



**BİNALARIN ENERJİ ETKİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE DENEY TASARIMI
VE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TABANLI BÜTÜNLEŞİK BİR
YAKLAŞIM**

Ayşenur COŞKUN

**DOKTORA TEZİ
MİMARLIK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ayşenur COŞKUN

11/07/2025

BİNALARIN ENERJİ ETKİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE DENEY TASARIMI VE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TABANLI BÜTÜNLEŞİK BİR YAKLAŞIM

(Doktora Tezi)

Ayşenur COŞKUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

İklim değişikliği ve küresel ısınmanın etkileri yapı sektörünü, enerji verimliliği ve karbon salımı açısından dönüşümün odağına yerleştirmiştir. Binalar, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40'ından ve karbon emisyonlarının %36'sından sorumludur ve mevcut yapı stokunun enerji performansı oldukça düşüktür. Dolayısıyla, yeni bina inşası yerine mevcut yapıların iyileştirilmesi, daha ekonomik, çevre dostu ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda “Enerji Etkin İyileştirme” yaklaşımı, yapı kabuğu ve enerji sistemlerinde yapılacak müdahalelerle enerji tüketimini ve çevresel etkileri azaltırken, ekonomik faydalar da sağlamaktadır. Bu çalışmada, mevcut bir konut yapısının yapı kabuğu ve enerji sistemlerine yönelik iyileştirme alternatiflerinin enerji, ekonomik ve çevresel performansları birlikte değerlendirilmiştir. Çalışmada Taguchi deney tasarımı, bina enerji simülasyonu (DesignBuilder-EnergyPlus), regresyon modelleme ve çok kriterli karar verme (MOORA) yöntemleri bütünsel olarak kullanılmıştır. 7 faktör ve farklı faktör seviyelerinden oluşan senaryolar doğrultusunda 648 kombinasyon modellenmiş ve her biri için toplam enerji tüketimi, ısıtma enerjisi tüketimi, enerji tasarrufu, karbon salımı, geri ödeme süresi, yıllık getiri, fayda/maliyet oranı gibi çok boyutlu çıktılar analiz edilmiştir. Bu kapsamda enerji, çevresel ve ekonomik göstergeler, farklı ağırlıklandırmalar altında birlikte optimize edilmiş ve en uygun senaryolar belirlenmiştir. Nicel bulgulara göre, mevcut duruma kıyasla yıllık toplam enerji tüketimi, enerji/çevresel odaklı senaryolarda 152 228 kWh'den 77 445 kWh'ye düşerek %49,1 oranında azalmıştır. Benzer şekilde yıllık CO₂ emisyonu 44,3 tondan 16,4 tona gerilemiş ve yaklaşık %63 düşüş sağlanmıştır. Bu senaryolarda geri ödeme süresi 8,5 yıl, fayda/maliyet oranı 2,24 ve yıllık ortalama yatırım getirisi %11,2 olarak bulunmuştur. Ekonomik odaklı senaryoda ise enerji tüketimi 79 653 kWh, CO₂ emisyonu 16,9 ton olup geri ödeme süresi 7,8 yıl, fayda/maliyet oranı 2,32 ve yıllık yatırım getirisi %11,6 olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen değerlendirmeler, geliştirilen bütünsel yöntemin, çok sayıda senaryoyu sınırlı sayıda simülasyon ile güvenilir biçimde analiz edebildiğini ve farklı önceliklere bağlı olarak esnek çözümler sunduğunu göstermektedir. Çalışma, enerji etkin bina iyileştirme sürecinde disiplinler arası, sistematik ve uygulanabilir bir karar destek modeli ortaya koyarak, hem enerji verimliliği hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik uygulanabilirlik açısından güçlü sonuçlar sunmaktadır.

Bilim Kodu : 80115
Anahtar Kelimeler : Enerji etkin iyileştirme, karar destek modeli, Taguchi deney tasarımı, çok kriterli karar verme, MOORA
Sayfa Adedi : 174
Danışman : Prof. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK,
İkinci Danışman : Prof. Dr. Fatma Zehra ÇAKICI

AN INTEGRATED EXPERIMENTAL DESIGN AND MULTI-CRITERIA DECISION MAKING APPROACH FOR ENERGY EFFICIENT-RETROFITTING OF EXISTING BUILDINGS

(Ph. D. Thesis)

Ayşenur COŞKUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

The effects of climate change and global warming have placed the construction sector at the center of transformation in terms of energy efficiency and carbon emissions. Buildings are responsible for approximately 40% of total energy consumption and 36% of carbon emissions, and the energy performance of the existing building stock is quite low. Therefore, improving existing structures instead of constructing new buildings offers a more economical, environmentally friendly and applicable solution. In this context, the “Energy Efficient Retrofit” approach reduces energy consumption and environmental impacts through interventions in the building envelope and energy systems, while also providing economic benefits. In this study, the energy, economic and environmental performances of the improvement alternatives for the building envelope and energy systems of an existing residential building were evaluated together. Taguchi design of experiments, building energy simulation (DesignBuilder-EnergyPlus), regression modeling and multi-criteria decision making (MOORA) methods were used in an integrated manner. In line with the scenarios consisting of 7 factors and different factor levels, 648 combinations were modeled and multidimensional outputs such as total energy consumption, heating energy consumption, energy saving, carbon emission, payback period, annual return, benefit/cost ratio were analyzed for each. In this context, energy, environmental, and economic indicators were optimized together under different weightings, and the most suitable scenarios were determined. According to the quantitative findings, compared to the current situation, total annual energy consumption decreased by 49.1% in the energy/environment-focused scenarios, from 152,228 kWh to 77,445 kWh. Similarly, annual CO₂ emissions decreased from 44.3 tonnes to 16.4 tonnes, a decrease of approximately 63%. In these scenarios, the payback period was 8.5 years, the benefit/cost ratio was 2.24, and the annual average return on investment was 11.2%. In the economic-focused scenario, energy consumption was 79,653 kWh, CO₂ emissions were 16.9 tons, the payback period was 7.8 years, the benefit/cost ratio was 2.32, and the annual return on investment was 11.6%. The resulting evaluations demonstrate that the developed integrated method can reliably analyze a large number of scenarios with a limited number of simulations and offers flexible solutions based on different priorities. The study presents an interdisciplinary, systematic, and applicable decision support model for energy-efficient building retrofits, offering robust results in terms of energy efficiency, environmental sustainability, and economic viability.

Science Code : 80115
Key Words : Energy efficient retrofit, decision support model, Taguchi
experimental design, multi-criteria decision making, MOORA
Page Number : 174
Supervisor : Prof. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK,
Co-Supervisor : Prof. Dr. Fatma Zehra ÇAKICI

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi, birikim ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, araştırmama bilimsel yönden katkı sunmakla kalmayıp, motivasyonumu daima yüksek tutmamı sağlayan çok kıymetli danışmanım Prof. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK'a ve eş danışmanım Prof. Dr. Fatma Zehra ÇAKICI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez sürecinde değerli görüş ve katkılarıyla çalışmamın gelişimine katkı sağlayan TİK üyelerim Prof. Dr. Figen BEYHAN ve Dr. Öğretim Üyesi Turaj Arda AŞRAFI'ye ayrıca samimi destek ve yardımları için Prof. Dr. Mustafa Zeki YILMAZOĞLU'na gönülden teşekkür ederim.

Tez çalışmam, ERA-NET, 210447-4401 numaralı “Sığ-Jeotermal Kaynaklı Düşük Sıcaklıklı Bölgesel Isıtma Sistemi” projesi ile Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından desteklenen FPD-2024-8830, “Binalarda Enerji Etkin İyileştirme Önlemlerinin Seçim Sürecine Yönelik Bir Araştırma” projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Sağladıkları finansal ve bilimsel destekler için her iki kuruma da teşekkür ederim.

Araştırma sürecinde fikirleri, önerileri ve manevi destekleriyle yanımda olan sevgili abim ve kız kardeşime, her koşulda varlıklarıyla bana güç veren, hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili annem ve babama sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca bu zorlu süreçte yanımda olan, maddi, manevi desteklerini daima hissettiren değerli arkadaşlarım Betül, Güneş, Merve, Rüya ve Sinem'e de gönülden teşekkür ederim.

Son olarak, uzun ve yorucu bir akademik yolculuk boyunca azimle çalışmamı sürdürebilmemi sağlayan irademe, sabrıma ve emeğime duyduğum saygıyla, kendime de teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE.....	9
2.1. Yasal Düzenlemeler ve Politika Çerçevesi	9
2.1.1. Avrupa’da binalarda enerji performansı hakkında yasal düzenlemeler....	9
2.1.2. Türkiye’de binalarda enerji performansı hakkında yasal düzenlemeler ...	15
2.2. Mevcut Yapılarda Enerji Etkin İyileştirme	20
2.2.1. Enerji etkin iyileştirmenin temel aşamaları	21
2.2.2. Enerji etkin iyileştirmeyi etkileyen temel unsurlar	23
2.2.3. Bina iyileştirme teknolojileri	25
2.3. Bina Enerji Performansının Belirlenmesi	27
2.3.1. Enerji simülasyonu ve modelleme yaklaşımları	28
2.3.2. Bina enerji simülasyon modelinin kalibrasyonu ve yöntemsel adımları ..	29
2.4. Bütünleşik Yöntemlere Yönelik Tanımlar ve Literatür Analizi.....	34
2.4.1. İstatistiksel deneysel tasarım.....	34

	Sayfa
2.4.2. Taguchi deney tasarımı yöntemi	38
2.4.3. Regresyon modelleme	43
2.4.4. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemi	44
2.4.5. Entegre yaklaşımlar.....	46
3. MATERYAL VE YÖNTEM	51
3.1. Mevcut Binanın Modellenmesi ve Kalibrasyonu.....	53
3.2. Yanıt Değişkenlerinin Belirlenmesi	53
3.3. Faktör ve Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi	54
3.4. Taguchi Ortogonal Dizi ile Deney Tasarımının Oluşturulması	58
3.4.1. Taguchi yöntemi ve ortogonal dizi seçimi	58
3.4.2. Faktörlerin kodlanması ve L36 deney matrisinin oluşturulması.....	59
3.4.3. Sinyal-gürültü (S/N) analizi	63
3.5. Deneylerin Gerçekleştirilmesi.....	64
3.5.1. Enerji ve emisyon verilerinin elde edilmesi.....	65
3.5.2. Ekonomik analizlerin yapılması.....	65
3.6. Regresyon Modelleme Süreci	68
3.6.1. Regresyon denklemlerinin oluşturulması.....	68
3.6.2. Doğrulama deneylerinin yapılması	69
3.6.3. Tüm kombinasyonların hesaplanması.....	70
3.7. Çok Kriterli Karar Verme Süreci	70
3.7.1. MOORA ile nihai değerlendirmenin yapılması ve en iyi kombinasyonun belirlenmesi.....	71
3.7.2. Ağırlık senaryoları ile duyarlılık analizi	72
3.7.3. MOORA ve TOPSIS yöntemleriyle elde edilen sonuçların değerlendirilmesi	73

4. GELİŞTİRİLEN MODELİN UYGULANMASI: SAMSUN/HAVZA'DA BİR KONUT BİNASI.....	75
4.1. İncelenen Yapının Tanıtımı.....	75
4.1.1. Yapının konumu ve fiziksel özellikleri.....	76
4.1.2. Modelleme için kullanılan termofiziksel veriler	78
4.2. Mevcut Durum Analizi	79
4.2.1. Mevcut yapının enerji modelinin oluşturulması ve kalibrasyonu	80
4.2.2. Mevcut yapının emisyon değerlendirmesi	85
4.2.3. Mevcut yapının ekonomik performans değerlendirmesi.....	85
4.3. Senaryoların Uygulanması ve İstatistiksel Modelin Kurulması.....	86
4.3.1. Sinyal/gürültü oranına göre Taguchi analizlerinin yapılması	88
4.3.2. Regresyon modelinin kurulması ve doğrulanması.....	96
4.3.3. Regresyon denklemleri ile 648 kombinasyonun hesaplanması ve veri setinin hazırlanması	119
4.4. Çok Kriterli Karar Verme Sonuçları	120
4.4.1. MOORA yöntemi ile en uygun kombinasyonun belirlenmesi.....	120
4.4.2. Farklı ağırlık senaryolarına göre sıralama değişimi ve duyarlılık analizi.	122
4.4.3. MOORA ve TOPSIS yöntemleri ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	126
5. TARTIŞMA	129
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	133
KAYNAKLAR	143
EKLER.....	153
EK-1. Mevcut enerji simülasyon raporu	154
EK-2. Gerekli kütüphanelerin çağırılıp, kombinasyonları oluşturulması	157

Sayfa

EK-3. Regresyon denklemlerine göre her bir yanıt değişkeni için tahminlerin hesaplanması.....	158
EK-4. Tüm tahmin sonuçlarını içeren karar matrisinin oluşturulması	159
EK-5. Tüm tahmin sonuçlarını içeren veri seti	162
EK-6. Senaryo 1 için MOORA kodu.....	170
EK-7. Senaryo 1 için TOPSİS kodu	171
ÖZGEÇMİŞ	172



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye’de binalarda enerji verimliliğine ilişkin sektörün durum değerlendirmesi	19
Çizelge 2.2. Başlı Sayfaca Bina Enerji Simülasyon programları	29
Çizelge 2.3. Kalibrasyon için gerekli olan, istatistiksel kriterlerin eşik sınırları.	33
Çizelge 2.4. Yaygın ÇKKV Yöntemlerinin Karşılaştırılması	46
Çizelge 3.1. Yanıt değişkenleri	54
Çizelge 3.2. İyileştirme için belirlenen tekil iyileştirme önlemleri.	56
Çizelge 3.3. Çalışma için belirlenen malzemelerin özellikleri	57
Çizelge 3.4. Faktör ve faktör seviyeleri	58
Çizelge 3.5. Üç tanesi iki seviyeli dört tanesi üç seviyeli ($2^3 \times 3^4$) veri seti	59
Çizelge 3.6. L36 deney kombinasyonları	60
Çizelge 3.7. $2^3 \times 3^4$ veri setine ait L36 deney matrisi.....	62
Çizelge 3.8. Yanıt değişkenlerine ait S/N seçimleri	64
Çizelge 3.9. Birinci senaryoya ait kriterler için belirlenen yönelim ve ağırlıklar.....	72
Çizelge 3.10. Alternatif senaryolara ait kriterler için belirlenen yönelim ve ağırlıklar ..	73
Çizelge 4.1. Tavsiye edilen U değerleri (TS 825, 2024)	77
Çizelge 4.2. Bina zarfını oluşturan bileşenlerin termofiziksel özellikleri	79
Çizelge 4.3. Binaya ait yapısal ve teknik bilgiler	82
Çizelge 4.4. Kalibrasyonun sağlanmasında kullanılan belirsizlik parametreleri ve değerleri.....	83
Çizelge 4.5. Mevcut enerji performansı.....	83
Çizelge 4.6. $N(MBE)$ ’nin hesaplanması.....	84
Çizelge 4.7. $CV(RMSE)$ ’nin hesaplanması	84
Çizelge 4.8. Belirsizlik indeks sonuçlarının değerlendirilmesi	84

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.9. Mevcut sistemin toplam enerji tüketim maliyeti hesaplanması.....	85
Çizelge 4.10. Mevcut sistemin toplam enerji tüketim maliyeti hesaplanması.....	86
Çizelge 4.11. L36 ortagonal dizisine ait kombinasyonların deney sonuçları	87
Çizelge 4.12. Yıllık toplam enerji tüketimi için en etkin kombinasyon	89
Çizelge 4.13. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi için en etkin kombinasyon.....	90
Çizelge 4.14. Yıllık enerji tasarrufu miktarı için en etkin kombinasyon.....	91
Çizelge 4.15. Yıllık CO ₂ emisyonu için en etkin kombinasyon	92
Çizelge 4.16. Geri ödeme süresi için en etkin kombinasyon	93
Çizelge 4.17. Ortalama yıllık yatırım getirisi için en etkin kombinasyon	94
Çizelge 4.18. Fayda/Maliyet oranı için en etkin kombinasyon	95
Çizelge 4.19. Yıllık toplam enerji tüketimine ait regresyon modeli doğrulama sonuçları	100
Çizelge 4.20. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimine ait regresyon modeli doğrulama sonuçları	102
Çizelge 4.21. Yıllık enerji tasarrufu miktarına ait regresyon modeli doğrulama sonuçları	104
Çizelge 4.22. Yıllık CO ₂ emisyonuna ait regresyon modeli doğrulama sonuçları	107
Çizelge 4.23. Geri ödeme süresine ait regresyon modeli doğrulama sonuçları.....	111
Çizelge 4.24. Ortalama yıllık yatırım getirisine ait regresyon modeli doğrulama sonuçları	115
Çizelge 4.25. Fayda/Maliyet oranına ait regresyon modeli doğrulama sonuçları	119
Çizelge 4.26. Enerji odaklı birinci senaryo kapsamında ilk 10 alternatifin sonuçları ve MOORA skorları	121
Çizelge 4.27. Birinci senaryo kapsamında elde edilen en iyi kombinasyon.....	122
Çizelge 4.28. Çevresel odaklı ikinci senaryo kapsamında ilk 10 alternatifin sonuçları ve MOORA skorları	123
Çizelge 4.29. Ekonomi odaklı üçüncü senaryo kapsamında ilk 10 alternatifin sonuçları ve MOORA skorları	123

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.30. Her bir senaryoya göre ilk 10 kombinasyon ve sıralamaları	124
Çizelge 4.31. Enerji odaklı birinci senaryo kapsamında ilk 10 alternatifin sonuçları ve TOPSİS skorları.....	126
Çizelge 4.32. MOORA ve TOPSİS sonuçlarının karşılaştırılması	127
Çizelge 6.1. S/N analizi sonuçlarına göre yanıt değişkenlerine ait en etkin kombinasyonlar	135
Çizelge 6.2. Her bir yanıt değişkenine ait regresyon modelinin hata yüzdeleri	137
Çizelge 6.3. Farklı ağırlık senaryolarına ait optimum kombinasyonlar.....	138
Çizelge 6.4. Mevcut durum ve optimum senaryoların enerji, çevresel ve ekonomik performans sonuçları.....	139

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Tezin strüktürü.....	7
Şekil 2.1. AB'nin binalar için enerji verimliliği politikaları çerçevesinde gelişim çizelgesi	11
Şekil 2.2. Revize edilen TS 825'e göre güncellenen iklim bölgeleri ve kaynak	16
Şekil 2.3. Revize edilen TS 825'e göre güncellenen tavsiye edilen U değerleri	17
Şekil 2.4. Şekil Enerji etkin bina iyileştirme programın temel aşamaları	21
Şekil 2.5. EEİ sürecini etkileyen temel unsurlar	23
Şekil 2.6. Bina iyileştirme teknolojilerinin ana kategorileri	25
Şekil 2.7. Binalarda alt sistemlerin dinamik etkileşimleri	27
Şekil 2.8. Taguchi yöntemi uygulama adımları	40
Şekil 3.1. Önerilen yöntemin adımları	51
Şekil 4.1. Normal kat planı	77
Şekil 4.2. Modelin oluşturulması ve kalibrasyonu süreci akış şeması.....	80
Şekil 4.3. Seçilen binanın 3 boyutlu modeli	81
Şekil 4.4. Yıllık toplam enerji tüketimi için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu	89
Şekil 4.5. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu	90
Şekil 4.6. Yıllık enerji tasarrufu miktarı için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu	91
Şekil 4.7. Yıllık CO ₂ emisyonu için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu.....	92
Şekil 4.8. Geri ödeme süresi için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu.....	93
Şekil 4.9. Ortalama yıllık yatırım getirisi için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu	94

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. Fayda/Maliyet oranı için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu	95
Şekil 4.11. Yıllık toplam enerji tüketimine ait ANOVA sonuçları.....	97
Şekil 4. 12. Yıllık toplam enerji tüketimine ait regresyon modeli.....	98
Şekil 4.13. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimine ait ANOVA sonuçları	100
Şekil 4.14.Yıllık ısıtma enerjisi tüketimine ait regresyon modeli	101
Şekil 4.15. Yıllık enerji tasarrufu miktarına ait ANOVA sonuçları	102
Şekil 4.16. Yıllık enerji tasarrufu miktarına ait regresyon modeli	103
Şekil 4.17. Yıllık CO ₂ emisyonuna ait ANOVA sonuçları.....	105
Şekil 4.18. Yıllık CO ₂ emisyonuna ait regresyon modeli.....	106
Şekil 4.19. Geri ödeme süresine ait ana faktörlere dayalı ilk model için ANOVA sonuçları.....	107
Şekil 4.20. Geri ödeme süresine ait ana faktörlere dayalı ilk modelin özeti	108
Şekil 4. 21. Geri ödeme süresine ait A×B, A×C ve B×C etkileşimlerini içeren nihai modelin ANOVA sonuçları	108
Şekil 4. 22. Geri ödeme süresine ait regresyon modeli.....	110
Şekil 4. 23. Ortalama yıllık yatırım getirisine ait ana faktörlere dayalı ilk model için ANOVA sonuçları.....	112
Şekil 4.24. Ortalama yıllık yatırım getirisine ait ana faktörlere dayalı ilk modelin özeti.....	112
Şekil 4.25. Ortalama yıllık yatırım getirisine ait A×B, A×C ve B×C etkileşimlerini içeren nihai modelin ANOVA sonuçları.....	113
Şekil 4.26. Ortalama yıllık yatırım getirisine ait regresyon modeli.....	114
Şekil 4.27. Fayda/Maliyet oranına ait ana faktörlere dayalı ilk model için ANOVA sonuçları	116
Şekil 4.28. Fayda/Maliyet oranına ait ana faktörlere dayalı ilk modelin özeti	116
Şekil 4.29. Fayda/Maliyet oranına ait A×B, A×C ve B×C etkileşimlerini içeren nihai modelin ANOVA sonuçları	117

Şekil	Sayfa
Şekil 4.30. Fayda/Maliyet oranına ait regresyon modeli	118
Şekil 4.31. İlk 10 alternatifin MOORA skorları	121
Şekil 4.32. Farklı ağırlık senaryoları altında ilk 10 kombinasyonun sıralama değişimleri.....	125



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Seçilen konut binası.....	76



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

CO₂	Karbondioksit
K	Kelvin
kg	kilogram
kWh	Kilovat saat
m²	Metrekare
R	Isıl geçirgenlik direnci
U	Isı geçirme katsayısı
W	Watt
%	Yüzde
λ	Isıl iletkenlik katsayısı

Kısaltmalar

Açıklamalar

AB	Avrupa Birliği
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANN	Artificial Neural Network
ANOVA	Analysis of Variance
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
BES	Bina Enerji Simülasyonu
BIM	Building Information Modeling
CCD	Central Composite Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
CV(RMSE)	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
ÇŞB	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
DOE	Design of Experiments
DT	Decision Tree
EC	European Community
ECM	Energy Conservation Measures
EEC	European Economic Community
EEİ	Enerji Etkin İyileştirme
EED	Energy Efficiency Directive
EKB	Enerji Kimlik Belgesi
ELECTRE	Elimination Et Choix Traduisant la Realité
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EPC	Energy Performance Certificates
EPS	Expanded Polystyrene
ESCO	Energy Service Company
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EU	European Union
FEMP	Federal Energy Management Program
GOF	Goodness Of Fit
GRA	Grey Relational Analysis
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IEA	International Energy Agency
IPMVP	International Performance Measurement and Verification Protocol
LCA	Life Cycle Assesment
LCC	Life Cycle Cost
LED	Light Emitting Diode
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MEPS	Minimum Energy Performance Standards
MLR	Multiple Linear Regression
MOORA	Multi-Objective Optimization on the basis Ratio Analysis

Kısaltmalar**Açıklamalar**

NECPs	The National Energy and Climate Plans
N(MBE)	Normalized Mean Bias Error
nZEB	Nearly-Zero Energy Buildings
PCM	Phase Change Material
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
PV	Photovoltaic
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
RF	Random Forest
SAVE	Specific Actions for Vigorous Energy Efficiency
S/N	Signal to Noise Ratio
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient
SVR	Support Vector Regression
TL	Türk Lirası
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
Tvis	Visible Transmittance
VIKOR	VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje
XGBoost	Extreme Gradient Boosting
XPS	Extruded Polystyrene
YZ	Yapay Zeka

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinin en kritik sorunlarından biri haline gelen iklim değışikliği ve küresel ısınma, dünya genelinde sürdürülebilir kalkınma politikalarının merkezine yerleşmiştir. Bu bağlamda, küresel enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumlu olan yapıli çevreler, özellikle de binalar, sürdürülebilirlik çabalarının odak noktası haline gelmiştir. Kentler ve yapıli çevreler, küresel ölçekte sera gazlarının yaklaşık %70'inden enerji tüketiminin ise %75'inden sorumludur (IEA, 2023). Yapılı çevrelerin en önemli bileşeni olan binalar ise küresel enerji tüketiminin yaklaşık %34'ünü ve karbon emisyonlarının neredeyse %37'sini oluşturmaktadır (Zhang, Ma, Zhou, ve Yan, 2024) ve bu oran IPCC (2022) raporunda da binaların CO₂ emisyonlarına %31 düzeyinde katkıda bulunduğu şeklinde desteklenmektedir. Bu rakamlar, bina sektörünün enerji verimliliği ve karbon emisyonlarının azaltılması açısından ne denli kritik bir öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Avrupa Birliği'nde binaların %85'i 2000 yılından önce inşa edilmiş olup, bu binaların %75'i düşük enerji performansına sahiptir (Avrupa Komisyonu, 2025). Benzer şekilde ulusal veriler, Türkiye'deki mevcut bina stokunun büyük bir kısmının, güncel enerji verimliliği standartlarının çok altında performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Binaların yaklaşık %75'i 25 yaşıin üzerindedir ve bu stokun yalnızca %40'nın enerji verimliliği potansiyeline sahip olduğu tahmin edilmektedir (IICEC, 2025). Ayrıca küresel ölçekte yapıli stokunun yenilenme hızı yıllık sadece %1-2 civarındadır (Niemelä, Kosonen ve Jokisalo, 2017) ve mevcut binaların büyük bir kısmı önümüzdeki on yıllarda da kullanılmaya devam edecektir. Bu durum, mevcut binaların enerji verimli hale getirilmesinin, yeni ve verimli binalar inşa etmek kadar, hatta bazı durumlarda daha da önemli olduğunu göstermektedir.

