Yalıtım:

Modelimizde Y adet yalıtım alternatifi olması durumunda $x_y^{Yalıtım}$ karar değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$x_y^{Yal} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } y \text{ yalıtım alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

Önerilen yalıtım alternatifleri arasından yalnızca bir çeşidinin seçilebilmesi için;

$$\sum_{y=1}^Y x_y^{Yal} = 1$$

y= 1, ... , Y

d) Duvarlar

Modelimizde D adet duvar yapısı alternatifi olması durumunda x_d^{Duvar} karar değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$x_d^{Duvar} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } d \text{ duvar yapısı alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

Önerilen duvar yapısı alternatifleri arasından yalnızca bir çeşidinin seçilebilmesi için;

$$\sum_{d=1}^D x_d^{Duvar} = 1$$

d= 1, ... , D

Her bir duvar yapısı çeşitli sayıda katmanlardan oluşmaktadır. Bu katmanlardan bilinenlerin sayısını $bk_{duvar} = 1, \dots, BK_{duvar}$, kalınlıklarını

$(d_{d,bk}^{Duvvar})$ ve ısı iletkenlik hesap değerlerini $(\lambda_{d,bk}^{Duvvar})$ olarak ifade edebiliriz.

Aynı şekilde kalınlığı bilinmeyen ve kendisi bir karar değişkeni olan yalıtım katmanının kalınlığını $d_{d,y}^{Yal}$, ısı iletkenlik hesap değerlerini $(\lambda_{d,y}^{Yal})$ olarak ifade edebiliriz. Bu durumda her bir duvarın ısı iletkenlik katsayısı (U_d^{Duvvar}) değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$U_d^{Duvvar} = \left(\frac{1}{R_i} + \sum_{bk_{duvar}=1}^{BK_{duvar}} \frac{d_{d,bk}^{Duvvar}}{\lambda_{d,bk}^{Duvvar}} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yal} \left(\frac{d_{d,y}^{Yal}}{\lambda_{d,y}^{Yal}} \right) + \frac{1}{R_e} \right)^{-1}$$

Olarak hesaplanır. Burada;

R: Isıl iletkenlik direnci (m^2K/W)

λ : Isıl iletkenlik hesap değeri (W/mK)

U: Isıl geçirgenlik katsayısı (W/m^2K)

$R=d/\lambda$

$U=1/R$

R_i = İ yüzeylerin ısı iletim direnci ($W/m^2 K$)

R_e =Dış yüzeylerin ısı iletim direnci ($W/m^2 K$)

e) Yapı Duvarları

Binanın taşıyıcı özellik gösteren duvarları modelimizde yapı duvarları olarak adlandırılmıştır. Bu duvarlar yapı olarak daha fazla beton içermesiyle diğer duvarlardan ayrılır. Modelimizde YD adet yapı duvarı alternatifi olması durumunda $x_{yd}^{YDuvvar}$ karar değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$x_{yd}^{YDuvvar} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } yd \text{ yapı duvarı alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

Önerilen duvar yapısı alternatifleri arasından yalnızca bir çeşidinin seçilebilmesi için;

$$\sum_{yd=1}^{YD} x_{yd}^{YDuvvar} = 1$$

$yd= 1, \dots, YD$

Her bir yapı duvarı çeşitli sayıda katmanlardan oluşmaktadır. Bu katmanlardan bilinenlerin sayısını $bk_{Yduvar} = 1, \dots, BK_{Yduvar}$, kalınlıklarını $(d_{yd,bk}^{YDuvvar})$ ve ısı iletkenlik hesap değerlerini $(\lambda_{yd,bk}^{YDuvvar})$ olarak ifade edebiliriz.

Aynı şekilde kalınlığı bilinmeyen ve kendisi bir karar değişkeni olan yalıtım katmanının kalınlığını $d_{yd,y}^{Yal}$, ısı iletkenlik hesap değerlerini $(\lambda_{yd,y}^{Yal})$ olarak ifade edebiliriz. Bu durumda her bir duvarın ısı iletkenlik katsayısı $(U_{yd}^{YDuvvar})$ değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$U_{yd}^{YDuvvar} = \left(\frac{1}{R_i} + \sum_{bk_{Yduvar}=1}^{BK_{Yduvar}} \frac{d_{yd,bk}^{YDuvvar}}{\lambda_{yd,bk}^{YDuvvar}} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yal} \left(\frac{d_{yd,y}^{Yal}}{\lambda_{yd,y}^{Yal}} \right) + \frac{1}{R_e} \right)^{-1}$$

Olarak hesaplanır.

e) Tavan

Modelimizde TAV adet tavan yapısı alternatifi olması durumunda x_{tav}^{Tavan} karar değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$x_{tav}^{Tavan} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } tav \text{ tavan yapısı alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

Önerilen tavan yapısı alternatifleri arasından yalnızca bir çeşidinin seçilebilmesi için;

$$\sum_{tav=1}^{TAV} x_{tav}^{Tavan} = 1$$

$tav= 1, \dots, TAV$

Her bir tavan yapısı çeşitli sayıda katmanlardan oluşmaktadır. Bu katmanlardan bilinenlerin sayısını $bk_{tav} = 1, \dots, BK_{tav}$, kalınlıklarını ($d_{tav,bk}^{Tavan}$) ve ısı iletkenlik hesap değerlerini ($\lambda_{tav,bk}^{Tavan}$) olarak ifade edebiliriz.

Aynı şekilde kalınlığı bilinmeyen ve kendisi bir karar değişkeni olan yalıtım katmanının kalınlığını $d_{tav,y}^{Yal}$, ısı iletkenlik hesap değerlerini ($\lambda_{tav,y}^{Yal}$) olarak ifade edebiliriz. Bu durumda her bir duvarın ısı geçirenlik katsayısı (U_{tav}^{Tavan}) değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$U_{tav}^{Tavan} = \left(\frac{1}{R_i} + \sum_{bk_{tav}=1}^{BK_{tav}} \frac{d_{tav,bk}^{Tavan}}{\lambda_{tav,bk}^{Tavan}} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yal} \left(\frac{d_{tav,y}^{Yal}}{\lambda_{tav,y}^{Yal}} \right) + \frac{1}{R_e} \right)^{-1}$$

Olarak hesaplanır.

e) Taban

Modelimizde TAB adet tavan yapısı alternatifi olması durumunda x_{tab}^{Taban} karar değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$x_{tab}^{Taban} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer tab taban yapısı alternatifi seğilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

Önerilen taban yapısı alternatifleri arasından yalnızca bir çeşidinin seçilebilmesi için;

$$\sum_{tab=1}^{TAB} x_{tab}^{Taban} = 1$$

tab= 1, ... , TAB

Her bir taban yapısı çeşitli sayıda katmanlardan oluşmaktadır. Bu katmanlardan bilinenlerin sayısını $bk_{tab} = 1, \dots, BK_{tab}$, kalınlıklarını ($d_{tab,bk}^{Taban}$) ve ısı iletkenlik hesap değerlerini ($\lambda_{tab,bk}^{Taban}$) olarak ifade edebiliriz.

