



## Analyzing occupancy density with directional effect to optimize energy consumption in a university building using the response surface method

Resul Özlük\*<sup>ID</sup>, Yusuf Yıldız<sup>ID</sup>

Department of Architecture, Faculty of Architecture, Balıkesir University, 10463, Balıkesir, Türkiye

### Highlights:

- Educational building energy simulation and multi-objective optimization
- Statistical analysis of classroom usage with RSM
- The effect of four different directional parameters of building occupancy on energy consumption.

### Keywords:

- Building occupancy
- Multi-objective optimization
- Response surface method
- Energy efficiency
- Use of space in educational buildings.

### Article Info:

Research Article  
Received: 20.03.2024  
Accepted: 15.09.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1455889

### Correspondence:

Author: Resul Özlük  
e-mail: resulozlu7@gmail.com  
phone: +90 553 094 6236

### Graphical/Tabular Abstract

The impact of changes in classroom usage direction and building occupancy rates on energy consumption in the education building will be examined using the Response Surface Method (RSM). RSM method was used together with the energy simulation tool DesignBuilder and EnergyPlus to model the educational building and calculate energy consumptions. The RSM method was applied in three steps. These steps; Experimental design, creation of data using energy simulation and multi-objective optimization. Figure A shows the flowchart of these stages.

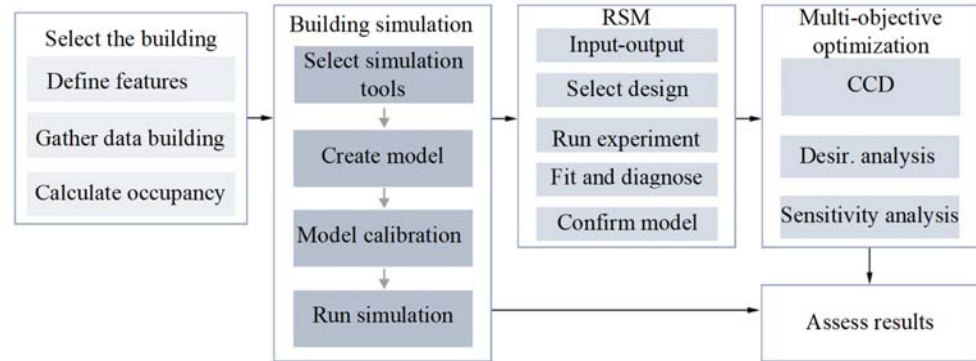


Figure A. Methodological flow chart

**Purpose:** The purpose of this study is to examine the effect of classroom use on energy consumption in university buildings, along with its directional effect. In this way, usage data of all classrooms in the selected university building will be generated and a study will be conducted to optimize energy consumption, taking into account the directional effect.

**Theory and Methods:** In this study, DesignBuilder, EnergyPlus and RSM methods were used for the modeling of the educational building, simulation and optimization of energy consumption, respectively.

**Results:** It has been determined that the occupancy rates of classrooms in the education building vary between 0.1 and 0.4. It was found that the highest occupancy rate was on Tuesday. The RSM method was used to optimize energy consumption by using the ranges of occupancy rates and the direction effect. The variance analysis results of the RSM model are significant and reliable for all academic periods. The multi-objective optimization model has been shown to be useful for optimizing energy consumption using ranges of occupancy rates. The most effective direction, occupancy rates and desirability values for optimum results vary.

**Conclusion:** With this study, it was seen that energy savings can be achieved by using the most appropriate occupancy rates in the right directions. With multi-purpose optimization, an energy saving of approximately 1.8% in heating consumption and approximately 9.3% in cooling consumption was achieved. Considering the effect of the parameters, the most effective parameter for heating energy consumption in all periods is the north occupancy rate, while the most effective parameter for cooling energy consumption is the west occupancy rate. Eastbound occupancy rate was the least effective parameter. As this study shows, a building operation that consumes less energy is possible with more accurate classroom placement.



## Yanıt yüzeyi yöntemi ile üniversite binasında enerji tüketimini optimize etmek için kullanıcı yoğunluğunun yön etkisiyle birlikte analiz edilmesi

Resul Özlük\*<sup>ID</sup>, Yusuf Yıldız<sup>ID</sup>

Balıkesir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 10463, Çağış, Balıkesir, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Eğitim binası enerji hesaplamalı simülasyonu ve çok amaçlı optimizasyonu
- Yanıt yüzey yöntemi ile uygun derslik kullanımının istatistiksel analizi
- Bina doluluğuna ait dört farklı yön parametresinin enerji tüketimi üzerine etkisi

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 20.03.2024

Kabul: 15.09.2024

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1455889

#### Anahtar Kelimeler:

Mekân doluluğu,  
çok amaçlı optimizasyon,  
yanıt yüzeyi yöntemi,  
enerji verimliliği,  
eğitim binalarında mekân  
kullanımı

#### ÖZ

Üniversite binaları, genellikle enerji tüketimi yüksek olan binalardır. Bu nedenle üniversite binaları enerji tasarrufunu sağlamak ve karbon salımını azaltmada önemli bir rol oynar. Son yıllarda öğrenci ve üniversite binası sayısında önemli artış görülmektedir. Bu artış, mekânların etkin kullanımının önemini arttırmaktadır. Genellikle üniversite binaları mekân yerleşimleri ve doluluk oranlarına dikkat edilmeden ısıtılıp soğutulmaktadır. Farklı yönlere bakan sınıflardaki optimum doluluk oranları ile bina enerji verimliliğini iyileştirmeyi amaçlayan bu çalışmada, hesaplamalı simülasyon ve çok amaçlı optimizasyonu bütünleştiren yanıt yüzey yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, bina simülasyonu için öncelikle bina doluluk oranları hesaplanmış ve hesaplamalar doğrultusunda çok amaçlı optimizasyon için tasarım çözümleri üretilmiştir. Farklı dönemlerde enerji tüketimlerine ait arzu edilebilirliğin yüksek olduğu optimum çözümler, aynı döneme ait sabah ve öğleden sonraki periyotlarda farklılık göstermesi en dikkat çekici bulgulardandır. Optimum çözümler ile ısıtma tüketiminde yaklaşık %2, soğutma tüketiminde ise %9,3 oranında enerji tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca ısıtma amaçlı enerji tüketimi için en etkili parametre kuzey yönlü dersliklere ait doluluk oranı iken soğutma amaçlı enerji tüketimi için en etkili parametre batı yönlü dersliklere ait doluluk oranı olmuştur. Doğu yönlü dersliklere ait doluluk oranının ise en az etkili parametre olduğu bulunmuştur. Bu çalışma, eğitim binalarında enerji tasarrufu için mekân kullanımı ve yerleşimi konusunda yapılacak gelecekteki araştırmalara yeni bir bakış sunmayı hedeflemektedir.

## Analyzing occupancy density with directional effect to optimize energy consumption in a university building using the response surface method

### H I G H L I G H T S

- Educational building energy simulation and multi-objective optimization
- Statistical analysis of classroom usage with response surface method
- The effect of four different directional parameters of building occupancy on energy consumption

#### Article Info

Research Article

Received: 20.03.2024

Accepted: 15.09.2024

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1455889

#### Keywords:

Building occupancy,  
multi-objective optimization,  
response surface method,  
energy efficiency,  
use of space in educational  
buildings

#### ABSTRACT

University buildings are generally buildings with high energy consumption. Therefore, university buildings play an important role in saving energy and reducing carbon emissions. In recent years, there has been a significant increase in the number of students and university buildings. This increase increases the importance of effective use of spaces. Mostly, university buildings are heated and cooled without paying attention to space layouts and occupancy rates. In this study, which aims to improve building energy efficiency with optimum occupancy rates in classrooms facing different directions, the RSM method integrating computational simulation and multi-objective optimization was used. In this study, building occupancy rates were first calculated for building simulation and design solutions were produced for multi-objective optimization in line with the calculations. One of the most important findings is that the occupancy rates of optimum solutions, where the desirability of energy consumption is high in different periods, differ in the morning and afternoon periods of the same period. With optimum solutions, energy savings of approximately 2% in heating consumption and 9.3% in cooling consumption were achieved. In addition, the most effective parameter for energy consumption for heating purposes was the northern occupancy rate, while the most effective parameter for energy consumption for cooling purposes was the western occupancy rate. Eastern occupancy rate was found to be the least effective parameter. This study aims to provide a new perspective on future research on space use and layout for energy saving in educational buildings.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*resulozluk7@gmail.com, yusufyildiz@balikesir.edu.tr / Tel: +90 553 094 6236

## 1. Giriş (Introduction)

Pandemi nedeniyle 2020'de dünya enerji tüketiminde yaşanan %4,5'lik bir düşüşün ardından, 2021'de %5'lik bir artış gerçekleşmiştir [1]. Sonraki yıllarda da artışın devam edeceği öngörülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) raporu, yapı çevrenin enerji kullanımının %34'ü ve enerjiyle ilgili karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salımının %37'sinden sorumlu olduğunu ifade eder [2]. Bu bağlamda, binalarda enerjinin etkin kullanımı sera gazı salımlarının azaltılması açısından önemlidir [3]. Yapılı çevrenin önemli bir bölümünü oluşturan üniversite, ticari ve ofis binaları enerji tüketimi yüksek kategorili binalar arasında yer alır [4]. Örneğin, ABD'deki üniversite binaları, toplam bina enerji tüketiminin yaklaşık %13'ünü oluşturmaktadır. Eğitim binalarındaki yoğun programlar ve doluluk oranları bunun ana sebepleri arasındadır [5]. Benzer şekilde, Çin'de kolejlerin ve üniversitelerin tükettiği enerji toplam tüketilen enerjinin %8'ine karşılık gelmektedir [6]. Üniversite binaları, enerji tüketimi yoğun binalar olmaları sebebiyle enerji tasarrufu konusunda önemli potansiyele sahiptirler [7]. Ayrıca bu binalar sosyal sorumluluk bilincine sahip kullanıcılar tarafından kullanılmaktadır [8]. Bu yüzden eğitim binalarında enerji verimliliği yalnızca karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sunmaz aynı zamanda sürdürülebilirlik konusunda yüksek bilince sahip yeni nesil kullanıcıların yetiştirilmesine de önemli katkı sağlarlar [9, 10]. Genel olarak üniversite binaları; öğretim elemanlarına ait ofisler, derslikler, toplantı odaları ve uygulama laboratuvarları gibi çeşitli mekânlardan oluşmaktadır. Ofisler hariç bu mekânlar genellikle belli zaman aralıklarında değişen sayıdaki öğrenci tarafından kullanılmaktadır [11]. Yeo vd. [12] üniversite binalarındaki doluluk oranlarının istikrarlı olmadığını belirtmiştir. Çoğunlukla üniversite binaları, doluluk ve alan kullanımına dikkat edilmeden sabit bir programda işletilmektedir. Bir binanın kullanımına, enerji verimliliği açısından bakıldığında kullanıcıların sayısı ve binada geçirdikleri süreler göz önüne alınmalıdır [13]. Yapılan çalışmalar, binaların çevresel etkilerinin büyük bir bölümünün kullanımları sırasında meydana geldiğini göstermiştir [14–16]. Ayrıca bina kullanımından kaynaklı enerji tüketiminin de toplam enerji tüketimi üzerinde önemli bir role sahip olduğu görülür [17–19]. Bu durum, yalnızca enerji verimli binalar tasarlanmanın değil daha büyük ölçekte enerji tüketimini azaltmak için konuya farklı açılardan da yaklaşmanın önemini vurgulamaktadır.