Mevcut binaları iyileştirmenin en radikal yolu, bunları yıkıp yerlerine yeni, enerji etkin binalar inşa etmektir. Ancak bu yaklaşım hem ekonomik açıdan maliyetli hem de çevresel açıdan sürdürülebilir değildir. Yıkım ve yeniden inşa süreçleri, önemli miktarda atık üretiminin yanı sıra, yeni yapı malzemelerinin üretimi ve taşınması için gereken enerji ve kaynak tüketimi nedeniyle ciddi çevresel etkilere sahiptir. Ayrıca, yatırım limitleri nedeniyle, binaların yenilenme oranı oldukça düşüktür (Ma, Cooper, Daly ve Ledo, 2012; Pombo, Rivela ve Neila, 2016). Bu nedenle, "Enerji Etkin İyileştirme" (*Energy Efficient*

Retrofitting) olarak adlandırılan ve mevcut binaların enerji performansını artırmaya yönelik müdahaleleri içeren yaklaşım, daha az yatırımla daha hızlı sonuç alınabilecek bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

Enerji etkin iyileştirme, bir binanın enerji tüketimini azaltmak amacıyla, iç mekân konforunu koruyarak veya iyileştirerek, yapı kabuğunun (duvar, çatı veya pencereler), enerji sistemlerinin (ısıtma, soğutma veya kullanım sıcak suyu), aydınlatma ve diğer elektrikli cihazların mevcut durumlarının yenilikçi ve verimli teknolojilerle değiştirilmesi veya iyileştirilmesi olarak tanımlanmaktadır (Ascione, Bianco, De Masi, Mauro ve Vanoli, 2017). Bu tür iyileştirmeler, binaların enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilir, iç mekân konfor koşullarını iyileştirebilir ve binaların piyasa değerini artırabilir.

Farklı ölçek ve uygulama alanlarında yapılan enerji etkin iyileştirmeye ilişkin çalışmaların sonucunda, sera gazı emisyonlarının ve bina enerji tüketiminin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Grossi, Ge, Zmeureanu, ve Baba (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, elektrikli ısıtma ve yapı kabuğu iyileştirmelerini içeren yenilemelerin, elektriğin ağırlıklı olarak yenilenebilir ve fosil olmayan yakıtlardan üretildiği bölgelerde, yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarını %75'e kadar azaltabileceği gösterilmiştir. Benzer şekilde, Razzaq, Amjad, Qamar, Asim, Ishfaq, Razzaq, ve Mawra, (2023) tarafından yürütülen bir çalışmada, akademik bir binanın yenilenmesinin yılda 32,8 metrik ton CO₂ emisyonunun azaltılmasını sağladığı ve binanın enerji tüketiminin yaklaşık %34'e kadar düşürüldüğü belirtilmiştir.

Enerji etkin iyileştirme çalışmaları, sadece çevresel faydalar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik ve sosyal faydalar da sunmaktadır. Papineau, Rivers ve Yassin, (2025) yaptıkları çalışmada konutlarda yapılan enerji verimliliği iyileştirmeleri doğal gaz tüketimini 10 yıl boyunca ortalama %20 oranında azaltarak doğrudan maliyet tasarrufu sağladığını ortaya koymuşlardır. Yaşam döngüsü analizlerine dayanan çalışmalar, derin enerji iyileştirmeleri içeren malzemelerin önemli ölçüde birincil enerji ve maliyet avantajı sunduğunu göstermektedir (Piccardo ve Gustavsson, 2023). Ayrıca Lozinsky, Casquero-Modrego ve Walker (2025), kapsamlı literatür incelemelerine dayanan çalışmalarında, yapı kabuğu iyileştirmelerinin akustik ortamı, termal konforu ve iç mekân kalitesini iyileştirerek sosyal ve sağlık açısından olumlu etkiler sağladığını belirtmişlerdir.

Literatürde, binaların iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda yalnızca enerji verimliliği değil, iyileştirme maliyeti, bakım ve işletme giderleri, geri ödeme süresi (Jakob, 2006; Liu, Liu,

Ye ve Liu, 2018; Biserni, Valdiserri, D’Orazio ve Garai) kullanılan malzemelerin özellikleri, konfor koşulları, organizasyonel çözümler (Brunelli, Castellani, Garinei, Biondi ve Marconi, 2016; Schwartz, Raslan ve Mumovic, 2016), ekolojik ve iklimsel etkiler (Sun, Gou ve Lau, 2018), sosyal, yasal ve politik koşullar (Gram-Hanssen, 2014) ile kullanıcı gereksinimleri (Ascione, Bianco, De Masi, Mastellone, Mauro ve Vanoli, 2020) gibi çok sayıda kriterin de değerlendirmeye alındığı görülmektedir. Bu durum, bina iyileştirme sürecinin yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik, çevresel ve sosyal açılardan da çok boyutlu bir karar problemine dönüştüğünü göstermektedir.

Öte yandan, bu kriterleri etkileyen yapı kabuğu ve sistem bileşenlerine ilişkin faktörlerin ve bunlara ait farklı seviyelerin fazla olması, karar verme aşamasında yüksek sayıda alternatif senaryonun analiz edilmesini zorunlu kılmaktadır. Ancak bu durum, yüzlerce hatta binlerce simülasyonun yapılmasına yol açarak zaman ve kaynak kullanımı açısından önemli kısıtlar doğurmakta ve hata riskini artırmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar çoğu zaman ya kapsamlı simülasyon süreçleri yürütmekte ya da sezgisel yaklaşımlarla sınırlı sayıda senaryo üzerinden karar vermektedir.

Bu bağlamda, tez çalışmasının temel amacı, mevcut binaların enerji etkin iyileştirilmesine yönelik karar süreçlerinde karşılaşılan zaman, maliyet ve hesaplama yükünü azaltırken, aynı zamanda teknik, ekonomik ve çevresel açıdan güvenilir ve dengeli sonuçlara ulaşmayı sağlayacak bir karar destek yaklaşımı geliştirmektir.

Bu amaç doğrultusunda çalışmada, enerji simülasyonu, deney tasarımı, istatistiksel modelleme ve çok kriterli karar verme tekniklerini bir arada kullanan bütünlük bir yöntem önerilmiştir.

Çalışmanın hedefi, yapı kabuğu ve sistem bileşenlerine yönelik farklı iyileştirme kombinasyonlarını hem enerji hem ekonomik hem de çevresel kriterler üzerinden sistematik biçimde analiz edebilen, zamandan ve kaynaklardan tasarruf sağlayan bir karar modelinin oluşturulmasıdır. Bu model, mühendislik temelli kararları daha nesnel ve karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirmeye olanak tanıyarak, enerji etkin bina iyileştirme stratejilerinin daha verimli ve uygulanabilir şekilde planlanmasını mümkün kılmaktadır.

Araştırma sorusu

Yapıların enerji performansını artırmaya yönelik yapı kabuğu ve sistem senaryolarının, çok sayıda performans kriteri üzerinden birlikte değerlendirilmesi genellikle parçalı ya da tek boyutlu analizlerle sınırlı kalmaktadır. Bu durum, enerji verimliliği hedeflerine ulaşmada teknik ve ekonomik açıdan istenen düzeyde verimli olmayan kararların alınmasına yol açabilmektedir. Dolayısıyla, çoklu faktör ve kriter içeren senaryoların entegrasyonunu mümkün kılan sistematik bir yaklaşım gereklidir. Bu bağlamda, enerji etkin bina iyileştirme sürecinde, yapı kabuğu ve enerji sistemlerine ait çok sayıda faktör ve seviyeden oluşan alternatiflerin, hem enerji hem de çevresel ve ekonomik performans kriterleri açısından birlikte değerlendirilmesini sağlayacak pratik, güvenilir ve uygulanabilir bir karar destek modeli geliştirilebilir mi? Sorusunu cevaplamak hedefiyle araştırmaya başlanmıştır.

Araştırmanın hipotezi

Enerji etkin iyileştirme önlemlerinin (yapı kabuğu ve enerji sistemi iyileştirmeleri) mevcut binalara uygulanması, yıllık enerji tüketimini ve çevresel etkileri önemli ölçüde azaltırken, aynı zamanda ekonomik olarak da uygulanabilir çözümler sunarak bina performansını ve sürdürülebilirliğini artıracaktır. Taguchi deney tasarımı, bina enerji simülasyonları, regresyon modelleme ve çok kriterli karar verme yöntemlerinin bütünlük olarak uygulanmasıyla, enerji, çevresel ve ekonomik hedefleri eş zamanlı olarak optimize eden en uygun iyileştirme kombinasyonları daha az sayıda analizle güvenilir şekilde belirlenebilir.

Araştırma yöntemi

Bu çalışmanın temel amacı, mevcut bir yapının enerji, ekonomik ve çevresel performansını iyileştirmeye yönelik farklı yapı kabuğu ve sistem kombinasyonlarını bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmek ve en uygun yapı bileşimi ile sistem çözümünü belirlemektir. Bu kapsamda, simülasyon sayısını azaltarak daha yönetilebilir bir analiz süreci elde etmeye imkân tanıyan Taguchi istatistiksel deney tasarımı yöntemi benimsenmiştir. Yedi farklı faktör (duvar, çatı, zemin, pencere, aydınlatma, PV panel kullanımı ve ısıtma sistemi) ikili ve üçlü seviyelerle deneysel tasarıma dâhil edilmiş, bu doğrultuda oluşturulan L36 ortogonal dizi DesignBuilder–EnergyPlus yazılımında yıllık 8760 saatlik simülasyonlarla analiz edilmiştir.

Öncelikle mevcut yapı modellenmiş ve iç ortam sıcaklık kayıtları üzerinden kalibrasyonu yapılmıştır. Daha sonra Taguchi deneyleriyle elde edilen verilerden hareketle, her bir yanıt değişkeni (yıllık enerji tüketimi, karbon emisyonu, enerji tasarrufu, geri ödeme süresi, yıllık getiri ve fayda-maliyet oranı) için regresyon modelleri geliştirilmiş ve toplam 648 kombinasyon tahmin edilmiştir. Son aşamada ise MOORA yöntemi kullanılarak çok kriterli karar verme analizi gerçekleştirilmiş ve en uygun yapı-sistem kombinasyonu belirlenmiştir.

Bu yönüyle çalışma, enerji, ekonomik ve çevresel çıktılar arasında dengeli kararlar verilmesine imkân sağlayan bütünlük bir yöntem sunmaktadır.

Araştırmanın sınırlılıkları

- Çalışma tek bir konut yapısı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Farklı iklim bölgeleri, kullanım türleri ve bina tipleri için genellenebilirliği test edilmemiştir.
- CO₂ emisyon hesaplamaları, enerji tüketim verilerine dayalı olarak yapılmıştır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (*Life Cycle Assessment, LCA*) kapsam dışı bırakılmıştır. Piyasa koşullarındaki dalgalanmalar sebebiyle ekonomik analizlerde dinamik yöntemler yerine statik yöntemler kullanılmıştır.
- Kullanıcı davranışları, iç yükler ve iklim verileri gibi değişkenler sabit kabul edilmiş, dinamik etkiler modele yansıtılmamıştır.

Varsayımlar

- Enerji simülasyon yazılımı (DesignBuilder, EnergyPlus) ile elde edilen sonuçlar, gerçek durumu temsil etmektedir.
- Taguchi L36 dizisi, tüm kombinasyon uzayının yeterli düzeyde örneklemesini sağlamaktadır.
- Geliştirilen regresyon modelleri, test edilmeyen kombinasyonlar için yeterli doğrulukta tahmin üretmektedir.
- Kriter ağırlıkları ve yönelimleri karar verici perspektifini doğru şekilde temsil etmektedir.

Tezin strüktürü

Bu tez çalışması, toplam altı ana bölümden oluşmaktadır. Şekil 1.1’de te gösterildiği gibi birinci bölüm olan “Giriş” kısmında, çalışmanın genel çerçevesi, amacı, araştırma problemi, hipotezleri ve yöntemi açıklanmıştır.

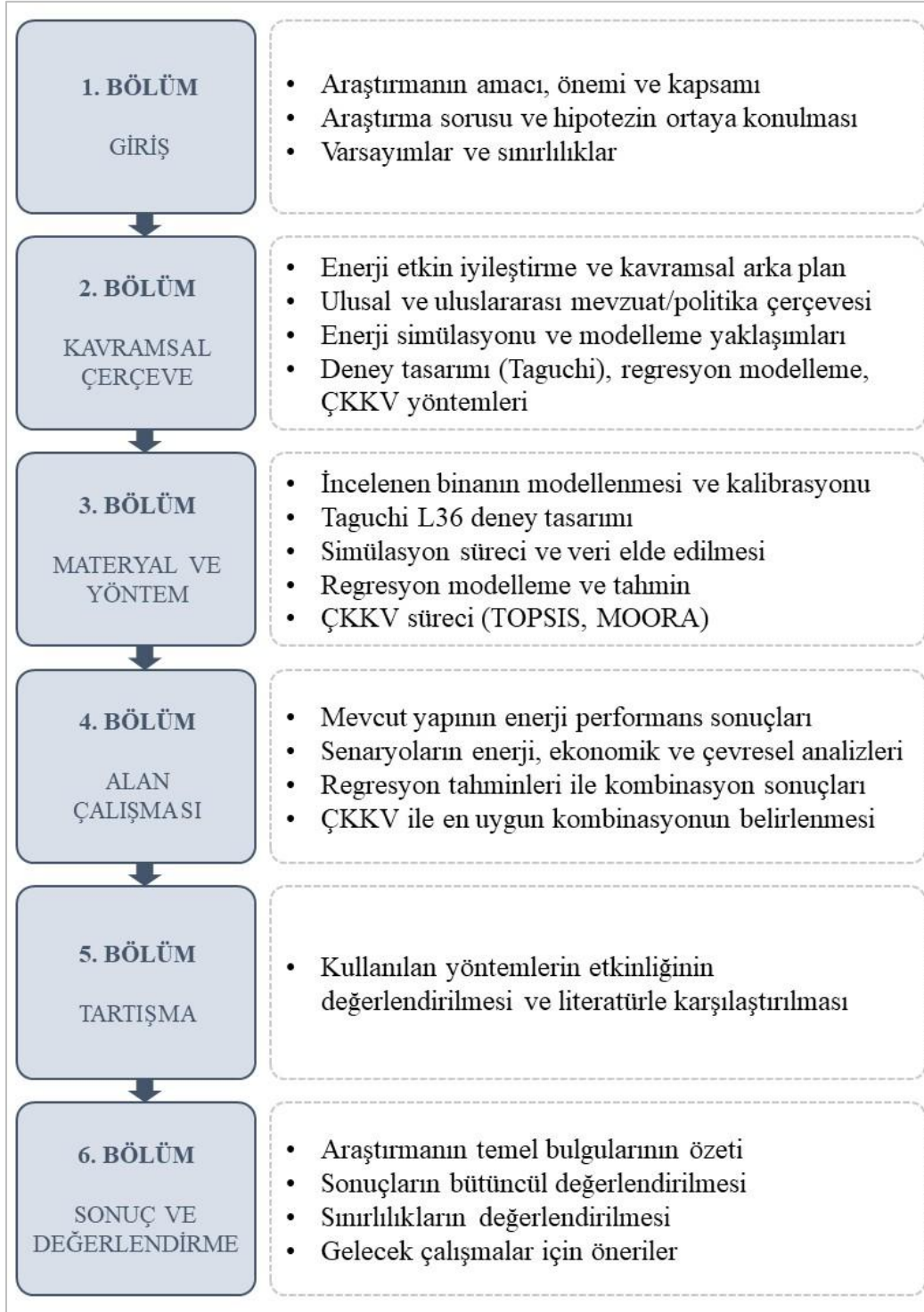
İkinci bölümde, enerji etkin iyileştirmeye yönelik politika çerçevesi sunulmuş, genel tanımlamalar yapılarak kavramsal arka plan oluşturulmuştur. Sonrasında literatür incelemesi gerçekleştirilmiş, bina enerji performansı, yapı kabuğu bileşenleri, enerji simülasyonu, deney tasarımı ve çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri konularında yapılmış önceki çalışmalar değerlendirilmiştir.

Üçüncü bölüm olan “Materyal ve Yöntem” başlığı altında, çalışma kapsamında analiz edilen yapının özellikleri, kullanılan simülasyon programı, deney tasarımı süreci, elde edilen verilerin işlenmesi, regresyon modelleme adımları ve çok kriterli karar verme süreci ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, kurgulanan yöntemin bir konut yapısı üzerinde uygulaması gerçekleştirilmiştir. Mevcut yapıya ait simülasyon verileri değerlendirilmiş, yapı kabuğu ve sistem senaryoları için enerji, ekonomik ve çevresel analizler yapılmış ve regresyon modelleri ile tahmin edilen kombinasyonların sonuçları analiz edilmiştir.

Beşinci bölüm olan “Tartışma” kısmında, kullanılan yöntemlerin etkinliği değerlendirilmiş ve literatürle karşılaştırmalar yapılmıştır.

Son olarak altıncı bölüm olan “Sonuç ve Değerlendirme” başlığı altında, çalışmanın temel çıktıları özetlenmiş, bulgular yorumlanmış, sonuçlara ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmanın sınırlılıkları çerçevesinde gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler geliştirilmiştir. Kurgulanan bu tez yapısı Şekil 1.1’de sunulmuştur.



Şekil 1.1. Tezin strüktürü



2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde, bina enerji performansının iyileştirilmesine yönelik kavramsal çerçeve, çalışmada kullanılan yöntemlere ilişkin tanımlamalar ve literatür araştırmaları sunulmaktadır. Bu bağlamda öncelikle Avrupa ve Türkiye’de bina enerji performansına ilişkin yasal düzenlemeler ve politikalar ele alınmıştır. Mevcut yapıların enerji etkin iyileştirilmesine dair temel aşamalar, etkileyen faktörler ve kullanılan teknoloji seçenekler incelenmiştir. Daha sonra bina enerji performansının belirlenmesinde kullanılan simülasyon ve modelleme yaklaşımları ile model kalibrasyonuna yönelik yöntemsel adımlar açıklanmıştır. Son olarak çalışmada kullanılan yöntem ve tekniklere ilişkin tanımlamalar ve literatür çalışmalarına yer verilmiştir.

2.1. Yasal Düzenlemeler ve Politika Çerçevesi

Binalarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik stratejiler, ulusal ve uluslararası düzeyde geliştirilen yasal düzenlemeler ve politikalarla şekillenmektedir. Enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturan bina sektörü, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda Avrupa Birliği (AB) başta olmak üzere birçok ülke, enerji performansı standartlarını zorunlu hale getiren çeşitli yasal düzenlemeler geliştirmiştir. Türkiye de bu sürece paralel olarak, ulusal mevzuatını Avrupa Birliği ilkeleriyle uyumlu hale getirmeyi amaçlayan adımlar atmıştır. Bu bölümde, Avrupa’da ve Türkiye’de binalarda enerji performansına ilişkin yürürlükte olan yasal düzenlemeler incelenmiştir.

2.1.1. Avrupa’da binalarda enerji performansı hakkında yasal düzenlemeler

Avrupa Birliği’nin bina sektöründe enerji verimliliğine yönelik politika çabaları 1990’lı yıllara kadar uzanmaktadır. İlk önemli adımlardan biri, üye devletleri bina sektöründe enerji verimliliği programları geliştirmeye teşvik eden 1993 tarihli SAVE Direktifi (93/76/EEC) olmuştur (Avrupa Birliği, 1993). Ancak, daha kapsamlı ve bağlayıcı bir çerçeve, 2002 yılında kabul edilen ilk Binalarda Enerji Performansı Direktifi (*Energy Performance of Buildings Directive*, EPBD) (2002/91/EC) ile oluşturulmuştur (Avrupa Birliği, 2002). Bu direktif, binaların enerji performansının hesaplanması için ortak bir metodoloji, minimum

enerji performans standartları ve Enerji Performans Sertifikaları (*Energy Performance Certificates, EPC*) gibi temel unsurları oluşturmuştur.

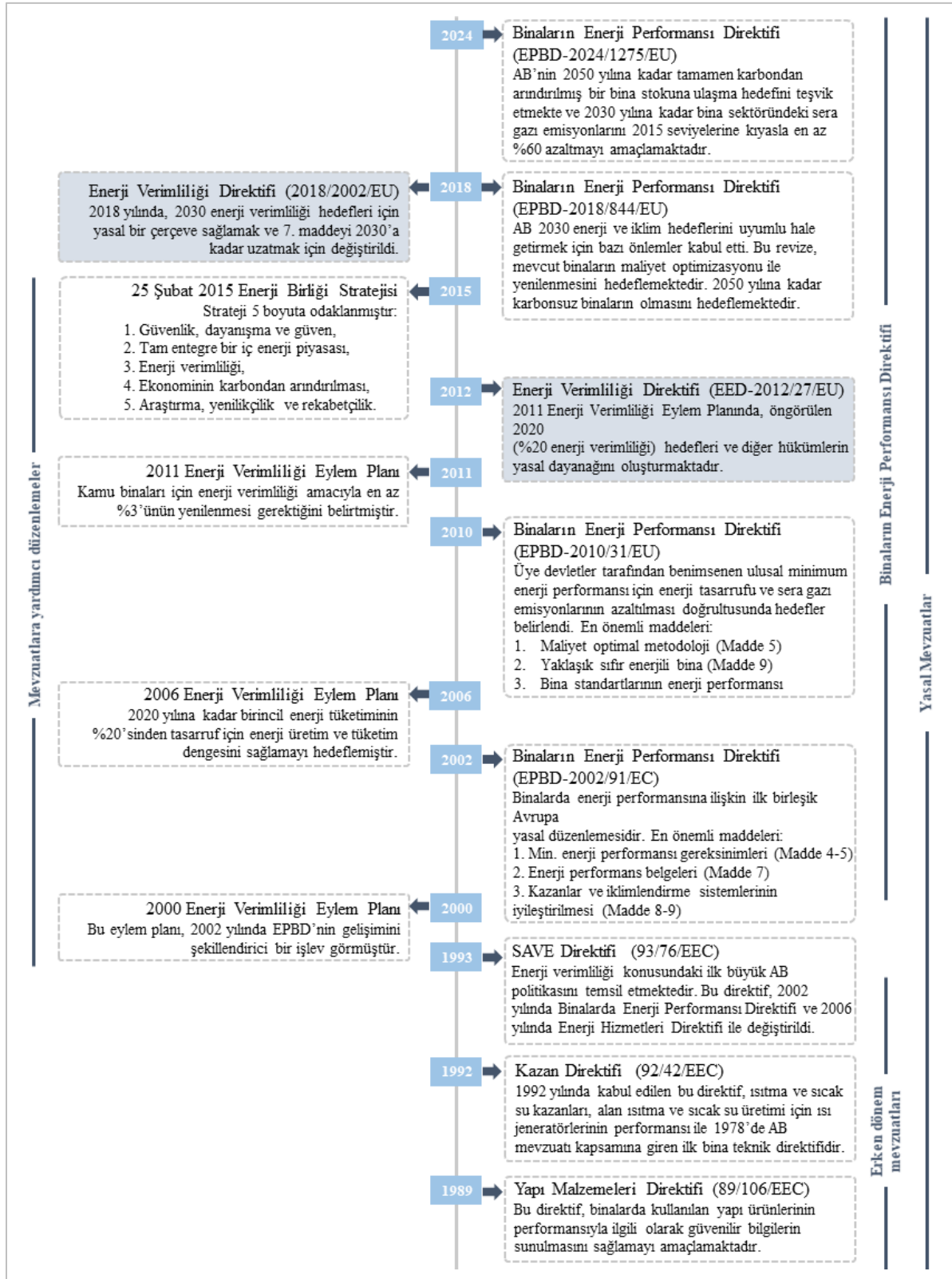
2000’li yılların ortalarından itibaren AB’nin enerji ve iklim hedefleri daha iddialı hale gelmiş, bu tutum bina politikalarına da yansımıştır. 2010 yılında revize edilen EPBD (2010/31/EU), Yaklaşık Sıfır Enerjili Binalar (*Nearly-Zero Energy Buildings, nZEB*) kavramını tanıtmış ve 2020 sonrasında yeni binalar için bu standardı zorunlu hale getirmiştir (Avrupa Birliği, 2010). 2012 tarihli Enerji Verimliliği Direktifi (*Energy Efficiency Directive, EED*) (2012/27/EU) ise genel enerji verimliliği hedeflerini desteklemiş ve özellikle kamu binalarının iyileştirilmesi için yeni hedefler ortaya koymuştur (Avrupa Birliği, 2012).

2018 yılında EPBD’nin tekrar revize edilmesi (2018/844/EU), “Tüm Avrupalılar İçin Temiz Enerji Paketi” kapsamında gerçekleşmiştir. Bu revizyon, uzun vadeli iyileştirme stratejilerini zorunlu hale getirmiş, akıllı bina teknolojilerini teşvik etmiştir (Avrupa Birliği, 2018a).

2019’da açıklanan Avrupa Yeşil Mutabakatı (*European Green Deal*) ise AB’nin 2050 yılına kadar iklim-nötr olma hedefini belirleyerek bina sektörünün karbondan arındırılmasını öncelikli hale getirmiştir (Avrupa Komisyonu, 2019).

Yeşil Mutabakat’ın ardından, 2020’de Yenileme Dalgası Stratejisi (*Renovation Wave Strategy*) kabul edilerek mevcut binaların enerji etkin iyileştirme oranının artırılması hedeflenmiştir (Avrupa Komisyonu, 2020a). 2021’de sunulan 55’e Uyum (*Fit for 55*) paketi ve 2022’deki REPowerEU planı, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji hedeflerini daha da yükseltmiş ve EPBD’nin son revizyonuna zemin hazırlamıştır (Avrupa Komisyonu, 2021; Avrupa Komisyonu, 2022).

Şekil 2.1’de Avrupa Birliği’nde enerji verimliliği ve bina enerji performansına yönelik yasal düzenlemelerin tarihsel gelişim süreci tarihsel olarak özetlenmiştir.



Şekil 2.1. AB'nin binalar için enerji verimliliği politikaları çerçevesinde gelişim çizelgesi (Sönmez ve Maçka Kalfa, 2022'den uyarlanmıştır.)

Binalarda enerji performansı direktifi

Avrupa Birliği'nin bina sektöründe enerji verimliliği ve karbon emisyonu azaltma politikaları, 1990'lardan günümüze önemli değişimler göstermiştir. İlk başta gönüllü programları teşvik eden yaklaşımlardan, giderek daha bağlayıcı hedefler belirleyen politika çerçevesine doğru bir gelişim söz konusu olmuştur. AB'nin bina sektöründe enerji verimliliği politikaları, birbiriyle ilişkili çeşitli araçlar ve mekanizmalar üzerine kurulmuştur (Sönmez ve Maçka Kalfa, 2022).

2024 yılında revize edilen Binalarda Enerji Performansı Direktifi, AB'nin 2050 yılına kadar tamamen karbondan arındırılmış bir bina stokuna ulaşma hedefini destekleyen en güncel ve kapsamlı yasal araçtır. EPBD, binaların enerji performansının hesaplanması, minimum standartların belirlenmesi, enerji sertifikasyonu, yeni ve mevcut binalar için gerekliliklere ilişkin konuları içermektedir. Bina sektöründe enerji verimliliği politikalarının en güncel hali, 24 Nisan 2024 tarihinde kabul edilen ve 28 Mayıs 2024'te yürürlüğe giren revize edilmiş EPBD (2024/1275/EU)'dir. Bu revizyon, AB'nin 2050 yılına kadar tamamen karbondan arındırılmış bir bina stokuna ulaşma hedefini teşvik etmekte ve 2030 yılına kadar bina sektöründeki sera gazı emisyonlarını 2015 seviyelerine kıyasla en az %60 azaltmayı amaçlamaktadır (Avrupa Birliği, 2024).