Aynı şekilde kalınlığı bilinmeyen ve kendisi bir karar değişkeni olan yalıtım katmanının kalınlığını $d_{tab,y}^{Yal}$, ısı iletkenlik hesap değerlerini ($\lambda_{tab,y}^{Yal}$) olarak ifade edebiliriz. Bu durumda her bir duvarın ısı geçirenlik katsayısı (U_{tab}^{Taban}) değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$U_{tab}^{Taban} = \left(\frac{1}{R_i} + \sum_{bk_{tab}=1}^{BK_{tab}} \frac{d_{tab,bk}^{Taban}}{\lambda_{tab,bk}^{Taban}} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yalıtım} \left(\frac{d_{tab,y}^{Yal}}{\lambda_{tab,y}^{Yal}} \right) + \frac{1}{R_e} \right)^{-1}$$

Olarak hesaplanır.

A.1.2. Bina Enerji Sistemleri

a) Isıtma sistemleri için

EISi elektrikli ısıtma sistemleri için alternatif kategorileri gösterebiliriz, EISj bu kategorilerin altındaki cihaz alternatiflerini gösterebiliriz. $e_{isi}=1, \dots, EISi$ ve $e_{isj}=1, \dots, EISj$ olsun. Bu durumda;

$$x_{e_{isi},e_{isj}}^{EIS} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer e_{isi} kategorisine ait e_{isj} elektrikli ısıtma sistemi} \\ & \text{alternatifi seğilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

EOISi elektrikli olmayan ısıtma sistemleri için alternatif kategorileri gösterebiliriz, EOISj bu kategorilerin altındaki cihaz alternatiflerini gösterebiliriz. $e_{oisi}=1, \dots, EOISi$ ve $e_{oisj}=1, \dots, EOISj$ olsun. Bu durumda;

$$x_{e_{oisi},e_{oisj}}^{EOIS} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer e_{oisi} kategorisine ait e_{oisj} elektrikli olmayan ısıtma} \\ & \text{sistemi alternatifi seğilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

b) Soğutma sistemleri için

SSi elektrikli soğutma sistemleri için alternatif kategorileri gösterebiliriz, SSj bu kategorilerin altındaki cihaz alternatiflerini gösterebiliriz. $ssi=1, \dots, SSi$ ve $ssj=1, \dots, SSj$ olsun. Bu durumda;

$$x_{ssi,ssj}^{SS} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer ssi kategorisine ait ssj elektrikli soğutma sistemi} \\ & \text{alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \end{cases} \quad d.d$$

c) Sıcak su sistemleri için

ESSi elektrikli sıcak su sistemleri için alternatif kategorileri gösterebilirsin, ESSj bu kategorilerin altındaki cihaz alternatiflerini gösterebilirsin. essi=1, ... , ESSi ve essj=1, ... , ESSj olsun. Bu durumda;

$$x_{essi,essj}^{ESS} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer essi kategorisine ait essj elektrikli sıcak su sistemi} \\ & \text{alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \end{cases} \quad d.d$$

d) Isıtma Soğutma sistemleri için

ISSi elektrikli ısıtma soğutma sistemleri için alternatif kategorileri gösterebilirsin, ISSj bu kategorilerin altındaki cihaz alternatiflerini gösterebilirsin. issi=1, ... , ISSi ve issj=1, ... , ISSj olsun. Bu durumda;

$$x_{issj,issj}^{ISS} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer issi kategorisine ait issj elektrikli ısıtma soğutma sistemi} \\ & \text{alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \end{cases} \quad d.d$$

e) Isıtma Sıcak su sistemleri için

EISSSi elektrikli ısıtma sıcak su sistemleri için alternatif kategorileri gösterebilirsin, EISSSj bu kategorilerin altındaki cihaz alternatiflerini gösterebilirsin. eissssi=1, ... , EISSSi ve eissssj=1, ... , EISSSj olsun. Bu durumda;

$$x_{eissssi,eissssj}^{EISSS} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer eissssi kategorisine ait eissssj elektrikli ısıtma sıcak su} \\ & \text{sistemi alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \end{cases} \quad d.d$$

EOISSSi elektrikli olmayan ısıtma sıcak su sistemleri için alternatif kategorileri gösterebilirsin, EOISSSj bu kategorilerin altındaki cihaz alternatiflerini gösterebilirsin. eoissssi=1, ... , EOISSSi ve eoissssj=1, ... , EOISSSj olsun. Bu durumda;

$$x_{eoissssi,eoissssj}^{EOISSS} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer eoissssi kategorisine ait eoissssj elektrikli olmayan} \\ & \text{ısıtmamasıcak su sistemi alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \end{cases} \quad d.d$$

f) Güneş Kolektörü sistemleri için

GKi güneş kolektörü sistemleri için cihaz alternatiflerini gösterebilirsin. gki=1, ... , GKi olsun. Bu durumda;

$$x_{gk}^{GK} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer gki güneş kolektörü sistemi} \\ & \text{alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \end{cases} \quad d.d$$

Yukarıda ifade edilen sistemlerden bazıları birden çok işleve hitap etmektedir. Bu bağlamda her işlev için bir adet sistemin seçilmesini garanti altına almak gerekir. Bu yüzden aşağıdaki kısıtlar modele eklenmelidir.

- Alternatif ısıtma sistemlerinden sadece 1 tanesinin seçilmesi için:

$$\sum_{eisi=1}^{EISi} \sum_{eissj=1}^{EISSj} x_{eisi,eissj}^{EIS} + \sum_{eoissi=1}^{EOISSi} \sum_{eoissj=1}^{EOISSj} x_{eoissi,eoissj}^{EOISS} + \sum_{issi=1}^{ISSi} \sum_{issj=1}^{ISSj} x_{issi,issj}^{ISS} + \sum_{eissssi=1}^{EISSSi} \sum_{eissssj=1}^{EISSSj} x_{eissssi,eissssj}^{EISSS} + \sum_{eoissssi=1}^{EOISSSi} \sum_{eoissssj=1}^{EOISSSj} x_{eoissssi,eoissssj}^{EOISSS} = 1$$

- Alternatif soğutma sistemlerinden sadece 1 tanesinin seçilmesi için:

$$\sum_{ssi=1}^{SSi} \sum_{ssj=1}^{SSj} x_{ssi,ssj}^{SS} + \sum_{issi=1}^{ISSi} \sum_{issj=1}^{ISSj} x_{issi,issj}^{ISS} = 1$$

- Alternatif sıcak su sistemlerinden sadece 1 tanesinin seçilmesi için:

$$\sum_{ess_i=1}^{ESS_i} \sum_{ess_j=1}^{ESS_j} x_{ess_i,ess_j}^{ESS} + \sum_{eiss_i=1}^{EISS_i} \sum_{eiss_j=1}^{EISS_j} x_{eiss_i,eiss_j}^{EISS} + \sum_{eoiiss_i=1}^{EOISS_i} \sum_{eoiiss_j=1}^{EOISS_j} x_{eoiiss_i,eoiiss_j}^{EOISS} = 1$$