### 1.1. Literatür Taraması (Literature Review)

Binalarda doluluk oranları, enerji tüketimi ve iç ortam kalitesi ile ilgili önemli bir bilgidir [20]. Bina doluluğu, çalışma sürelerinden ve kullanım seviyelerinden etkilenir. Bu nedenle, bina doluluğu, yıllık kullanım süreleri ve ortalama doluluk oranları çarpımı ya da her bir kullanıcının mekânda geçirdiği saatlerin toplamıyla hesaplanabilir [21]. Bu tanımlara ek olarak doluluk oranı, kullanılan alanların mevcut alanlara oranı olarak da tanımlanabilir [22]. Binalarda doluluk oranlarını ölçmek ve modellemek için çeşitli yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerden en temel olanı anketlerdir. Fakat anket ile veri toplamak zaman alabilir ve hata oranı yüksek olabilir. Radyo frekanslı (RF) doluluk sensörleri, kullanıcı sayısının tespitinde yaygın olarak kullanılabilir. Kızılötesi, ultrason veya video kameralarından gelen bilgilere dayanan farklı yöntemler de mevcuttur [23]. Bir mekânda kullanıcıların sayısını tahmin etmek için CO<sub>2</sub> sensörlerinden de yararlanılmaktadır [24]. Ek olarak Küresel Konumlandırma Sistemi ve Kablosuz Yerel Alan Ağı (WLAN) gibi gelişmiş yöntemler de doluluk tespitinde kullanılmaktadır [25]. İlgili literatür incelendiğinde farklı bina tiplerinde; doluluk profilleri, kullanıcı davranışları ve faaliyetleri, mekân kullanımı ve enerji kullanımına dayalı derslik planlamalarının enerji tüketimi üzerine etkisini araştıran çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Mevcut binalarda, enerji tüketimi azaltma potansiyeli yüksek olduğu için doğru verimlilik çalışmaları ile enerji

tüketimini azaltmak mümkün olabilir. Lindberg vd. [13] doğru mekân kullanımının artmasının enerji verimliliği üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu doğrulamıştır. Wang ve Chen [26] doluluğun mekânlarda yanlış organizasyonu nedeniyle büyük hacimli odalarda klima sistemleri için ilave kontrol stratejisi önermektedir. Önerilen iki farklı strateji ile yaklaşık %13,5 ve %30,4 enerji tasarrufu sağlanmış ve bina kullanıcılarının ısı konforu üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Gul vd. [4] doluluk modelinin, binanın optimum enerji performansı için HVAC kontrol stratejilerinin yeniden belirlenmesine yardımcı olabileceği sonucuna ulaşmıştır. Doluluk, bir binaya ait HVAC sistemi için önemli parametrelerdendir. Zhao vd. [27] kullanıcıların pasif davranışlarını öğrenmek ve bunun farklı iklimlerde ofis binası HVAC enerji tüketimlerini nasıl etkileyebileceğini ortaya çıkarmak için daha az müdahaleci "dolaylı" bir veri madenciliği yaklaşımı geliştirmiştir. Simülasyon sonucu, tüm iklim bölgeleri için ısıtma enerjisinde ortalama %8,39 artış, soğutma enerjisinde %2,80 azalma ve fan enerjisinde %4,07 azalma olduğunu göstermektedir. Yang ve Gerber [28] ise HVAC sistemlerinin verimliliğini artırmak için mekân kullanımı odaklı bir yaklaşım önermiştir. Simülasyon sonuçları, doluluk profiline dayalı HVAC programlarının uygulanmasının, geleneksel programlara kıyasla %9'a kadar enerji tasarrufu sağlayabileceğini göstermiştir. Böylelikle benzer doluluk oranlarına sahip mekânları yan yana getirmek enerji tüketimini azaltmıştır. Dong ve Lam [29] bir odadaki gerçek kişi sayısı tespiti, çoğu mevcut algılama tekniğinin kapsamının ötesindedir. Bu sorunu ele almak için incelenen binada, karmaşık bir çevresel sensör ağı kullanmıştır. Bu yöntem ile doluluk seviyeleri ile ölçülen çevresel koşullar arasında önemli ilişkiler olduğu görülmektedir. Sonuçlar, kullanıcı davranışına dayalı kontrol yaklaşımı kullanılarak %87,5 termal konfor memnuniyeti ile %18,5 enerji tasarrufu sağlanabileceğini göstermektedir. Cabrera ve Zareipour [30] çalışmalarında doluluk ve aydınlatma amaçlı enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Sonuçlar, doğru verimlilik çalışmaları ile mevcut enerji kullanımının %70'i kadar bir tasarruf elde edilebileceğini doğrulamıştır.

Eğitim binalarında ders planlarının enerji tüketimi üzerindeki etkisi hakkında çalışmalar olsa da sınırlı sayıda kalmaktadır. Song vd. [31] ders planlarının, dersliklerde enerji tüketimi üzerindeki etkisinin belirsiz olduğu ve optimum zaman çizelgesinin %4 oranında enerji tasarrufu sağlayabileceğini göstermiştir. Cacchiani vd. [32] benzer şekilde ders planlarının dersliklerde enerji kullanımını nasıl etkilediğine dair çalışmaların yetersiz olduğu ve enerji kullanımına ilişkin sınırlamalar olduğunu ifade etmiştir. Bu nedenle müfredat tabanlı ders çizelgeleme problemi için alt sınırları hesaplama üzere yeni bir yöntem önermiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin mevcut alternatif formülasyonlarla bulunanlardan çok daha iyi sınırlar elde ettiğini göstermektedir. Ders planlarının ve doluluk profillerinin optimizasyonuna yönelik yapılan diğer çalışmalarda, zaman çizelgesini optimize etmenin enerji tüketimini azaltabileceğini göstermiştir [33–35]. Gui vd. [36] yükseköğretim binalarında mekân kullanımının da dikkate alınarak enerji tasarruf çalışmalarının yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. Bununla birlikte, Gui vd. [37] başka bir çalışmada, teknik iyileştirmelerin yanı sıra kampüsten kampüse değişen program ve doluluk konularına da odaklanılmasını önermişler ve Griffith Üniversitesi'nde, akademik takvimin 2 yarıyıldan 3 yarıyıla değiştirilmesi ile yıllık enerji tüketiminde yaklaşık %5'lik bir azalmanın gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Mevcut literatür incelendiğinde mekanların doğru yerleşimi, kullanıcı memnuniyetini ve bina enerji verimliliğini etkilediği göstermektedir. Ancak eğitim binalarında enerji tüketimiyle ilgili mekân yerleşimleri ve doluluk oranları ile birlikte yön etkisinin çalışmalarda pek dikkate alınmadığı görülmektedir. Ayrıca üniversite binalarında enerji performansı optimizasyonunda doluluk oranı parametresinin diğer

parametrelere göre daha az kullanılmıştır. Bu nedenlerle, üniversite binalarında mekân kullanımı ile doluluk oranlarının enerji tüketimine etkisi detaylı şekilde incelenmelidir [37].

Bu çalışmada, aşağıdaki araştırma sorularına odaklanılmıştır:

1. Sınıflara, derslerin atanması ile oluşacak doluluk oranının optimizasyonu ile ne kadar enerji tasarruf edilebilir?
2. Farklı eğitim dönemlerine ait bina enerji tüketimi için en etkili yön parametresi nasıl değişir?

Özetle çalışmanın amacı, üniversite binalarında sınıflara derslerin atanması ile oluşan doluluk oranının yön etkisiyle birlikte enerji tüketimine etkisini incelemektir. Bunun için seçilen üniversite binasında bulunan tüm dersliklere ait kullanım verileri oluşturulmuş, yön etkisinin de dikkate alındığı enerji tüketiminin optimize edildiği bir çalışma yapılmıştır. Böylelikle farklı dönemlerde hangi yönde mekân kullanımının enerji tüketimi üzerinde ne derece etkili olduğu görülmüştür. Bu çalışma şu şekilde yapılandırılmıştır. İlk olarak konuya ilişkin yapılan çalışmalara yönelik literatür taraması yapılmıştır. Bölüm 2'de vaka çalışması ve özellikleri açıklanmış, doluluk oranlarının hesaplanması için verilerin toplanma süreci anlatılmış, bina simülasyonu, model doğrulama, çok amaçlı optimizasyon için kullanılan RSM yöntemi ve arzu edilebilirlik analizi tanıtılmıştır. Bölüm 3'te; sınıf kullanımı ile doluluğun enerji performansına etkisi değerlendirilmiş, çok amaçlı optimizasyon ve istatistiksel modellerin sonuçları sunulmuş ve kısaca tartışılmıştır. Bölüm 4; çalışmaya ait sonuçları sunmaktadır. Son olarak, Bölüm 5'te; çalışmaya ait sınırlar ve öneriler anlatılarak makale sonlandırılmıştır.

## 2. Yöntem (Method)

Seçilen üniversite binasında sınıf kullanımı ile oluşacak bina doluluk oranlarındaki değişikliklerin yön ile birlikte enerji tüketimine etkisi yanıt yüzey yöntemi (RSM) kullanılarak incelenecektir. RSM, bağımsız değişkenlerin başka bir bağımlı değişken veya yanıt üzerinde ürettiği etkinin incelenmesine izin veren matematiksel ve istatistiksel bir tekniktir [38]. RSM'nin daha az simülasyon veya

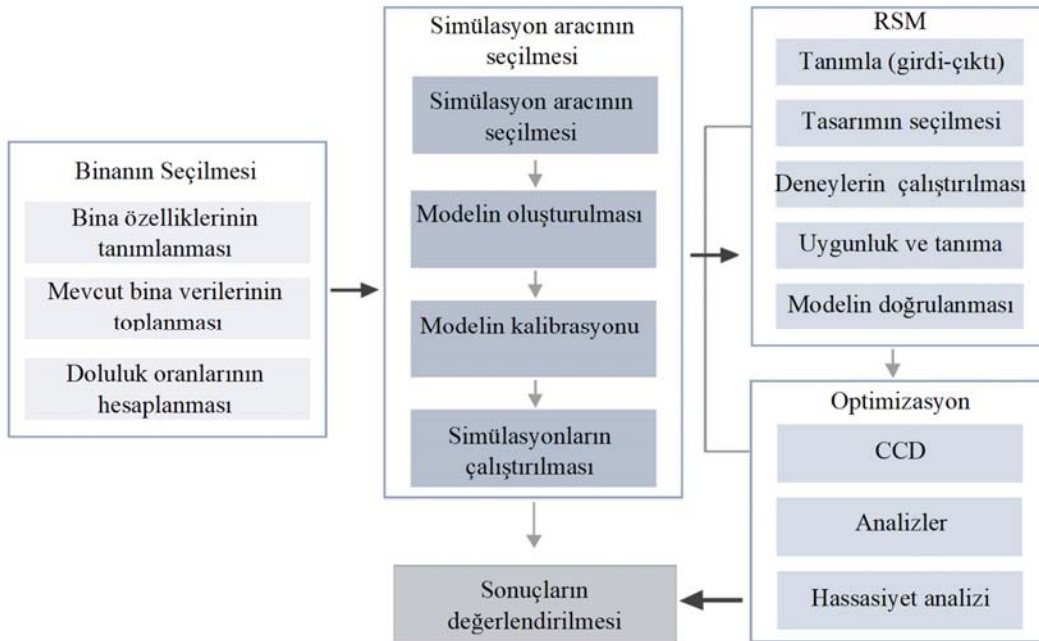
deneyle en uygun çözümleri bulma, parametrelerin etkileşimlerini modelleme, modelin tahmini, birden fazla amacı optimize etme ve istatistiksel olarak anlamlı bilgiler sağlama özelliği gibi nedenlerle bu çalışmada tercih edilmiştir. Ayrıca RSM'nin enerji ile ilgili problemlerde optimizasyon için uygun bir araç olduğu Baghoolizadeh vd. [39] tarafından da açıkça ifade edilmiştir. RSM yöntemi, seçilen üniversite binasını modellemek ve enerji tüketimlerini hesaplamak için enerji simülasyon aracı DesignBuilder ve EnergyPlus ile birlikte kullanılmıştır. RSM yöntemi üç adımda uygulanmıştır. Bu adımlar; deney tasarımı, enerji simülasyonu kullanılarak verilerin oluşturulması ve optimizasyonun yapılmasıdır. Çalışmaya ait yöntem şeması Şekil 1'de sunulmuştur.