Yeni direktifin getirdiği en önemli yenilikler şunlardır:

- Konut dışı binalar için ulusal eşiklere dayalı asgari enerji performans standartlarının, kademeli olarak uygulamaya konulması ve öncelikle en kötü performans gösteren binaların hedeflenmesi,
- Ulusal yönergelere dayalı olarak, ulusal konut bina stokunun ortalama enerji performansını 2020'ye kıyasla 2030'a kadar %16 ve 2035'e kadar %20-22 oranında arttırılmasının hedeflenmesi,
- Tüm yaşam döngüsü karbon emisyonunun hesaplanması dahil olmak üzere, yeni binaların sıfır emisyonlu olması için standartların geliştirilmesi,
- Uzun vadeli iyileştirme stratejilerinin daha kapsamlı Ulusal Bina İyileştirme Planlarına dönüştürülmesi,
- Standartlaştırılmış enerji performans sınıfları ile Enerji Kimlik Belgelerinin güvenilirliğinin artırılması ve dijitalleştirilmesi.

- Aşamalı ve derin enerji etkin iyileştirmelere rehberlik etmek için bina iyileştirme pasaportlarının uygulamaya konulması,
- Binalarda güneş enerjisi teknolojilerinin kullanımının artırılması,
- Ocak 2025'ten itibaren fosil yakıtlı kazanların kademeli olarak kullanımdan kaldırılması,
- Ev sahipleri ve diğer paydaşlar için süreci basitleştirmek amacıyla enerji iyileştirmeleri için tek durak ofislerin kurulması,
- Binalarda elektrikli araçlar için şarj altyapısının ve bisiklet parkına yönelik önlemlerin daha da geliştirilmesi.

Enerji verimliliği direktifi

Enerji Verimliliği Direktifi, bir diğer önemli yasal düzenlemedir. Bu direktif, genel enerji verimliliği hedeflerini belirlemekte ve bina sektörü dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde enerji tasarrufu önlemlerini teşvik etmektedir. Özellikle kamu binalarının enerji etkin iyileştirilmesi ve uzun vadeli stratejiler konusunda EPBD'yi tamamlayan niteliktedir. EED'nin bina sektörüne dolaylı etkileri arasında, enerji verimliliği finansmanının teşvik edilmesi, enerji verimliliği hizmetleri pazarının geliştirilmesi ve enerji verimliliği konusunda bilgi ve farkındalığın artırılması yer almaktadır (Avrupa Birliği, 2023). Revize edilmiş EED (2023/1791/EU), AB'nin 2030 yılına kadar enerji verimliliği hedeflerini daha da güçlendirmektedir. Bu revizyon, bina sektörü de dahil olmak üzere tüm sektörlerde enerji verimliliğinin artırılması için daha iddialı hedefler ve önlemler içermektedir.

Minimum enerji performans standartları ve enerji performans sertifikaları

Minimum Enerji Performans Standartları (*Minimum Energy Performance Standards, MEPS*) yeni binalar ve büyük ölçekli iyileştirmeler için karşılanması gereken asgari enerji verimliliği seviyelerini belirlemektedir. Son EPBD revizyonu ile mevcut konut dışı binalar için de kademeli olarak MEPS getirilmesi gerekmektedir (Avrupa Birliği, 2022b).

Bir diğer yasal düzenleme, EPBD ile tanıtılan, Enerji Performans Sertifikaları (EPC)'dir. Bunlar, binaların enerji verimliliğini A'dan G'ye kadar sınıflandıran ve potansiyel iyileştirmeler hakkında bilgi veren belgelerdir. Bina alım, satım veya kiralamalarında sunulması zorunlu tutulmaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020b).

Avrupa Birliği'nin yenileme dalgası (*Renovation wave*) stratejisi

2020 yılında başlatılmış olan Avrupa Birliği'nin Yenileme Dalgası (*Renovation Wave*) stratejisi, mevcut binaların iyileştirilmesine ilişkin önemli bir çerçeve sunmaktadır. Bu strateji, Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın karbon nötr bina yaklaşımına temel oluşturmaktadır. Strateji bağlamında, yıllık yenileme oranlarını 2030 yılına kadar en az iki katına çıkarmayı ve enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltan derin yenilemeleri teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Strateji, özellikle üç odak alanına yöneliktir: enerji yoksulluğu ve en kötü performans gösteren binalar (genellikle sosyal ve çok daireli konutlarla ilişkili), kamu binaları ve sosyal altyapı son olarak da düşük karbon emisyonu sağlayan ısıtma ve soğutma sistemleridir (Bjelland, Brozovsky, ve Hrynyszyn, 2024).

Net-Sıfır 2050 ve Ulusal enerji ve iklim planları (NECPs)

Net-Sıfır 2050 hedefi, Avrupa İklim Yasası'nda yer alan AB'nin 2050 yılına kadar iklim nötrlüğü taahhüdüdür. Karbon nötr binalara ulaşmaya ilişkin kapsayıcı bir çerçeve sağlamaktadır. Net-Sıfır 2050 hedefi, AB'nin enerji tüketiminin ve emisyonlarının önemli bir kısmından sorumlu olan bina sektörünün kapsamlı bir dönüşümünü gerektirmektedir (Avrupa Komisyonu, 2024a).

Ulusal Enerji ve İklim Planları ise (*The National Energy and Climate Plans*, NCEPs) üye devletlerin AB'nin iklim ve enerji hedeflerine katkıda bulunmak için çeşitli stratejilerin belirlendiği araçlar olarak hizmet etmektedir. Bu planlar, Enerji Birliği'nin Yönetmeliği kapsamında gerekli olup, binalarda enerji verimliliğini artırmak ve ısıtma ve soğutmada yenilenebilir enerji payını artırmak için ayrıntılı önlemleri içermektedir (Avrupa Komisyonu, 2024b).

Tüm bu yasal düzenlemeler ve politika belgeleri, AB'nin bina sektöründe enerji verimliliği ve karbon emisyonu azaltımı politikaları, iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir bir ekonomiye geçiş hedeflerine ulaşmak için önemli birer unsurdur.

2.1.2. Türkiye’de binalarda enerji performansı hakkında yasal düzenlemeler

Türkiye, enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü ithal eden bir ülkedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, Türkiye’nin birincil enerji arzında ithalatın payı %70’in üzerindedir (ETKB, 2024). Enerji tüketiminin sektörel dağılımına bakıldığında, sanayi, ulaşım ve bina sektörleri en büyük paya sahiptir. Bina sektörü, Türkiye’nin toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %30-35’ini oluşturmaktadır (SHURA, 2025). Bu oran, AB ortalamasına (%40) göre biraz daha düşük olsa da bina sektörünün enerji verimliliği potansiyelinin ve önemini ortaya koymaktadır.

Mevcut bina stoğunun enerji performansı açısından durumu incelendiğinde, Türkiye’deki binaların büyük bir kısmının enerji verimliliği açısından yetersiz olduğu görülmektedir. Özellikle 2000 yılından önce inşa edilen binalar, genellikle düşük yalıtım standartlarına ve verimsiz ısıtma sistemlerine sahiptir. Bu durum, binaların enerji tüketiminin yüksek olmasına ve iç mekân konfor koşullarının düşük olmasına neden olmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, Türkiye’deki konutların önemli bir bölümü yalıtımsız veya yetersiz yalıtımlıdır. Bu nedenle, binalarda enerji verimliliğinin artırılması, hem enerji güvenliği hem de iklim değişikliğiyle mücadele açısından kritik öneme sahiptir.

Bu bağlamda Türkiye, bina sektöründe enerji verimliliğini artırmak için son yıllarda önemli yasal ve düzenleyici adımlar atmıştır. Bu adımlar, büyük ölçüde Avrupa Birliği ile uyum çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

TS 825 Standardı ve revizyonları

Türkiye’de bina enerji verimliliği alanındaki en temel düzenlemelerden biri, TS 825 "Binalarda Isı Yalıtım Kuralları" standardıdır. Bu standart, binaların ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçlarını sınırlamak amacıyla, yapı elemanlarının ısı yalıtım gerekliliklerini belirlemektedir. Standart, ilk olarak 1999 yılında yayınlanmış ve zaman içinde çeşitli revizyonlar yapılmıştır.

En son revizyon, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından hazırlanarak 20 Şubat 2025 tarihli Resmî Gazete’de yayımlanan tebliğ ile gerçekleştirilmiş ve 1 Nisan 2025

tarihinde zorunlu olarak uygulamaya konulmuştur (Resmi Gazete, 2025). Bu revizyon, Avrupa Birliği tarafından 2024'te güncellenen Binalarda Enerji Performansı Direktifi ile uyumlu olacak şekilde hazırlanmıştır.

Revize edilen TS 825 standardındaki en önemli yeniliklerden biri, daha önce 4 bölgeye ayrılan yalıtım sınıflandırması, iklim koşulları göz önünde bulundurularak 6 bölgeye çıkarılmıştır (Şekil 2.2 ve 2.3). Bu sayede binalarda uygulanacak yalıtım hesaplamaları bölgesel iklim şartlarına göre daha hassas bir şekilde yapılabilecektir. Ayrıca daha önce sadece ısıtma odaklı olan hesaplamaların, artık soğutma ihtiyaçlarını da içerecek şekilde genişletilmesidir. Bu, Türkiye'nin iklim koşulları göz önüne alındığında, özellikle yaz aylarında soğutma ihtiyacının arttığı bölgeler için önemli bir gelişmedir (İzoder, 2025a).



Şekil 2.2. Revize edilen TS 825'e göre güncellenen iklim bölgeleri ve kaynak (İzoder 2025b)

TS 825: 2008	Duvar U_D (W/m ² K)	Tavan/Çatı U_T (W/m ² K)	Döşeme U_t (W/m ² K)	Pencere U_{p*} (W/m ² K)	TS 825: 2024	Duvar U_D (W/m ² K)	Tavan/Çatı U_T (W/m ² K)	Döşeme U_t (W/m ² K)	Pencere U_{p*} (W/m ² K)	g (-)
1. Bölge	0,70	0,45	0,70	2,4	1. Bölge	0,45	0,35	0,4	1,8	$\leq 0,45$
2. Bölge	0,60	0,40	0,60	2,4	2. Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8	$\leq 0,45$
3. Bölge	0,50	0,30	0,45	2,4	3. Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8	$\leq 0,45$
4. Bölge	0,40	0,25	0,40	2,4	4. Bölge	0,35	0,25	0,3	1,8	$\geq 0,55$
					5. Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8	$\geq 0,55$
					6. Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8	$\geq 0,55$

Şekil 2.3. Revize edilen TS 825'e göre güncellenen tavsiye edilen U değerleri (İzoder, 2025b)

Yeni düzenleme ile binalarda konfor şartları korunarak enerji faturalarında yüzde 25'e varan düşüş sağlanması öngörülmektedir. Ayrıca, her yıl inşa edilecek yeni binalarda toplam 2,5 terawatt saat enerji tasarrufu elde edilmesi ve Atatürk Barajı'nın üç aylık enerji üretimine eşdeğer kazanım sağlanması hedeflenmektedir. Karbon salımının yılda 600 milyon ton azaltılmasıyla çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunulması beklenmektedir (İzoder, 2025a).

Binalarda enerji performansı yönetmeliği ve BEP-TR

Türkiye'de binalarda enerji performansına yönelik yasal düzenlemelerin temelini 18 Nisan 2007 tarihinde kabul edilen ve 2 Mayıs 2007 tarihli 26510 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu oluşturmaktadır (Resmi Gazete, 2007). Bu kanun, enerjinin etkin kullanılması, israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması amacıyla enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasını hedeflemiştir.

5627 sayılı Kanun'a dayanılarak hazırlanan Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, 5 Aralık 2008 tarihli ve 27075 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir (Resmi Gazete, 2008). Bu yönetmelik, binalarda enerjinin ve enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanılmasına, enerji israfının önlenmesine ve çevrenin korunmasına ilişkin usul ve esasları düzenlemiştir. Yönetmelik kapsamında yeni ve mevcut binalar için enerji performans sınıflandırması ve sertifikasyonu sistemi getirilmiştir. Enerji Kimlik Belgesi (EKB) uygulaması tanımlanmıştır. Bu doğrultuda 1 Ocak 2011 tarihinden itibaren yeni binalar için Enerji Kimlik Belgesi (EKB) düzenlenmesi zorunlu hale getirilmiştir.

Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği kapsamında, 1 Ocak 2020 tarihine kadar mevcut binaların da Enerji Kimlik Belgesi alması zorunlu kılınmıştır. Ancak, bu süre daha sonra uzatılmıştır. Bu uygulama, Türkiye’deki mevcut bina stokunun enerji performansının değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi için önemli bir adım olmuştur.

7 Ocak 2021 tarihli ve 31357 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan değişiklikle, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği’nde önemli güncellemeler yapılmıştır (Resmi Gazete, 2021). Bu değişikliklerle, EKB uzmanlarının eğitimi ve denetimi konusunda daha sıkı kurallar getirilmiş, EKB düzenleme süreçleri iyileştirilmiş ve BEP-TR yazılımının kullanımına ilişkin detaylar güncellenmiştir. Ayrıca, binaların enerji performansının hesaplanmasında kullanılan metodoloji de güncellenmiştir.

Sonuç olarak, Türkiye’de binalarda enerji performansına ilişkin yasal düzenlemeler ve politika çerçeveleri, önemli bir gelişim göstermiş ve gelecekte daha da gelişmesi beklenmektedir. Bu gelişmeler, Türkiye’nin enerji güvenliği, iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşması için önemli katkılar sağlayacaktır. Ancak, binalarda enerji verimliliğine ilişkin sektörün durumuna ilişkin tabloya bakıldığında (Çizelge 2.1) bu hedeflere ulaşmak için finansman, farkındalık, teknik kapasite ve mevzuat uygulaması gibi alanlarda karşılaşılan zorlukların aşılması gerekmektedir. Bu zorlukların aşılması ve fırsatların değerlendirilmesi, Türkiye’nin binalarda enerji verimliliği hedeflerine ulaşması ve sürdürülebilir bir yapıyı çevre oluşturması için kritik öneme sahiptir.

Çizelge 2.1. Türkiye’de binalarda enerji verimliliğine ilişkin sektörün durum değerlendirmesi (İMSAD, 2014’ten uyarlanmıştır.)

Güçlü yanlar	Zayıf Yanlar
- Binalarda enerji verimliliği ile ilgili yasal yapının varlığı - Enerji yönetimi uygulamalarının ve enerji verimliliği etütlerinin zorunlu olması - Bir Enerji Verimliliği Danışmanlık (EVD) piyasasının başlamış olması - EKB uygulamalarının başlamış olması - Çevresel stratejilerin içerisinde yer alan enerji verimliliği stratejileri	- Daha çok önem verilen sektörün sanayi olması - Verilerin yetersizliği - İllegal yapılaşma - Bina sektörüne yönelik hükümet teşviklerinin olmayışı - Özellikle EVD, enerji performans sözleşmesi, kamu-özel sektör ortaklığı gibi finansal yöntemlerin eksikliği - Başarılı uygulama örneklerinin e’ksikliği - Enerji verimli malzeme, cihaz ve sistemlerin test laboratuvarlarının olmayışı
Fırsatlar	Tehditler
- Yüksek verimlilik potansiyelleri - EKB uygulamasının başlamış olması - Çeşitli uluslararası fonların varlığı - Piyasadaki malzemelerin, cihazların ve sistemlerin verimliliklerine önem verilmesi	- Çok çeşitli bina tiplerinin, iklim özelliklerinin olduğu geniş bir ülke olunması - Genellikle tüketim ayağının değil enerji üretim ayağının ön planda olduğu planlamalar yapılması - Veri yetersizliğinden dolayı binalar için verimlilik hedeflerinin belirlenememesi - Mevcut yasal düzenlemelerin izlenememesinden kaynaklı oluşturulacak eylem planının uygulamaya dönük olamaması - Bürokrasi - Verilen kredilerin yeterli denetlenmemesi - Genellikle konforun verimlilikten ön planda olması - Enerji verimliliği uygulamalarının kazançlarını daha net olarak gözlemlenebileceği tarife yapısının olmayışı - Hane halkının gelir ve tasarruf bilinci eksikliği

Bu bağlamda mevcut bina stokunu daha enerji verimli ve çevresel olarak sürdürülebilir hale getirmek için bu konuda hem teoriye hem uygulamaya yönelik daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Potansiyel iyileştirme faydalarına güven düzeyini artırmaya yardımcı olmak için pratik vaka çalışmalarının artması son derece önemlidir.

2.2. Mevcut Yapılarda Enerji Etkin İyileştirme

Bir binanın enerji etkin iyileştirilmesi (EEİ), enerji tüketimini azaltmak amacıyla bina iç mekan konforunu koruyarak, yapı kabuğunun (duvar, çatı veya pencereler), enerji sistemlerinin (ısıtma, soğutma veya kullanım sıcak suyu), aydınlatma ve diğer elektrikli cihazlar açısından mevcut sistemlerin yenilikçi ve verimli teknolojilerle değiştirilmesi/iyileştirilmesi olarak tanımlanmaktadır (Wu, Wang, ve Xia, 2016). Bina enerji verimliliğindeki iyileştirmeler, tipik olarak yapısal, mekanik ve kontrol sistemlerin dönüşümünün yanında uygun olduğu durumlarda yenilenebilir enerji dönüşümünü de içermektedir (Xu, 2012).

Bir bina, dış ortam şartları ile değişebilen aydınlatma, su, ısıtma, soğutma, havalandırma ve yalıtım gibi birçok alt sisteme sahip karmaşık bir sistemdir. Her alt sistemin enerji verimliliğinin toplam performansı üzerinde büyük etkileri vardır ve alt sistemler arasındaki etkileşimin de enerji tasarrufu ile yakın ilişkisi vardır (Kaklauskas, Zavadskas, ve Raslanas, 2005).

Enerji verimliliğinin yanı sıra, teknik, teknolojik, ekolojik, sosyal, estetik ve ekonomik kaygılar da dahil olmak üzere birçok kaygı, binanın dönüşümünde düşünülmesi gereken dengelerdendir. Bu nedenle, kapsamlı bir bina yenilemesi üstlenilmesi oldukça zor bir konudur. Bu bağlamda, optimal çözümler için öncelikle şu üç sorunun cevaplama gerekmektedir (Wu ve diğerleri, 2016):

- İyileştirme için hangi mevcut sistemler seçilmiştir?
- Seçilmiş olan sistemleri, sınırlı bütçeyle iyileştirmek için kaç müdahale gerekmektedir?
- Her kategoride birden fazla alternatif öneri varsa hangi alternatif müdahaleler kullanılmalıdır?

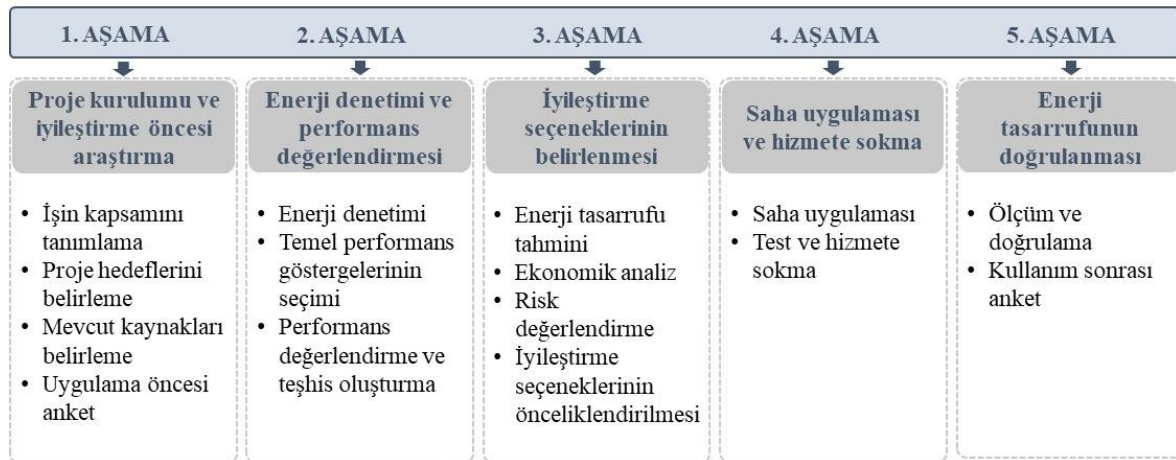
Her bina benzersiz mimari, coğrafi ve operasyonel özellikler sergilediğinden, sürecin modellenmesi ve planlaması her bina için rasyonel olarak araştırılmalıdır. İyileştirme için en fazla verim sağlayacak sistemlerin seçilmesi, alternatifli müdahale yöntemlerinin belirlenmesi ve çok amaçlı (maliyet, enerji, malzeme vb.) optimizasyonun sağlanması başarılı bir sonuca ulaşmada son derece önemlidir.

Binaların yapısal ve mekanik sistemlerinin iyileştirmesinin yanı sıra, işletme ve yönetim uygulamalarının iyileştirilmesi de bu süreçte dikkate alınmalıdır. Optimum işletim ve tasarrufun devam etmesini sağlamak için kullanıcıların eğitimi, yönetim ve izleme stratejileri de sistemin sürdürülebilirliği için gereklidir (Xu, 2012).

Bu bağlamda, konunun doğası gereği var olan bu çoklu problem-çözüm mekanizmasının işlerliği açısından enerji etkin iyileştirme programının temel aşamalarının bilinçli olarak uygulanması sürecin başarıyla sonuçlanmasında etkili olacaktır.

2.2.1. Enerji etkin iyileştirmenin temel aşamaları

Bir bina iyileştirmesinin genel süreci; “Proje kurulumu ve iyileştirme öncesi araştırma”, “Enerji denetimi ve performans değerlendirmesi”, “İyileştirme seçeneklerinin belirlenmesi”, “Saha uygulaması ve hizmete sokma”, son olarak “Enerji tasarrufunun doğrulanması” şeklinde beş ana aşamaya incelenmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Şekil Enerji etkin bina iyileştirme programın temel aşamaları (Ma ve diğerleri, 2012’den uyarlanmıştır.)

i. *Proje kurulumu ve iyileştirme öncesi araştırma (Pre-retrofit)*: EEİ sürecinin ilk aşamasıdır. Bu aşamada, bina sahiplerinin veya diğer aktör ve paydaşların önce işin kapsamını tanımlaması ve proje hedeflerini belirlemesi gerekmektedir. Daha sonra bütçe ve çalışma programını çerçevelemek için mevcut kaynaklar belirlenebilir. Ek olarak binanın

operasyonel sorunlarını ve bina sakinlerinin temel endişelerini daha iyi anlamak için iyileştirme öncesi bir anket de gerekli olacaktır (Ma ve diğerleri, 2012).

Bina sahiplerinin, bina tadilatını planlama ve uygulama sorumluluğunu üstlenecek deneyimli bir Enerji Servis Firması (*Energy Service Company*, ESCO) seçmesi yaygın bir uygulamadır. Bu bağlamda, ESCO'lar özellikle binalarda enerji verimliliği iyileştirmelerini teşvik eden önemli unsurlardır. ESCO hizmetleri, enerji analizi ve denetimler; enerji yönetimi, proje tasarımı ve uygulaması; bakım ve işletme, enerji ve mali tasarrufların izlenmesi ve değerlendirilmesi; mülk/tesis yönetimi ve enerji ve/veya ekipman tedariki gibi geniş bir faaliyet yelpazesini içermektedir. ESCO'nun diğer enerji hizmeti sağlayıcıları (örneğin, danışmanlık şirketleri) ile karşılaştırıldığında farklı kılan özelliği, ESCO'ların bir enerji verimliliği projesi uygulayarak daha düşük bir maliyetle enerji tasarrufu miktarını garanti etmesi ve tüm riskleri üstlenmesidir.

ii. Enerji denetimi ve performans değerlendirmesi: İkinci aşama, enerji denetimi, performans değerlendirmesini ve teşhislerini içermektedir. Enerji denetimi; bina enerji verilerini analiz etmek, bina enerji kullanımını anlamak, enerji israfı olan -dolayısıyla enerji tasarrufu potansiyeli olan- alanları belirlemek, maliyetsiz ve düşük maliyetli enerji tasarrufu önlem/önerilerini (*Energy Conservation Measures*, ECM) kapsamaktadır (Mata ve Johnsson, 2017).

Diğer yandan, seçilen performans göstergelerini veya yeşil bina derecelendirme sistemlerini kullanarak bina enerji kullanımını kıyaslamak için performans değerlendirmesi yapılmalıdır. Bu bağlamda, bir diğer adım olarak verimsiz ekipmanları, uygun olmayan kontrol şemalarını ve uygulamalarda meydana gelen arızaları belirleyerek teşhis ve tanı oluşturulmalıdır.

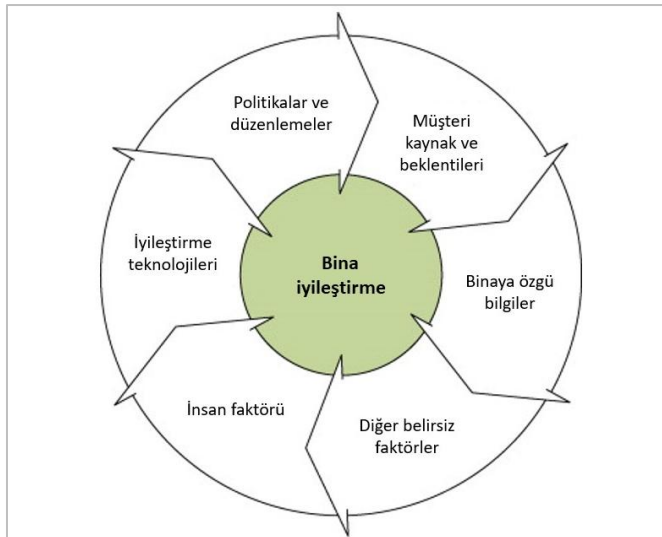
iii. İyileştirme seçeneklerinin belirlenmesi: Enerji etkin bina iyileştirme programın üçüncü aşaması, iyileştirme seçeneklerinin belirlenmesidir. Uygun enerji modelleri ve simülasyon programları kullanılarak enerji tasarrufu tahmini ve ekonomik analiz araçları ve risk değerlendirme yöntemleri kullanılarak da bir dizi iyileştirme alternatifinin performansı, nicel olarak değerlendirilebilir. Daha sonra enerji denetimi sırasında tespit edilmiş olabilecek maliyetsiz ve düşük maliyetli enerji tasarruf önlemleriyle iyileştirme alternatifleri önceliklendirilebilir.

iv. Saha uygulaması ve hizmete sokma: Dördüncü aşama, belirlenen iyileştirme önlemlerinin yerinde uygulanmasını ve daha sonra test edilip hizmete sunulmasını içermektedir. Bu aşamada yapılan testler daha sonra binanın ve hizmet sistemlerinin optimum şekilde çalışmasını sağlamak ve iyileştirme önlemlerini ayarlamak için kullanılmaktadır. Bunun yanında bazı iyileştirme önlemlerinin uygulanmasında bina sakinlerinin kullanımlarının önemli etkilerinin olduğunu belirtmek gerekmektedir.

v. Enerji tasarrufunun doğrulanması: Son aşama olarak, iyileştirme önlemleri uygulandıktan ve hizmete sunulduktan sonra, enerji tasarrufunu doğrulamak için standart ölçüm ve doğrulama yöntemleri (Taneja, 2011) kullanılmalıdır. Bunun yanında, bina sakinlerinin ve bina sahiplerinin genel iyileştirme sonucundan memnun olup olmadıklarını anlamak için kullanım sonrası anketlerine de ihtiyaç vardır.