- Alternatif güneş kolektörü sistemlerinden sadece 1 tanesinin seçilmesi için:

$$\sum_{gk=1}^{GK} x_{gk}^{GK} = 1$$

gk= 1, ... , GK

A.1.3. Aydınlatma Sistemleri

L aydınlatma sistemleri için cihaz alternatiflerini gösterebilir. l=1, ... , L olsun. Bu durumda x_l^{Ayd} karar değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$x_l^{Ayd} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } l \text{ aydınlatma armatürü alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

Önerilen aydınlatma alternatifleri arasından yalnızca bir çeşidinin seçilebilmesi için;

$$\sum_{l=1}^L x_l^{Ayd} = 1$$

A.1.4. Elektrikli Cihazlar

ECSi binada kullanılan elektrikli cihazlar için alternatif kategorileri gösterebilir, ECSj bu kategorilerin altındaki cihaz alternatiflerini gösterebilir. ecsi=1, ... , ECSi ve ecsj=1, ... , ECSj olsun. Bu durumda;

$$x_{ecsi,ecsj}^{ECS} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } ecsi \text{ kategorisine ait } ecsj \text{ elektrikli cihaz} \\ & \text{alternatifi seçilmişse} \\ 0, & \text{d.d} \end{cases}$$

Önerilen elektrikli cihaz alternatifleri arasından yalnızca bir çeşidinin seçilebilmesi için;

$$\sum_{ecsj=1}^{ECS_j} x_{ecsi,ecsj}^{ECS} = 1$$

Önerilen her bir elektrikli cihaz kategorisinden bir adet cihaz seçilebilmesi için;

$$\sum_{ecsi=1}^{ECS_i} \sum_{ecsj=1}^{ECS_j} x_{ecsi,ecsj}^{ECS} = ECS_i$$

A.2. Kısıtlar ve Amaç Fonksiyonları

Amaç binanın yıllık enerji tüketimini, ilk yatırım maliyetini ve CO₂ emisyonunu minimize etmektir. Böylece ilk yatırımda yapılacak harcamalar düşük tutulurken, binanın enerji tüketimi ve çevreye verdiği zarar minimuma indirgenir.

Min[g₁(x)]=Q_T (Enerji Tüketimi Minimizasyonu)

Min[g₂(x)]=Y_T (Yatırım Maliyeti Minimizasyonu)

Min[g₃(x)]=CO₂^T (CO₂ Emisyonunun Minimizasyonu)

A.2.1. Toplam Yıllık Enerji Tüketimi

Binanın yıllık toplam enerji tüketimine etki eden ana faktörler binanın ısıtma enerjisi ihtiyacı, soğutma enerjisi ihtiyacı, sıcak su ihtiyacı, aydınlatma ihtiyacı ve binada kullanılan cihazların elektrik tüketimlerinin toplamından oluşmaktadır.

$$Q_T = Q_{Is1} + Q_{Soğ} + Q_{SıcSu} + Q_{Ayd} + Q_{Cih}$$

Isıtma için tüketilen enerji miktarı ($Q_{Isıt}$):

$Q_e^{Isıt}$ elektrikli ısıtma sistemlerinin yıllık tüketimi, $Q_{eo}^{Isıt}$ elektrikli olmayan ısıtma sistemlerinin tüketimini ifade etmek üzere, yıllık toplam ısıtma enerjisi ihtiyacı:

$$Q_{Isıt} = Q_e^{Isıt} + Q_{eo}^{Isıt} \text{ olur.}$$

Elektrikli ve elektrikli olmayan cihaz alternatiflerinin verimleri farklı olduğu için her bir kategori için verimlilik değerlerinin ayrı ayrı hesaplanması gerekir. $Q_{yıl}^{Isıt}$ toplam yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacını belirtmek üzere;

$$Q_e^{Isıt} = Q_{yıl}^{Isıt} v_e^{Isıt}$$

$$Q_{eo}^{Isıt} = Q_{yıl}^{Isıt} v_{eo}^{Isıt} \text{ olur.}$$

$$v_e^{Isıt} = \sum_{eisi=1}^{EISi} \sum_{etsj=1}^{EISj} \frac{x_{eisi,etsj}^{EIS}}{v_{eisi,etsj}^{EIS}} + \sum_{issj=1}^{ISSj} \sum_{issj=1}^{ISSj} \frac{x_{issj,issj}^{ISS}}{v_{issj,issj}^{ISS}} + \sum_{eissj=1}^{EISSj} \sum_{eissj=1}^{EISSj} \frac{x_{eissj,eissj}^{EISS}}{v_{eissj,eissj}^{EISS}}$$

$$v_{eo}^{Isıt} = \sum_{eosis=1}^{EOISi} \sum_{eosis=1}^{EOISj} \frac{x_{eosis,eosis}^{EOIS}}{v_{eosis,eosis}^{EOIS}} + \sum_{eioissj=1}^{EOISSi} \sum_{eioissj=1}^{EOISSj} \frac{x_{eioissj,eioissj}^{EOISS}}{v_{eioissj,eioissj}^{EOISS}}$$

$v_e^{Isıt}$, $v_{eo}^{Isıt}$: Elektrikli ve elektrikli olmayan sistemlerin verimi.

$v_{eisi,etsj}^{EIS}$, $v_{issj,issj}^{ISS}$, $v_{eissj,eissj}^{EISS}$, $v_{eosis,eosis}^{EOIS}$, $v_{eioissj,eioissj}^{EOISS}$: İlgili kategorilere ait ısıtma cihazlarının verimleri.

Hesaplama Metodu:

Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı aylık ihtiyaçların ($Q_{ay}^{Isıt}$) toplanması ile bulunur.

$$Q_{yıl}^{Isıt} = \sum_{ay=1}^{12} Q_{ay}^{Isıt}$$

$$Q_{ay}^{Isıt} = \begin{cases} [H(\theta_i - \theta_e) - \eta_{ay}(\emptyset_{i,ay} + \emptyset_{s,ay})], & \text{Eğer pozitifse} \\ 0, & \text{d.d.} \end{cases}$$

$Q_{yıl}^{Isıt}$: Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı (W)

$Q_{ay}^{Isıt}$: Aylık ısıtma enerjisi ihtiyacı (W)

H : Binanın özgül ısı kaybı (W/K)

θ_i , θ_e : Aylık ortalama iç ve dış sıcaklıklar (°C)

η_{ay} : Kazançlar için aylık ortalama kullanım faktörü

$\emptyset_{i,ay}$: Aylık ortalama iç kazançlar (W)

$\emptyset_{s,ay}$: Aylık ortalama güneş enerjisi kazancı (W)