### 2.1. Seçilen Bina ve İklim Özellikleri (Selected Building and Climate Characteristics).

Bu çalışma için, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Ek Binası referans bina olarak seçilmiştir. Binanın yeni olması, öğrenci sayısının fazla olması, gerekli bilgilere kolaylıkla ulaşılabilirliği ve farklı bölümler tarafından kullanılması nedeniyle tercih edilmiştir. Bina yaklaşık olarak 20.400 m<sup>2</sup> kapalı alana sahiptir ve bodrum kat ile birlikte altı kattan oluşmaktadır. Bina; ofis alanları, amfi, seminer odaları, toplantı odaları, derslikler, laboratuvarlar, kafe ve çalışma alanları sunmaktadır. Güney cephesinde derslikler, laboratuvarlar ve ofis mekânları konumlanır. Kuzey ve doğu cephelerde genellikle derslikler ve ofis mekânları vardır. Batı cephesinde kafe, ofisler, derslikler, laboratuvarlar ve toplantı odaları yer almaktadır. Orta bölgede ise merdivenler, tuvaletler ve depolar bulunmaktadır. Bina katlarında bulunan mekân sayıları birbirinden farklılık göstermektedir. Bina iklimlendirme sistemi 4 yollu fan coil ünitesine sahiptir. Isıtma için 0,83 verime sahip doğal gaz kazanı kullanılmaktadır. Soğutma için ise 2,5 soğutma performans katsayısına sahip soğutma gruplarından oluşmaktadır. Bunlara uygun olarak DesignBuilder programında veri girişleri yapılmıştır.

### 2.2. Verilerin Toplanması (Collection of Data)

Bu çalışmada, Mühendislik Fakültesi Ek Binasına ait doluluk bilgileri, personel sayısı, derslere kayıtlı öğrenci sayısı ve bu binada bulunan



Şekil 1. Metodolojik akış şeması (Methodological flow chart).

bölmelere ait ders programlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Ders programları bölüm başkanlıkları tarafından her yarıyıl için hazırlanmakta ve dersleri uygun gördükleri zaman dilimi için seçtikleri sınıflara vermektedir. Toplam öğrenci sayısı, her bir zaman dilimi için programda yer alan farklı bölümlerdeki derslere kayıtlı öğrenci sayılarının toplanmasıyla hesaplanır.

### 2.2.1. Kullanıcı sayısı ile sınıf kapasitesi arasındaki ilişkinin analizi (Analysis of the relationship between the number of users and classroom capacity)

Derslerin sınıflara nasıl yerleştirildiğinin analizi için derse kayıtlı öğrenci sayısı ile derslik kapasitesi arasındaki ilişkinin anlamlılığı incelenmiştir. Bunun için ilgili bölümlerin ders programları kullanılmıştır. Daha sonra sınıfların kapasiteleri bölümlere ait ders programları ve gözlem yoluyla tespit edilmiştir. Bu veriler ile ilgili dağılımlar Şekil 2' de verilmiştir.

Elde edilen verilerle derse kayıtlı öğrenci sayısı ile sınıf kapasitesi arasında anlamlı bir ilişkinin olup olmadığını incelemek için Sosyal Bilimler için İstatistiksel Paket Programı (SPSS) ile Pearson korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Binaya ait sınıf kapasitesi ile kullanıcı sayısı arasındaki ilişkinin analizi için korelasyon analizi yapılmıştır. Bu iki değişken arasındaki ilişki düzeyi  $r=0.542$  bulunmuştur. Belirleme (determination) katsayısı ise  $r^2 = 0,294$ 'tür ( $p<0.01$ ). Böylelikle değişkenler arasında pozitif yönlü ve orta düzeyde bir ilişki olduğu görülmektedir. Buna göre, sınıf kapasitesindeki toplam değişkenliğin yaklaşık %30'u, derse alan öğrenci sayısından kaynaklanmaktadır. Bu durum sınıflara dersler atanırken öğrenci sayısı ve sınıf kapasitesine çok fazla dikkat edilmediğini göstermektedir.

### 2.2.2. Bina doluluğunun hesaplanması (Calculation of building occupancy)

Enerji tüketimi ile ilişkiyi görmek ve optimizasyon için, seçilen binanın doluluk bilgisi gerekmektedir. Doluluk hesaplamaları literatürde tanımlanan yıllık kullanım süreleri ve kullanılan alanların mevcut alanlara oranı dikkate alınarak yapılmıştır. Doluluk bilgileri aşağıdaki aşamalar izlenerek hesaplanmıştır:

**Aşama 1:** Zamansal olarak kullanımın sınıflandırılması: Bir haftalık zaman dilimi günlük olarak incelenmiştir. Haftanın farklı günleri ise birinci öğretim ve ikinci öğretim olarak ele alınmıştır ve ders programındaki saatlere uygun bir şekilde periyotlara ayrılmıştır. Birinci öğretim dört farklı (08:30-10:10, 10:20-12:00, 12:30-14:10 ve 14:20-16:55) zaman periyodunda ikinci öğretim ise iki farklı (17:05-18:45 ve 18:55-21:30) zaman periyodunda incelenmiştir.

**Aşama 2:** Mekân kullanımlarının sınıflandırılması: Mekanların alan kullanımını sınıflandırılırken toplam alan; değişken olarak kullanılan alan ve sabit olarak kullanılan alan olmak üzere iki gruba ayrılmıştır.

Değişken olarak kullanılan alanlar; derslikler, ofis alanları ve laboratuvarlar, sabit olarak kullanılan alanlar; kafeterya, hol, depo ve ıslak hacim gibi alanlar olarak belirlenmiştir.

**Aşama 3:** Doluluk oranı hesaplanması: Mekân kullanımı bazlı doluluk oranı hesaplamaları için ders programlarından yararlanılmıştır. Hesaplamalar periyodik (saatlik), günlük ve haftalık olarak yapılmıştır. Ders programlarına ait derslik kullanım saatleri Excel programında kayıt altına alınıp hesaplaması yapılmıştır. Daha sonra Excel programında dersliklerin ismi, alanı, bir gün içerisinde bulunan periyotlar ve saatler, doluluk hesaplaması yapılacak olan kata ait alan ve hacim bilgileri düzenlenmiştir. Gerekli bilgiler sağlandıktan sonra doluluk oranları aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

1. Zaman periyotlarına göre doluluk oranı (pdo) Eş. 1'deki gibi formülize edilmiştir.

$$pdo = \frac{(X_1 * P + X_2 * P + \dots + X_n * P)}{(X_t * P)} \quad (1)$$

pdo = Periyot doluluk oranı  
 $X_1, X_2, \dots, X_n$  = Derslik, ofis, laboratuvar alanı  
 $X_t$  = Toplam kat alanı  
 $P$  = Bir periyottaki toplam saat

Bu hesaplamalar binaya ait haftanın beş günü için altı farklı periyot için yapılmıştır.

2. Bina katlarına ait günlük doluluk oranı hesaplaması (kdo) (Eş. 2):

$$kdo = \frac{pd_1 + pd_2 + \dots + pd_n}{X_t * pt} \quad (2)$$

kdo = Bina katına ait günlük doluluk oranı  
 $pd_n$  = n. Periyot doluluk oranı  
 $X_t$  = Toplam kat alanı  
 $pt$  = (1, 2, ..., n. periyotlardaki toplam saat) olacak şekilde formülize edilmiştir.

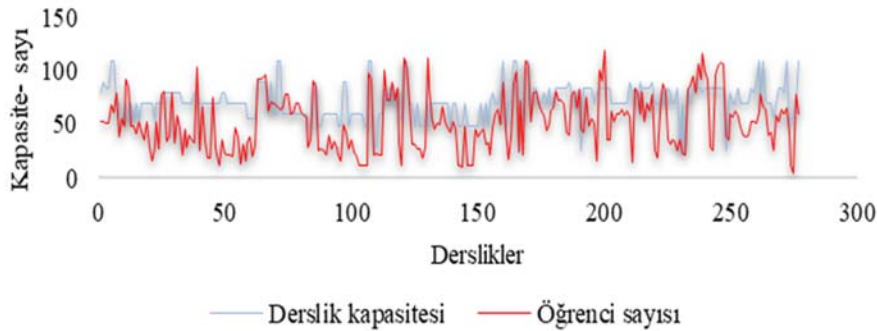
Bu hesaplamalar binanın herhangi bir katına ait bir gündeki doluluk oranı hesaplaması için yapılmıştır.

3. Toplam binaya ait günlük doluluk oranı hesaplaması (gdo) (Eş. 3):

$$gdo = \left( \frac{kdo_{n.kat} * n.kat.alanı}{Ta} \right) \quad (3)$$

kdo = Bina katına ait günlük doluluk oranı  
 $Ta$  = Toplam inşaat alanı

Bu hesaplamalar binanın tüm katları ve haftanın beş günü için yapılmıştır. Daha sonra günlere ait toplam doluluk oranlarının



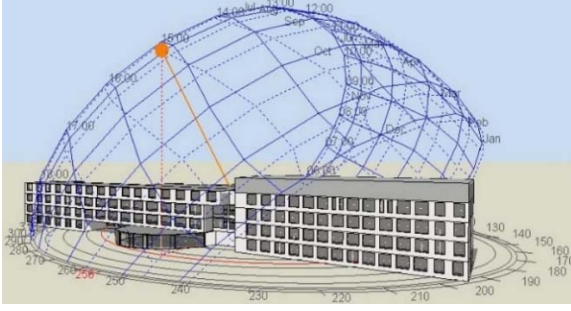
Şekil 2. Öğrenci sayısı ve sınıf kapasitesinin dağılımı (Distribution of student number and classroom capacity)



aritmetik ortalamasının hesaplanmasıyla binaya ait haftalık doluluk oranları hesaplanmıştır.

### 2.3. Bina Enerji Simülasyonu ve Kalibrasyonu (Building Energy Simulation and Calibration)

Bina enerji simülasyonu için öncelikle binanın 3D modeli oluşturulmalıdır (Şekil 3). Daha sonra gerekli verilerin programa girilmesi ile simülasyon başlatılabilir. Bu çalışmada, bina enerji simülasyonu olarak DesignBuilder TM arayüzü aracılığıyla EnergyPlus programı kullanılmıştır [40].



**Şekil 3.** Çalışılan binanın DesignBuilder programında oluşturulan 3D modeli  
(3D model of the case building created in the DesignBuilder program)

Simüle edilen binaya ait simülasyon sonuçları ile gerçek tüketim değerleri birbirinden farklılık gösterebilir. Bu nedenle, modellerin ölçülen verilerle doğrulanması (kalibrasyon) gerekmektedir. Bina simülasyon modelinin doğruluğu ve güvenilirliği için ASHRAE Kılavuzu 14'deki yaklaşımlar yöntem olarak kullanılır [41, 42]. Bu yaklaşım, simüle edilmiş aylık tüketim değerlerinin ölçülen verilerden sapmasını, ortalama karekök hatasının değişim katsayısı ve ortalama yanlılık hatasıyla kontrol etmeyi amaçlayan bir hata analizidir. Modelden elde edilen sonuçların güvenli aralıkta olması için Ortalama Sapma Hatası olan MBE (Mean Bias Error)  $\pm 5\%$  aralığında ve CV RMSE (Coefficient of Variable Root Mean Squared Error) aylık değerler için  $+15\%$ 'in altında olmalıdır. MBE ve CV(RMSE) Eş. 4 ve Eş. 5'deki formüllerle hesaplanır [43, 44]:

$$MBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} x_i} \quad (4)$$

$$CV\ RMSE(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} (x_i - y_i)^2 / N_p}}{\bar{x}_p} \quad (5)$$

Eş. 4 ve Eş. 5'de yer alan  $x_i$  ve  $y_i$  her bir model örneği 'i' için ilgili ölçülen ve simüle edilmiş veri noktalarıdır.  $N_p$  'p' aralığındaki veri noktalarının sayısıdır (yani,  $N_{aylık}=12$ ,  $N_{saatlik}=8760$ ) ve  $\bar{x}_p$  ise ölçülen veri noktalarının ortalamasıdır [43, 44].