2.2.2. Enerji etkin iyileştirmeyi etkileyen temel unsurlar

Bir bina iyileştirme programının başarısının bağlı olduğu pek çok etken vardır. Bu kapsamda, politikalar ve düzenlemeler, müşteri kaynakları ve beklentileri, iyileştirme teknolojileri, binaya özgü bilgiler, insan faktörü ve diğer belirsiz faktörler, iyileştirmeler üzerinde önemli etkileri olan temel unsurlardır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. EEİ sürecini etkileyen temel unsurlar (Ma ve diğerleri, 2012)

- *Politikalar ve düzenlemeler*, mevcut binaların iyileştirilmesi için minimum enerji verimliliği gereksinimlerini belirleyen enerji verimliliği standartlarıdır. Bu kapsamda, hükümetler, iyileştirme önlemlerini uygulayarak, bina sahiplerine ve proje geliştiricilerine gerekli enerji performansı hedeflerine ulaşmalarında yardımcı olmak için mali destek sağlayabilir.

- *Müşteri kaynak ve beklentileri*; proje hedeflerinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Böylece hangi tür iyileştirme teknolojilerinin kullanılması gerektiğini konusu netlik kazanır. Enerji verimliliğine yönelik yatırım kararları oldukça karmaşıktır. Bu nedenle, müşterilerin iyileştirmelerin yatırım yapmaya değer olup olmadığına dair karar vermeleri kolay olmamaktadır. Bu konuya ilişkin yapılan çalışmalara (Harris, Anderson, ve Shafron, 2000) göre enerji verimliliğine yatırım kararını etkileyen çok sayıda faktör söz konusudur ve karar verme sürecini etkileyen en yaygın etkenin geri ödeme süresi (*Payback Period*) olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak bu süre iyileştirmeye yapılacak yatırımlarla da doğrudan ilişkilidir. Alajmi (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, sermaye yatırımı olmayan veya düşük sermaye yatırımı ile gerçekleştirilmiş ECM'lerin bina yıllık enerji tüketiminde yalnızca %6,5 tasarruf sağladığını, önemli sermaye yatırımı ile gerçekleştirilen ECM önlemlerinin ise yıllık enerji tüketiminin %49,3'üne kadar tasarruf sağlayabildiğini göstermiştir.

- *İyileştirme teknolojileri*, binanın enerji verimliliğini ve sürdürülebilirliğini teşvik etmek için kullanılan enerji tasarruf önlemleridir (ECM). İyileştirme teknolojileri, enerji verimli ekipmanların, gelişmiş kontrollerin ve yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımından, enerji tüketim modellerinin değişikliklerine ve gelişmiş ısıtma ve soğutma teknolojilerinin uygulanmasına kadar uzanmaktadır. İyileştirme önlemleri, ekonomik geri ödeme, karmaşıklık ve uygulama kolaylığı sırasına göre düşünülmelidir (CIBSE, 2012).

- *Binaya özgü bilgiler*; bina iyileştirme faaliyetlerini etkileyen bir diğer unsurdur. Sürecin planlaması coğrafi konum, bina tipi, boyutu, yapısı, yaşı, kullanım planı, işletim ve bakım, enerji kaynakları, hizmet sistemleri vb. bilgilere de bağlıdır. Belirli bir projede, optimum iyileştirme çözümleri, binaya özgü bilgiler dikkate alınarak belirlenmelidir.

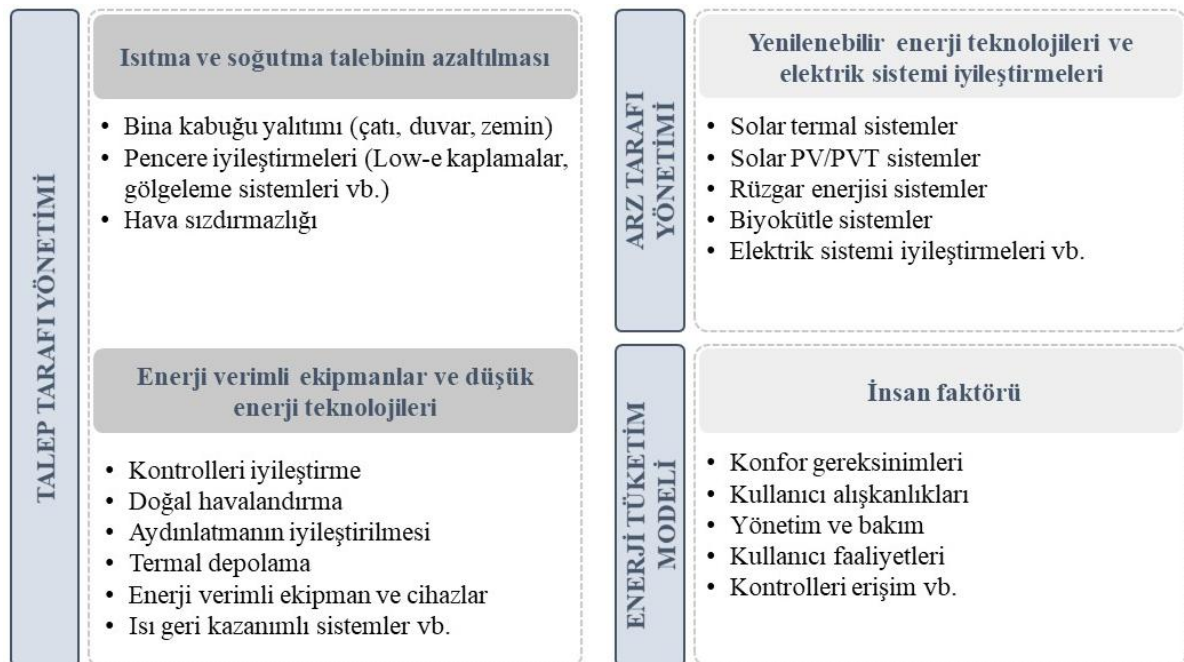
- *İnsan faktörü*; bir iyileştirme projesinin başarısını etkileyen en önemli etmenlerden birisidir. İnsan faktörü kapsamında, kullanıcının konfor gereksinimleri, kullanım

alışkanlıkları, yönetim ve bakım, aktivite ve kontrollere erişimi sayılabilir (CIBSE, 2012). Yapılan araştırmalar (Yohanis, 2012; Santin, Itard, ve Visscher, 2009) kullanıcı davranışlarının binanın enerji kullanımını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bu çalışmaların sonuçları, bina sakinlerinin davranışlarındaki, kullanıcı kontrollerindeki ve konfor aralığındaki değişikliklerin önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayabileceğini göstermiştir. Bu bağlamda, enerji tasarrufu genellikle hiç sermaye yatırımı olmadan veya çok az sermaye yatırımı ile elde edilebilmektedir.

2.2.3. Bina iyileştirme teknolojileri

Bu bölümde iyi bir enerji etkin iyileştirme programının en temel unsurlarından olan enerji tasarruf önlemlerini (*Energy Conservation Measure*, ECM) içeren iyileştirme teknolojileri yakından incelenmiştir. Bu iyileştirmenin operasyonel boyutunun anlaşılması bakımından faydalı olacaktır.

Bu bağlamda, iyileştirme teknolojileri arz tarafı yönetimi, talep tarafı yönetimi ve enerji tüketim modellerinin değişimi, yani insan faktörleri olmak üzere üç gruba ayrılabilir (Ma ve diğerleri, 2012) (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Bina iyileştirme teknolojilerinin ana kategorileri

Talep tarafı yönetimi için iyileştirme teknolojileri, binanın ihtiyacı olan enerji miktarını, dolayısıyla enerji tüketimini azaltacak önlemleri içermektedir. Bu önlemler, bina ısıtma ve soğutma talebini azaltmaya yönelik stratejiler ile enerji verimli ekipman ve düşük enerji teknolojilerinin kullanımından oluşmaktadır. Bir binanın ısıtma ve soğutma talebi, yapı kabuğunun iyileştirilmesi ve hava sızdırmazlığı, pencere gölgelendirme vb. gibi diğer gelişmiş teknolojilerin kullanılması yoluyla azaltılabilir. Düşük enerji teknolojileri ise gelişmiş kontrol şemaları, doğal havalandırma, aydınlatmanın iyileştirilmesi, ısı geri kazanımı, enerji verimli ekipman ve cihazların kullanımı, termal depolama sistemlerini içermektedir (Barlow ve Fiala, 2007; Xing, Hewitt, ve Griffiths, 2011; Krarti, 2020).

Arz tarafı yönetimi için iyileştirme teknolojileri, enerji ihtiyacını yenilenebilir ve verimli kaynaklardan sağlanmasına yönelik önlemleri kapsamaktadır. Bu bağlamda, elektrik sistemi iyileştirmeleri ve güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji vb. gibi yenilenebilir enerjinin elektrik ve / veya binalar için termal enerji kullanımını destekleyen önlemler uygulanabilir. Son yıllarda, çevre sorunlarına yönelik farkındalığın artması nedeniyle bina iyileştirme çözümlerinde yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanımına artan bir ilgi vardır.

Bir diğer tasarruf önlemi insan faktörüdür. Kullanıcıların konfor gereksinimleri, alışkanlıkları, sistemlerin bakım ve yönetimi gibi etkenlere bağlı olarak önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

Bir binanın enerji etkin iyileştirilmesinde söz konusu önlemlerin seçiminde şu hususlara da dikkat edilmesi gerekmektedir:

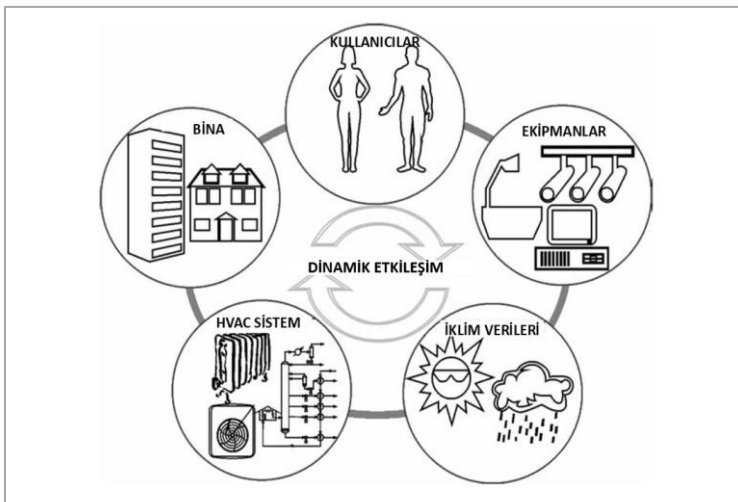
- Her bina farklı özelliklere sahiptir. Bu nedenle bir binada kullanılan iyileştirme önlemleri başka bir binada kullanım için uygun olmayabilir.
- ECM'lerin seçimi çok amaçlı bir optimizasyon problemidir (*multi-objective optimisation problem*). Çok amaçlı optimizasyon, karmaşık karar problemlerinin çözümü için büyük potansiyele sahip çok çeşitli yöntemler sunan bilimsel bir alandır (Diakaki, Grigoroudis, ve Kolokotsa, 2008) İyileştirmeler için optimizasyon probleminin çözümünde kriterlerin seçimi ve önceliklerin seçimi çok önemlidir.
- Optimizasyonlar, model bazlı yaklaşım veya modelsiz yaklaşım kullanılarak geliştirilebilir. Model tabanlı yaklaşımda, enerji simülasyon araçları, farklı ECM'lerin

enerji tasarruflarını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Modelden bağımsız yaklaşım, hedeflenen sistemin bir "modelini" gerektirmez. Bilgi birikimlerinden faydalanarak sabit uygulamalar yapılmaktadır. Bu nedenle önemli hatalar barındırmaktadır (Wang ve Ma, 2008).

Bu bölümde, mevcut yapılarda enerji etkin iyileştirme kavramına genel bir bakış sağlanmaya çalışılmıştır. Küresel ve yerel ölçekte gereklilikleri, uygulama aşamaları, bu süreçte iyileştirmeyi etkileyen temel unsurlar ve iyileştirme teknolojileri üzerinde durulmuştur.

2.3. Bina Enerji Performansının Belirlenmesi

Kullanıcıların tüm operasyonel gereksinimlerini karşılayan enerji etkin binalar tasarlamak, süreçte etkin rol oynayan ve bütüncül olarak ele alınması gereken çok fazla girdi parametresi olması sebebiyle zorlu bir prosedür gerektirmektedir. Araştırmacılar, uygulayıcılar ve diğer paydaşlar, küresel iklim değişikliği, fosil yakıt stoklarının tükenmesi, bina sakinlerinin artan ihtiyaçları ve konfor beklentileri gibi çeşitli dinamik süreçleri tanıma ve dikkate alma ihtiyacı nedeniyle büyük zorluklarla karşı karşıyadır. Gelecekteki taleplere dayanabilecek sağlam bina ve sistem çözümleri elde etmek için tüm hususları yönetmek Şekil 2.7’de gösterilen alt sistemlerin entegre bir yaklaşımını gerektirmektedir (Lamberts ve Hensen, 2011).



Şekil 2.7. Binalarda alt sistemlerin dinamik etkileşimleri (Lamberts ve Hensen, 2011)

Tüm bu karmaşık yapı ve süreçte etkin olan birçok parametre sebebiyle bina enerji performansının belirlenmesi erken tasarım evresinde enerji etkin bina için veya mevcut yapının iyileştirmesinde son derece kritik öneme sahiptir. Gelecekteki bina davranışını önceden tahmin ve analiz etmenin, bina kullanım aşamasındayken sorunları düzeltmekten çok daha verimli ve ekonomik olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir (Lamberts ve Hensen, 2011).

Bu bağlamda mevcut bir binanın enerji performansının belirlenmesinde ilk adım bina enerji simülasyon modelinin oluşturulması ikincisi ise simülasyon sonucunda elde edilen verilerin güvenilirliğini arttırmak amacıyla gerçek verilerle karşılaştırılması ve doğrulanmasıdır.

2.3.1. Enerji simülasyonu ve modelleme yaklaşımları

Simülasyon karmaşık bir sistemin basitleştirilmiş bir modelini oluşturma ve bu modeli gerçek sistemin davranışını analiz etmek ve tahmin etmek için kullanma sürecidir. Bina performansını simüle etmek için azaltılmış ölçekli modellerden, tam boyutlu olanlara kadar değişen fiziksel modellerin yanı sıra binanın enerji performansını tahmin etmek için matematiksel modellerin ve bilgisayar programlarının kullanıldığı bilgisayar destekli sayısal modelleme yaklaşımları vardır. (Hensen, 2003) Günümüzde bina enerji simülasyonunda en yaygın ve kapsamlı kullanılan yaklaşım şüphesiz bilgisayar destekli sayısal modellemelerdir.

Bu modeller, binanın geometrisi, yapısal özellikleri, malzeme özellikleri, iklim verileri, iç yükler (insan, aydınlatma, ekipman) ve işletme senaryoları gibi çeşitli parametreleri dikkate alarak binanın ısıtma, soğutma, aydınlatma ve havalandırma gibi enerji tüketimlerini hesaplamaya imkân sağlamaktadır (Bayraktar, Schulze ve Yılmaz, 2009).

Bu amaçla geliştirilen birçok Bina Enerji Simülasyon (BES) programı vardır. Bina enerji simülasyon programları, yeni ve mevcut binaların çevresel performansının hızlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlayan yazılımlardır. BES; mimari tasarım, HVAC tasarımı ve işletimi, iyileştirme analizi, bina operasyonel optimizasyonu, kentsel ölçekte enerji verimliliği analizi, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (*Life Cycle Assessment*, LCA) ve Yaşam Döngüsü Maliyet (*Life Cycle Cost*, LCC) analizi vb. gibi pratik amaçlar için oluşturulmuş ve geliştirilmiştir (Chong, Gu, ve Jia, 2021). Bu sayede, tasarımcılar ve

mühendisler, erken tasarım sürecinde potansiyel enerji tüketimlerini belirleyerek, binanın çevresel etkilerini azaltarak enerji ve maliyet etkin çözümler üretebilmektedir. Literatürde sıklıkla rastlanan başlıca simülasyon programları ve modelleme arayüzleri Çizelge 2.2’de görülmektedir.

Çizelge 2.2. Başlıca Bina Enerji Simülasyon programları

Simülasyon motoru	Birlikte çalıştığı modelleme ara yüzleri	Açıklama
<i>EnergyPlus</i>	DesignBuilder, OpenStudio, Grasshopper UMI, URBANopt, CityBES	En yaygın olarak kullanılan bina enerji simülasyon motorudur. Açık kaynaklı ve esnektir.
<i>DOE-2</i>	eQuest, VisualDOE	Özellikle mevcut yapıların iyileştirilmesine ilişkin analizlerde tercih edilmektedir. EnergyPlus’tan daha basit fakat daha sınırlıdır.
<i>Radiance</i>	OpenStudio, UMI, Grasshopper, DesignBuilder	Aydınlatma ve güneş ışığı simülasyonları için kullanılmaktadır.
<i>TRNSYS</i>	OpenStudio, Grasshopper	Gelişmiş sistem ve enerji analizi yapılmasına imkân sağlamaktadır.

Literatüre bakıldığında en yaygın kullanılan simülasyon programı olarak, birçok programla koordinasyon halinde çalışabilen, farklı sistemlerde ve ölçeklerde analizler yapılmasına imkân sağlayan, DesignBuilder yazılımı ile entegre çalışan EnergyPlus simülasyon motoru öne çıkmaktadır (Dal, Tomrukçu, Kızıldağ, Avgan, Ashrafian, Özdemir, ve Sağlam, 2023).

2.3.2. Bina enerji simülasyon modelinin kalibrasyonu ve yöntemsel adımları

Sayısal modelleme açısından bakıldığında kalibrasyon fikri, bir bilimsel teoremin doğruluğunu kanıtlamak değil, modelin belirlenen amaç için kabul edilebilir ve uygun olup olmadığını değerlendirmeye ve ölçmeye dayanmaktadır. Dolayısıyla simülasyon ölçümlerinin güvenilirliğini artırmak, simüle edilmiş ve izlenen bina enerji performansı arasında daha iyi eşleşme sağlamak için modelin kalibre edilmesine ihtiyaç vardır (Chong ve diğerleri, 2021). Bina simülasyonunun bu özel uygulamasına kalibre edilmiş simülasyon denir. Bu tanım, gözlemlenen enerji tüketimlerinin simülasyon programı tarafından

öngörülenlere yakın olması için simülasyon girdilerinin ince ayarlanması veya "kalibre edilmesi" sürecine karşılık gelmektedir (Fabrizio ve Monetti, 2015). Böylece tahminler, gözlemlenen enerji kullanımıyla yakından eşleşmektedir. Sonuç itibarıyla, kalibrasyon süreci; kullanıcı bilgisine, geçmiş deneyime, istatistiksel uzmanlığa, mühendislik ölçümüne ve bol miktarda deneme yanılmaya dayanan bir izlek (prosedür) olmaktadır (Reddy, Maor, ve Panjapornpon, 2007).

ASHRAE kılavuz 14'te (ASHRAE, 2014) kalibrasyon; "belirli bir koşul kümesi altında modelin tahmin edilen çıktısını, aynı koşul kümesi için gerçek ölçülen verilerle karşılaştırarak modelin belirsizliğini azaltma süreci" olarak tanımlanmaktadır. Anlaşılacağı üzere kalibre edilmiş bir model, aynı koşul kümesi altında ölçülen verileri, yeniden üretebilen bir modeldir ve doğruluğu bir belirsizlik analizi ile ölçülmektedir (Ramos Ruiz ve Fernandez Bandera, 2017).

ASHRAE Kılavuz 14'te (2014) açıklandığı üzere, belirsizlik analizi "ölçüm prosedürleri ve/veya hesaplamalar kullanılırken gerçek değere olan güven derecesini belirleme sürecidir" (Ramos Ruiz ve Fernandez Bandera, 2017).

Bu güven "derecesinin", yani belirsizliğin nasıl belirleneceğini açıklayan üç ana kaynak ise;

- Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği (ASHRAE) Kılavuz 14,
- Federal Enerji Yönetimi Programı için Ölçme ve doğrulama yönergeleri (FEMP) (Webster, Bradford, Sartor, Shonder, Atkin, Dunnivant, Frank, Franconi, Jump ve Schiller, 2015)
- Uluslararası Performans Ölçümleri ve Doğrulama protokolüdür (IPMVP, 2002).

Bu kaynaklar, tasarruf hesaplamalarındaki belirsizliği ölçmek için basitleştirilmiş yöntemler kullanmaktadır. Kullanılan başlıca belirsizlik endeksleri şunlardır: (Ramos Ruiz, ve Fernandez Bandera, 2017).

- Normalize edilmiş Ortalama Sapma Hatası (*Normalized Mean Bias Error, N(MBE)*)
- Kök Ortalama Kare Hatasının Değişim Katsayısı (*Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error, CV(RMSE)*)'dir.

Bu endekslerin dışında R^2 (*Coefficient of determination*), GOF (*Goodness-Of-Fit*) ve f_i maliyet fonksiyonu, kalibrasyon amacıyla kullanılan diğer istatistiksel göstergelerdendir. Ancak bu çalışmada, literatürde en sık kullanımına rastlanan ve birlikte kullanıldığında uyumlu olarak kalibrasyon hatalarını telafi edebilen $N(MBE)$ ve $CV(RMSE)$ endeksleri tercih edilmiştir.

$N(MBE)$ (%), her saat için ölçülen ve simüle edilen veriler arasındaki farkı ölçmektedir ve modeldeki genel sapmanın iyi bir göstergesidir. Negatif veya pozitif olabilir. Pozitif değerler, modelin ölçülen verileri az tahmin ettiği anlamına gelirken, negatif değerler aşırı tahmin anlamına gelmektedir. Ancak, pozitif ve negatif değerlerin toplam değeri azaltarak iptal hatalarına maruz kalması bu endeksle ilgili önemli bir sorun olmaktadır. Bu nedenle tek başına kullanılmaması önerilmektedir. $CV(RMSE)$ (%) ise, ölçülen ve simüle edilen veriler arasındaki telafi edici hataları yakalayarak bir modelin verilerle ne kadar iyi bağdaştığını belirlemeye imkân sağlamaktadır. Her zaman pozitif değerdedir buna bağlı olarak iptal hatalarına maruz kalmamaktadır (Coakley, Raftery, ve Keane, 2014). Her iki endeksin birlikte kullanılması, olası kalibrasyon hatalarını önlemek adına daha isabetli görülmektedir.

Kalibrasyon sırasında, oluşturulan bina modelinden gelen “simülasyon veri kümesi” ve gerçek bina izleme sisteminden gelen “ölçümlü veri kümesi” olmak üzere iki ana veri kümesine ihtiyaç vardır. Bina modeli veri kümesi, simüle edilen ve ölçülen enerji tüketimi arasında bir eşleşme bulmak için en çok etki eden parametrelerin seçilmesi gereken büyük miktarda veriden oluşmaktadır (Fabrizio ve Monetti, 2015). Bunlar faturalarda belirtilen aylık enerji tüketim verileri ya da saatlik ölçülen iç ortam verileri olabilmektedir.

$N(MBE)$; MBE (Ortalama Sapma Hatası) değerinin normalize edilmiş halidir. MBE , bir örnek uzayın hatalarının ortalamasıdır. Genel olarak, örneklemin regresyon çizgisi ile ilgili olarak simüle edilen verilerin genel davranışının iyi bir göstergesidir (Ramos Ruiz ve Fernandez Bandera, 2017). Eşitlik 2.1’de verilen formüle göre hesaplanmaktadır.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n-p} \times 100 (\%) \quad (2.1)$$

Buna bağılı olarak, *MBE* sonuçlarını ölçeklendirmek ve karşılaştırılabilir hale getirmek için $N(MBE)$, endeksine ihtiyaç duyulmaktadır. *MBE* endeksini ölçülen değerlerin ortalamasına ($\bar{m}$) bölerek hesaplanmakta ve gerçek değerler ile tahmin edilenler arasındaki global farkı vermektedir. Ölçülen ortalama değer ($\bar{m}$) formülde yerine konulup $p = 0$ alınarak gerekli sadeleştirmeler yapıldığında basitleştirilmiş olarak $N(MBE)$ formülü ortaya çıkmaktadır (Eş. 2.2). Bu formüle göre öncelikle dikkate alınan dönemin hesaplama zaman aralıklarında (örneğin, ay) ölçülen ve simüle edilen enerji tüketimi arasındaki fark toplanıp daha sonra bu sonuç, ölçülen enerji tüketiminin toplamına bölünerek hesaplama tamamlanmaktadır. Burada dikkat çekilmesi gereken önemli bir nokta vardır. Yapılan literatür araştırmalarında sıklıkla $N(MBE)$ formülünün (Eş. 2.2), *MBE* olarak isimlendirilip kullanıldığı gözlemlenmiştir. Ancak yukarıda ayrıntılı biçimde açıklandığı üzere kalibrasyon için dikkate alınan, belirsizlik endeksidir ve bu endeks $N(MBE)$ (Normalize edilmiş Ortalama Sapma Hatası), olarak Standart/Protokollerde (ASHRAE 14, FEMP, IPMVP) yer almaktadır.

$$N(MBE) = \frac{1}{\bar{m}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n-p} \times 100 (\%) \rightarrow \bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i)}{n}$$

$$N(MBE) = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i)} \times 100 (\%) \quad (2.2)$$

- m , zaman aralığı boyunca ölçülen enerji verisi
- s , aynı zaman aralığındaki simüle edilmiş enerji verisi
- n , gözlem sayısı
- $\bar{m}$, ölçülen değerlerin ortalaması
- p , kalibrasyon amaçları için ayarlanabilir model parametrelerinin sayısı

$N(MBE)$ hesaplanırken $p=0$ alınması önerilmektedir (Reddy, Maor, Jian, ve Panjapornporn, 2006 akt. Robertson, Polly ve Collis, 2013).