1- Binanın özgül ısı kaybının (H) hesabı

Binanın özgül ısı kaybı (H), iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı (H_T) ve havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybının (H_V) toplanması ile bulunur.

$$H = H_T + H_V$$

H_T : İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı (W/K)

H_V : Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı (W/K)

2- İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybının (H_T) hesaplanması

$$H_T = \sum AU + IU_l$$

$$H_T = A_{Kapı} \sum_{k=1}^K (x_k^{Kapı} U_k^{Kapı}) + A_{Pen} \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z (x_{pz}^{Pen} U_{pz}^{Pen}) + A_{Duv} \sum_{d=1}^D (x_d^{Duv} U_d^{Duv})$$

$$+ A_{YDuv} \sum_{yd=1}^{YD} (x_{yd}^{YDuv} U_{yd}^{YDuv}) + 0,8 A_{Tav} \sum_{tav=1}^{TAV} (x_{tav}^{Tavan} U_{tav}^{Tavan})$$

$$+ 0,5 A_{Tab} \sum_{tab=1}^{TAB} (x_{tab}^{Taban} U_{tab}^{Taban})$$

$U_k^{Kapı}$, U_{pz}^{Pen} , U_d^{Duv} , U_{yd}^{YDuv} , U_{tav}^{Tavan} , U_{tab}^{Taban} : İlgili kategorilere ait ısı geçirenlik katsayıları (W/ m²K)

$A_{Kapı}$, A_{Pen} , A_{Duv} , A_{YDuv} , A_{Tav} , A_{Tab} : Projeye göre ilgili kategorilerin toplam alanları (m²)

Binada yalıtım olduğu için ısı köprüsü (IU_I) ve temas değerleri model dışında bırakılmıştır.

3-Isıl geçirgenlik katsayısı (U) değerlerinin hesaplanması:

Kapı, pencere gibi ekipmanların kataloglarında bulunan U değerleri hesaplama için kullanılırken, duvar, tavan gibi katmanlardan oluşan yapıların U değerlerinin aşağıdaki gibi hesaplanması gerekmektedir. $d_{d,y}^{Duv}$, $d_{yd,y}^{YDuv}$, $d_{tav,y}^{Tavan}$, $d_{tab,y}^{Taban}$ değerleri yalıtım kalınlıkları için belirsizdir ve karar değişkeni olarak yer alır. Geliştirilen yazılım çözüm sonunda uygun yalıtım kalınlığı değerini hesaplayarak sunmaktadır.

$$U_d^{duvar} = \left(\frac{1}{R_i} + \sum_{bk_{duvar}=1}^{BK_{duvar}} \frac{d_{d,bk}^{Duv}}{\lambda_{d,bk}^{Duv}} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yalıtım} \left(\frac{d_{d,y}^{Duv}}{\lambda_{d,y}^{Duv}} \right) + \frac{1}{R_e} \right)^{-1}$$

$$U_{yd}^{Yduvar} = \left(\frac{1}{R_i} + \sum_{bk_{Yduvar}=1}^{BK_{Yduvar}} \frac{d_{yd,bk}^{YDuv}}{\lambda_{yd,bk}^{YDuv}} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yalıtım} \left(\frac{d_{yd,y}^{YDuv}}{\lambda_{yd,y}^{YDuv}} \right) + \frac{1}{R_e} \right)^{-1}$$

$$U_{tav}^{Tavan} = \left(\frac{1}{R_i} + \sum_{bk_{tav}=1}^{BK_{tav}} \frac{d_{tav,bk}^{Tavan}}{\lambda_{tav,bk}^{Tavan}} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yalıtım} \left(\frac{d_{tav,y}^{Tavan}}{\lambda_{tav,y}^{Tavan}} \right) + \frac{1}{R_e} \right)^{-1}$$

$$U_{tab}^{Taban} = \left(\frac{1}{R_i} + \sum_{bk_{tab}=1}^{BK_{tab}} \frac{d_{tab,bk}^{Taban}}{\lambda_{tab,bk}^{Taban}} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yalıtım} \left(\frac{d_{tab,y}^{Taban}}{\lambda_{tab,y}^{Taban}} \right) + \frac{1}{R_e} \right)^{-1}$$

R_i , R_e : İç ve dış yüzeylerin ısı iletim direnci (m²K/W)

$d_{d,bk}^{Duv}$, $d_{yd,bk}^{YDuv}$, $d_{tav,bk}^{Tavan}$, $d_{tab,bk}^{Taban}$: İlgili kategoriye ait bilinen katmanların kalınlıkları (m)

$d_{d,y}^{Duv}$, $d_{yd,y}^{YDuv}$, $d_{tav,y}^{Tavan}$, $d_{tab,y}^{Taban}$: İlgili kategoriye ait bilinmeyen (yalıtım) katmanlarının kalınlıkları (m)

$\lambda_{d,bk}^{Duv}$, $\lambda_{yd,bk}^{YDuv}$, $\lambda_{tav,bk}^{Tavan}$, $\lambda_{tab,bk}^{Taban}$: İlgili kategoriye ait bilinen katmanların ısı iletim hesap değeri (W/mK)

$\lambda_{d,y}^{Duv}$, $\lambda_{yd,y}^{YDuv}$, $\lambda_{tav,y}^{Tavan}$, $\lambda_{tab,y}^{Taban}$: İlgili kategoriye ait bilinmeyen katmanların (yalıtım) ısı iletim hesap değeri (W/mK)

4-Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybının (H_v) hesaplanması

$$H_v = 0.33n_h V_h$$

n_h : Hava değişim oranı (h^{-1})

V_h : Havalandırılan hacim ($0,8 \times V_{Brüt}$) (m³)

$V_{Brüt}$: Binanın ısıtılan brüt hacmi (m³)

1- Aylık ortalama iç kazançların ($\emptyset_{i,ay}$) hesaplanması

İç kazançlar aşağıda verilenleri kapsar:

- İnsanlardan kaynaklanan metabolik ısı kazançları,
- Sıcak su sisteminden kaynaklanan ısı kazançları,
- Yemek pişirme işleminden kaynaklanan ısı kazançları,

- Aydınlatma sisteminden kaynaklanan ısı kazançları,
- Binalarda kullanılan muhtelif elektrikli cihazlardan kaynaklanan ısı kazançları.

Yüksek iç enerji kazançlı binalarda $\emptyset_{i,ay} = 10 \times A_n$ (W) olarak alınabilir.