Model simülasyonu sonucu elde edilen aylık doğalgaz tüketim verileri ve gerçek doğalgaz tüketim verileri kullanılarak kalibre edilmiştir (Şekil 4). Grafikteki veriler kullanılarak modelden elde edilen enerji tüketim değerlerinin geçerliliğini kontrol etmek için MBE ve CV RMSE değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda; MBE değeri  $-2,65\%$ ; CV RMSE değeri ise  $6,83\%$  olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar ASHRAE Kılavuzu 14'te verilen sınır değer aralıklarında kaldığı için ( $MBE_{monthly} = -2,71\% < 5\%$  ve  $(CV\ RMSE_{monthly}) = 7,39\% < 15\%$ ) model geçerli ve sonuçlar güvenilirdir.

### 2.4. Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Method (RSM))

RSM; belirli bir amaç fonksiyonunu optimize (maksimize / minimize) eden girdi değişkenlerinin kombinasyonunu belirlemeyi sağlayan bir optimizasyon yaklaşımıdır [45]. RSM, yanıtlar ile girdi değişkenleri arasındaki ilişkilerin analizini sağlar [46]. Aynı zamanda RSM, yanıt (y) ile onu etkileyen faktörler ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) arasındaki ilişkiyi tanımlamak için matematiksel ve istatistiksel modelleri kullanır. RSM'de yaygın olarak kullanılan modeller aşağıda formülize edilmiştir [47]. RSM'de doğrusal bir fonksiyona yönelik modeller en temel modellerdir.

Bu model, düşük dereceli bir polinom denklemi ile tahmin edilebilir (Eş. 6). Eğer sistemde doğrusallıktan uzaklaşma varsa daha yüksek dereceli polinomlar kullanılır [48].

$$y = f'(X)\beta + \varepsilon \quad (6)$$

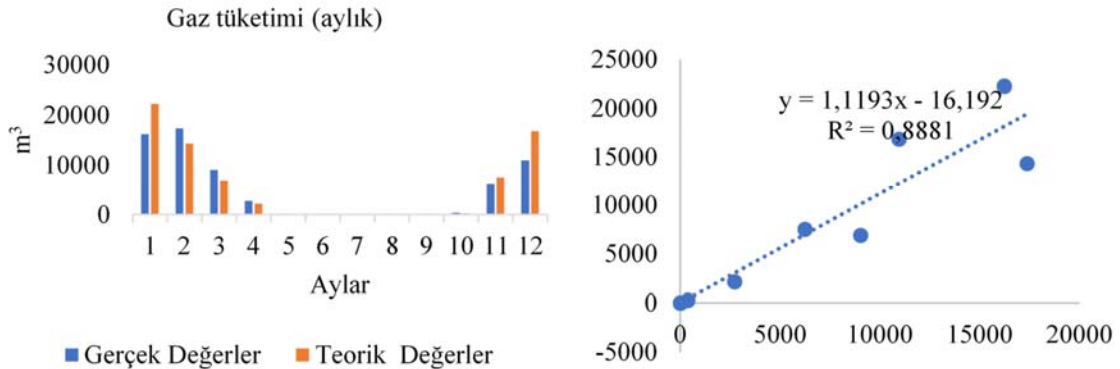
Burada,  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ ,  $f'(X)$  ise  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 'nin kuvvetlerini içeren n elemanın bir vektör fonksiyonudur.

Bunlar birinci derece modeli (Eş. 7) ve yüksek dereceli modeli (Eş. 8) içerir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \varepsilon \quad (7)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (8)$$

Burada y yanıt parametresinin değeridir, X tasarım değişkenidir,  $\beta$  regresyon katsayısıdır,  $\varepsilon$  rastgele hata değeridir; n ise farklı tasarım değişkeni sayısıdır [48].



**Şekil 4.** Çalışılan binaya ait gerçek ve teorik doğalgaz tüketimleri (Real and theoretical natural gas consumptions of the case study)

Mevcut çalışmada, verilerin analizi için Design-Expert 11 yazılımı kullanılmıştır. Design-Expert 11 yazılımı, faktöriyel tasarım ve RSM tasarımı gibi deneysel tasarım yöntemleri için kullanılabilir [49]. Bu nedenle çalışmada kullanılan RSM yöntemi, Design-Expert 11 yazılımı kullanılarak uygulanmıştır. RSM yaklaşımıyla optimizasyon altı aşamaya ayrılabilir: (1) girdi ve yanıtların seçimi, (2) deneysel tasarım yönteminin seçimi, (3) deneysel sonuçların üretilmesi, (4) model denkleminin elde edilmesi, (5) modelin doğrulanması, (6) optimal koşulların belirlenmesidir [50, 51].

### 2.5. Çok Amaçlı Optimizasyon Modellemesi ve Arzu Edilebilirlik Analizi (Multi-Objective Optimization Modelling and Desirability Analysis)

Çok amaçlı optimizasyon, aynı anda optimize edilecek çok sayıda amaç fonksiyonunu içerir ve problemlere yönelik çok kriterli karar vermeyi sağlar [52]. Arzu edilebilirlik fonksiyonu yaklaşımı ise, basitliği nedeniyle çoklu yanıt optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır [53]. Bu fonksiyon aynı anda seçilen yanıtlar arasında en uygun çözümlenmeyi bulmak için sık kullanılan çok kriterli bir yöntemdir [54]. Bu fonksiyonun ölçeği 0 ile 1 arasında değişmektedir ( $0 < d_i < 1$ ). Bu değer 1'e yakın olması belirlenen kriterlerin daha iyi sağlandığını gösterir. Bu değer 0 olması yanıt değişkeni değerlerinin belirlenen bölgenin dışında olduğunu gösterir. Genellikle arzu edilebilirlik fonksiyonu (D) aşağıdaki gibi formülize edilebilir (Eş. 9):

$$D = \left( \prod_{i=1}^m d_i \right)^{1/m} \quad (9)$$

Burada m yanıtın sayısıdır  $d_i$  hedeflenen çıktı için tanımlanan arzu edilebilirliktir.

Optimizasyon yöntemlerine göre farklı bireysel arzu edilebilirlik fonksiyonları oluşturulabilir ve bireysel arzu edilebilirliği (individual desirability) elde etmek için çeşitli dönüşüm türleri vardır [55]. Hedef değer (T), y yanıtı için bir maksimum ise bireysel arzu edilirlilik (d) aşağıdaki denklemle tanımlanır (Eş. 10):

$$d = \begin{cases} 0 & \text{if } y < L \\ \frac{(y-L)^r}{(T-L)^r} & \text{if } L \leq y \leq T \\ 1 & \text{if } L \leq y \leq T \end{cases} \quad (10)$$

Burada L, yanıtın kabul edilebilir en düşük değeridir ve r ağırlıktır,  $r > 1$  için arzu edilebilirlik fonksiyonu doğrusaldır.  $r > 1$ 'i seçmek hedef değere yakın olmayı daha fazla vurgular ve  $0 < r < 1$ 'i seçmek ise bunun önemini azaltır. Eğer y yanıtı için hedef değer minimum ise, bireysel arzu edilirlilik (d) aşağıdaki denklemle verilir (Eş. 11):

$$d = \begin{cases} 1 & \text{if } T < y \\ \frac{(U-y)^s}{(U-T)^s} & \text{if } T \leq y \leq U \\ 0 & \text{if } y > U \end{cases} \quad (11)$$

Burada U yanıtın kabul edilebilir üst değeridir ve s bir ağırlıktır. Hedef değer (T), alt sınır (L) ile üst sınır (U) arasında yer alıyorsa fonksiyon aşağıdaki denklemle ifade edilir (Eş. 12):

$$d = \begin{cases} 0 & \text{if } y < L \\ \frac{(y-L)^s}{(T-L)^s} & \text{if } L \leq y \leq T \\ \frac{(U-y)^s}{(U-T)^s} & \text{if } T \leq y \leq U \\ 0 & \text{if } y > U \end{cases} \quad (12)$$

Fonksiyonlarda gösterildiği gibi, r ve s arzu edilirlilik fonksiyonlarının değişim oranını kontrol eder [54]. Optimizasyon çalışmalarında her bir yanıt için seçilen kriterle bağlı olarak çeşitli arzu edilebilirlik fonksiyonları uygulanmaktadır. Amaç, seçilen kriterlerin arzu edilebilirliğini esnek bir şekilde belirlemektir [55]. Arzu edilirlilik analizinde her bir girdi ve yanıt için istenen değerler bulunabilir. Bu değerleri bulmak için sayısal ve grafiksel optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır [56].

## 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

### 3.1. Bina Doluluğu ve Mekân Kullanımı Analizi (Building Occupancy and Space Usage Analysis)

Bina doluluğu analizi için farklı bölümlere ait öğrenci sayıları ve bölüm ders programlarına ait veriler kullanılmıştır. Bu veriler doğrultusunda binanın farklı dönemlerine ait haftalık, günlük ve periyotluk (saatlik) doluluk oranları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar ile binanın kullanıldığı günlerde, binaya ait doluluk modelleri oluşturulmuştur. Bu doluluk modeli oluşturulurken binanın sınıfları, ofis ve ortak alanları dikkate alınarak binaya ait bütüncül bir model oluşturulmuştur. Bu modelde ortak alanların çalışma süreleri tüm gün iken sınıflar ve ofis alanlarının çalışma süreleri birbirinden farklılık göstermektedir. Doluluk modelleri oluşturulduktan sonra farklı zaman dilimlerindeki periyotların ortalama doluluk oranları her gün için ayrı hesaplanmıştır. Günlük bazda farklı periyotlardaki doluluk oranlarına baktığımızda en yüksek doluluk oranı 0,4 iken en düşük doluluk oranının yaklaşık 0,1 olduğu görülmektedir. Haftanın farklı günlerine ait doluluk oranlarına baktığımızda en yüksek doluluk oranı salı günü, en düşük doluluk oranı ise cuma gününe aittir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda bina simülasyonu için doluluk girdi parametrelerinin 0,1 ile 0,4 aralığında değiştiği kabul edilmiştir.

### 3.1. Çok Amaçlı Optimizasyon (Multi-Objective Optimization)

#### 3.2.1. Merkezi kompozit tasarımı sonuçları (Central composite design (CCD) results)

Daha detaylı bir model elde etmek için farklı yönler göre doluluk oranı parametreleri hesaplanmıştır. Bu değişkenlerin tasarımında, RSM altında yer alan Merkezi Kompozit Tasarımı (CCD) yöntemi kullanılmıştır. CCD, süreci etkileyen parametrelerin doğrusal ve ikinci dereceden etkileşim etkilerinin yüksek kalitede tahminlerini sağlar [55]. CCD hem güz hem de bahar dönemine ait ısıtma ve soğutma enerji tüketimini minimize eden optimum doluluk oranlarını bulmak için seçilmiştir. Farklı yönler göre sabah ve öğleden sonra için simülasyonlar yapılmıştır. Çalışmada, farklı cephelere ait incelenen doluluk oranları aralığı ve düzeyi Tablo 1'de gösterilmiştir. Bina doluluk parametreleri tanımlandıktan sonra, CCD dört girdi faktörüne ait 30 (6 adet merkezi nokta ve 24 adet merkez-dışı nokta) adet çözüm sunmuştur. Bu çözümlere ait veriler ile binanın ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimi simülasyon programı ile hesaplanmıştır. Sonrasında optimizasyon için çözümler verilen sıralamaya uygun bir şekilde kaydedilmiştir.