Bir diğer belirsizlik endeksi olan $CV(RMSE)$ ise $RMSE$ değerinin normalize edilmesi ile bulunmaktadır. Öncelikle, ölçülen ve simüle edilen değerlerin farklarının kareleri toplamı, gözlem sayısına bölünmektedir. Son olarak bu işlemin sonucunun karekökü alınarak $RMSE$ değeri elde edilmektedir (Eş. 2.3). $RMSE$ 'nin ölçülen değerlerin ortalamasına ($\bar{m}$), bölünmesi ile ise $CV(RMSE)$ hesaplanmaktadır (Eş. 2.4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n-p}} \times 100 (\%) \quad (2.3)$$

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n-p}} \times 100 (\%) \quad (2.4)$$

- m , zaman aralığı boyunca ölçülen enerji verisi
- s , aynı zaman aralığındaki simüle edilmiş enerji verisi
- n , gözlem sayısı
- $\bar{m}$, ölçülen değerlerin ortalaması
- p , kalibrasyon amaçları için önerilen ayarlanabilir model parametrelerinin sayısı

$CV(RMSE)$ hesaplanırken $p=1$ alınması önerilmektedir (Reddy ve diğerleri, 2006 akt. Robertson ve diğerleri, 2013).

Bir modeli kalibre edilmiş olarak değerlendirebilmek için, $N(MBE)$ ve $CV(RMSE)$ değerlerinde bir eşik sınırına uyulması gerekmektedir. Kalibrasyon için zaman aralığına (aylık veya saatlik) ve ele alınan Standart/Protokolün (ASHRAE 14, FEMP, IPMVP) gerekliliklerine uygunluğa bağlı olarak, sınır eşiği küçük farklılıklar göstermektedir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Kalibrasyon için gerekli olan, istatistiksel kriterlerin eşik sınırları.

	İstatistiksel göstergeler (%)	ASHRAE	FEMP	IPMVP
Aylık	$N(MBE)$	±5	±5	±20
	$CV(RMSE)$	15	15	-
Saatlik	$N(MBE)$	±10	±10	±5
	$CV(RMSE)$	30	30	20

Genel olarak, simülasyon modellerinin ölçülen verilere göre kalibre edilmesine yönelik yaklaşımlar dört grupta sınıflandırılabilir (Coakley ve diğerleri, 2014; Reddy ve diğerleri, 2006).

- i. Ağırlıklı olarak modelleyen eylemsel ve yinelenen müdahalesine dayanan manuel yaklaşımlardır. Matematiksel/istatistiksel yöntemler ve hiçbir şekilde otomatik kalibrasyon biçimi kullanmayan tüm yöntemler bu sınıfta değerlendirilebilir.

- ii. Çok fazla verinin olası belirsizlikler yarattığı durumlarda manuel yaklaşıma ek olarak özel araç setleriyle oluşturulan belirli türdeki görsel grafiklerin kullanıldığı bilgilendirici grafiksel karşılaştırmaya dayalı yaklaşımlar.
- iii. Model kalibrasyonuna yardımcı olmak veya onu tamamlamak için bir tür otomatik (yani kullanıcı odaklı olmayan) analitik bir sürece sahip yöntemleri içeren otomatik yaklaşımlar.
- iv. Ölçülen ve simüle edilen enerji kullanım verileri arasındaki periyodik veriyi ortalama kare hataların minimize edilmesi formülasyonuna dayalı analitik/matematiksel yaklaşımlar.

2.4. Bütünleşik Yöntemlere Yönelik Tanımlar ve Literatür Analizi

Bu bölümde çalışmada kullanılan yöntemlerin kuramsal temelleri ve ilgili literatürdeki uygulamaları ele alınmaktadır. Bu kapsamda, öncelikle istatistiksel deneysel tasarımın genel yapısı ve araştırmalarda nasıl kullanıldığı açıklanmıştır. Ardından bu yapının özel bir uygulaması olan Taguchi deney tasarımı yöntemi üzerinde durulmuştur. Regresyon modelleme alt başlığında, enerji simülasyonu yoluyla elde edilen verilerin matematiksel olarak temsil edilmesini sağlayan modellerin yapısı açıklanmıştır. Sonrasında, çok kriterli karar verme yöntemleri ele alınmış, bu yöntemlerin bütünleşik yaklaşımlara ilişkin literatüre yer verilmiştir.

2.4.1. İstatistiksel deneysel tasarım

İstatistiksel deney tasarımı (*Design of Experiments*, DOE), deneysel çalışmaların planlanması, yürütülmesi ve analiz edilmesi için sistematik bir yaklaşım sunan bilimsel bir metodoloji olarak tanımlanmaktadır. Montgomery, (2017) istatistiksel deney tasarımını “bir süreç veya sistemin performansını etkileyen faktörlerin belirlenmesi, bu faktörlerin etkilerinin değerlendirilmesi ve optimum sonuçlar elde etmek için faktör seviyelerinin ayarlanması amacıyla yapılan deneysel çalışmaların planlanması ve analizi” olarak tanımlamaktadır.

İstatistiksel deney tasarımı, özellikle endüstriyel süreçlerde, bilimsel araştırmalarda ve ürün geliştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu metodolojinin temel amacı, minimum sayıda deney ile maksimum bilgi elde etmektir. Bu yaklaşım, zaman, maliyet ve

kaynak tasarrufu sağlarken, aynı zamanda elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve geçerliliğini de artırmaktadır (Montgomery, 2017).

Unal ve Dean (1990), istatistiksel deney tasarımının önemini vurgulayarak, bu metodolojinin “kalite ve maliyet optimizasyonu için kritik bir araç” olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, karmaşık ve maliyetli projelerde, istatistiksel deney tasarımının kaynak kullanımını optimize etmek ve yüksek kaliteli ürünler geliştirmek için vazgeçilmez olduğunu vurgulamışlardır.

İstatistiksel deney tasarımının temelleri, 1920’lerde İngiliz istatistikçi Sir Ronald A. Fisher tarafından atılmıştır. Fisher, tarımsal deneylerde verimliliği artırmak amacıyla faktöriyel tasarım ve varyans analizi gibi temel kavramları geliştirmiştir (Montgomery, 2017). Fisher’ın çalışmaları, modern istatistiksel deney tasarımının temelini oluşturmuş ve sonraki yıllarda bu alanda yapılan çalışmalara öncülük etmiştir. 1950’lerde ve 1960’larda, George E. P. Box ve J. Stuart Hunter gibi araştırmacılar, endüstriyel süreçlerin optimizasyonu için istatistiksel deney tasarımı metodolojilerini geliştirmişlerdir.

1980’lerde, Japon kalite mühendisi Genichi Taguchi, istatistiksel deney tasarımına yeni bir yaklaşım getirmiştir. Taguchi’nin ortogonal dizilere dayalı deney tasarımı metodolojisi, özellikle endüstriyel süreçlerin optimizasyonu ve ürün kalitesinin artırılması için yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Kacker, Lagergren, ve Filliben, 1991).

İstatistiksel deney tasarımının adımları

Montgomery (2017), istatistiksel deney tasarımının sistematik bir şekilde uygulanması için aşağıdaki adımları önermektedir:

1. Problem tanımlama ve hedef belirleme: Deneysel çalışmanın amacının ve hedeflerinin net bir şekilde tanımlanması.
2. Faktörlerin ve seviyelerinin belirlenmesi: Deneysel çalışmada incelenecek faktörlerin (bağımsız değişkenlerin) ve bu faktörlerin seviyelerinin (değerlerinin) belirlenmesi.
3. Yanıt değişkenlerinin seçimi: Deneysel çalışmada ölçülecek yanıt değişkenlerinin (bağımlı değişkenlerin) belirlenmesi.

4. Deney tasarımının seçimi: Deneysel çalışmanın amacına ve kaynaklarına uygun deney tasarımının seçilmesi.
5. Deneylerin yürütülmesi: Belirlenen deney tasarımına göre deneylerin sistematik bir şekilde yürütülmesi ve verilerin toplanması.
6. Verilerin analizi: Toplanan verilerin istatistiksel yöntemlerle analiz edilmesi ve sonuçların yorumlanması.
7. Sonuçların doğrulanması: Analiz sonuçlarının doğruluğunun ve geçerliliğinin test edilmesi için doğrulama deneylerinin yapılması.
8. Sonuçların raporlanması ve Uygulama: Deneysel çalışmanın sonuçlarının raporlanması ve elde edilen bilgilerin uygulamaya aktarılması.

Bu adımların sistematik bir şekilde uygulanması, deneysel çalışmaların etkinliğini ve verimliliğini artırmakta, aynı zamanda elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve geçerliliğini de sağlamaktadır.

İstatistiksel deney tasarımı türleri

İstatistiksel deney tasarımı, deneysel çalışmanın amacına, kaynaklarına ve incelenecek faktörlerin özelliklerine göre farklı türlerde olabilir. Montgomery (2017), istatistiksel deney tasarımı türlerini aşağıdaki şekilde sınıflandırmaktadır.

i. Tam faktöriyel tasarımlar (Full factorial designs)

Tam faktöriyel tasarımlar, tüm faktörlerin tüm seviyelerinin kombinasyonlarını içeren deney tasarımlarıdır. Bu tasarımlar, faktörler arasındaki etkileşimleri de incelemeye olanak tanımaktadır. Ancak, faktör ve seviye sayısı arttıkça, deney sayısı üstel olarak artmaktadır, bu da zaman ve kaynak kısıtlamaları olan durumlarda pratik olmamaktadır.

Örneğin, 3 faktörlü ve her faktörün 2 seviyeli olduğu bir tam faktöriyel tasarımda, toplam deney sayısı $2^3 = 8$ olacaktır. Ancak, faktör sayısı 5'e çıktığında, deney sayısı $2^5 = 32$ 'ye yükselecektir.

ii. Kesirli faktöriyel tasarımlar (*Fractional factorial designs*)

Kesirli faktöriyel tasarımlar, tam faktöriyel tasarımların bir alt kümesini kullanarak, daha az sayıda deney ile faktörlerin ana etkilerini ve belirli etkileşimlerini incelemeye olanak tanımaktadır. Bu tasarımlar, özellikle faktör sayısının fazla olduğu ve kaynakların kısıtlı olduğu durumlarda tercih edilmektedir (Montgomery, 2017).

Kesirli faktöriyel tasarımlar, genellikle $2^{(k-p)}$ şeklinde gösterilmektedir. Burada k faktör sayısını, p ise kesir derecesini ifade etmektedir. Örneğin, $2^{(5-1)}$ tasarımı, 5 faktörlü ve her faktörün 2 seviyeli olduğu bir tam faktöriyel tasarımın $1/2$ kesrini kullanır, bu da toplam $2^5/2 = 16$ deney anlamına gelmektedir.

iii. Yanıt yüzeyi tasarımları (*Response surface designs*)

Yanıt yüzeyi tasarımları, bir sürecin optimizasyonu için kullanılan deney tasarımlarıdır. Bu tasarımlar, faktörlerin yanıt değişkeni üzerindeki doğrusal olmayan etkilerini modellemek ve optimum faktör seviyelerini belirlemek için kullanılmaktadır (Montgomery, 2017). En yaygın yanıt yüzeyi tasarımları arasında Merkezi Kompozit Tasarım (*Central Composite Design*, CCD) ve Box-Behnken Tasarımı yer almaktadır.

iv. Karışım tasarımları (*Mixture designs*)

Karışım tasarımları, bileşenlerin oranlarının yanıt değişkeni üzerindeki etkilerini incelemek için kullanılan özel deney tasarımlarıdır. Bu tasarımlarda, bileşenlerin toplam miktarı sabit tutulur ve bileşenlerin oranları değiştirilir (Montgomery, 2017). Karışım tasarımları, özellikle kimyasal formülasyonlar, gıda ürünleri, ilaçlar ve malzemeler gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

v. Latin kare tasarımları (*Latin square designs*)

Latin kare tasarımları, blok etkilerini kontrol etmek için kullanılan deney tasarımlarıdır. Bu tasarımlarda, her faktör seviyesi her satırda ve her sütunda yalnızca bir kez görünmektedir (Montgomery, 2017).

Latin kare tasarımları, özellikle tarımsal deneylerde ve klinik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

vi. Plackett-Burman tasarımları

Plackett-Burman tasarımları, ana etkilerin etkin bir şekilde tahmin edilmesi için kullanılan kesirli faktöriyel tasarımlardır. Bu tasarımlar, özellikle faktör tarama çalışmalarında, yani çok sayıda faktörün etkilerini hızlı bir şekilde değerlendirmek için kullanılmaktadır (Montgomery, 2012). Plackett-Burman tasarımları, deney sayısının faktör sayısından biraz fazla olmasını sağlayarak, kaynak kullanımını optimize etmektedir.

vii. Taguchi tasarımları (Taguchi designs)

Taguchi tasarımları, Genichi Taguchi tarafından geliştirilen ve ortogonal dizilere dayanan deney tasarımlarıdır. Bu tasarımlar, ürün ve süreç kalitesini artırmak ve değişkenliği azaltmak için kullanılmaktadır (Kacker, Lagergren ve Filliben, 1991). Taguchi tasarımları, kontrol edilebilir faktörlerin optimum seviyelerini belirlemek ve kontrol edilemeyen faktörlerin (gürültü faktörleri) etkilerini minimize etmek için "sinyal/gürültü oranı" (signal-to-noise ratio) kavramını kullanmaktadır.

Bu çalışmada çok sayıda yapı kabuğu bileşeni (duvar, çatı, pencere, zemin vb.) ve enerji sistemine (ısıtma sistemi, PV sistemi, aydınlatma vb.) ait çeşitli faktör ve faktör seviyeleri dikkate alınarak kapsamlı bir performans değerlendirmesi yapılması amaçlanmıştır. Tüm kombinasyonların denenmesi, zaman ve kaynak açısından mümkün olmadığından, deney sayısını optimize ederken güvenilir sonuçlar sağlayan Taguchi deney tasarımı tercih edilmiştir. Taguchi yöntemi, ortogonal diziler sayesinde faktörlerin etkilerini sistematik şekilde değerlendirme olanağı sunmakta ve sınırlı sayıda simülasyonla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yönüyle, çalışmanın kapsamı ve kaynak kısıtlarıyla uyumlu, uygun bir yöntem olarak değerlendirilmiştir.

2.4.2. Taguchi deney tasarımı yöntemi

Taguchi yöntemi, 1950'lerde Japonya'da, Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Taguchi, II. Dünya Savaşı sonrasında Japonya'nın yeniden yapılanma sürecinde, sınırlı

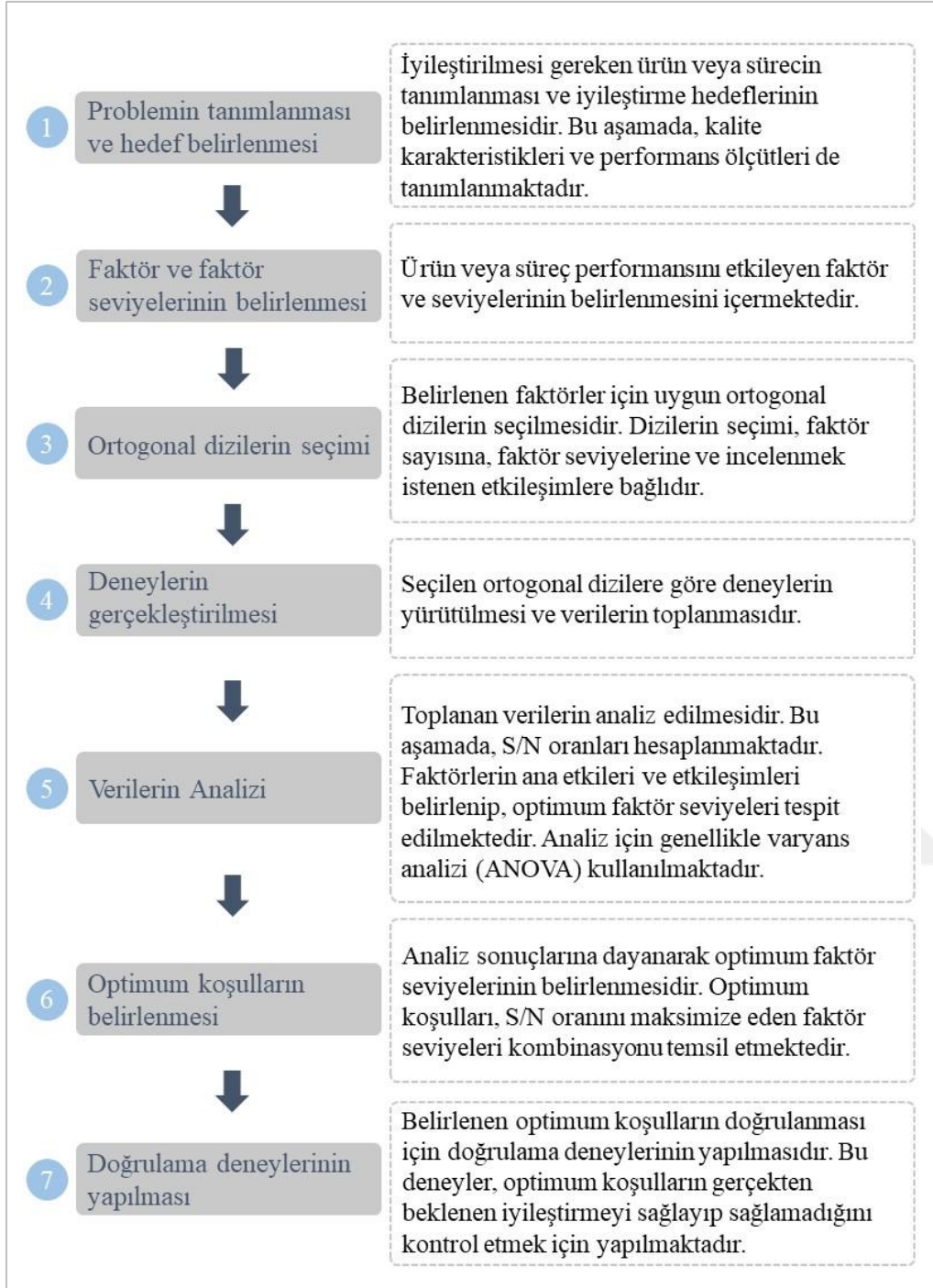
kaynaklarla yüksek kaliteli ürünler üretme ihtiyacını karşılamak için bu yöntemi geliştirmiştir (Unal ve Dean, 1991).

1960'larda ve 1970'lerde, yöntemi Japonya'da yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve Japon endüstrisinin kalite devriminde önemli bir rol oynamıştır. Bu dönemde, Toyota, Nissan ve Sony gibi Japon şirketleri, Taguchi yöntemini kullanarak ürün kalitesini artırmış ve uluslararası pazarlarda rekabet avantajı elde etmiştir (Montgomery, 2012).

1980'lerde, Taguchi yöntemi Batı dünyasında da tanınmaya ve kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde, Ford, Xerox ve AT&T gibi şirketler, Taguchi yöntemini ürün ve süreç geliştirme çalışmalarında kullanmaya başlamıştır (Unal ve Dean, 1991).

1990'larda ve 2000'lerde, Taguchi yöntemi dünya genelinde yaygınlaşmış ve çeşitli endüstrilerde standart bir kalite iyileştirme aracı haline gelmiştir. Bu dönemde, Taguchi yönteminin teorik temelleri ve uygulama alanları genişletilmiş, ayrıca diğer kalite iyileştirme metodolojileriyle entegrasyonu sağlanmıştır (Montgomery, 2012).

Taguchi yönteminin uygulama adımları, Şekil 2.8'de sistematik biçimde sunulan aşamalardan oluşmaktadır (Unal ve Dean, 1991; Montgomery, 2012; Kacker, Lagergren ve Filliben, 1991).



Şekil 2.8. Taguchi yöntemi uygulama adımları

Bina enerji performansı alanında, Taguchi yöntemi, yapı kabuğu optimizasyonu, termal yalıtım malzemelerinin seçimi, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemlerinin tasarımı ve enerji simülasyonu gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bu yöntem, az sayıda denemeyle çok sayıda faktörün etkisini analiz edebilmesi ve kontrol edilemeyen gürültü faktörlerinin etkisini azaltarak sistemin daha sağlam hale gelmesini sağlaması nedeniyle bina tasarımı gibi karmaşık ve çok değişkenli problemlerde önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürde farklı uygulama bağlamlarında Taguchi yönteminin bina enerji performansı üzerindeki etkilerini değerlendiren pek çok çalışma yer almaktadır.

Sadeghifam, Meynagh, Tabatabaee, Mahdiyar, Memari, Ismail (2019), Malezya’da tropikal iklim koşullarına sahip konutlar üzerinde yürüttükleri çalışmada, enerji verimli yapı kabuğu tasarımı için Taguchi yönteminden yararlanmıştır. Autodesk Revit ile oluşturulan bina modeli, EnergyPlus simülasyon motoruna aktarılmış ve yapı kabuğu bileşenlerinin enerji tüketimine etkileri değerlendirilmiştir. Taguchi yöntemi, hem gürültü faktörlerinin etkisini azaltmak hem de optimum yapı bileşeni kombinasyonlarını belirlemek amacıyla kullanılmış, özellikle çatı yalıtımının enerji performansı üzerindeki baskın etkisi vurgulanmıştır.

Benzer şekilde Chen, Currao, Li, ve Kao, (2023) biyosentez gazı ile çalışan mikro ölçekte bir birleşik ısı ve güç sisteminin optimizasyonunda Taguchi yöntemini uygulamış, yakıt bileşimi, eşdeğerlik oranı ve akış hızı gibi parametrelerin sistem verimliliği üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Bu çalışma, her ne kadar doğrudan bina kabuğu ile ilişkili olmasa da, Taguchi yönteminin enerji sistemlerinin parametre düzeylerinde etkin ve güvenilir sonuçlar sağlayabildiğini göstermesi açısından önemlidir.

Chlela, Husaunndee, Riederer, ve Inard, (2007) bir ofis binasında bina zarfı parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini deneysel tasarım ilkeleriyle analiz etmiş ve Taguchi yöntemini bu bağlamda uygulamıştır. Söz konusu yaklaşım, tasarım aşamasında farklı bileşen kombinasyonlarının sistematik olarak test edilmesini sağlamış, düşük enerji bina tasarımı için yönlendirici olmuştur.

Yuce, Nielsen, ve Wargocki, (2022) ise, bina içi havalandırma performansını değerlendirmek amacıyla CFD analizlerini Taguchi, ANOVA ve GRA yöntemleriyle birlikte kullanmışlardır. Bu çalışmada, özellikle çok sayıda değişkenin etkili olduğu simülasyonlarda, Taguchi yöntemi deney sayısını azaltarak modelleme sürecini basitleştirmiştir. Ortogonal diziler üzerinden oluşturulan deney planı, en uygun havalandırma senaryolarının belirlenmesine katkı sağlamıştır.

Chiu, Chiang, Lee, ve Chen (2025) tarafından yürütülen bir diğer çalışmada, mevcut sağlık yapılarının enerji verimliliğini artırmaya yönelik konum tabanlı bir simülasyon aracı geliştirilmiştir. Bu süreçte Taguchi yöntemi, hızlı ve etkili karar destek modeli olarak kullanılmıştır. HVAC sistem verimliliği, pencere özellikleri ve gölgeleme parametreleri gibi faktörler değerlendirilmiş, tam faktöriyel tasarıma kıyasla çok daha az sayıda denemeyle benzer sonuçlara ulaşılabilmektedir. Bu durum, Taguchi yönteminin simülasyon yükünü azaltarak zaman ve maliyet açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Alafzadeh, Moubed, ve Haghighat, (2024) ise, bir hastane odasında soğutma sistemine ait farklı parametrelerin iç sıcaklık ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini EnergyPlus ve Taguchi yöntemi ile analiz etmişlerdir. Özellikle hava difüzörlerinin yerleşimi gibi faktörlerin konfor koşullarına etkisi test edilmiş ve soğutma yükünün optimize edilmesinde Taguchi yönteminin etkinliği vurgulanmıştır.

Yenilikçi malzemelerin entegre edildiği sistemler üzerine yapılan çalışmalarda da Taguchi yöntemine başvurulmaktadır. Lin ve Ma, (2016) entegre güneş paneli sistemleri ve faz değişim malzemeleri (*Phase Change Material*, PCM) ile donatılmış bina kabuklarında termal performans iyileştirmesi için Taguchi ve Fibonacci arama yöntemlerini birleştirmiştir. Bu hibrit yaklaşım, hem sürekli hem de ayrık değişkenlerle çok boyutlu optimizasyon yapılmasına olanak sağlamış, yapı kabuğunda PCM tipi ve katman kalınlığı gibi parametrelerin enerji performansı üzerindeki katkısı detaylı olarak analiz edilmiştir.

Son olarak Yi, Srinivasan, ve Braham, (2015), bina formunun erken tasarım aşamasında optimizasyonu amacıyla enerji–emerji temelli bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu çalışmada, EnergyPlus ile bina enerji simülasyonu, analitik yollarla yapılan emerji hesaplamaları ve Taguchi yöntemi ile geliştirilen metamodel birlikte kullanılarak, tasarım sürecinin çevresel etkiler açısından daha bütüncül şekilde değerlendirilmesi sağlanmıştır. Taguchi yöntemi burada, emerji tabanlı metamodelin istatistiksel sağlamlığını kurmak ve karmaşık çok kriterli karar alanlarında sadeleştirme yapmak için tercih edilmiştir.

Bu çalışmaların ortak noktası, Taguchi yönteminin çok sayıda değişkenin olduğu enerji performansı odaklı sistemlerde, karar verme sürecini sadeleştirme ve optimum sonuçlara ulaşmak için etkili bir yol sunmasıdır. Ayrıca, yöntemin EnergyPlus ve CFD gibi simülasyon tabanlı analizlerle entegre şekilde kullanılabilmesi, bina ölçeğinde sürdürülebilirlik ve enerji

verimliliği hedeflerine ulaşmak isteyen araştırmacılar ve tasarımcılar için önemli bir avantajdır.

2.4.3. Regresyon modelleme

Binalarda enerji performansının modellenmesi, hem enerji verimliliği iyileştirmeleri hem de karar destek sistemlerinin geliştirilmesi açısından kritik bir adımdır. Literatürde, pek çok çıktı değişkeninin belirlenmesinde regresyon modelleme sıkça başvurulan yöntemlerden biridir (Vesterberg, 2014). Regresyon modelleri, özellikle sınırlı sayıda simülasyon verisinden genellenebilir matematiksel ilişkiler oluşturmak ve simülasyon yapılmamış kombinasyonlar için tahminleme yapmak amacıyla tercih edilmektedir (Ali ve diğerleri, 2024).