A_n : Bina kullanım alanı (m^2)

$$A_n = 0,32 \times V_{brüt}$$

5-Aylık ortalama güneş enerjisi kazançlarının ($\emptyset_{s,ay}$) hesaplanması Pencerelerden sağlanan doğrudan güneş ışınımı kazançlarının hesaplanmasını içermektedir.

$$\emptyset_{s,ay} = \sum_{ay} \sum_{yön} \left(r_{ay,yön} I_{ay,yön} A_{yön} \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z (x_{pz}^{Pen} g_{pz}^{Pen}) \right)$$

$r_{ay,yön}$: "yön" yönünde saydam yüzeylerin aylık gölgelenme faktörü

$I_{ay,yön}$: "yön" yönünde dik yüzeylere gelen aylık güneş ışınım şiddeti (W/m^2)

$A_{yön}$: "yön" yönündeki toplam pencere alanı (m^2)

g_{pz}^{Pen} : p pencere alternatifi ve z alt çeşidi için saydam yüzeylerin güneş enerjisi geçirme faktörü

$$g_{pz}^{Pen} = F_w g$$

F_w : Camlar için düzeltme faktörüdür.

g : Lâboratuvar şartlarında ölçülen ve yüzeye dik gelen ışın için güneş enerjisi geçirme faktörüdür.

6-Kazanç kullanım faktörünün (η_{ay}) hesaplanması

Aylık ortalama kazanç kullanım faktörü, aşağıda verildiği gibi hesaplanmalıdır.

$$\eta_{ay} = 1 - e^{(-1/KKO_{ay})}$$

KKO_{ay} : Aylık kazanç kayıp oranı

$KKO_{ay} = (\emptyset_{i,ay} + \emptyset_{s,ay})/H(\theta_i - \theta_e)$ olur. Hesaplama kolaylığı açısından çalışmamızda 0,9 kabul edilmiştir.

Soğutma için tüketilen enerji miktarı ($Q_{soğ}$):

Soğutma için gerek duyulan enerji ihtiyacı ısıtma ihtiyacına benzer şekilde hesaplanmıştır. Soğutma hesabında mahal için ısı kazançları dikkate alınmaktadır. Soğutma için kullanabileceğimiz sistem alternatifleri sadece elektrikli sistemleri içerdiğinden herhangi bir ayrıma gerek yoktur.

$$Q_{soğ} = Q_e^{Soğ} \text{ olur.}$$

$Q_{yıl}^{Soğ}$ toplam yıllık soğutma enerjisi ihtiyacını belirtmek üzere, soğutma cihazlarının verimlilikleri dikkate alınarak;

$$Q_e^{Soğ} = Q_{yıl}^{Soğ} v_e^{Soğ} \text{ olur.}$$

$$v_e^{Soğ} = \sum_{ssi=1}^{SSI} \sum_{ssj=1}^{SSJ} \frac{x_{ssi,ssj}^{SS}}{v_{ssi,ssj}^{SS}} + \sum_{issj=1}^{ISSJ} \sum_{issi=1}^{ISSI} \frac{x_{issi,issj}^{ISS}}{v_{issi,issj}^{ISS}}$$

$v_e^{Soğ}$: Soğutma sistemlerinin verimi.

$v_{ssi,ssj}^{SS}$, $v_{issi,issj}^{ISS}$: İlgili kategorilere ait soğutma cihazlarının verimleri.

Hesaplama Metodu:

Yıllık soğutma enerjisi ihtiyacı aylık ihtiyaçların ($Q_{ay}^{Soğ}$) toplanması ile bulunur.

$$Q_{yıl}^{Soğ} = \sum_{ay=1}^{12} Q_{ay}^{Soğ}$$

$$Q_{ay}^{Soğ} = \begin{cases} Q_i + Q_h + Q_{ik} + Q_{g,ay}, & \text{Eğer pozitifse} \\ 0, & \text{d.d.} \end{cases}$$

$Q_{yıl}^{Soğ}$: Yıllık soğutma enerjisi ihtiyacı (W)

$Q_{ay}^{Soğ}$: Aylık soğutma enerjisi ihtiyacı (W)

Q_i : İletim ısı kazancı (W)

Q_h : Hava değişimi ısı kazancı (W)

Q_{ik} : İç ısı kazançları (W)

$Q_{g,ay}$: Güneş enerjisi kazançları (W)

7-İletim ısı kazancının (Q_i) hesaplanması

Binada iletim yoluyla oluşan ısı kazançları aşağıdaki şekilde modele eklenir. U değerlerinin hesaplanması önceki bölümde ifade edilmiştir.

$Q_i = H_s(\theta_e - \theta_i)$

$$H_s = A_{K_{Kapı}} \sum_{k=1}^K (x_k^{Kapı} U_k^{Kapı}) + A_{Pen} \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z (x_{pz}^{Pen} U_{pz}^{Pen}) + A_{Duv} \sum_{d=1}^D (x_d^{Duv} U_d^{Duv}) + A_{YDuv} \sum_{y=1}^{YD} (x_{yd}^{YDuv} U_{yd}^{YDuv}) + A_{Tav} \sum_{tav=1}^{TAV} (x_{tav}^{Tav} U_{tav}^{Tav}) + A_{Tab} \sum_{tab=1}^{TAB} (x_{tab}^{Tab} U_{tab}^{Tab})$$

H_s : Binanın özgül ısı kazancı (W/K)

θ_i, θ_e : Aylık ortalama iç ve dış sıcaklıklar ($^{\circ}C$)

$U_k^{Kapı}, U_{pz}^{Pen}, U_d^{Duv}, U_{yd}^{YDuv}, U_{tav}^{Tav}, U_{tab}^{Tab}$: İlgili kategorilere ait ısı geçirgenlik katsayıları (W/ m^2K)

$A_{Kapı}, A_{Pen}, A_{Duv}, A_{YDuv}, A_{Tav}, A_{Tab}$: Projeye göre ilgili kategorilerin toplam alanları (m^2)

8-Hava değişimi ısı kazancının (Q_h) hesaplanması

$Q_h = n_h V_h (h_e - h_i) \rho_h$

n_h : Hava değişim oranı (h^{-1})

V_h : Havalandırılan hacim ($0,8 \times V_{Brüt}$) (m^3)

$V_{Brüt}$: Binanın ısıtılan brüt hacmi (m^3)

h_e, h_i : Dış ve iç havanın entalpisi (kJ/kg)

ρ_h : Havanın yoğunluğu (kg/ m^3)

9-İç ısı kazançlarının (Q_{ik}) hesaplanması

Yüksek iç enerji kazançlı binalarda $Q_{ik} = n W Z_0$ olarak alınabilir.

n : Adet (Hesapta kullanılan cihaz veya insan adedi)

W : Isı yükü (W)

Z_0 : Günlük çalışma saati

10-Aylık ortalama güneş enerjisi kazançlarının ($\emptyset_{g,ay}$) hesaplanması

Pencerelerden sağlanan doğrudan güneş ışınımı kazançlarının hesaplanmasını içermektedir.

$$\emptyset_{s,ay} = \sum_{ay}^{AY} \sum_{yön}^{YÖN} \left(r_{ay,yön} I_{ay,yön} A_{yön} \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z (x_{pz}^{Pen} g_{pz}^{Pen}) \right)$$

$r_{ay,yön}$: "yön" yönünde saydam yüzeylerin aylık gölgelenme faktörü

$I_{ay,yön}$: "yön" yönünde dik yüzeylere gelen aylık güneş ışınım şiddeti (W/ m^2)

$A_{yön}$: "yön" yönündeki toplam pencere alanı (m^2)

g_{pz}^{Pen} : p pencere alternatifi ve z alt çeşidi için saydam yüzeylerin güneş enerjisi geçirme faktörü

$g_{pz}^{Pen} = F_w g$

F_w : Camlar için düzeltme faktörüdür.

g : Lâboratuvar şartlarında ölçülen ve yüzeye dik gelen ışın için güneş enerjisi geçirme faktörüdür.