**Tablo 1.** Üç düzeyli dört faktöre ait doluluk değerleri (Occupancy values of four factors with three levels)

Factors	Seviye 1 (min.)	Seviye 2	Seviye 3 (max.)
A: Kuzey yönlü doluluk	0,1	0,25	0,4
B: Güney yönlü doluluk	0,1	0,25	0,4
C: Doğu yönlü doluluk	0,1	0,25	0,4
D: Batı yönlü doluluk	0,1	0,25	0,4

İki farklı eğitim-öğretim dönemine ait girdiler ve yanıtlar sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Güz döneminde CCD tasarımının deneysel planları ve simülasyon sonuçları  
(Experimental plans and simulation results of CCD design in the first period)

Çalışma	Faktörler				Güz dönemi sabah		Güz dönemi öğle	
	A: Kuzey	B: Güney	C: Doğu	D: Batı	Isıtma enerjisi tüketimi kWh	Soğutma enerjisi tüketimi kWh	Isıtma enerjisi tüketimi kWh	Soğutma enerjisi tüketimi kWh
1	0,25	0,25	0,4	0,25	90966,8	125749	80796,6	137595
2	0,4	0,1	0,1	0,1	98940,2	92006,9	88270,8	104032
3	0,1	0,4	0,4	0,4	87917,95	142851	79128,7	156283
4	0,1	0,25	0,25	0,25	99123,65	106905	90517,9	116790
5	0,4	0,1	0,1	0,4	85917,06	133633	76321,3	146632
6	0,25	0,25	0,25	0,25	93058,37	120451,8	85524,3	134152
7	0,4	0,4	0,1	0,4	79969,31	157474	70989,9	171714
8	0,1	0,4	0,1	0,4	92083,72	131413	81432,5	146053
9	0,4	0,1	0,4	0,4	82812,66	137300	72834,3	150466
10	0,25	0,1	0,25	0,25	96983,02	103885	86476,3	114931
11	0,1	0,4	0,4	0,1	104089,7	97775,8	94596,6	109911
12	0,25	0,25	0,25	0,25	93058,37	120451,8	85524,3	134152
13	0,1	0,1	0,1	0,4	99051,7	99787,8	89275,6	111181
14	0,1	0,1	0,4	0,1	106937,4	77523,6	96462,5	88752,7
15	0,25	0,25	0,25	0,25	93058,37	120451,8	85524,3	134152
16	0,4	0,25	0,25	0,25	87037,76	132847	78727,4	148179
17	0,25	0,25	0,1	0,25	95094,21	114373	87851,9	127735
18	0,4	0,1	0,4	0,1	94805,49	103499	84141,2	115988
19	0,25	0,4	0,25	0,25	90013,79	135472	82981,2	151346
20	0,4	0,4	0,1	0,1	91926,52	123756	82293,1	137193
21	0,25	0,25	0,25	0,25	93058,37	120451,8	85524,3	134152
22	0,1	0,4	0,1	0,1	104089,7	97775,8	94596,6	109911
23	0,1	0,1	0,4	0,4	94926,84	111241	85152,7	123176
24	0,25	0,25	0,25	0,25	93058,37	120451,8	85524,3	134152
25	0,25	0,25	0,25	0,4	87062,4	135948	79711,1	151850
26	0,4	0,4	0,4	0,4	75796,95	168944	66821,1	183613
27	0,25	0,25	0,25	0,25	93058,37	120451,8	85524,3	134152
28	0,1	0,1	0,1	0,1	110842,7	66402,9	100514	76855,9
29	0,4	0,4	0,4	0,1	87754,36	135188	78112,3	149102
30	0,25	0,25	0,25	0,1	89102,9	129864	92287,2	115942

Girdilere göre sonuçlar elde edildikten sonra modeller için varyans analizleri (ANOVA) ve regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Bahar dönemi sabah ısıtma tüketimine ait RSM modelinin varyans analizine ait sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur. F-testi kullanılarak model denkleminin istatistiksel önemi değerlendirilmiştir. Her katsayının önemi, F-değerleri ve P-değerleri tarafından belirlenmiştir. Tablo 4'ten, modelin oldukça anlamlı olduğu ( $P < 0.0001$ ) ve RSM'nin güvenli bir model olduğu görülmektedir. Ek olarak A, B, C, D,  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$ ,  $D^2$ , anlamlı model terimleridir ( $p < 0.05$ ).

Sonuçlar incelendiğinde, enerji tüketimlerinin ayarlanmış  $R^2$  değerinin (Adj. $R^2$ ),  $R^2$  ve tahmin edilen (Pre. $R^2$ ) ile büyük ölçüde tutarlı olduğu görülmektedir (Tablo 5). Sapmaya karşı verilen yanıtların oranını gösteren uygun kesinlik (Adequate Precision), sinyal/gürültü oranını ölçer. Bu oranın 4'ten büyük olması istenir. Bu durum yeterli bir sinyal olduğunu gösterir [48,57]. Tablo 5'te bulunan değerler modelin uygun olduğunu göstermektedir. Daha sonra simülasyonlardan elde edilen sonuçlara göre, iki farklı döneme ait ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketiminin RSM denklemleri geliştirilmiştir (Tablo 6).

Tahmin edilen ve gerçek yanıt grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Gerçek değerler bina enerji simülasyonlarından elde edilirken, tahmin edilen değerler ise RSM tarafından oluşturulan tahmin modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Grafik, yanıtların tahmin edilen değerleri ile gerçek değerleri arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Şekil 6 dört parametrenin merkez noktasındaki soğutma ve ısıtma enerjisi üzerindeki etkisini göstermektedir. Dersliklere ait kuzey ve doğu yönlü doluluk oranı merkez sınırını azaltıkça soğutma enerjisi tüketiminin düşmeye başladığı ve güney ve batı yönlü doluluk oranı merkez sınırını artırdıkça soğutma enerjisi tüketiminin artmaya başladığı görülmektedir (Şekil 6a). Ancak ısıtma enerjisi tüketimi için bu durumun tersi olduğu görülmektedir (Şekil 6b). Dersliklere ait doğu yönlü doluluk oranının değişimi diğer faktörlere göre her iki tüketim değeri üzerinde daha az duyarlıdır.

### 3.2.1. Arzu edilebilirlik analizi sonuçları (Desirability analysis results)

Arzu edilebilirlik fonksiyonu, birden fazla amaç arasında çözümü bulmak için kullanılır. Arzu edilebilirlik fonksiyonunun değerinin 1'e



**Tablo 3.** Bahar dönemi CCD tasarımının deneysel planları ve simülasyon sonuçları  
(Experimental plans and simulation results of CCD design in the first period)

Run	Faktörler				Bahar dönemi sabah		Bahar dönemi öğle	
	A: Kuzey	B: Güney	C: Doğu	D: Batı	Isıtma enerjisi tüketimi kWh	Soğutma enerjisi tüketimi kWh	Isıtma enerjisi tüketimi kWh	Soğutma enerjisi tüketimi kWh
1	0,25	0,25	0,4	0,25	35266	160207	23739,1	199474
2	0,4	0,1	0,1	0,1	38947,9	130167	26193	159231
3	0,1	0,4	0,4	0,4	37271,5	190082	26466,3	223085
4	0,1	0,25	0,25	0,25	39523,9	145087	28960,7	172301
5	0,4	0,1	0,1	0,4	33952,5	180313	22977,5	213467
6	0,25	0,25	0,25	0,25	35266	160207	24265,2	199546
7	0,4	0,4	0,1	0,4	32203,3	206856	21772,5	242524
8	0,1	0,4	0,1	0,4	38592,3	175190	26384	209288
9	0,4	0,1	0,4	0,4	32694	186941	21869,5	220611
10	0,25	0,1	0,25	0,25	36645,6	142518	24987,8	172164
11	0,1	0,4	0,4	0,1	42209,5	148262	30807,5	161782
12	0,25	0,25	0,25	0,25	35266	160207	24265,2	199546
13	0,1	0,1	0,1	0,4	40423,8	140339	28661,7	169430
14	0,1	0,1	0,4	0,1	44110,3	113483	30913,7	140087
15	0,25	0,25	0,25	0,25	35266	160207	24265,2	199546
16	0,4	0,25	0,25	0,25	33304,4	176612	22407,3	219122
17	0,25	0,25	0,1	0,25	36196,9	152666	25175,9	191285
18	0,4	0,1	0,4	0,1	37659	145080	25139,8	175231
19	0,25	0,4	0,25	0,25	34900,1	177312	24073,5	219190
20	0,4	0,4	0,1	0,1	37160,2	164996	25060,2	196979
21	0,25	0,25	0,25	0,25	35266	160207	24265,2	199546
22	0,1	0,4	0,1	0,1	43399,6	133396	30807,5	161782
23	0,1	0,1	0,4	0,4	39113,2	155303	27614,2	185436
24	0,25	0,25	0,25	0,25	35266	160207	24265,2	199546
25	0,25	0,25	0,25	0,4	33855,1	180653	23265,4	223138
26	0,4	0,4	0,4	0,4	30816,1	221727	20690,2	258367
27	0,25	0,25	0,25	0,25	35266	160207	24265,2	199546
28	0,1	0,1	0,1	0,1	44972,8	98695	31875,5	124090
29	0,4	0,4	0,4	0,1	35778,8	179883	23968,9	212882
30	0,25	0,25	0,25	0,1	38490,5	139012	26838,5	175508

**Tablo 4.** Yanıtlar için hesaplanan modelin varyans analizi (ANOVA of the calculated model for responses)

Kaynak	Serbestlik derecesi	Karelerin toplamı	Ortalama kareler	F-Değeri	P-Değeri
Model	14	354036747	25288339	2739,61	<0,0001
Doğrusal	4	308947326	77236832	8367,43	<0,0001
A	1	181138330	181138330	19623,57	<0,0001
B	1	14557868	14557868	1577,12	<0,0001
C	1	6638032	6638032	719,13	<0,0001
D	1	106613096	106613096	11549,90	<0,0001
Kareler	4	45001144	11250286	1218,80	<0,0001
A A	1	3071064	3071064	332,70	<0,0001
B B	1	518673	518673	56,19	<0,0001
C C	1	427129	427129	46,27	<0,0001
D D	1	1860390	1860390	201,54	<0,0001
2- Yönlü etkileşim	6	88277	14713	1,59	0,217
A B	1	1365	1365	0,15	0,706
A C	1	24964	24964	2,70	0,121
A D	1	21653	21653	2,35	0,146
B C	1	19530	19530	2,12	0,166
B D	1	1568	1568	0,17	0,686
C D	1	19196	19196	2,08	0,170
Hata	15	138460	9231		
Uyum eksikliği	10	138460	13846		
Artık hata	5	0	0		
Toplam	29	354175206			

yaklaşması çözümlerin daha yüksek kabul edilir olduğunu gösterir. Bu analizde girdi ve yanıtlar için istenen çözümler üretilebilir [51, 53]. Bu çalışmada, çok amaçlı bir optimizasyon problemini çözmek için Design-Expert ile arzu edilebilirlik analizi yapılmıştır. Bu analiz

problemin çözümüne dair üç boyutlu grafikler, parametrelerin hassasiyeti, en iyi yanıt karşılık optimum parametre değerlerini sunar. Çalışmada, optimizasyonun amacı; ısıtma ve soğutma tüketimlerini mümkün olan en düşük seviyeye indirmektir. Arzu