Literatürde, bina enerji performansı tahmininde çok çeşitli regresyon teknikleri kullanılmıştır. Bunlar arasında en yaygın olanları şunlardır: (Kangalli Uyar, Ozbay, ve Dal, 2025; Storcz, Várady, Kistelegdi, ve Ercsey, 2023)

- Çoklu doğrusal regresyon (*Multiple linear regression*, MLR): En temel regresyon modelidir. Bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsaymaktadır. Basitliği ve yorumlanabilirliği nedeniyle sıkça tercih edilmektedir.
- Karar ağaçları (*Decision tree*, DT): Enerji tüketimini tahmin etmek için bir dizi karar kuralı oluşturmakta ve karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri yakalayabilmektedir.
- Destek vektör regresyonu (*Support vector regression*, SVR): Veri noktaları arasındaki ilişkiyi bir hiperdüzlem ile modelleyerek çalışmaktadır ve küçük veri setlerinde iyi performans göstermektedir.
- Yapay sinir ağları (*Artificial neural network*, ANN): Karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri modelleme yeteneği sayesinde yüksek doğrulukta tahminler yapabilmektedir. Ancak, yorumlanabilirlikleri MLR'ye göre daha düşüktür.
- Rastgele orman (*Random forest*, RF): Birden fazla karar ağacının bir araya gelmesiyle oluşan bir topluluk öğrenme yöntemidir. Genellikle yüksek doğruluk ve genellenebilirlik sunmaktadır.
- Aşırı gradyan yükseltme (*Extreme gradient boosting*, XGBoost): Güçlü bir topluluk öğrenme algoritmasıdır ve yüksek doğrulukta tahminler yapma yeteneği ile

bilinmektedir. Özellikle büyük veri setlerinde ve karmaşık ilişkilerde başarı göstermektedir.

2.4.4. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemi

Çok kriterli karar verme ya da uluslararası literatürdeki yaygın kullanımıyla *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), karar vericilerin birden fazla, çoğu zaman birbiriyle çelişen kriteri dikkate alarak en uygun alternatifi seçmesini sağlayan sistematik ve analitik bir karar destek sürecidir (Taherdoost ve Madanchian, 2023). Bu yöntem, karar problemlerinin yalnızca tek bir ölçüte indirgenemediği durumlarda alternatifler arasında rasyonel ve nesnel seçimler yapılmasına olanak tanımaktadır. Özellikle maliyet, kalite, sürdürülebilirlik, kullanıcı memnuniyeti ve risk gibi çok boyutlu kriterlerin etkili olduğu karmaşık sistemlerde karar alma sürecinin şeffaf ve izlenebilir olmasını sağlamaktadır (Zheng ve Wang, 2023).

Son yıllarda ÇKKV yöntemlerinin önemi, farklı disiplinlerdeki uygulamaların artmasıyla birlikte belirgin şekilde artmıştır. Finansal yatırımların optimizasyonu, mühendislik sistemlerinin tasarımı, tedarik zinciri yönetimi, sürdürülebilir bina performanslarının değerlendirilmesi, ulaşım sistemleri planlaması ve hatta bireysel tüketici tercihleri gibi çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Zheng ve Wang, 2023). Bu geniş kullanım alanı, karar vericilerin çok yönlü bakış açılarını değerlendirme ihtiyacından kaynaklanmaktadır.

ÇKKV süreci genellikle birbirini izleyen yapılandırılmış aşamalardan oluşmaktadır. Bu süreç beş temel adımda özetlenebilmektedir (Bayraktar ve Şentürk, 2022).

1. Problemin tanımlanması ve hedeflerin belirlenmesi: Karar verme sürecine yön verecek ana sorunun ve kararın nihai amacının netleştirilmesi,
2. Kriterlerin belirlenmesi: Karar sürecinde dikkate alınacak nicel veya nitel ölçütlerin seçimi,
3. Alternatiflerin tanımlanması: Değerlendirmeye tabi tutulacak farklı seçeneklerin belirlenmesi,
4. Alternatiflerin değerlendirilmesi: Seçilen kriterler doğrultusunda her bir alternatifin sistematik olarak analiz edilmesi,

5. Sonuçların yorumlanması ve kararın verilmesi: Değerlendirme sonuçlarına göre en uygun seçeneğin belirlenmesi ve kararın uygulanması.

Bu adımlar, karar verme sürecine açıklık ve nesnellik kazandırarak daha güvenilir sonuçlara ulaşılmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca karar vericilerin sezgisel önyargılardan arınmış, kanıta dayalı bir yaklaşım benimsemelerini desteklemektedir.

Karar süreçlerinin daha esnek ve güçlü hale getirilmesi amacıyla çeşitli ÇKKV yöntemleri geliştirilmiştir. AHP (*Analytic Hierarchy Process*), TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), VIKOR (*VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*), MOORA (*Multi-Objective Optimization on the basis Ratio Analysis*) ve PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) gibi yöntemler en yaygın kullanılan teknikler arasında yer almaktadır. Bunun yanı sıra, farklı yöntemlerin avantajlarını bir araya getiren hibrit ÇKKV yaklaşımları da geliştirilmektedir. Bu hibrit sistemler, belirsizlik, bulanıklık ve dinamik koşulların etkili olduğu karmaşık ortamlarda karar verme sürecinin daha etkin şekilde yürütülmesini mümkün kılmaktadır (Shaikh, 2025).

Sonuç olarak, ÇKKV metodolojisi; çok boyutlu, çok aktörlü ve çoğu zaman belirsizlik içeren karar problemlerinde rasyonel, sistematik ve izlenebilir çözümler üretmek açısından önemli ve yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Bu yöntemlerin doğru biçimde uygulanması, karar kalitesini artırmakta ve karar vericilere stratejik avantajlar sunmaktadır.

Literatürde yaygın olarak kullanılan bazı temel ÇKKV yöntemlerinin temel özellikleri Çizelge 2.4'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 2.4. Yaygın ÇKKV Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Önay, 2015)

ÇKKV Teknikleri	Hesaplama Zamanı	Basitlik	Matematik İşlemleri	Güvenilirlik	Veri Türü
<i>MOORA</i>	Çok az	Çok basit	Minimum	İyi	Nicel
<i>AHP</i>	Çok fazla	Çok kritik	Maksimum	Zayıf	Karışık
<i>TOPSIS</i>	Orta	Orta kritik	Orta	Orta	Nicel
<i>VIKOR</i>	Az	Basit	Orta	Orta	Nicel
<i>ELECTRE</i>	Fazla	Orta kritik	Orta	Orta	Karışık
<i>PROMETHEE</i>	Fazla	Orta kritik	Orta	Orta	Karışık

Tabloda görüldüğü üzere MOORA, diğer yöntemlere kıyasla işlem yükü en düşük yöntemlerden biridir. Ayrıca güvenilirlik düzeyi "iyi" olarak tanımlanırken, veri türü açısından yalnızca nicel verilerle çalışmaktadır. Bu da yöntemin, özellikle sayısal performans kriterlerinin değerlendirildiği mühendislik, enerji verimliliği, malzeme seçimi ve benzeri alanlarda yaygın olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Bu yönleriyle MOORA yönteminin karar vericilere sade, anlaşılır ve güvenilir bir sıralama sunması, sonuçların yorumlanabilirliğini artırarak analiz sürecini kolaylaştırmıştır. MOORA, hesaplama süresinin oldukça kısa olması ve matematiksel işlemlerinin son derece basit olması nedeniyle, özellikle geniş veri setlerinin değerlendirildiği mühendislik temelli çalışmalarda pratik bir avantaj sunmaktadır. Bu bağlamda, bu tez kapsamında kullanılan enerji, ekonomik ve çevresel performans ölçütleriyle doğrudan uyumludur. Tüm bu nedenlerle MOORA yöntemi, çalışmanın çok kriterli değerlendirme süreci için uygun ve etkili bir araç olarak benimsenmiştir.

2.4.5. Entegre yaklaşımlar

Günümüzde bina enerji performansının değerlendirilmesinde tekil yöntemlerin ötesine geçilerek çok aşamalı ve entegre karar destek sistemleri geliştirilmektedir. Bu kapsamda; bina enerji simülasyonları ile elde edilen veriler, istatistiksel modelleme ve çok kriterli karar verme yöntemleriyle birleştirilerek daha kapsamlı analizler yapılmaktadır. Simülasyonlar aracılığıyla farklı yapı kabuğu ve sistem kombinasyonlarının performansları belirlenmekte, bu çıktılar regresyon gibi istatistiksel yaklaşımlarla genellenebilir hale getirilmekte ve nihai

kararlar ÇKKV yöntemleriyle alınmaktadır. Literatürde, bu tür entegre yaklaşımlar enerji verimliliği iyileştirmelerinde etkili stratejiler sunmakla birlikte hâlâ sınırlı sayıdadır. Bu nedenle, bu çalışmada önerilen İstatistiksel Deney Tasarımı (Taguchi) + Regresyon + ÇKKV (MOORA) bileşenlerinden bütünselik bir karar destek yaklaşımı, literatüre önemli bir katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Bina performansını artırmaya yönelik tasarım ve iyileştirme stratejilerinde, enerji, çevresel etki ve maliyet gibi birden fazla kriterin aynı anda değerlendirilmesi sürdürülebilirlik ve uygulanabilirlik açısından kritik önem taşımaktadır. Bu noktada çok kriterli karar verme ve optimizasyon yöntemleri, araştırmacılara farklı hedefler arasında denge kurmalarını sağlayan güçlü araçlar sunmaktadır. Literatürde bu yöntemlerin giderek artan biçimde bina performansı analizlerinde kullanıldığı görülmektedir.

Enerji verimliliği, genellikle maliyet, konfor ve çevresel etki gibi diğer hedeflerle çelişebilen bir optimizasyon problemidir. Bu nedenle, araştırmacılar çok amaçlı optimizasyon algoritmalarından sıklıkla yararlanmaktadır. Alghamdi, Tang, Kanjanabootra, ve Alterman, (2023), yükseköğretim binalarında pencere-duvar oranı, yalıtım ve gölgeleme gibi mimari parametrelerin en uygun konfigürasyonunu bulmak için simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon algoritmalarını kullanmıştır. Benzer şekilde, Seok, Jo, ve Kim, (2009), çift cepheli sistemlerin karmaşık tasarımını parametre analizi yoluyla ele alarak performans odaklı bir tasarım süreci oluşturmuştur.

Chanda ve Biswas, (2024) modern yerel konutlarda pasif duvar malzemelerinin seçimini AHP ve TOPSIS gibi çok kriterli bir karar verme çerçevesiyle ele alarak enerji verimliliğine katkı sağlamıştır. Enerji sistemleri düzeyinde, Li, Cheng, Yang, Yin, ve Zang, (2024) güneş enerjili toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin optimizasyonunu veriye dayalı bir yaklaşımla incelerken, Tronchin, Manfren, ve Nastasi (2018) ise enerji verimliliği, talep tarafı yönetimi ve enerji depolama teknolojilerinin yapıları çevreye entegrasyonu için kritik yolları analiz etmişlerdir.

Literatürde bu optimizasyon süreçlerinin desteklenmesinde istatistiksel deney tasarımı tekniklerinin entegre edilerek yaygın biçimde kullanıldığı gözlemlenmektedir. Li, Lin, Jiang, Jim, Liu, Tserng, (2024) Yapı Bilgi Modellemesi (*Building Information Modeling*,

BIM) ile istatistiksel bir deney tasarımı tekniği olan ortogonal test yöntemini birleştirerek, en etkili tasarım parametrelerini minimum sayıda simülasyonla belirlemiştir. Mevcut binaların yenilenmesi sürecinde ise Romani, Draoui, ve Allard, (2022) karmaşık simülasyonları basitleştiren DOE yaklaşımını kullanarak enerji, maliyet ve konfor kriterleri için meta-modeller oluşturmuş ve farklı iyileştirme senaryolarını çok kriterli analiz yöntemleriyle değerlendirerek karar vericilere pratik çözümler sunmuştur.

Son yıllarda yapay zeka (YZ) ve makine öğrenmesi, bina enerji optimizasyonunda yenilikçi olanaklar sunmaktadır. Sarmaş, Marinakis, ve Doukas, (2025) YZ'nin akıllı, esnek ve optimal enerji yönetimi sağlamadaki merkezi rolünü vurgulamaktadır. Bu potansiyeli somutlaştıran Li, Wang, Chang, Wang, ve Guo, (2024) çok görevli öğrenme (multi-task learning) tabanlı yapay sinir ağları kullanarak, enerji verimliliği ve gün ışığı performansı gibi birden çok hedefi aynı anda optimize edebilen üretken bir tasarım modeli geliştirmiştir. Bu yaklaşım, geleneksel optimizasyon süreçlerine göre daha entegre ve hızlı sonuçlar vaat etmektedir. Ekici, (2022) ise YZ'yı yüksek katlı binaların kendi kendine yeterli hale gelmesi için bir performans optimizasyon aracı olarak konumlandırmıştır.

Sonuç olarak, ÇKKV ve optimizasyon yöntemleri, hem bina tasarımının erken aşamalarında hem de mevcut yapıların iyileştirme süreçlerinde etkin biçimde kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar; parametrik modelleme, makine öğrenmesi, yapay zeka meta-modelleme ve istatistiksel deney tasarımı gibi yöntemlerle birlikte ele alınarak bina enerji performansını artıran yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda, mevcut literatür hem yöntemsel çeşitlilik hem de uygulama derinliği bakımından önemli bir zemin oluşturmaktadır.

Yapılan literatür taramalarında mevcut çalışmalarda, farklı enerji tasarruf senaryolarının tüm yıl boyunca detaylı olarak analiz edilmesi, elde edilen verilerin istatistiksel olarak modellenmesi ve sonrasında çok kriterli karar verme sürecine entegre edilmesi nadiren bir arada ele alınmaktadır.

Bu bağlamda, bu tez çalışması:

- Enerji, çevresel ve ekonomik kriterleri aynı çatı altında toplayarak çok boyutlu analiz yapması,
- Simülasyon sonuçlarını regresyonla genelleyerek tüm kombinasyonları taraması,

- Nihai kararları MOORA ve TOPSIS gibi yöntemlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirmesi ile literatüre katkı sağlamaktadır.

Çalışmada Taguchi deney tasarımı, regresyon modelleme ve çok kriterli karar verme teknikleri bütünleşik bir karar destek süreci içinde kullanılmıştır. Ayrıca farklı ağırlıklandırma senaryoları altında yapılan duyarlılık analizleri sayesinde kararların istikrarlılığı test edilmiş, böylece yöntemin hem metodolojik çeşitliliği hem de güvenilirliği artırılmıştır. Bu yönüyle tez, çok sayıda tasarım kombinasyonunun hızlı ve sistematik biçimde değerlendirilmesine olanak tanıyan, enerji verimliliği odaklı bütüncül bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

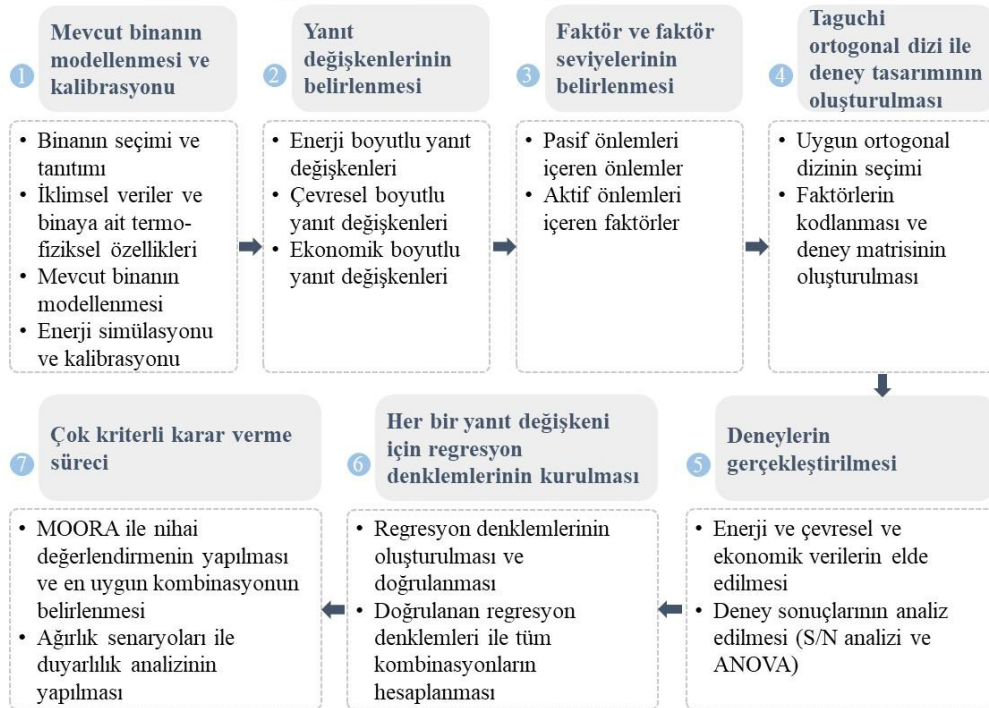




3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde, mevcut yapılarda iyileştirme önlemlerinin, çeşitli yanıt parametreleri bağlamında çok kriterli seçiminin yapılmasına yönelik bir yöntem sunulmaktadır. Söz konusu yöntemsel yaklaşım, farklı kriterlere sahip farklı yapı tipolojilerine uyum potansiyeli taşımaktadır. Önerilen bu yaklaşım, tasarımcılara kendi özel kriter ve yanıt değişkenleri çerçevesinde, tek kriterli analizlerde optimum kriter dizilimine sahip kombinasyonu tespit etme imkânı sunmaktadır. Bununla birlikte, çok kriterli analizlerde ise istatistiksel açıdan geçerliliği sağlanmış, %5'in altında sapma performansı gösteren optimum kombinasyonların belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Çalışmanın amacı, çeşitli aktif ve pasif önlemlerin, enerji, ekonomik ve çevresel etkilerini değerlendirmek üzere çok aşamalı bir karar destek yöntemi geliştirmektir. Bu doğrultuda, deney tasarımı, enerji simülasyonu, regresyon modelleme ve çok kriterli karar verme tekniklerinin bütünleşik bir şekilde kullanılması hedeflenmiştir. Önerilen yaklaşım Şekil 3.1 de sunulan adımlardan oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Önerilen yöntemin adımları

Çalışmada, enerji etkin yapı bileşenlerinin optimizasyonu amacıyla 3'ü iki seviyeli, 4'ü üç seviyeli olmak üzere toplam 7 faktör için Taguchi L36 ortogonal deney dizisi¹ uygulanmıştır. Her bir deney kombinasyonun enerji simülasyonları yapılarak yıllık enerji performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon çıktıları doğrultusunda her kombinasyona ait enerji tüketimi değerleri elde edilmiş, bu değerler üzerinden çevresel (CO₂ emisyonları) ve ekonomik (geri ödeme süresi, ortalama yıllık getiri, maliyet/fayda oranı) göstergeler hesaplanmıştır.

Elde edilen veriler kullanılarak her bir yanıt değişkeni için varyans analizi (ANOVA) yapılmış, istatistiksel olarak anlamlı etkiler dikkate alınarak regresyon modelleri oluşturulmuştur. Kurulan bu modeller aracılığıyla deneysel olarak test edilmeyen 648 olası kombinasyon için tahminleme yapılmıştır. Bu sayede tasarım alanının tamamı analiz edilebilir hale gelmiştir. Tahmin edilen performans değerleri, çok kriterli karar verme yöntemlerinden MOORA ile değerlendirilmiş, enerji, çevresel ve ekonomik göstergelerin birlikte optimize edildiği yapı bileşeni kombinasyonları belirlenmiştir. Ayrıca, ağırlık senaryoları altında yapılan duyarlılık analizleri ile karar destek sisteminin güvenilirliği pekiştirilmiştir. Buna ek olarak, karar modelinin tutarlılığını artırmak ve farklı sıralama tekniklerinin etkilerini karşılaştırmak amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan TOPSIS yöntemi kullanılarak paralel analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece nihai önerilen kombinasyonunun yalnızca tek bir karar modeline bağlı kalmadan, farklı ÇKKV yaklaşımları altında da yüksek performans gösterip göstermediği test edilmiştir. Bu bağlamda geliştirilen model, karar vericinin öncelikleri, ağırlık değişimleri ve duyarlılık analizlerine açık, esnek bir karar destek sistemi olarak kurgulanmıştır.

Bu çalışmada, bina enerji performans simülasyonlarının gerçekleştirilmesinde DesignBuilder programı, simülasyon motoru olarak ise EnergyPlus yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen simülasyon verilerinin istatistiksel olarak analiz edilmesi, regresyon modellerinin oluşturulması ve çok kriterli karar verme sürecinin yürütülmesi için Minitab 21 ve Python 3.x yazılımlarından faydalanılmıştır. Minitab, Taguchi deney tasarımı ve regresyon modelleme işlemleri için, Python ise büyük veri setlerinin işlenmesi, tüm

¹ Taguchi L36 ortogonal dizi: 3 faktörün iki seviyeli, 4 faktörün üç seviyeli olduğu durumlarda, faktör-seviye kombinasyonlarını istatistiksel olarak dengeli şekilde temsil eden toplam 36 deney koşulu içeren Taguchi standart ortogonal dizisidir. Az sayıda deneyle maksimum bilgi elde etmeyi sağlamaktadır.

kombinasyonların taranması ve karar verme algoritmalarının (MOORA, TOPSİS) uygulanması için kullanılmıştır. Python ortamında, NumPy, Pandas, Itertools², kütüphanelerinden faydalanılmıştır.

3.1. Mevcut Binanın Modellenmesi ve Kalibrasyonu

Araştırmanın ilk aşamasında, mevcut yapı, enerji simülasyonu gerçekleştirilmek üzere kapsamlı bir şekilde modellenmiştir. Söz konusu modelleme sürecinde, yapının geometrisi, yönelimi, kullanım alanları, yapı kabuğunu oluşturan bileşenler (duvar, çatı, zemin, pencere), termofiziksel özellikler (ısı iletkenlik katsayısı, yoğunluk parametreleri, özgül ısı değerleri), kullanım profilleri, havalandırma koşulları ve iklim verileri gibi tüm parametreler detaylı biçimde tanımlanmıştır. Bina modeli DesignBuilder ile oluşturulmuş ve hesaplamalarda EnergyPlus simülasyon motoru kullanılmıştır.

Oluşturulan modelin güvenilirliğini sağlamak amacıyla, simülasyon verileri, yapının gerçek enerji tüketim değerleri ile karşılaştırılarak kapsamlı bir kalibrasyon prosedürü uygulanmıştır. Kalibrasyon sürecinde ASHRAE Guideline 14, FEMP ve IPMVP standartlarına uygun olarak Varyasyon Katsayısı (CV(RMSE)) ve Normalize Edilmiş Ortalama Sapma Hatası (N(MBE)) gibi istatistiksel metrikler analiz edilmiş ve modelin öngörülen tolerans limitleri dahilinde doğruluğu sağlanmıştır. Bu sayede, ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek senaryo analizlerinin, bilimsel geçerliliği yüksek ve güvenilir sonuçlar üretmesi garanti altına alınmıştır.

3.2. Yanıt Değişkenlerinin Belirlenmesi

Yanıt değişkenleri, deney tasarımı faktörlere ait girdi parametrelerine karşılık olarak ölçülen çıktıları temsil etmektedir. Deneysel tasarımı yanıt değişkenlerini uygun seçmek, sonuçların geçerliliğini ve güvenilirliğini etkileyen kritik bir adımdır. Yetersiz tanımlanmış

² NumPy (Numerical Python): Çok boyutlu diziler üzerinde hızlı sayısal hesaplamalar yapılmasını sağlamaktadır.

Pandas: Tablo (DataFrame) yapısında verilerin işlenmesini sağlayan bir veri analiz kütüphanesidir.

Itertools: Python'da yinelenmeli (iteratif) veri üretimi için kullanılan, özellikle tüm olası kombinasyonların hızlıca oluşturulmasını sağlayan bir kütüphanedir. Bu çalışmada, regresyon denklemlerinin tüm olası faktör-seviye kombinasyonlarına uygulanması (Itertools), tahmin sonuçlarının hesaplanması (NumPy) ve karar matrisi formatında düzenlenmesi (Pandas) aşamalarında bu kütüphanelerden yararlanılmıştır.

yanıt değişkenleri, hatalar ve verimsizlikler ortaya çıkararak araştırma sonuçlarının yanlış yorumlanmasına yol açabilmektedir (Draper ve Beggs, 1971).

Bu çalışmada, yapı kabuğuna ve enerji sistemlerine ait farklı iyileştirme kombinasyonlarının performanslarını değerlendirmek amacıyla 7 farklı yanıt değişkeni belirlenmiştir. Bu yanıt değişkenleri 3 temel kategoride sınıflandırılmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Yanıt değişkenleri

<i>Enerji boyutlu yanıt değişkenleri</i>	1. Yıllık toplam enerji tüketimi 2. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi 3. Yıllık enerji tasarrufu miktarı
<i>Çevresel boyutlu yanıt değişkenleri</i>	4. Yıllık CO ₂ emisyonu
<i>Ekonomik boyutlu yanıt değişkenleri</i>	5. Geri ödeme süresi 6. Ortalama yıllık yatırım getirisi 7. Fayda / Maliyet oranı

Yanıt değişkenlerinin sonuçları, enerji simülasyonlarıyla elde edilen verilere ve ekonomik analiz hesaplamalarına dayanmaktadır.

3.3. Faktör ve Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi

Deney tasarımı bağımsız değişkenleri temsil eden faktör ve faktör seviyelerinin seçimi, genellikle yanıtı etkilediğine inanılan parametreler üzerinden yapılmaktadır. Deneyi yapan kişi, önceki bilgilere veya ön çalışmalara dayanarak bu değişkenlerin bir alt kümesini seçebilmektedir (Draper ve Beggs, 1971). Her faktör için seviye sayısı, deneyin çözünürlüğünü ve etkileşimleri tespit etme yeteneğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Örneğin, analizi geliştirmek için iki seviyeli ve dört seviyeli faktörler tasarımlara entegre edilebilmektedir (Ankenman, 1999). Faktör seçiminde, binaların enerji verimliliğini doğrudan etkileyen çeşitli iyileştirme önlemleri dikkate alınmıştır. Önlemlerin belirlenmesinde literatürde vurgulanma sıklığı, uygulanabilirlik ve iklim koşullarına uyum gibi kriterler etkili olmuştur.

Binalarda enerji verimliliğinin önlemleri, pasif ve aktif önlemler olmak üzere iki temel yaklaşım çerçevesinde gerçekleştirilmektedir. Pasif önlemler kapsamında, yapı kabuğunun iyileştirilmesi ve pencere sistemlerinin yüksek performanslı cam üniteleriyle değiştirilmesi ön plana çıkarken, aktif önlemler dâhilinde ise mekanik sistemlerin iyileştirilmesi ele alınmaktadır. Bu bağlamda, sirkülasyon pompalarının yenilenmesi, solar termal sistemlerin sisteme entegrasyonu ve konvansiyonel kazanların yüksek verimli alternatiflerle değiştirilmesi gibi uygulamalar yapılmaktadır. Ayrıca, konvektif ısıtma sistemlerinin radyant ısıtma sistemleriyle değiştirilmesi, termal konfor optimizasyonu açısından önem arz etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları açısından ise fotovoltaik sistemlerin çatı uygulamaları sayılabilmektedir. Tüm bunlara ek olarak konvansiyonel aydınlatma armatürlerinin LED teknolojisi ile modernizasyonu, binaların enerji performansını iyileştiren basit ama etkili çözümler arasında yer almaktadır.