Sıcak su için tüketilen enerji miktarı ($Q_{SıcSu}$):

Modelimizde toplam yıllık sıcak su için tüketilen enerjinin hesaplanmasında elektrikli sıcak su sistemleri ve elektrikli olmayan sıcak su sistemleri olmak üzere iki farklı alternatif vardır. Q_e^{Sicsu} elektrikli sıcak su sistemlerinin yıllık tüketimini, Q_{eo}^{Sicsu} elektrikli olmayan sıcak su sistemlerinin tüketimini ifade etmek üzere, yıllık toplam sıcak su enerjisi ihtiyacı:

$$Q_{Sicsu} = Q_e^{Sicsu} + Q_{eo}^{Sicsu} \text{ olur.}$$

Buraya kadar olan enerji tüketimi normal bir binada sıcak su için harcanacak tüketimi vermektedir. Fakat modelimizde güneş kollektörü alternatifleri bulunmaktadır. Güneş kollektöründen elde edilecek enerjinin (Q_{yil}^{Gk}) hesaplanarak toplam tüketimden düşülmesi gerekir. Bu durum modele aşağıdaki şekilde eklenir.

$$Q_{Sicsu} = Q_e^{Sicsu} + Q_{eo}^{Sicsu} - Q_{yil}^{Gk} \text{ olur.}$$

İlk aşamada tüketim değerlerini hesaplamamız gerekir. Elektrikli ve elektrikli olmayan cihaz alternatiflerinin verimleri farklı olduğu için her bir kategori için verimlilik değerlerinin ayrı ayrı hesaplanması gerekir. Q_{yil}^{Sicsu} toplam yıllık sıcak su enerjisi ihtiyacını belirtmek üzere;

$$Q_e^{Sicsu} = Q_{yil}^{Sicsu} v_e^{Sicsu}$$

$$Q_{eo}^{Sicsu} = Q_{yil}^{Sicsu} v_{eo}^{Sicsu} \text{ olur.}$$

$$v_e^{Sicsu} = \sum_{essi=1}^{ESSi} \sum_{essj=1}^{ESSj} \frac{x_{essi,essj}^{ESS}}{v_{essi,essj}^{ESS}} + \sum_{eissi=1}^{EISSi} \sum_{eissj=1}^{EISSj} \frac{x_{eissi,eissj}^{EISS}}{v_{eissi,eissj}^{EISS}}$$

$$v_{eo}^{Sicsu} = \sum_{eoissi=1}^{EOISSi} \sum_{eoissj=1}^{EOISSj} x_{eoissi,eoissj}^{EOISS}$$

v_e^{Sicsu} , v_{eo}^{Sicsu} : Elektrikli ve elektrikli olmayan sıcak su sistemlerinin verimi.

$v_{essi,essj}^{ESS}$, $v_{eissi,eissj}^{EISS}$, $v_{eoissi,eoissj}^{EOISS}$: İlgili kategorilere ait sıcak su cihazlarının verimleri.

Hesaplama Metodu:

Yıllık sıcak su enerjisi ihtiyacı (Q_{yil}^{Sicsu}) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$Q_{yil}^{Sicsu} = m_{ss} c_{su} (\theta_{çıkış}^{su} - \theta_{giriş}^{su}) t_{yil}$$

Q_{yil}^{Sicsu} : Yıllık sıcak su enerjisi ihtiyacı (kcal)

m_{ss} : Sıcak su ihtiyacı (lt/h)

c_{su} : Suyun özgül ısısı (1 kcal/kg°C)

$\theta_{çıkış}^{su}$, $\theta_{giriş}^{su}$: Suyun giriş ve çıkış sıcaklıkları (°C)

t_{yil} : Yıllık çalışma süresi (h)

İkinci aşamada güneş kollektöründen elde edilecek enerji tasarrufu (Q_{yil}^{Gk}) modele eklenir. Buraya kadar olan enerji tüketimi normal bir binada sıcak su için harcanacak tüketimi vermektedir. Fakat modelimizde güneş kollektörü alternatifleri bulunmaktadır. Güneş kollektöründen elde edilecek enerjinin hesaplanarak toplam tüketimden düşülmesi gerekir. Bu durum modele aşağıdaki şekilde eklenir.

$$Q_{yil}^{Gk} = \sum_1^{12} Q_{ay}^{Gk}$$

$$Q_{ay}^{Gk} = A_{gk} I_{gk,ay} \sum_{gk}^{GK} x_{gk}^{GK} v_{gk}^{GK}$$

Q_{ay}^{Gk} : Güneş kollektöründen elde edilen enerji (kWh)

A_{gk} : Güneş kollektörü alanı (m²)

$I_{gk,ay}$: Aylık kollektör kazancı (kcal/m²gün)

v_{gk}^{GK} : İlgili kollektör alternatifinin verimi

Aydınlatma için tüketilen enerji miktarı (Q_{Ayd}):

Kullanılan aydınlatma armatürlerinin seçimine göre binanın yıllık enerji tüketimi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_{Ayd} = t_{yul} \sum_{l=1}^L n_{Ayd,l} P_{Ayd,l} x_l^{Ayd}$$

Q_{Ayd} : Yıllık aydınlatma enerjisi tüketimi (kWh)

$n_{Ayd,l}$: İlgili aydınlatma armatürünün adedi

$P_{Ayd,l}$: İlgili aydınlatma armatürünün kullandığı güç (W)

t_{yul} : Yıllık çalışma süresi (h)

Elektrikli cihazlar için tüketilen enerji miktarı (Q_{Cih}):

Binada kullanılması düşünülen elektrikli cihaz alternatiflerine ait enerji tüketimleri aşağıdaki şekilde modele eklenir.

$$Q_{Cih} = \sum_{ecsi=1}^{ECSi} \sum_{ecsj=1}^{ECSj} t_{yul,ecsi} n_{ecsi}^{ECS} P_{ecsi,ecsj}^{ECS} x_{ecsi,ecsj}^{ECS}$$

Q_{Cih} : Elektrikli cihazların yıllık enerji tüketimi (kWh)

$n_{ecsi,ecsj}^{ECS}$: İlgili kategorideki cihaz adedi

$P_{ecsi,ecsj}^{ECS}$: İlgili elektrikli cihazın kullandığı güç (W)

$t_{yul,ecsi}$: İlgili kategorideki cihazın yıllık çalışma süresi (h)