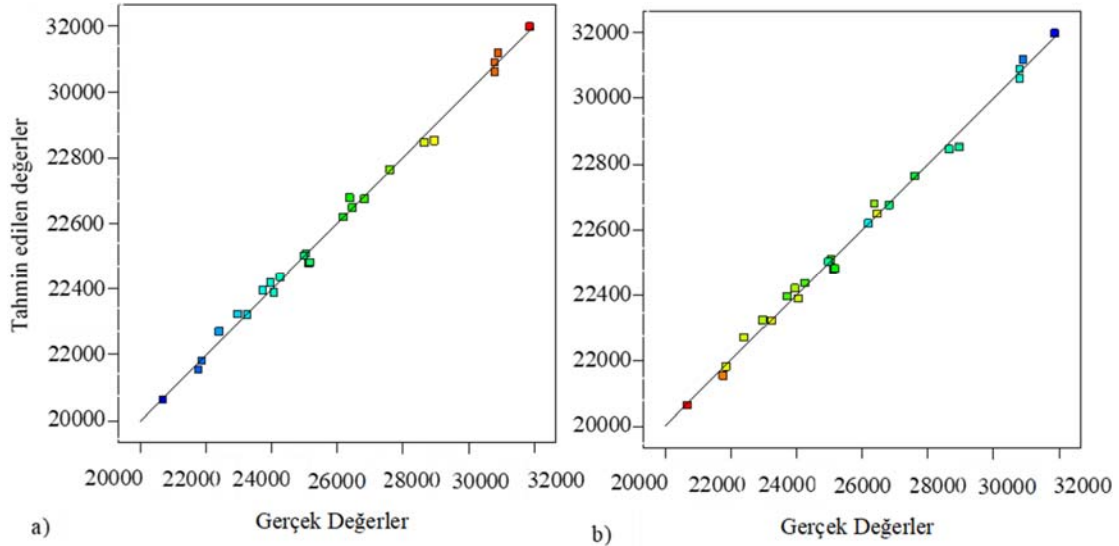
**Tablo 5.** Uygunluk istatistiklerinin sonuçları (Results of fit statistics)

	Güz dönemi ısıtma tüketimi		Güz dönemi soğutma tüketimi		Bahar dönemi ısıtma tüketimi		Bahar dönemi soğutma tüketimi	
	Sabah	Öğle	Sabah	Öğle	Sabah	Öğle	Sabah	Öğle
Std. Sapma	2079,87	1021,63	6165,79	2800,92	96,09	282,23	96,09	4222,46
Ortalama	93053,23	84447,94	1,195E+05	1,317E+05	36969,45	25541,37	36969,45	1,941E+05
C.V. %	2,24	1,21	5,16	2,13	0,2599	1,10	0,2599	2,18
R <sup>2</sup>	0,9611	0,9903	0,9303	0,9923	0,9996	0,9951	0,9996	0,9892
Adj. R <sup>2</sup>	0,9248	0,9812	0,9191	0,9851	0,9992	0,9906	0,9992	0,9791
Pre. R <sup>2</sup>	0,8204	0,9403	0,9064	0,9382	0,9979	0,9696	0,9979	0,9269
Uygun kesinlik	23,1589	46,8756	39,5766	54,3046	209,3675	56,9102	209,3675	45,5469

**Tablo 6.** Farklı dönemlere ait ısıtma ve soğutma enerji tüketimine ait denklemler (Equations for heating and cooling energy consumption for different periods)

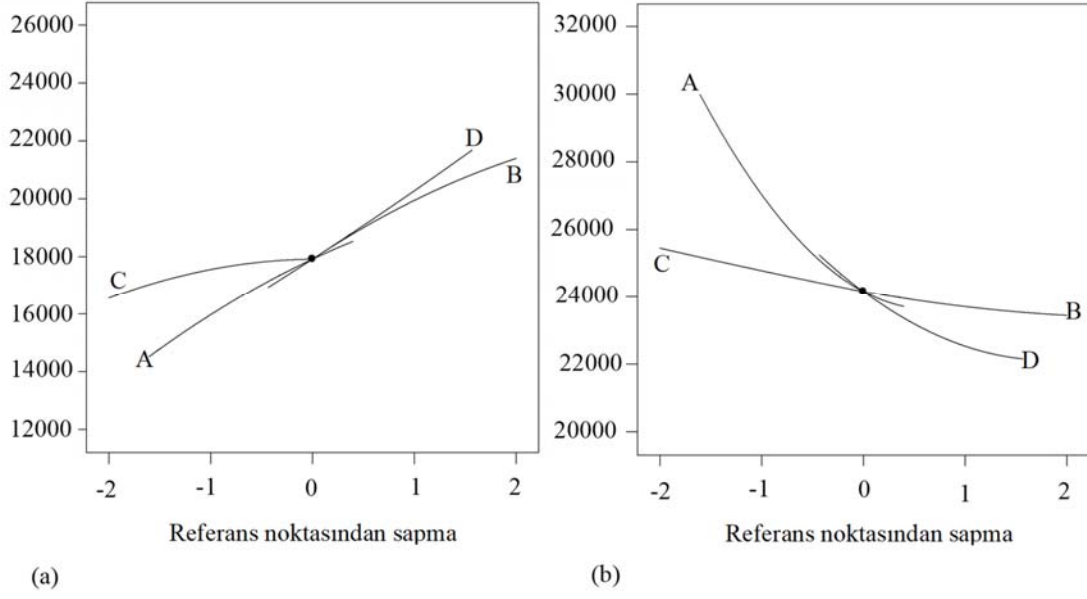
R1=	92.342,7 - 6.339,05A - 3.198,62B - 1.772,6C - 5.719,46D -215,663AB - 211,735AC + 190,539AD + 172,432BC - 204,671BD - 209,705CD + 1.453,69A <sup>2</sup> + 1.871,4B <sup>2</sup> + 1.403,5C <sup>2</sup> - 3.544,35D <sup>2</sup>
R2=	122.400 + 14.054A + 14.742,8B + 4.636,06C + 16.377,8D + 253,925AB + 253,075AC - 182,1AD - 212,062BC + 228,563BD + 248,963CD - 4.472,05A <sup>2</sup> - 4.669,55B <sup>2</sup> - 4.287,05C <sup>2</sup> + 8.557,95D <sup>2</sup>
R3=	85.425,1 - 6.286,97A - 2.694,24B - 1.861,06C - 6.089,28D - 106,318AB - 343,026AC + 333,076AD + 321,074BC - 338,89BD - 107,557CD - 703,18A <sup>2</sup> - 597,107B <sup>2</sup> - 1.001,6C <sup>2</sup> + 673,325D <sup>2</sup>
R4=	134.106 + 14.889,2A + 15.728,4B + 4.643,32C + 18.515,6D + 144,475AB + 342,263AC - 322,025AD - 352,737BC + 357,475BD + 137,263CD - 1.575,97A <sup>2</sup> - 921,965B <sup>2</sup> - 1.395,47C <sup>2</sup> - 164,465D <sup>2</sup>
R5=	35.295,7 - 3.172,26A - 899,318 B - 607,274C - 2.433,71D - 9,24327AB + -39,5057AC -36,7895 AD - 34,9249BC - 9,90934BD + -34,6421CD + 1.088,75A <sup>2</sup> + 447,413B <sup>2</sup> + 406,032C <sup>2</sup> + 847,34D <sup>2</sup>
R6=	159.610 + 16.263,2A + 16.936,9B + 6.575C + 21.357,2D - 509,312AB - 513,187AC + 539,563AD + 513,938BC - 509,562BD - 506,187CD + 1.837,46 A <sup>2</sup> + 902,965B <sup>2</sup> - 2.575,54C <sup>2</sup> + 820,465D <sup>2</sup>
R7=	24.349,9 - 2.911,8 A - 566,782B - 427,703C - 1.772,41D - 5,504AB - 150,492AC + 139,103AD + 129,952 BC - 145,743BD - 3,07334CD + 1.249,41A <sup>2</sup> + 96,0695B <sup>2</sup> + 22,9306C <sup>2</sup> + 617,413D <sup>2</sup>
R8=	199.063 + 19.507,4A + 18.118,4B + 6.048,83C + 24.320,8D + 332,375AB + 568,125AC -553,25AD - 600,25BC + 595,875BD + 305,625CD - 2.869,13A <sup>2</sup> - 2.903,63B <sup>2</sup> - 3.201,13 C <sup>2</sup> + 742,371D <sup>2</sup>

R1: 1. dönem sabah ısıtması, R2: 1. dönem sabah soğutması, R3: 1. dönem öğleden sonra ısıtması, R4:1. dönem öğleden sonra soğutması, R5: 2. dönem sabah ısıtması, R6: 2. dönem sabah soğutması, R7: 2. dönem öğleden sonra ısıtması, R8: 2. dönem öğleden sonra soğutması.

**Şekil 5.** Isıtma enerjisi tüketimi (a) ve soğutma enerjisi tüketimi (b) için tahmin edilen ve gerçek değer grafikleri (Predicted vs. Actual plots for heating energy consumption (a) and cooling energy consumption (b))

edilebilirlik fonksiyonun değerinin yüksek olduğu optimum çözümler kümesine ait parametre ve yanıtlar Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'deki sonuçları incelediğimizde arzu edilebilirliğin yüksek olduğu optimum çözümler birbirinden farklılık göstermektedir. Dahası, aynı döneme ait sabah ve öğleden sonraki periyotlarda dahi optimum

çözümlerin farklılaşması çalışmadaki bir diğer önemli ve dikkat çekici bulgulardandır. Örneğin güz dönemi sabah sonuçlarına baktığımızda kuzey ve doğu yönlerinde en uygun doluluk oranı çözümlerinin 0,4, güney yönünde 0,11 ve batı yönünde 0,1 olduğu görülmektedir. Bu döneme ait öğleden sonraki çözümleri incelediğimizde ise güney



Şekil 6. Dört parametrenin soğutma enerjisi tüketimi (a) ve ısıtma enerjisi tüketimi (b) sonuçları üzerindeki etkisi. (Effect of four parameters on the results of cooling energy consumption (a) and heating energy consumption (b).)

Tablo 7. Problemin çözümü için optimum girdiler ve yanıtları. (Optimum input parameters and responses for solving the problem).

Dönemler	Faktörler (doluluk)				Isıtma enerjisi tüketimi (kWh)	Soğutma enerjisi tüketimi (kWh)	Arzu edilebilirlik
	Kuzey (A)	Güney (B)	Doğu (C)	Batı (D)			
T1	0,400	0,110	0,400	0,100	93519,94	107100,53	0,576
T2	0,400	0,100	0,400	0,170	80296,32	124799,74	0,595
T3	0,316	0,107	0,172	0,234	36064,64	145885,32	0,615
T4	0,380	0,100	0,100	0,323	25270,99	169298,33	0,625

T1:1. dönem sabah, T2: 1. dönem öğleden sonra, T3:2. dönem sabah, T4: 2. dönem öğleden sonra.