Tez kapsamında, pasif sisteme ilişkin önlemler için TS 825, 2024 standardı esas alınırken, mekanik ve aydınlatma ile ilgili önlemleri kapsayan aktif sistemler, piyasa araştırmalarına dayandırılmıştır. Bu bağlamda faktör ve seviyelerini oluşturan tekil önlemlere ait kararlar Çizelge 3.2’de detaylı olarak açıklanmıştır.

Çizelge 3.2. İyileştirme için belirlenen tekil iyileştirme önlemleri.

	Tekil önlem	Açıklama
<i>Pasif sistem iyileştirmeleri</i>	Birinci seviye dış cephe yalıtımı	TS825, 2024'i sağlayan en yakın değer
	İkinci seviye dış cephe yalıtımı	TS825, 2024 için gereken U değerinden yaklaşık %25 daha düşük değer
	Üçüncü seviye dış cephe yalıtımı	TS825, 2024 için gereken U değerinden yaklaşık %50 daha düşük değer
	Birinci seviye çatı yalıtımı	TS825, 2024'i sağlayan en yakın değer
	İkinci seviye çatı yalıtımı	TS825, 2024 için gereken U değerinden yaklaşık %25 daha düşük değer
	Üçüncü seviye çatı yalıtımı	TS825, 2024 için gereken U değerinden yaklaşık %50 daha düşük değer
	Birinci seviye zemin yalıtımı	TS825, 2024'i sağlayan en yakın değer
	İkinci seviye zemin yalıtımı	TS825, 2024 için gereken U değerinden yaklaşık %25 daha düşük değer
	Üçüncü seviye zemin yalıtımı	TS825, 2024 için gereken U değerinden yaklaşık %50 daha düşük değer
	Birinci seviye saydam yüzey iyileştirmesi	TS825, 2024'i sağlayan en yakın değer
	İkinci seviye saydam yüzey iyileştirmesi	TS825, 2024 için gereken U değerinden yaklaşık %25 daha düşük değer
	Üçüncü seviye saydam yüzey iyileştirmesi	TS825, 2024 için gereken U değerinden yaklaşık %50 daha düşük değer
<i>Aktif-HVAC iyileştirmeleri</i>	Isıtma sisteminin değiştirilmesi	Mevcut kazanın 0,93 verimliliğe sahip yoğuşmalı kazan ile değiştirilmesi + radyatör sistemi
	Isıtma sisteminin değiştirilmesi	Hava kaynaklı hibrit ısı pompası + ısıtılmalı zemin
<i>Aktif- Aydınlatma iyileştirmeleri</i>	Enerji verimliliği düşük lambaların LED lambalar ile değiştirilmesi	
<i>Aktif- Yenilenebilir enerji uygulanması</i>	Isıtma sistemine ilave olarak fotovoltaik entegrasyonu	

Yapılan piyasa araştırmaları sonucunda, Türkiye’de tedarik edilebilirliği yüksek yapı malzemeleri, uygulama alanlarına göre kategorize edilerek tespit edilmiştir. Bu kapsamda sektördeki tedarikçilerle yapılan görüşmeler sonucunda, başlangıç yatırım maliyeti ile enerji verimliliği optimizasyonu ve malzemelerin fiziksel özelliklerinin kullanım alanlarına uygunluğu kriterleri değerlendirilerek materyal seçimleri gerçekleştirilmiştir. Duvar uygulamaları için Ekspande Polistiren Köpük (EPS), çatı izolasyonunda taş yünü, zemin yalıtımında Ekstrüde Polistiren (XPS) levha ve pencere sistemlerinde Isıcam tercih edilmiştir. Seçilen malzemelerin ısı geçirgenlik katsayıları (U-değerleri) ve kalınlık parametreleri Çizelge 3.3’te sunulmaktadır. Piyasada mevcut malzeme kalınlıkları arasından, TS 825, 2024 standardına uygunluk gösteren ve standardın öngördüğü U değerlerinin yanı sıra bu değerin yaklaşık %25 ve %50 oranında iyileştirme sağlayan kalınlıklar seçilmiştir.

Çizelge 3.3. Çalışma için belirlenen malzemelerin özellikleri

Kabuk elemanı	Malzeme	Isıl geçirgenlik (λ) (w/mk)	Çalışılan kalınlık (d)	U değeri (w/m ² k)
Duvar	EPS	0.040	6 cm	0,43
			10 cm	0,3
			15 cm	0,22
Çatı	Taş yünü	0.035-0.050	8 cm	0,3
			15 cm	0,21
			18 cm	0,18
Zemin	XPS	0.035-0.040	6 cm	0,35
			10 cm	0,27
			15 cm	0,19
Pencere	Isıcam	1,3 (Tvis ³ :0,79 SHGC ⁴ : 0,56)	4+9+4 (Hava)	1,8
		1,1 (Tvis:0,71 SHGC: 0,44)	4+16+4 (Hava)	1,3
		0,7 (Tvis:0,71 SHGC: 0,45)	4+16+4 (Argon)	1,1

Bu kapsamda, 7 ana faktör belirlenerek her birinin 2’li veya 3’lü seviyelerine göre kombinasyonlar oluşturulmuştur. Belirlenen faktör ve faktör seviyelerine ait nihai tablo, Çizelge 3.4’te görülmektedir.

³ Tvis (Visible Transmittance): Görünür ışık geçirgenliği anlamına gelmektedir. Genellikle 0 ile 1 arasında değer alır. Örneğin 0,79 değeri camın %79 oranında doğal ışığı geçirdiği anlamına gelmektedir.

⁴ SHGC (Solar Heat Gain Coefficient): Güneş ısı kazanç katsayısı, güneşten gelen enerjinin ne kadarının camdan içeriye iletildiğini ifade etmektedir. 0 ile 1 arasında değer alır. 0,56 değeri camın %56 oranında güneş enerjisini geçirdiğini göstermektedir. Düşük SHGC değerleri, daha düşük güneş ısı kazancı anlamına gelmektedir. Daha serin iç mekanlar sağlar bu nedenle sıcak iklimlerde enerji tasarrufu açısından önemlidir.

Çizelge 3.4. Faktör ve faktör seviyeleri

		<i>Faktörler</i>						
		A	B	C	D	E	F	G
		Aydınlatma	Yenilenebilir Enerji (PV panel)	Isıtma sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
<i>Seviyeler</i>	1	Mevcut	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör sistemi	EPS 6 cm	Taş y. 8 cm	XPS 6 cm	4+9+4 (Hava)
	2	LED	Yok	Hava k. hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	EPS 10 cm	Taş y. 15 cm	XPS 10 cm	4+16+4 (Hava)
	3				EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 15 cm	4+16+4 (Argon)

3.4. Taguchi Ortogonal Dizi ile Deney Tasarımının Oluşturulması

Çalışmanın bu aşaması, seçilmiş olan faktör ve faktör seviyeleri doğrultusunda yanıt değişkenlerinin deneysel tasarım kullanılarak değerlendirilmesini içermektedir. Bu amaçla çalışmada, çok faktörlü ve çok seviyeli deneylerin sistematik biçimde analiz edilmesine ve değerlendirilmesine olanak tanıyan Taguchi deney tasarımı yöntemi tercih edilmiştir.

3.4.1. Taguchi yöntemi ve ortogonal dizi seçimi

Taguchi deney tasarımı, ürün ve süreç tasarımında kalite ve güvenilirliği artırmak için kullanılan güçlü bir istatistiksel yöntemdir (Taguchi, Chowdhury ve Wu, 2005). Taguchi yöntemi, ölçülebilen sayısal kriterlerin, ölçülemeyen nitel kriterlerle beraber ele alınmasına imkân vermektedir (Sari ve Timor, 2015). Bu nedenle bu çalışmanın yapısına uygun görülerek tercih edilmiştir.

Taguchi deney tasarımı, Minitab yazılımı aracılığıyla hızlı ve kolay bir şekilde uygulanabilmektedir. Minitab'ın Stat > DOE > Taguchi menüsü üzerinden erişilebilen Taguchi tasarım modülü, kullanıcılara çalışmalarına uygun olan çeşitli ortogonal dizileri (L4, L8, L9, L12, L16, L18, L27, L32) sunmaktadır (Minitab Support, 2023). Yazılım, deney tasarımının oluşturulması, veri girişi, S/N (sinyal/gürültü) analizleri, ANOVA analizi, ana etki grafikleri, etkileşim grafikleri ve optimum koşulların belirlenmesi gibi tüm aşamaları desteklemektedir. Ayrıca, Minitab'ın yanıt optimizasyonu özelliği, birden fazla yanıt

değişkeninin eş zamanlı olarak optimize edilmesine olanak sağlamaktadır Hisam, Dar, Elrasheed, Khan, Gera, Azad, (2024). Ancak bu çalışmada her bir yanıt değişkeni farklı hedeflere sahip olduğu için sonraki aşamalarda çok kriterli karar verme teknikleri yöntemine entegre edilmiştir.

Bu çalışmada, 7 faktör ve farklı sayıda seviyeler göz önünde bulundurularak Taguchi yönteminin sunduğu ortogonal diziler arasından, karmaşık yapılı (*mixed level design*) L36 ($2^3 \times 3^4$) ortogonal dizisi tercih edilmiştir. Uygun ortogonal dizinin seçimi Minitab'ın Stat > DOE > Taguchi > Create Taguchi Design > Mixed Level Design menüsü üzerinden yapılmıştır. Bu dizi, her faktör seviyesinin dengeli bir şekilde temsil edilmesini sağlayan tüm kombinasyonların heterojen bir alt kümesidir. L36 dizisi geleneksel tam faktöriyel deney tasarımlarına kıyasla deney sayısını önemli ölçüde azaltarak hem zaman hem de kaynak tasarrufu sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde, her bir faktörün temel etkisi istatistiksel olarak bağımsız şekilde analiz edilebilmekte ve deneysel verimlilik artırılmaktadır.

3.4.2. Faktörlerin kodlanması ve L36 deney matrisinin oluşturulması

Bu aşamada Çizelge 3.4'te detaylı olarak verilen faktör ve faktör seviyeleri sayısal olarak kodlanmıştır. Bu numaralama işlemi regresyon modelleme ve simülasyon işlemlerinde kolaylık sağlamak amacıyla yapılmaktadır. İlk olarak her bir faktör uygun harflerle (A, B, C, D, E, F, G) ve bu faktörlerin seviyeleri sayısal kodlarla (1, 2, 3) temsil edilmiştir. Örneğin, A, aydınlatma faktörünü ifade etmekte olup, Seviye 1 = Mevcut aydınlatma, Seviye 2 = LED aydınlatma, olarak tanımlanmıştır. Benzer şekilde diğer faktörler de fiziksel karşılıklarına göre kodlanarak Çizelge 3.5'teki kodlama tablosu oluşturulmuştur.

Çizelge 3.5. Üç tanesi iki seviyeli dört tanesi üç seviyeli ($2^3 \times 3^4$) veri seti

	<i>Faktörler</i>						
	A	B	C	D	E	F	G
<i>Seviyeler</i>	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	2
				3	3	3	3

Daha sonra, Minitab aracılığı ile Taguchi L36 dizisinde yer alan 36 satır (deney) bu kodlamalarla eşleştirilmiştir. Çizelge 3.6’da bu deneylerin DesignBuilder’a aktarılan fiziksel karşılıkları görülürken Çizelge 3.7’de kodlanan faktör ve seviyelere göre elde edilen L36 deney matrisi görülmektedir.

Çizelge 3.6. L36 deney kombinasyonları

Deney	Aydınlatma	PV Panel	Isıtma Sistemi	Duvar (EPS)	Çatı (Taş yünü)	Zemin (XPS)	Pencere
1	Mevcut	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör	6 cm	8 cm	6 cm	4/9/4 hava
2	Mevcut	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör	10 cm	15 cm	10 cm	4/16/4 hava
3	Mevcut	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör	15 cm	18 cm	15 cm	4/16/4 argon
4	Mevcut	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör	6 cm	8 cm	6 cm	4/9/4 hava
5	Mevcut	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör	10 cm	15 cm	10 cm	4/16/4 hava
6	Mevcut	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör	15 cm	18 cm	15 cm	4/16/4 argon
7	Mevcut	Var	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	6 cm	8 cm	10 cm	4/16/4 argon
8	Mevcut	Var	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	10 cm	15 cm	15 cm	4/9/4 hava
9	Mevcut	Var	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	15 cm	18 cm	6 cm	4/16/4 hava
10	Mevcut	Yok	0,93 verimli y. kazan + radyatör	6 cm	8 cm	15 cm	4/16/4 hava
11	Mevcut	Yok	0,93 verimli y. kazan + radyatör	10 cm	15 cm	6 cm	4/16/4 argon
12	Mevcut	Yok	0,93 verimli y. kazan + radyatör	15 cm	18 cm	10 cm	4/9/4 hava
13	Mevcut	Yok	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	6 cm	15 cm	15 cm	4/9/4 hava
14	Mevcut	Yok	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	10 cm	18 cm	6 cm	4/16/4 hava
15	Mevcut	Yok	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	15 cm	8 cm	10 cm	4/16/4 argon
16	Mevcut	Yok	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	6 cm	15 cm	15 cm	4/16/4 hava
17	Mevcut	Yok	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	10 cm	18 cm	6 cm	4/16/4 argon
18	Mevcut	Yok	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	15 cm	8 cm	10 cm	4/9/4 hava
19	Yok	Var	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	6 cm	15 cm	6 cm	4/16/4 argon
20	Yok	Var	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	10 cm	18 cm	10 cm	4/9/4 hava
21	Yok	Var	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	15 cm	8 cm	15 cm	4/16/4 hava
22	Yok	Var	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	6 cm	15 cm	10 cm	4/16/4 argon
23	Yok	Var	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	10 cm	18 cm	15 cm	4/9/4 hava

Çizelge 3.6. (devam) L36 deney kombinasyonları

Deney	Aydınlatma	PV Panel	Isıtma Sistemi	Duvar (EPS)	Çatı (Taş yünü)	Zemin (XPS)	Pencere
24	Yok	Var	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	15 cm	8 cm	6 cm	4/16/4 hava
25	Yok	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör	6 cm	18 cm	10 cm	4/9/4 hava
26	Yok	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör	10 cm	8 cm	15 cm	4/16/4 hava
27	Yok	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör	15 cm	15 cm	6 cm	4/16/4 argon
28	Yok	Yok	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	6 cm	18 cm	10 cm	4/16/4 hava
29	Yok	Yok	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	10 cm	8 cm	15 cm	4/16/4 argon
30	Yok	Yok	Hava kaynaklı hibrit 1. p. + ısıtmalı zemin	15 cm	15 cm	6 cm	4/9/4 hava
31	Yok	Yok	0,93 verimli y. kazan + radyatör	6 cm	18 cm	15 cm	4/16/4 argon
32	Yok	Yok	0,93 verimli y. kazan + radyatör	10 cm	8 cm	6 cm	4/9/4 hava
33	Yok	Yok	0,93 verimli y. kazan + radyatör	15 cm	15 cm	10 cm	4/16/4 hava
34	Yok	Yok	0,93 verimli y. kazan + radyatör	6 cm	18 cm	6 cm	4/16/4 hava
35	Yok	Yok	0,93 verimli y. kazan + radyatör	10 cm	8 cm	10 cm	4/16/4 argon
36	Yok	Yok	0,93 verimli y. kazan + radyatör	15 cm	15 cm	15 cm	4/9/4 hava

L36 dizisi kapsamında her bir satır bir deney kombinasyonunu ifade etmektedir. Örneğin Çizelge 3.7’de A1 B1 C2 D1 E1 F2 G3 kodlamasına sahip Deney 7; aydınlatma faktörü için mevcut aydınlatmanın kullanılmaya devam ettiği, PV panelin sisteme dahil edildiği, hava kaynaklı hibrit ısı pompası ile ısıtmalı zeminin birlikte kullanıldığı bir ısıtma sisteminin tercih edildiği, 6 cm duvar, 8 cm çatı, 10 cm zemin yalıtımının yapıldığı ve 4mm kalınlığında 16 mm argon boşluklu çift cam pencere sisteminin kullanıldığı bir seçim kombinasyonunu temsil etmektedir. Oluşturulan deney matrisi, her bir kombinasyon için DesignBuilder yazılımında simüle edilecek parametrelerin dengeli ve sistematik bir şekilde belirlenmesini sağlamıştır.

Çizelge 3.7. $2^3 \times 3^4$ veri setine ait L36 deney matrisi

	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	1	1	3	3	3	3
4	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	2	2	2	2
6	1	1	1	3	3	3	3
7	1	1	2	1	1	2	3
8	1	1	2	2	2	3	1
9	1	1	2	3	3	1	2
10	1	2	1	1	1	3	2
11	1	2	1	2	2	1	3
12	1	2	1	3	3	2	1
13	1	2	2	1	2	3	1
14	1	2	2	2	3	1	2
15	1	2	2	3	1	2	3
16	1	2	2	1	2	3	2
17	1	2	2	2	3	1	3
18	1	2	2	3	1	2	1
19	2	1	2	1	2	1	3
20	2	1	2	2	3	2	1
21	2	1	2	3	1	3	2
22	2	1	2	1	2	2	3
23	2	1	2	2	3	3	1
24	2	1	2	3	1	1	2
25	2	1	1	1	3	2	1
26	2	1	1	2	1	3	2
27	2	1	1	3	2	1	3
28	2	2	2	1	3	2	2
29	2	2	2	2	1	3	3
30	2	2	2	3	2	1	1
31	2	2	1	1	3	3	3
32	2	2	1	2	1	1	1
33	2	2	1	3	2	2	2
34	2	2	1	1	3	1	2
35	2	2	1	2	1	2	3
36	2	2	1	3	2	3	1

$2^3 \times 3^4$ (toplam 648) kombinasyondan oluşan tam faktöriyel tasarımı temsil eden L36 deney matrisine bakıldığında, her bir faktör seviyesinin deneyler boyunca dengeli şekilde dağıldığı (her seviye eşit sayıda kullanılmış) görülmektedir. Böylece tüm faktör düzeylerinin etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirme ve daha az sayıda deneme ile benzer temsiliyet sağlanmaktadır.

3.4.3. Sinyal-gürültü (S/N) analizi

Taguchi yönteminin temel bileşenlerinden biri olan Sinyal-Gürültü (*Signal to Noise Ratio*, S/N) oranı, bir sistemin hedef performansını (istenen sinyal) istenmeyen değişkenliklerle (gürültü) karşılaştırarak optimum tasarım koşullarının belirlenmesini sağlamaktadır. Bu analizde amaç, istenilen sinyali maksimize ederken sistemdeki gürültüyü minimize etmektir (Liu, 2017).

S/N oranları için 3 seçenek vardır. Bu seçenekler ve hesaplandıkları formüller aşağıda verilmiştir.

i. Daha küçük daha iyidir; $S/N = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$ (3.1)

ii. Daha büyük daha iyidir; $S/N = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$ (3.2)

- y_i , Her bir deneye karşılık gelen yanıt değeri

- n , Tekrar sayısı

iii. Nominal değer daha iyidir; $S/N = \frac{\mu}{\sigma^2}$ (3.3)

- μ , Gözlemlerin aritmetik ortalaması

- σ , Gözlemlerin standart sapması

Bu çalışmada, öncelikli olarak L36 ortogonal dizi ve yanıt değişkenleri Minitab'a aktarılmıştır. S/N oranları, Minitab'ın Stat > DOE > Taguchi > Analyze Taguchi Design menüsü üzerinden her bir yanıt değişkeni için yanıt değişkenlerinin gerekliliğine uygun S/N

formülü seçilerek otomatik olarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.8’de yanıt değişkenlerine ait S/N seçimleri görülmektedir.

Çizelge 3.8. Yanıt değişkenlerine ait S/N seçimleri

1. Yıllık toplam enerji tüketimi	Daha <u>küçük</u> daha iyidir
2. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi	Daha <u>küçük</u> daha iyidir
3. Yıllık enerji tasarrufu miktarı	Daha <u>büyük</u> daha iyidir
4. Yıllık CO ₂ emisyonu	Daha <u>küçük</u> daha iyidir
5. Geri ödeme süresi	Daha <u>küçük</u> daha iyidir
6. Ortalama yıllık yatırım getirisi	Daha <u>büyük</u> daha iyidir
7. Fayda / Maliyet oranı	Daha <u>büyük</u> daha iyidir

Minitab, her faktörün her seviyesi için ortalama S/N oranlarını ve grafiksel sonuçları üretmiştir. Elde edilen S/N oranlarına göre, her bir yanıt değişkeni için optimum seviyeler belirlenmiş ve regresyon modelleme sürecinde bu seviyeler doğrulama kombinasyonlarıyla test edilmiştir.

3.5. Deneylerin Gerçekleştirilmesi

L36 ortogonal dizi ile temsil edilen her deney senaryosu, yapı kabuğu elemanları ve enerji sistemi parametrelerinin çeşitli kombinasyonlarını kapsamaktadır. Simülasyon sürecinde, 36 deney kombinasyonu için model parametrelerinin düzenli olarak güncellenmesi ve simülasyonların bir yıllık periyodu kapsayan 8760 saatlik zaman diliminde gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

Simülasyon çalışmalarında, dış iklim koşulları, kullanıcı davranış modelleri, iç yük profilleri ve bina geometrisi gibi kontrol değişkenleri sabit tutularak, yalnızca iyileştirme önlemlerine ilişkin deneysel değişkenlerin etkisi incelenmiştir. Her bir simülasyon senaryosu için, enerji tüketimi, karbon emisyonu ve ekonomik performans göstergeleri gibi daha önce belirlenmiş olan yanıt değişkenlerinin hesaplanmasını sağlayacak veriler elde edilmiştir. Elde edilen veri seti, deneylerin analiz edilmesinde kullanılmıştır.

3.5.1. Enerji ve emisyon verilerinin elde edilmesi

Doğrudan DesignBuilder'dan alınacak simülasyon çıktılarından, her bir deney kombinasyonuna ait “Yıllık toplam enerji tüketimi”, “Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi” değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca mevcut binanın enerji tüketimi üzerinden deney kombinasyonlarına ait “Elde edilen enerji tasarrufu” hesaplanmıştır.

Emisyon hesaplamaları ise aynı simülasyon çıktıları üzerinden yıllık tüketilen elektrik ve doğalgaz miktarlarının uygun birim emisyon katsayılarıyla çarpılması yoluyla yapılmıştır (Eş. 3.4).

$$\text{Toplam Emisyon (kgCO}_2\text{/yıl)} = (E_{el} \times EF_{el}) + (E_{dg} \times EF_{dg}) \quad (3.4)$$

- E_{el} , Yıllık elektrik tüketimi (kWh)
- EF_{el} , Elektrik için birim emisyon faktörü (kgCO₂/yıl)
- E_{dg} , Yıllık doğal gaz tüketimi (kWh)
- EF_{dg} , Doğal gaz için birim emisyon faktörü (kgCO₂/yıl)

Bu çalışmada elektrik için 0,478 kgCO₂/kWh (ETBK, 2024), doğalgaz için ise 0,234 kgCO₂/kWh (ÇŞB, 2015) katsayıları esas alınmıştır.

3.5.2. Ekonomik analizlerin yapılması

Türkiye gibi ekonomisi dalgalanmalara açık olan gelişmekte olan ülkelerde, önümüzdeki yıllara ilişkin sağlıklı ekonomik tahminlerde bulunmak oldukça güçtür. Enflasyon ve faiz oranlarının uzun vadede ne yönde seyredeceğini doğru şekilde öngörmek zor olduğundan, dinamik değerlendirme yöntemleri yerine paranın zaman değerini göz önüne almayan statik yöntemler tercih edilmektedir (Gedik, Akyüz ve Akyüz, 2005). Bu doğrultuda, bu çalışmada da ekonomik analizler statik değerlendirme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Her bir senaryo için toplam yatırım maliyeti ve yıllık enerji tasarrufu temel alınarak, yatırımın “Geri ödeme süresi”, “Ortalama yıllık yatırım getirisi” ve “Fayda/Maliyet oranı” hesaplanmıştır. Böylece yapı kabuğu ve enerji sistemleri ile ilgili iyileştirme seçeneklerinin

sadece enerji ve çevresel etkileri değil, ekonomik açıdan da değerlendirilmesi mümkün olmuştur.

- Yatırım maliyeti hesaplaması

İlk olarak deney kombinasyonlarına ait yatırım maliyeti, yapı kabuğunun ve enerji sistemlerinin birim maliyetleri esas alınarak hesaplanmıştır. Bu amaçla güncel inşaat ve tesisat birim fiyatları (ÇŞİB, 2025) ve pencere için Isıcam birim fiyatları (ISICAM, 2025) dikkate alınmıştır. Toplam yüzey alanları ve cihaz kapasiteleri üzerinden toplam yatırım maliyeti belirlenmiştir (Eş. 3.5).

$$I = \sum_{i=1}^n (A_i \times B_i) \quad (3.5)$$

I , Toplam yatırım maliyeti

A_i , Yapı bileşeninin toplam kullanım alanı veya kapasitesi

B_i , Yapı bileşeninin birim maliyeti

n , Toplam maliyet kalemi

- Yıllık enerji tasarrufu

Yıllık enerji tasarrufu, mevcut (referans) sistemin yıllık enerji tüketim maliyeti ile iyileştirilmiş senaryoya ait yıllık enerji tüketim maliyeti arasındaki fark alınarak hesaplanmaktadır. Böylece her bir alternatifin toplam enerji kullanımında ne kadar azalma sağladığı belirlenebilmektedir. Bu bağlamda öncelikle hem mevcut binanın hem de iyileştirilmiş senaryoların enerji tüketim maliyetleri Eşitlik 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Ardından buna bağlı olarak Eşitlik 3.7'ye göre yıllık enerji tasarrufu hesaplanmıştır.

$$\text{Toplam enerji tüketim maliyeti} = (E_{el} \times P_{el}) + (E_{dg} \times P_{dg}) \quad (3.6)$$

- E_{el} , Yıllık elektrik tüketimi (kWh)

- P_{el} , Elektrik birim fiyatı (kgCO₂/yıl)

- E_{dg} , Yıllık doğal gaz tüketimi (kWh)

- P_{dg} , Doğal gaz birim fiyatı (kgCO₂/yıl)

Bu çalışmada ilgili enerji türlerine ilişkin Nisan, 2025 birim fiyatlarından yararlanılmıştır. Elektrik birim fiyatı 2,59 kgCO₂/yıl (Elektrozirve, 2025) ve doğalgaz birim fiyatı 0,991 kgCO₂/yıl (Samgaz, 2025)⁵ olarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

$$\text{Yıllık Tasarruf} = \text{Referans Maliyet} - \text{Senaryo Maliyeti} \quad (3.7)$$

- Geri ödeme süresi (Payback Period)

Geri ödeme süresi, yapılan yatırımın yıllık enerji maliyeti üzerinden ne kadar sürede geri kazanılacağını göstermek amacıyla hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, her bir senaryoda elde edilen yıllık enerji tasarrufu ve toplam yatırım maliyeti üzerinden yapılmaktadır (Eş. 3.8).