A.2.2. Toplam İlk Yatırım Maliyeti

Binanın ilk yatırım maliyetine etki eden faktörler kullanılan malzeme ve sistemler olarak sınıflandırılabilir. İlk yatırım maliyetinin düşürülmesi ikinci amaç fonksiyonumuzu oluşturmaktadır. Bu fonksiyon aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

İlk Yatırım Maliyeti = $Mal_{Kapı} + Mal_{Pen} + Mal_{Yal} + Mal_{Duvar} + Mal_{YDuvar} + Mal_{Tavan} + Mal_{Taban} + Mal_{Is1} + Mal_{Soğ} + Mal_{S1cSu} + Mal_{Is1Soğ} + Mal_{Is1Su} + Mal_{GK} + Mal_{Ayd} + Mal_{ECS}$

$Mal_{Kapı}$, Mal_{Pen} , Mal_{Yal} , Mal_{Duvar} , Mal_{YDuvar} , Mal_{Tavan} , Mal_{Taban} , Mal_{Is1} , $Mal_{Soğ}$, Mal_{S1cSu} , $Mal_{Is1Soğ}$, Mal_{Is1Su} , Mal_{GK} , Mal_{Ayd} , Mal_{ECS} : Sırasıyla kapı, pencere, yalıtım, duvar, yapı duvarı, tavan, taban, ısıtma sistemi, soğutma sistemi, sıcak su sistemi, ısıtma-soğutma sistemi, ısıtma-sıcak su sistemi, güneş kollektörü, aydınlatma ve elektrikli cihazlar için ilk yatırım maliyeti.

Kapı alternatifi için toplam maliyet hesabı:

$$Mal_{Kapı} = A_{Kapı} \sum_{k=1}^K (x_k^{Kapı} m_k^{Kapı})$$

$m_k^{Kapı}$: k kapı alternatifinin m^2 maliyeti (TL/ m^2)

Pencere alternatifi için toplam maliyet hesabı:

$$Mal_{Pen} = A_{Pen} \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z (x_{pz}^{Pen} m_{pz}^{Pen})$$

m_{pz}^{Pen} : p kategorisi z pencere alternatifinin m^2 maliyeti (TL/ m^2)

Duvar alternatifi için toplam maliyet hesabı:

$$Mal_{Duv} = A_{Duv} \sum_{d=1}^D \left(x_d^{duv} \left(\sum_{bk_{duvar}=1}^{BK_{duvar}} m_{d,bk}^{Duv} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yal} (m_{d,y}^{Yal}) \right) \right)$$

$m_{d,bk}^{Duv}$: d tip duvarın bk bilinen katmanının m^2 maliyeti (TL/ m^2)

$m_{d,y}^{Yal}$: d tipi duvarın y yalıtım katmanının m^2 maliyeti (TL/ m^2)

Yapı duvarı alternatifi için toplam maliyet hesabı:

$$Mal_{YDuv} = A_{YDuv} \sum_{yd=1}^{YD} \left(x_{yd}^{Yduv} \left(\sum_{bk_{yduvar}=1}^{BK_{yduvar}} m_{yd,bk}^{YDuv} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yal} (m_{yd,y}^{Yal}) \right) \right)$$

$m_{yd,bk}^{YDuar}$: yd tipi yapı duvarının bk bilinen katmanının m^2 maliyeti (TL/ m^2)

$m_{yd,y}^{Yal}$: yd tipi yapı duvarının y yalıtım katmanının m^2 maliyeti (TL/ m^2)

Tavan alternatifi için toplam maliyet hesabı:

$$Mal_{Tavan} = A_{Tavan} \sum_{tav=1}^{TAV} \left(x_{tav}^{Tavan} \left(\sum_{bk_{tav}=1}^{BK_{tav}} m_{tav,bk}^{Tavan} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yal} (m_{tav,y}^{Yal}) \right) \right)$$

$m_{tav,bk}^{Tavan}$: tav tipi tavanın bk bilinen katmanının m^2 maliyeti (TL/ m^2)

$m_{tav,y}^{Yal}$: tav tipi tavanın y yalıtım katmanının m^2 maliyeti (TL/ m^2)

Taban alternatifi için toplam maliyet hesabı:

$$Mal_{Taban} = A_{Taban} \sum_{tab=1}^{TAB} \left(x_{tab}^{Taban} \left(\sum_{bk_{tab}=1}^{BK_{tab}} m_{tab,bk}^{Taban} + \sum_{y=1}^Y x_y^{Yal} (m_{tab,y}^{Yal}) \right) \right)$$

$m_{tab,bk}^{Taban}$: tab tipi tabanın bk bilinen katmanının m^2 maliyeti (TL/ m^2)

$m_{tab,y}^{Yal}$: tab tipi tabanın y yalıtım katmanının m^2 maliyeti (TL/ m^2)

Elektrikli ve elektrikli olmayan ısıtma sistemi alternatifleri için toplam maliyet:

$$Mal_{Isi} = \sum_{eisi=1}^{EISi} \sum_{eisj=1}^{EISj} (x_{eisi,eisj}^{EIS} m_{eisi,eisj}^{EIS}) + \sum_{eosis=1}^{EOISi} \sum_{eoisj=1}^{EOISj} (x_{eosis,eoisj}^{EOIS} m_{eosis,eoisj}^{EOIS})$$

$m_{eisi,eisj}^{EIS}$: eisi kategorisine ait eisj elektrikli ısıtma sisteminin ilk yatırım maliyeti (TL)

$m_{eosis,eoisj}^{EOIS}$: eosis kategorisine ait eoisj elektrikli olmayan ısıtma sisteminin ilk yatırım maliyeti (TL)

Elektrikli soğutma sistemi alternatifleri için toplam maliyet:

$$Mal_{Soğ} = \sum_{ssi=1}^{SSi} \sum_{ssj=1}^{SSj} (x_{ssi,ssj}^{SS} m_{ssi,ssj}^{SS})$$

$m_{ssi,ssj}^{SS}$: ssi kategorisine ait ssj elektrikli soğutma sisteminin ilk yatırım maliyeti (TL)

Elektrikli sıcak su sistemi alternatifleri için toplam maliyet:

$$Mal_{SıcSu} = \sum_{essi=1}^{ESSi} \sum_{essj=1}^{ESSj} (x_{essi,essj}^{ESS} m_{essi,essj}^{ESS})$$

$m_{essi,essj}^{ESS}$: essi kategorisine ait essj elektrikli sıcak su sisteminin ilk yatırım maliyeti (TL)

Elektrikli ısıtma-soğutma sistemi alternatifleri için toplam maliyet:

$$Mal_{IsıSoğ} = \sum_{issi=1}^{ISSi} \sum_{issj=1}^{ISSj} (x_{issi,issj}^{ISS} m_{issi,issj}^{ISS})$$

$m_{issi,issj}^{ISS}$: issi kategorisine ait issj elektrikli ısıtma-soğutma sisteminin ilk yatırım maliyeti (TL)