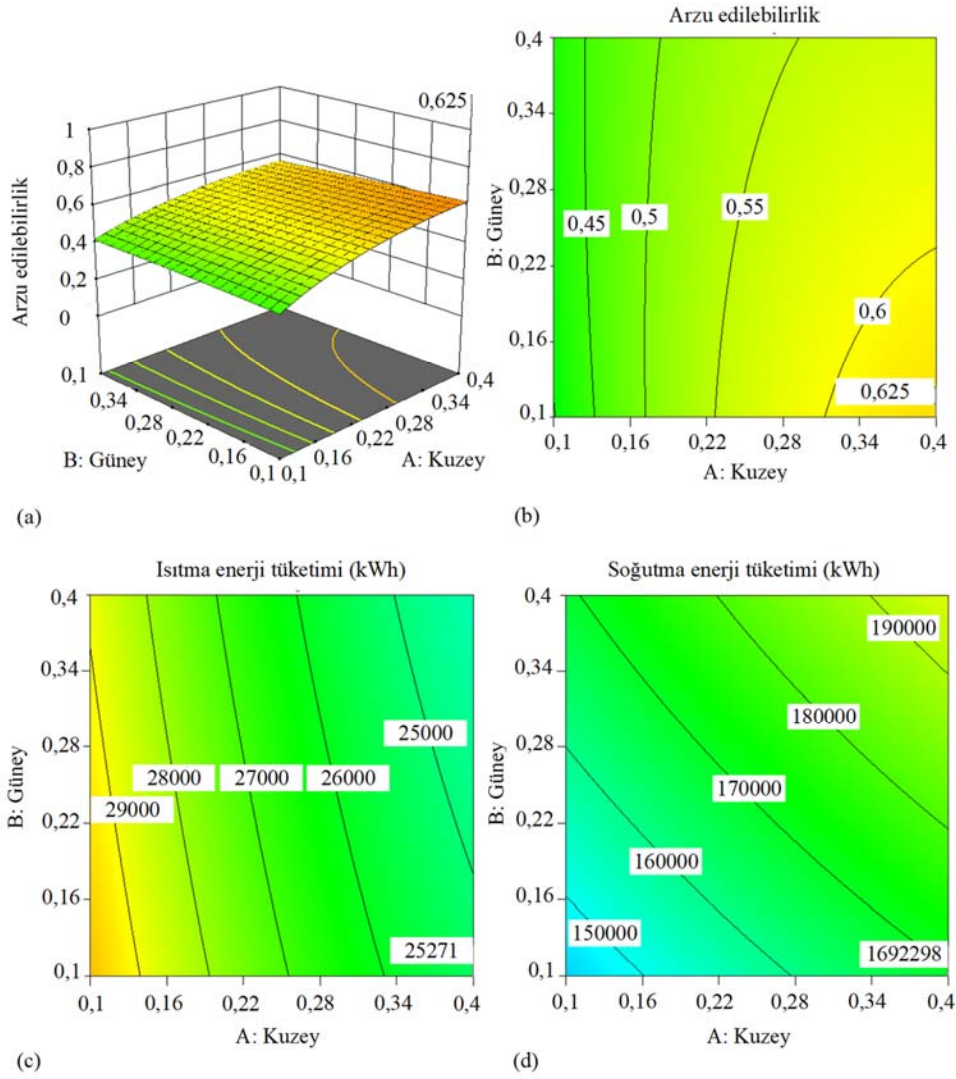
yönlü doluluk oranının 0,1, batı yönlü doluluk oranının 0,17 olduğu görülmektedir. Benzer bir durum bahar dönemindeki sabah ve öğleden sonraki optimum çözümler içinde doğrulanmıştır.

Faktörlerde belirlenen kısıtlamalara göre istenen yanıt özellikleri elde edilir. Farklı dönemler ve yönler için uygun doluluk oranları değişkenlik göstermektedir. Hem ısıtma hem soğutma için binaya ait arzu edilebilirliğin üç boyutlu yanıt yüzeyi Şekil 7a'da verilmiştir. Bu grafikte iki x eksenli bulunmaktadır. Grafikteki bir x eksen, güney ve kuzey yönlerindeki doluluk oranının aralığını gösterirken diğer x eksen ise doğu ve batı yönlerindeki faktörlerin merkez noktalarını göstermektedir. Faktörlere ait doluluk oranı aralığı 0,1 ile 0,4 arasındadır. Y eksen arzu edilebilirlik fonksiyonunun 0 ile 1 arasındaki aralığını göstermektedir. Kuzey yönlü doluluk oranının artması arzu edilebilirliği arttırmıştır ancak optimum değer yaklaşık 0,38 bulunmuştur. Güney yönlü doluluk oranının azalması da arzu edilebilirliği arttırmıştır ve optimum değeri yaklaşık 0,10 olduğu görülmektedir. Genel olarak üç boyutlu grafiğe bakıldığında, kuzey yönlü faktörün doluluk oranı arttığında ve güney yönlü faktörün doluluk oranı azaldığında arzu edilebilirliğin arttığı görülmektedir.

Şekil 7b arzu edilebilirlik yaklaşımı kullanılarak çok amaçlı optimum koşullar gösterilmiştir. Şekildeki çizgiler, yanıtların aralıklarını temsil etmektedir. Faktörlere işaretlenen bayrak, arzu edilirlilik fonksiyonunu maksimize eden bir noktadır. Yeşil renkten sarı renge geçişte arzu edilebilirliğin arttığı görülmektedir. Şekil 8b, optimum çözüm için arzu edilebilirliğin 0,625 olduğu görülmektedir. Maximum değere karşılık gelen yönler göre optimum girdi parametreleri 0,38 (kuzey yönlü doluluk), 0,10 (güney yönlü doluluk), 0,10 (doğu yönlü

doluluk), ve 0,32 (batı yönlü doluluk) olarak bulunmuştur. Arzu edilebilirlik fonksiyonunun maximum olduğu noktada, ısıtma enerjisi tüketimi 25270,99 kWh (Şekil. 7.c) ve soğutma enerjisi tüketimi 169298,33 kWh (Şekil. 7.d) olmuştur. Çalışmada, girdi parametrelerin hassasiyeti ve yanıtlar üzerindeki etkileri önemlidir. Çünkü hassas parametreler ve o parametrelerin optimum değerleri kullanılarak daha fazla enerji tasarrufu elde edilebilir. Parametrelerin hassasiyetine baktığımızda tüm dönemlerde ısıtma enerji tüketimi için en etkili parametrenin kuzey yönlü doluluk faktörü olduğu görülürken soğutma enerji tüketimi için en etkili parametre batı yönlü doluluk oranı olmuştur. Tüm dönemlere ait en az etkili parametrenin doğu yönlü doluluk oranının olduğu görülür. Bu faktörün en az etkili olması bu yöndeki derslik sayısının çok az olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Bu çalışmada, çok amaçlı optimizasyon sonuçları için kullanılan RSM yöntemi, incelenen eğitim binasının ısıtma ve soğutma tüketimi optimizasyonu için güvenilir bir yöntem olduğu doğrulanmıştır. RSM yönteminin, enerji performansı açısından bazı diğer çalışmalarda da benzer sonuçlar verdiğini görülmüştür [38, 49, 56, 58]. Cuadrado vd. [38] çalışmalarında, RSM yöntemi kullanarak üç farklı iklim için bir ev modeli örnek çalışma olarak incelemiştir. Simüle edilen senaryolar ile RSM analizinden elde edilen matematiksel modeller karşılaştırılıp matematiksel tahmin modellerinin güvenilir sonuçlar verdiği doğrulanmıştır. Li vd. [56] bir okul binasının enerji tüketimi ve konfor seviyesi optimizasyonu için simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon (RSM) modeli oluşturmuştur. Çok amaçlı optimizasyon için önemli tasarım değişkenleri olarak dış duvar yalıtım kalınlığı, çatı ısı iletim katsayısı, dış pencerenin güneş ısı kazanç katsayısı ve



Şekil 7. Isıtma ve soğutma enerji tüketimleri için binaya ait arzu edilebilirlik grafikleri (Desirability graphs for heating and cooling energy consumptions).

pencere-duvar oranı kullanılmıştır. Sonuç olarak dört parametrenin optimum kombinasyonu ile %4'lük bir enerji tasarrufu sağlanmış ve konfor seviyesinin arttığı görülmüştür. Benzer şekilde Liu vd. [49] seçilen binanın enerji performansını etkileyen parametrelerin en iyi seviyesi ve optimum kombinasyonunu RSM yöntemi kullanarak belirlemiş ve binanın elektrik tüketiminde %7,24'lük toplam bir azalma görülmüştür. Bir diğer çalışmada, Kim ve Suh [58] RSM yöntemini kullanarak bina kabuğuna yönelik tasarım değişkenleri ile konut binalarında enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Isıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimine yönelik tahmin modelinin geliştirilmesiyle enerji tüketiminin farklı tasarım değişkenlerine bağlı olarak değiştiğini doğrulamıştır.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, bir yükseköğretim binası incelenmiştir. Binanın daha enerji verimli olması için sınıfların doğru doluluk oranları ile etkin kullanımı sayesinde farklı dönemlerde ısıtma ve soğutma enerji tüketimlerinin azaltılması hedeflenmektedir. Farklı yönlerdeki doluluk oranı parametreleri kullanılarak çok amaçlı optimizasyon problemi için yanıtlar elde edilmiştir. Elde edilen yanıtlar analiz edilerek ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimine etki eden parametrelerin en uygun değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca aynı

döneme ait farklı periyotlarda optimum çözümler farklılık göstermektedir. Çok amaçlı optimizasyon ile optimum değerlerin sağlanmasıyla ısıtma tüketiminde yaklaşık %1,8 ve soğutma tüketiminde yaklaşık %9,3'lük bir enerji tasarrufu elde edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen diğer sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Derslik kapasitesi ile dersi alan öğrenci sayısı incelendiğinde, öğrenci sayısının daha az olmasına rağmen genel olarak derslik kapasitesinin daha fazla olduğu sınıflarda eğitim verildiği analiz edilmiştir.
- İncelenen eğitim binasında sınıfların doluluk oranları farklılık göstermektedir. Örneğin bir güne ait farklı zaman periyotlarında doluluk oranının 0,1 ile 0,4 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Benzer doluluk oranı aralığı hafta içi gün bazında da görülmektedir ve en yüksek doluluk oranının salı günü olduğu sonucu görülmüştür.
- RSM modelinin varyans analizi (ANOVA) sonuçları tüm eğitim-öğretim dönemleri için anlamlıdır. Sonuçlar incelendiğinde, enerji tüketimlerinin  $R^2$  değeri oldukça yüksektir. Gerçek tüketim değerleri ile RSM tarafından tahmin edilen tüketim değerleri arasında çok yüksek bir ilişki vardır.
- CCD kullanılarak elde edilen ikinci dereceden modeller, girilen parametrelere yönelik güvenilir sonuçlar vermiştir. Isıtma ve

soğutma tüketimine ait çok amaçlı optimizasyon modeli, doluluk oranlarına ait aralıklar kullanılarak enerji tüketimini optimize etmek için faydalı olduğu görülmüştür.

- Parametrelerin etkisine bakıldığında tüm dönemlerde ısıtma enerjisi tüketimi için en etkili parametre kuzey yönlü doluluk oranı iken soğutma enerjisi tüketimi için en etkili parametre batı yönlü doluluk oranıdır. Doğu yönlü doluluk oranı en az etkili parametre olmuştur. Eğitim binalarında bu tarz bilgiler ışığında yön bazlı sınıf kullanımı ve doluluk oranlarına dikkat edilerek ders planları hazırlandığında enerji tüketiminden önemli bir azalma sağlanabilir.

Erken tasarım aşamasında, bina enerji verimliliği için bina doluluk oranlarını ve kullanıcı yoğunluğunu tahmin eden analizler yapılmalıdır. Bu analizler, sınıf, laboratuvar, ofis gibi farklı mekânların kullanımı sırasında ortaya çıkabilecek kullanıcı yoğunluklarını öngörerek, enerji verimliliği açısından uygun mekân organizasyonunun yapılmasını sağlayabilir.

Bu çalışmanın gösterdiği gibi derslik yerleşiminin daha doğru yapılması ile daha az enerji tüketen bir bina kullanımı mümkündür. Ancak çalışmanın sonuçları gelecekte yeni soruları ortaya koyabilir. Geliştirilen modele ait optimum çözümlere göre sınıflar kullanılabilir mi? Enerji tasarrufunu gerçekleştirmek için binada bulunan akademik bölümler hangi derslikleri kullanacağı seçme özgürlüğünden vazgeçmeye hazırlar mı? Bunun için binada bulunan farklı bölümlere ait kullanıcılar ve yöneticiler ekip halinde çalışabilirler mi? Bu değişkenlerin binanın enerji tüketimi üzerindeki etkisini bilmek araştırmacılar için ilgi ve merak konusu olacaktır.