Elektrikli ve elektrikli olmayan ısıtma-sıcak su sistemi alternatifleri için toplam maliyet:

$$Mal_{IsıSu} = \sum_{eissi=1}^{EISSi} \sum_{eissj=1}^{EISSj} (x_{eissi,eissj}^{EISS} m_{eissi,eissj}^{EISS}) + \sum_{eioissi=1}^{EOISSi} \sum_{eioissj=1}^{EOISSj} (x_{eioissi,eioissj}^{EOISS} m_{eioissi,eioissj}^{EOISS})$$

$m_{eissi,eissj}^{EISS}$: eissi kategorisine ait eissj elektrikli ısıtma-sıcak su sisteminin ilk yatırım maliyeti (TL)

$m_{eioissi,eioissj}^{EOISS}$: eioissi kategorisine ait eioissj elektrikli olmayan ısıtma-sıcak su sisteminin ilk yatırım maliyeti (TL)

Güneş enerjisi sistemi alternatifleri için toplam maliyet:

$$Mal_{GK} = A_{gk} \sum_{gk=1}^{GK} (x_{gk}^{GK} m_{gk}^{GK})$$

m_{gk}^{GK} : gk güneş kolektörü alternatifinin m² maliyeti (TL/m²)
Aydınlatma sistemi alternatifleri için toplam maliyet:

$$Mal_{Ayd} = \sum_{l=1}^L (x_l^{Ayd} m_l^{Ayd} n_l^{Ayd})$$

m_l^{Ayd} : 1 aydınlatma alternatifinin maliyeti (TL)
Elektrikli cihaz alternatifleri için toplam maliyet:

$$Mal_{ECS} = \sum_{ecsi=1}^{ECSi} n_{ecsi}^{ECS} \sum_{ecsj=1}^{ECSj} (x_{ecsi,ecsj}^{ECS} m_{ecsi,ecsj}^{ECS})$$

$m_{ecsi,ecsj}^{ECS}$: ecsi kategorisine ait ecsj elektrikli cihaz alternatifinin maliyeti (TL)

A.2.3. Toplam Yıllık CO₂ Emisyonu

Toplam yıllık CO₂ emisyonu önceki bölümlerde anlatılan toplam enerji tüketimine bağlıdır. Elektrik ve elektrikli olmayan cihazların enerji tüketimlerine göre farklı CO₂ emisyon değerleri vardır. Söz konusu farklı emisyon değerleri elektrikli cihazlar için S_e , elektrikli olmayan cihazlar için S_d olursa, binanın toplam CO₂ emisyonu aşağıdaki şekilde bulunur.

$$CO_2^T = CO_2^{Isi} + CO_2^{Soğ} + CO_2^{SıcSu} + CO_2^{IsiSoğ} + CO_2^{IsiSu} + CO_2^{Ayd} + CO_2^{Cih}$$

$CO_2^{Isi}, CO_2^{Soğ}, CO_2^{SıcSu}, CO_2^{IsiSoğ}, CO_2^{IsiSu}, CO_2^{Ayd}, CO_2^{Cih}$:Sırasıyla ısıtma sistemi, soğutma sistemi, sıcak su sistemi, ısıtma-soğutma sistemi, ısıtma-sıcak su sistemi, aydınlatma ve elektrikli cihazlar için CO₂ emisyonu değeri (kg eşdeğer CO₂).

Elektrikli ve elektrikli olmayan ısıtma sistemi alternatifleri için CO₂ emisyonu:

$$CO_2^{Isi} = \sum_{eisi=1}^{EISi} \sum_{eisj=1}^{EISj} (x_{eisi,eisj}^{EIS} Q_{Isi} S_e) + \sum_{eosis=1}^{EOISi} \sum_{eosisj=1}^{EOISj} (x_{eosis,eosisj}^{EOIS} Q_{Isi} S_d)$$

CO_2^{Isi} : Elektrikli ve elektrikli olmayan ısıtma sistemleri için CO₂ emisyon değeri (kg eşdeğer CO₂)

S_e : Elektrikli sistemler için CO₂ emisyon değeri (kg eşdeğer CO₂/kWh)

S_d : Elektrikli olmayan sistemler için CO₂ emisyon değeri (kg eşdeğer CO₂/kWh)

Elektrikli soğutma sistemi alternatifleri için CO₂ emisyonu:

$$CO_2^{Soğ} = \sum_{ssi=1}^{SSi} \sum_{ssj=1}^{SSj} (x_{ssi,ssj}^{SS} Q_{Soğ} S_e)$$

$CO_2^{Soğ}$: Elektrikli soğutma sistemleri için CO₂ emisyon değeri (kg eşdeğer CO₂)

Elektrikli sıcak su sistemi alternatifleri için CO₂ emisyonu:

$$CO_2^{SıcSu} = \sum_{essi=1}^{ESSi} \sum_{essj=1}^{ESSj} (x_{essi,essj}^{ESS} Q_{SıcSu} S_e)$$

$CO_2^{SıcSu}$: Elektrikli sıcak su sistemleri için CO₂ emisyon değeri (kg eşdeğer CO₂)

Elektrikli ısıtma soğutma sistemi alternatifleri için CO₂ emisyonu:

$$CO_2^{IsiSoğ} = \sum_{issi=1}^{ISSi} \sum_{issj=1}^{ISSj} (x_{issi,issj}^{ISS} (Q_{Isi} + Q_{Soğ}) S_e)$$

$CO_2^{IsiSoğ}$: Elektrikli ısıtma soğutma sistemleri için CO_2 emisyon değeri (kg eşdeğer CO_2)

Elektrikli ve elektrikli olmayan ısıtma sıcak su sistemi alternatifleri için CO_2 emisyonu:

$$CO_2^{IsiSu} = \sum_{eissj=1}^{EISSi} \sum_{eissj=1}^{EISSj} (x_{eissj,eissj}^{EISS} (Q_{Isi} + Q_{SicSu}) S_e) + \sum_{eioissj=1}^{EOISSi} \sum_{eioissj=1}^{EOISSj} (x_{eioissj,eioissj}^{EOISS} (Q_{Isi} + Q_{SicSu}) S_d)$$

CO_2^{IsiSu} : Elektrikli ve elektrikli olmayan ısıtma sıcak su sistemleri için CO_2 emisyon değeri (kg eşdeğer CO_2)

Aydınlatma sistemi alternatifleri için CO_2 emisyonu:

$$CO_2^{Ayd} = \sum_{l=1}^L (x_l^{Ayd} Q_{Ayd} S_e)$$

CO_2^{Ayd} : Aydınlatma sistemleri için CO_2 emisyon değeri (kg eşdeğer CO_2)

Elektrikli cihaz alternatifleri için CO_2 emisyonu:

$$CO_2^{Cih} = \sum_{ecsj=1}^{ECSi} \sum_{ecsj=1}^{ECSj} (x_{ecsj,ecsj}^{ECS} Q_{Cih} S_e)$$

CO_2^{Cih} : Elektrikli cihaz alternatifleri için CO_2 emisyon değeri (kg eşdeğer CO_2)