##### 5. Sınırlılıklar ve Gelecekteki Çalışma (Limitations and Future Work)

Bu çalışmada, bazı sınırlılıklar bulunmaktadır. İlk olarak, ders programına uygun atanan sınıfların ders süresi boyunca sürekli kullanıldığı varsayılmıştır. Binaya ait haftalık ve günlük doluluk oranları hesaplamak için birden fazla matematiksel denklem kullanılmıştır. Bu denklemlerinin sayısının fazla olması doluluk oranı hesaplamalarında hata oranını artırabilir. Bu nedenle binaya ait doluluk oranı belirlenirken daha kapsamlı ölçüm teknolojilerinin kullanılması daha güvenilir sonuçlar verecektir. Analizler belirli bir bina için yapıldığından, sonuçlar başka binalar için geçerli olmayabilir. Farklı tipteki binalarda, benzer analizler yaparak sonuçların nasıl farklılaşacağı incelenebilir. Ayrıca çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aynı iklim verilerine ve benzer akademik takvime sahip eğitim binaları için güvenilir olabilir. Farklı iklim verileri ve farklı akademik takvime sahip eğitim binaları için sonuçlar farklılaşabilir. Çalışmanın bir diğer sınırlaması, sadece enerji tüketimine ait amaç fonksiyonlarına odaklanmaktadır. Sonraki çalışmalarda, enerji tüketiminin yanı sıra kullanıcı konforu ve maliyet gibi amaç fonksiyonlarına odaklanan araştırmalar yapılabilir. Bu çalışma için mevcut iklim verileri kullanılarak sonuçlar değerlendirilip karşılaştırılmıştır. Gelecekteki iklim verileri (2050, 2080, 2100 vb.) kullanılarak yapılacak olan çalışmada, sonuçların nasıl farklılaşacağını bilmek önem arz etmektedir.

##### Kaynaklar (References)

1. EnerData. World Energy Climate Statistics-Year Book 2023. <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>. Erişim tarihi Şubat 4, 2024.
2. United Nations Environment Programme, 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, 2022.
3. Yılmaz Y., Koçlar Oral G., An approach for cost and energy efficient retrofitting of a lower secondary school building, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (1), 393-407, 2019.

4. Gul M. S., Patidar S., Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building, Energy Build, 87, 155-165, 2015.
5. Sun Y., Luo X., Liu X., Optimization of a university timetable considering building energy efficiency: An approach based on the building controls virtual test bed platform using a genetic algorithm, Journal of Building Engineering, 35, 2021.
6. Liu Q., Ren J., Research on the building energy efficiency design strategy of Chinese universities based on green performance analysis, Energy Build, 224.
7. Chung M. H., Rhee E. K., Potential opportunities for energy conservation in existing buildings on university campus: A field survey in Korea, Energy Build, 78, 176-182, 2014.
8. Robinson O., Kemp S., Williams I., Carbon management at universities: A reality check, in Journal of Cleaner Production, 109-118, 2015.
9. Wright T. S. A., Definitions and frameworks for environmental sustainability in higher education, Higher Education Policy, 15 (2), 105-120, 2002.
10. Cortese A. D., The Critical Role of Higher Education in Creating a Sustainable Future, Planning for higher education, 31 (3), 15-22, 2003.
11. Klein-Banai C., Theis T. L., Quantitative analysis of factors affecting greenhouse gas emissions at institutions of higher education, in Journal of Cleaner Production, 48, 29-38, 2013.
12. Yeo J., Wang Y., An A. K., Zhang L., Estimation of energy efficiency for educational buildings in Hong Kong, J Clean Prod, 235, 453-460, 2019.
13. Lindberg T., Kaasalainen T., Moisio M., Mäkinen A., Hedman M., Vinha J., Potential of space zoning for energy efficiency through utilization efficiency, Advances in Building Energy Research, 14 (1), 19-40, 2020.
14. Junnila S., The Environmental Impact of an Office Building Throughout its Life Cycle, 2004.
15. Sartori I., Hestnes A. G., Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article, Energy Build, 39 (3), 249-257, 2007.
16. Junnila S., Horvath A., Asce A. M., Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building, Journal of Infrastructure Systems, 9 (4), 2003.
17. Thewes A., Maas S., Scholzen F., Waldmann D., Zurbes A., Field study on the energy consumption of school buildings in Luxembourg, Energy Build, 68, 460-470, 2014.
18. Airaksinen M., Energy use in day care centers and schools, Energies, 4 (6), 998-1009, 2011.
19. Güğül G.N., Köksal M.A., Economic evaluation of the methods used to reduce energy consumption of a single detached house, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (1), 215-234, 2019.
20. Azar E., Menassa C. C., A comprehensive analysis of the impact of occupancy parameters in energy simulation of office buildings, Energy Build, 55, 841-853, 2012.
21. Huovila A., Tuominen P., Airaksinen M., Effects of building occupancy on indicators of energy efficiency, Energies, 10(5), 2017.
22. Rozendaal E., Improving Building Energy Efficiency by Optimizing Occupancy Patterns Using Office Hoteling," Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2019.
23. Gu Y., Lo A., Niemegeers I., A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks, IEEE Communications Surveys and Tutorials, 11 (1), 13-32, 2009.
24. Meyn S., Surana A., Lin Y., Oggianu S. M., Narayanan S., Frewen T. A., A sensor-utility-network method for estimation of occupancy in buildings', in Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, Shanghai, 1494-1500, 2009.
25. Yang J., Santamouris M., Lee S. E., Review of occupancy sensing systems and occupancy modeling methodologies for the application in institutional buildings, Energy Build, 121, 344-349, 2016.
26. Wang W., Chen J., Wei W., Jiayu C., Demand-driven hvac control in large space based on occupancy distribution detection through indoor positioning systems, CLIMA 2016-proceedings of the 12th REHVA World Congress, 2016.
27. Zhao J., Lasternas B., Lam K. P., Yun R., Loftness V., Occupant behavior and schedule modeling for building energy simulation through office appliance power consumption data mining, Energy Build, 82, 341-355, 2014.



28. Yang Z., Becerik-Gerber B., The coupled effects of personalized occupancy profile based HVAC schedules and room reassignment on building energy use, *Energy Build*, 78, 113–122, 2014.
29. Dong B., Lam K. P., Building energy and comfort management through occupant behaviour pattern detection based on a large-scale environmental sensor network, *J Build Perform Simul*, 4 (4), 359–369, 2011.
30. Motta Cabrera D. F., Zareipour H., Data association mining for identifying lighting energy waste patterns in educational institutes, *Energy Build*, 62, 210–216, 2013.
31. Song K., Kim S., Park M., Lee H. S., Energy efficiency-based course timetabling for university buildings, *Energy*, 139, 394–405, 2017.
32. Cacchiani V., Caprara A., Roberti R., Toth P., A new lower bound for curriculum-based course timetabling, *Comput Oper Res*, 40 (10), 2466–2477, 2013.
33. Bettoni L., Zavanella L., Potential Energy Benchmark for Lecture Timetable Problem, *TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science*, 63, 173–180, 2019.
34. Jafarinejad T., Erfani A., Fathi A., Shafii M. B., Bi-level energy-efficient occupancy profile optimization integrated with demand-driven control strategy: University building energy saving, *Sustain Cities Soc*, 48, 2019.
35. Sethanan K., Theerakulpisut S., Benjapiporn C., Improving energy efficiency by classroom scheduling: A case study in a Thai university, in *Advanced Materials Research*, 1089–1095, 2014.
36. Gui X., Gou Z., Zhang F., The relationship between energy use and space use of higher educational buildings in subtropical Australia, *Energy Build*, 211, 2020.
37. Gui X., Gou Z., Lu Y., Reducing university energy use beyond energy retrofiting: The academic calendar impacts, *Energy Build*, 231, 2021.
38. García-Cuadrado J., Conserva A., Aranda J., Zambrana-Vasquez D., García-Armingol T., Millán G., Response Surface Method to Calculate Energy Savings Associated with Thermal Comfort Improvement in Buildings, *Sustainability*, 14 (5), 2022.
39. Baghoolizadeh M., Rostamzadeh-Renani R., Rostamzadeh-Renani M., Toghraie D., A multi-objective optimization of a building's total heating and cooling loads and total costs in various climatic situations using response surface methodology, *Energy Reports*, 77520–7538, 2021.
40. Sümer-Haydaraslan K., Dikmen N., Investigation of the effects of curtain wall angle on energy consumption in buildings, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (1), 315–325, 2024.
41. Pisello A. L., Petrozzi A., Castaldo V. L., Cotana F., On an innovative integrated technique for energy refurbishment of historical buildings: Thermal-energy, economic and environmental analysis of a case study, *Appl Energy*, 162, 1313–1322, 2014.
42. Coakley D., Raftery P., Keane M., A review of methods to match building energy simulation models to measured data, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123–141, 2014.
43. Mustafaraj G., Marini D., Costa A., Keane M., Model calibration for building energy efficiency simulation, *Appl Energy*, 130, 72–85, 2014.
44. Huang H., Binti Wan Mohd Nazi W. I., Yu Y., Wang Y., Energy performance of a high-rise residential building retrofitted to passive building standard – A case study, *Appl Therm Eng*, 181, 2020.
45. Kleijnen J. P. C., Response surface methodology for constrained simulation optimization: An overview, *Simul Model Pract Theory*, 16 (1), 50–64, 2008.
46. Ghorbani F., Younesi H., Ghasempouri S. M., Zinatizadeh A. A., Amini M., Daneshi A., Application of response surface methodology for optimization of cadmium biosorption in an aqueous solution by *Saccharomyces cerevisiae*, *Chemical Engineering Journal*, 145 (2), 267–275, 2008.
47. Khuri A. I., Mukhopadhyay S., Response surface methodology', *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2 (2), 128–149, 2010.
48. Bilen M., Ateş Ç., Bayraktar B., Determination of optimal conditions in boron factory wastewater chemical treatment process via response surface methodology, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 267–278, 2018.
49. Liu Y., Jia Wang X., Zhou S., Chen H., Enhancing public building energy efficiency using the response surface method: An optimal design approach, *Environ Impact Assess Rev*, 87, 2021.
50. Witek-Krowiak A., Chojnacka K., Podstawczyk D., Dawiec A., Bubala K., Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process, *Bioresour Technol*, 160, 150–160, 2014.
51. Costa N. R., Lourenço J., Pereira Z. L., Desirability function approach: A review and performance evaluation in adverse conditions, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 107 (2), 234–244, 2011.
52. Chang K. H., Multiobjective Optimization and Advanced Topics, in *e-Design*, 1105–1173, 2015.
53. Lee D. H., Jeong I. J., Kim K. J., A desirability function method for optimizing mean and variability of multiple responses using a posterior preference articulation approach, *Qual Reliab Eng Int*, 34 (3), 360–376, 2018.
54. Bezerra M. A., Santelli R. E., Oliveira E. P., Villar L. S., Escalera L. A., Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry, *Talanta*, 76 (5), 965–977, 2008.
55. Myers R. H., Montgomery D. C., Anderson-Cook C. M., Response surface methodology, Process and product optimization using designed experiments, WILEY, 2016.
56. Li Q., Zhang L., Zhang L., Wu X., Optimizing energy efficiency and thermal comfort in building green retrofit, *Energy*, 237, 2021.
57. Kadrić D., Aganović A., Kadrić E., Multi-objective optimization of energy-efficient retrofitting strategies for single-family residential homes: Minimizing energy consumption, CO2 emissions and retrofit costs, *Energy Reports*, 10, 1968–1981, 2023.
58. Kim D. D., Suh H. S., Heating and cooling energy consumption prediction model for high-rise apartment buildings considering design parameters, *Energy for Sustainable Development*, 61, 1–14, 2021.