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{I}{NNG} \quad (3.8)$$

- I , Toplam yatırım maliyeti

- NNG , Yatırımın yıllık net nakit girişi (Yıllık enerji tasarrufu)

- Ortalama yıllık getiri (Average Annual Return)

Yatırımın ortalama yıllık getirisi, yatırımın her yıl ortalama ne kadar kendini geri ödediği hakkında bilgi vermektedir. Yatırım maliyetine oranla yıllık tasarruf miktarının yüzdesi alınarak hesaplanmaktadır (Eş. 3.9).

$$\text{Ortalama Yıllık Getiri (\%)} = \frac{S}{I} \times 100 \quad (3.9)$$

- S , Yıllık tasarruf

- I , Toplam yatırım maliyeti

⁵ Fiyatlar 2025 Nisan ayına aittir.

- Fayda / maliyet oranı (*Benefit / Cost Ratio*)

Fayda/Maliyet oranı, yapılan yatırımın birim maliyetine karşılık ne kadar fayda (tasarruf) sağladığını ifade etmektedir. Analizde, her bir senaryo için yıllık enerji tasarrufunun yatırım maliyetine oranı dikkate alınmaktadır (Eş. 3.10). Bu yaklaşım, karar vericiye sınırlı bütçe altında en yüksek verimi sağlayan seçenekleri belirlemede yol göstermektedir. Sonucun 1'den büyük olması sistemin ekonomik olarak uygulanabilir olduğu anlamına gelmektedir.

$$B/C \text{ oranı} = \frac{S \times n}{I} \quad (3.10)$$

- *S*, Yıllık tasarruf
- *n*, Sistem ömrü (Bu çalışmada 20 yıl olarak alınmıştır.)
- *I*, Toplam yatırım maliyeti

3.6. Regresyon Modelleme Süreci

Taguchi deney tasarımı kapsamında, simülasyon sonuçları kullanılarak regresyon modelleri oluşturulmuştur. Buradaki amaç, her bir yanıt değişkeni ile faktörler arasındaki ilişkilerin istatistiksel olarak modellenmesidir. Bu sayede, deneysel olarak test edilmeyen kombinasyonlar için de tahminleme yapılabilmektedir.

Taguchi yöntemi ile elde edilen veriler, önce varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiş, ardından anlamlı faktör ve etkileşim terimleri belirlenerek çoklu doğrusal regresyon modelleri kurulmuştur. Oluşturulan modeller hem bireysel etkileri hem de bazı iki faktörlü etkileşimleri dikkate alarak formüle edilmiştir. Bu süreç Minitab'ın Stat > ANOVA > General Linear Model > Fit General Linear Model menüsü üzerinden gerçekleştirilmiştir.

3.6.1. Regresyon denklemlerinin oluşturulması

Bu çalışmada regresyon modeli olarak çoklu doğrusal regresyon (MLR) tercih edilmiştir. MLR, faktör düzeylerinin sayısal olarak ifade edildiği durumlarda sade, yorumlanabilir ve uygulanabilir bir yapı sunmaktadır. Karmaşık teknikler yerine, doğruluk ve açıklanabilirlik

dengeğini korumak amacıyla bu yöntem seçilmiştir. Böylece sınırlı sayıdaki simülasyon verisinden, farklı kombinasyonlar için güvenilir tahminler yapılabilmektedir.

Çoklu doğrusal regresyon modeli aşağıdaki genel yapıya göre ifade edilmektedir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (3.11)$$

- Y , bağımlı değişken
- $X_1, X_2 \dots X_n$, bağımsız değişkenler
- β_0 , sabit terim
- $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_n$, her bir bağımsız değişkene ait regresyon katsayısı

Bu yapı sayesinde her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisi doğrudan ve yorumlanabilir bir biçimde hesaplanabilmektedir. Bu bağlamda her bir yanıt değişkeni için ayrı bir çoklu doğrusal regresyon modeli geliştirilmiştir.

Modelleme sürecinde, regresyon modelinde, nitel yapıya sahip faktörlerin modele dahil edilebilmesi için dummy (kukla) değişkenler kullanılmıştır. Dummy değişken, nitel bir değişkenin her bir seviyesini temsil eden ve yalnızca 0 veya 1 değerini alabilen yapay bir değişkendir (Hardy, 1993). Bu dönüşüm sayesinde sayısal olmayan faktörler regresyon analizine uygun hale getirilmiş ve modelde referans seviyeye göre etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Model kurulumu sırasında hem ana etkiler hem de ANOVA sonuçlarına göre anlamlı bulunan bazı iki faktörlü etkileşim terimleri modele eklenmiştir. Modelin istatistiksel geçerliliği; belirleyicilik katsayısı (R^2 , $R^2(\text{adj})$), p-değerlerine göre değerlendirilmiştir.

3.6.2. Doğrulama deneylerinin yapılması

Regresyon modellerinin tahmin gücünü test etmek amacıyla, mevcut faktör ve seviyelerini içeren ancak L36 deney setinde yer almayan bazı ek kombinasyonlar seçilmiştir. Bu kombinasyonların seçiminde, Bölüm 3.4.3’de anlatılan her bir yanıt değişkeni için optimum seviyeleri sağlayan kombinasyonlar dikkate alınmıştır. Sonrasında bu kombinasyonlar için

enerji simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları ile regresyon modellerinin tahmin ettiği değerler karşılaştırılarak hata payı hesaplanmıştır.

3.6.3. Tüm kombinasyonların hesaplanması

Bu bölümde, önceki aşamada oluşturulan regresyon modelleri (eşitlikleri) kullanılarak, faktör seviyeleri dahilinde meydana gelebilecek tüm yapı kabuğu ve sistem kombinasyonları için tahminleme yapılmıştır. Taguchi yöntemi ile yalnızca 36 deney koşulu test edilmiş olsa da oluşturulan modeller sayesinde çok daha geniş bir çözüm uzayı taranabilmiş ve her bir yapı senaryosu için enerji, ekonomik ve çevresel göstergeler hesaplanmıştır. Bu süreç sayesinde, çok kriterli karar verme analizleri için gerekli olan kapsamlı veri seti elde edilmiştir.

Tüm kombinasyonların tahmin değerlerinin hesaplanabilmesi için Python programlama dili kullanılarak bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma, her faktörün tanımlı seviyelerini dikkate alarak tüm kombinasyonları üretmiş ve bu kombinasyonlara ait regresyon eşitliklerini otomatik olarak uygulamıştır. Kodu oluştururken, her faktörün seviyeleri dummy değişken yapısına uygun şekilde kodlanmış ve her bir kombinasyon için tahmin değerleri bir veri çerçevesine (DataFrame) kaydedilmiştir. Böylece 648 farklı kombinasyonun her biri için tüm yanıt değişkenleri aynı yapıda ve karşılaştırılabilir biçimde hesaplanmıştır. Bu süreçte kullanılan kodlar, Ekler bölümünde sunulmuştur. Oluşturulan Python betiği, yalnızca hesaplama amacıyla değil, aynı zamanda çok kriterli karar verme sürecinde analizlere doğrudan veri sağlaması açısından da önemlidir.

3.7. Çok Kriterli Karar Verme Süreci

Bu çalışmada, enerji verimliliği, çevresel etki ve ekonomik performans gibi birbirinden farklı nitelikteki kriterlerin birlikte değerlendirilmesi amacıyla çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmıştır. Bu kapsamda, regresyon modeliyle elde edilen 648 kombinasyona ait tahmin sonuçları, çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan MOORA yöntemi ile değerlendirilmiştir. Bu yöntem, kriter değerlerinin normalizasyonu ve ağırlıklandırılması sonrası fayda ve maliyet kriterlerinin ayrı ayrı işlenmesiyle toplam skorların hesaplanması işlemine dayanmaktadır (Hafezalkotob, Hafezalkotob, Liao ve Herrera, 2019). MOORA ile her alternatif için nihai skorlar hesaplanmıştır. Daha sonra ağırlık değerleri farklı senaryolara

göre değiştirilerek duyarlılık analizi yapılmış bu sayede karar modelinin esnekliği değerlendirilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların tutarlılığını test etmek amacıyla, alternatif bir yöntem olarak TOPSIS uygulanmış, iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu yöntemsel kıyaslama ile önerilen karar modelinin tutarlılığı ve sağlamlığı farklı bakış açılarıyla test edilmiştir. Bu adımda kullanılan tüm hesaplamalar Python programlama dili ile gerçekleştirilmiş, kullanılan kodlar eklerde sunulmuştur.

3.7.1. MOORA ile nihai değerlendirmenin yapılması ve en iyi kombinasyonun belirlenmesi

MOORA yöntemi uygulanırken ilk olarak kriterler belirlenmiştir. Bu çalışmada, yanıt değişkenlerinin her biri birer kriter olarak değerlendirilmiştir. İkinci olarak farklı ölçü birimlerine sahip kriterlerin doğrudan karşılaştırılması mümkün olmadığından, normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Eşitlik 3.12 ile her bir kriter, kendi değer kümesine göre normalize edilmiştir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (3.12)$$

- x_{ij}^* , i . alternatifin, j . kriter için olan ham değeri
- x_{ij} , i . alternatifin, j . kriter için olan normalleştirilmiş değeri

Normalizasyonun ardından, her bir kriterin karar verme sürecindeki göreceli önemini yansıtmak amacıyla tüm ağırlıkların toplamı 1'e eşit olacak şekilde ağırlıklandırma işlemi yapılmıştır. Normalize edilmiş her bir kriter değeri, ilgili kriterin önem katsayısı (ağırlığı) ile çarpılarak ağırlıklı normalize değerler elde edilmiştir (Eş. 3.13).

$$v_{ij} = w_j \cdot x_{ij}^* \quad (3.13)$$

- v_{ij} , j . kriterin ağırlığı

Bu ağırlıklandırmalar karar vericilerin iyileştirme önlemlerinin seçiminde hangi performans göstergelerine (enerji, çevresel veya ekonomik) odaklanacağına göre değişebilmektedir. Bu çalışmada birinci senaryo olarak kriterler açısından enerji odaklı ağırlıklandırma ile

MOORA uygulanmıştır. %60 enerji, %10 çevresel, %30 ekonomik göstergeleri temsil eden bir oranlama yapılmıştır. Bu bağlamda kullanılan ağırlıklar ve yönelimler Çizelge 3.9’da sunulmuştur.

Çizelge 3.9. Birinci senaryoya ait kriterler için belirlenen yönelim ve ağırlıklar

Kriter	Yönelim	Ağırlık (%)
<i>Yıllık Toplam Enerji Tüketimi</i>	Min.	20
<i>Yıllık Isıtma Enerjisi Tüketimi</i>	Min.	20
<i>Yıllık Enerji Tasarrufu Miktarı</i>	Maks.	20
<i>Yıllık CO₂ Emisyonu</i>	Min.	10
<i>Geri Ödeme Süresi</i>	Min.	10
<i>Ortalama Yıllık Yatırım Getirisi</i>	Maks.	10
<i>Maliyet/Fayda Oranı</i>	Maks.	10

Normalize edilmiş karar matrisi, belirlenmiş ağırlıklarla çarpılarak ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuş ve MOORA ile karar süreci için hazır hale getirilmiştir. Elde edilen ağırlıklı değerler, MOORA yöntemine uygun olarak fayda kriterleri için pozitif, maliyet kriterleri için negatif yönlü olacak şekilde işlenmiştir. Her bir alternatifin nihai skoru, Eş. 3.14’e göre hesaplanmıştır.

$$y_i = \sum_{j \in F} v_{ij} - \sum_{j \in M} v_{ij} \quad (3.14)$$

- F , Maksimize edilecek (fayda) kriter kümesi
- M , Minimize edilecek (maliyet) kriter kümesi
- y_i , i . Alternatife ait nihai MOORA skoru

3.7.2. Ağırlık senaryoları ile duyarlılık analizi

Bu bölümde karar vericinin önceliklerine bağlı olarak kriter ağırlıklarında meydana gelebilecek değişimlerin nihai sıralama üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu analizle amaçlanan, önerilen karar destek sisteminin esnekliğini test etmek ve en iyi kombinasyonun ağırlık duyarlılığına karşı ne derece kararlı olduğunu belirlemektir. Bu amaçla farklı senaryolar altında MOORA yöntemi tekrar uygulanmış ve elde edilen sıralamalar karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Senaryolar, enerji, ekonomik veya çevresel boyutlara

ağırlık verilerek oluşturulmuştur. Bu bağlamda bir önceki bölümde uygulanmış olan birinci senaryonun (Bkz. Çizelge 3.9) sonuçları ile karşılaştırılacak alternatif yeni senaryolar şu şekildedir:

Senaryo 2: Çevresel odaklı (%30 enerji, %40 çevresel, %30 ekonomik)

Senaryo 3: Ekonomik odaklı (%40 enerji, %10 çevresel, %50 ekonomik)

Bu senaryolara ait kriterler için belirlenen yönelim ve ağırlıklar Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Alternatif senaryolara ait kriterler için belirlenen yönelim ve ağırlıklar

Kriter	Yönelim	3. senaryo Ağırlık (%)	4. senaryo Ağırlık (%)
<i>Yıllık Toplam Enerji Tüketimi</i>	Min.	10	13,33
<i>Yıllık Isıtma Enerjisi Tüketimi</i>	Min.	10	13,33
<i>Yıllık Enerji Tasarrufu Miktarı</i>	Maks.	10	13,33
<i>Yıllık CO₂ Emisyonu</i>	Min.	40	10
<i>Geri Ödeme Süresi</i>	Min.	10	16,67
<i>Ortalama Yıllık Yatırım Getirisi</i>	Maks.	10	16,67
<i>Maliyet/Fayda Oranı</i>	Maks.	10	16,67

3.7.3. MOORA ve TOPSIS yöntemleriyle elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

Bu çalışmada, önerilen iyileştirme senaryolarının değerlendirilmesinde temel yöntem olarak hesaplama açısından basit ve uygulama kolaylığı yüksek olan MOORA yöntemi tercih edilmiştir. Ancak yöntem seçiminde güvenilirliği artırmak ve sonuçların sağlamasını yapmak amacıyla literatürde sık kullanılan alternatif bir yöntem olan TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) de tüm senaryolara uygulanmıştır. Her iki yöntem aynı normalizasyon ve ağırlıklandırma matrisleri üzerinden çalıştırılmıştır.

Bu uygulamanın amacı:

- MOORA ile elde edilen sıralamanın güvenilirliğini test etmek,
- Yöntemler arasında sonuç benzerliği olup olmadığını değerlendirmek,
- En iyi kombinasyonun yöntemden bağımsız olarak kararlı kalıp kalmadığını incelemektir.

Karşılaştırmalı uygulama sonucunda elde edilen sıralamalar, tablo olarak sunulmuştur. Ayrıca sıralama farkları analiz edilerek yöntemler arası tutarlılık değerlendirilmiştir.



4. GELİŞTİRİLEN MODELİN UYGULANMASI: SAMSUN/HAVZA'DA BİR KONUT BİNASI

Toplam enerji tüketiminin önemli bir kısmı, yapıyı çevre ve bu çevredeki kentsel faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, mevcut bina stokunda enerji etkin uygulamaların hayata geçirilmesi, enerji ve çevre konularına ilişkin ilerlemeler açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sürece katkı sağlamak amacıyla 4. bölümde aktarılmış olan modeli doğrulamak ve çalışma kapsamında ortaya konan hipotezleri test etmek için örnek bir bina seçilerek uygulama yapılmıştır.

4.1. İncelenen Yapının Tanıtımı

Çalışma kapsamında geliştirilen model, Samsun Havza ilçesinde bulunan bir konut binası üzerinde uygulanmıştır. Binanın seçimine, “Sığ-Jeotermal Kaynaklı Düşük Sıcaklıklı Bölgesel Isıtma Sistemi” isimli ERA-NET projesi kapsamında, bu bölgede Samsun valiliğinin iş birliği ile bir dönüşüm başlatılmak istenmesi kaynaklık etmiştir. Bu sebeplerle çalışma kapsamında, Havza yapı stoğunun önemli bir kısmını temsil eden 1988 yapımı, 54/1 ada parselde bulunan konut binası seçilmiştir (Resim 4.1).



Resim 4.1. Seçilen konut binası (Coşkun, 2024)

4.1.1. Yapının konumu ve fiziksel özellikleri

Yapının bulunduğu Samsun ili, coğrafi konumu itibarıyla ılıman iklim kuşağında yer almakla birlikte, topoğrafik yapısından dolayı farklı mikroklima özellikleri sergilemektedir. Kıyı şeridinde Karadeniz ikliminin tipik özellikleri görülürken, iç kesimlerde Akdağ (2000 m) ve Canik Dağları'nın (1500 m) etkisiyle karasal iklim özellikleri hâkimdir (Hekimoğlu, Altındöğ, ve Demirbaş, 2007). İç kesimde yer alan Havza ilçesi de bu arazi yapısının etkisiyle soğuk iklim karakteri göstermektedir. Bölgede yıllık sıcaklık periyodu -4°C ile 27°C arasında değişkenlik gösterirken, uç değer olarak -10°C 'nin altına ve 32°C 'nin üzerine nadiren ulaşmaktadır (WeatherSpark, 2025).

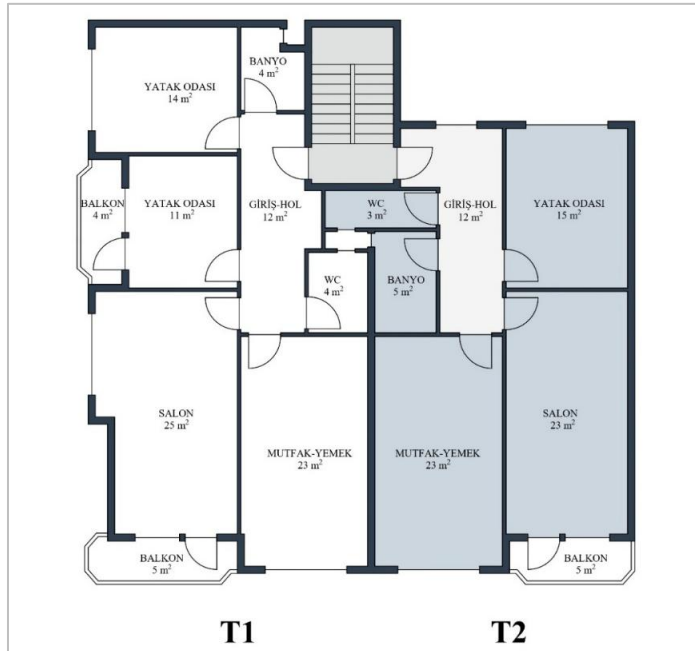
Samsun ili 2024 yılında güncellenen TS 825'e göre 3. derece-gün bölgesinde yer almaktadır. Her bölgeye ait duvar, tavan, taban ve pencere bileşenlerinde sağlanması gereken maksimum

ısı geçirgenlik katsayılarının belirtildiği standartta tavsiye edilen U değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Bu çalışmada iyileştirme paketleri oluşturulurken tabloda verilen TS 825, 2024 3. derece-gün bölgesi için gereken U değerleri referans alınmıştır.

Çizelge 4.1. Tavsiye edilen U değerleri (TS 825, 2024)

BÖLGE	U_{duvar} (W/m ² K)	U_{tavan} (W/m ² K)	U_{taban} (W/m ² K)	U_{pencere} (W/m ² K)
1. Bölge	0,45	0,35	0,4	1,8
2. Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8
3. Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8
4. Bölge	0,35	0,25	0,3	1,8
5. Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8
6. Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8

Çalışma kapsamında ilk olarak yapıya ait uygulama projesine erişilmiştir. Seçilen binanın taban alanı, 243 m²’dir. Bodrum+zemin+3 kat olan bina, betonarme iskelet sistemiyle inşa edilmiştir. Her kat, 116 m² alana sahip 1 adet Tip 1 (3+1) ve 95 m² alana sahip 1 adet Tip 2 (2+1) daireden oluşmaktadır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Normal kat planı

Zemin katta toplam 216 m² alana sahip 5 adet bölünmüş dükkân bulunmaktadır. Normal katların tavan yüksekliği 3 m, zemin katın 3,5 m ve bodrum katın 2,6 m'dir. Yapı, kuzey ve batı cepheleri açık, bitişik nizam olarak köşe parselde yer almaktadır. Normal katlar, %30 oranında cam yüzeye sahiptir. Zemin katta bu oran, %60'dır.

4.1.2. Modelleme için kullanılan termofiziksel veriler

Yapılan detaylı teknik inceleme sonucunda, betonarme taşıyıcı sisteme sahip binanın yapısal özellikleri tespit edilmiştir. Yapının dış duvarları 25 cm kalınlığında, iç duvarları ise 10 cm kalınlığında tuğla malzemeden imal edilmiştir. Bina, TS 825 standartının binalarda zorunlu hale geldiği 2000 yılı öncesi dönemde yalıtımsız olarak inşa edilmiştir. Geçtiğimiz yıllarda EPS malzeme ile dış cephe ısı yalıtımı uygulanmıştır. Ancak bu uygulamanın tüm cepheleri kapsamadığı kısmi olarak uygulandığı tespit edilmiştir. Bu nedenle enerji modeli yapılan mantolama işlemi göz ardı edilerek oluşturulmuştur. Daha doğru bir model elde etmek ve simülasyonda gerçeğe daha yakın sonuçlar alabilmek için binanın dış duvarlarının ısı transfer katsayısı (U-değeri) ölçümleri yapılmıştır⁶. Zemin ve çatı bileşenlerinde ısı yalıtımı bulunmamaktadır. Yapının tüm pencere sistemleri PVC doğrama ve çift cam ünitelerinden oluşmaktadır. Bina zarfını oluşturan bileşenlerin termofiziksel özellikleri Çizelge 4.2'de detaylandırılmıştır.

Kullanılan malzemelerin ısıl geçirgenlik direnci (R), yapı bileşeninin kalınlık (d) değerinin, ısıl iletkenlik hesap değerine (λ_h) bölünerek hesaplanmıştır (Eş. 4.1).

$$R = \frac{d}{\lambda_h} \quad (4.1)$$

⁶ Bu çalışmada kullanılan Testo 635-2 U-değeri seti, yazarın araştırmacı olarak yer aldığı ve Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından desteklenen "Binalarda Enerji Etkin İyileştirme Önlemlerinin Seçim Sürecine Yönelik Bir Araştırma" (Proje Kodu: FPD-2024-8830) adlı proje bütçesiyle temin edilmiştir.

Çizelge 4.2. Bina zarfını oluşturan bileşenlerin termofiziksel özellikleri

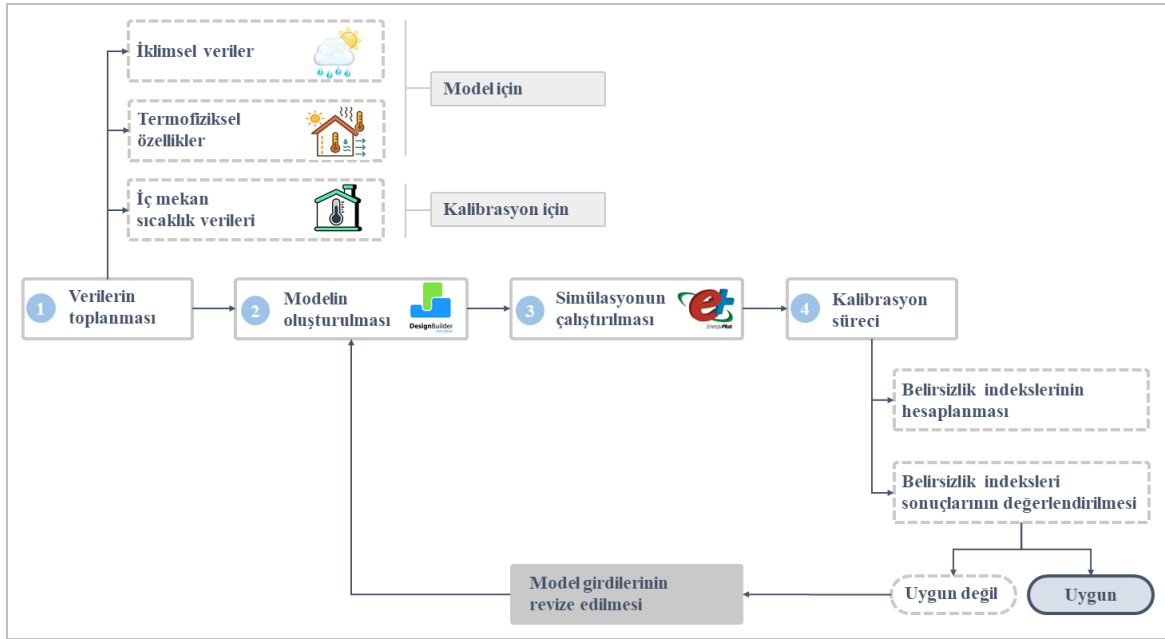
		Malzeme katmanları (Dıştan içe)	Termal iletkenlik λ (W/mK)	Kalınlık d (m)	Isıl geçirgenlik direnci R (m ² K/W)	Isıl geçirgenlik katsayısı U (W/m ² K)
<i>Çatı</i>		Trapez sac çatı kaplaması				2,930
		Keçe	0,035	0,005	0,14	
<i>Duvarlar</i>	Dış	Dış sıva	0,51	0,03	0,06	1,262
		Tuğla duvar	0,35	0,20	0,57	
		İç sıva	0,51	0,02	0,04	
	Bodrum	Betonarme duvar	2,50	0,2	0,08	4
<i>Döşemeler</i>	Yarı ısıtılmış tavan (çatı)					1,425
	Normal kat	Betonarme döşeme	2,50	0,12	0,048	3,145
	Yarı ısıtılmış taban (zemin)					1,932
	Bodrum	Şap	1,40	0,04	0,028	2,555
		Grobeton	1,65	0,10	0,06	
		Blokaj	2,00	0,15	0,075	
<i>Pencere</i>		Cam 3mm				2,72
		Hava boşluğu 13mm				
		Cam 3mm				
<i>Kapı İç</i>		Ahşap				2,823
<i>Kapı dış</i>		Demir				3,124

4.2. Mevcut Durum Analizi

Bu bölümde, yapıya ait mevcut durumun enerji ve ekonomik performansları yönünden detaylı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda ilk olarak yapının enerji modeli oluşturulmuş ve ölçüm verileri ile kalibrasyonu yapılmıştır. Daha sonra binanın mevcut enerji tüketimi ve buna bağlı sera gazı emisyonları hesaplanarak çevresel etkisi değerlendirilmiştir. Son olarak yatırım maliyetleri üzerinden ekonomik performansı hesaplanarak iyileştirme potansiyelinin belirlenmesine yönelik bir temel oluşturulmuştur.

4.2.1. Mevcut yapının enerji modelinin oluşturulması ve kalibrasyonu

Enerji modelinin oluşturulması ve doğrulanması aşamasında elde edilen veriler DesignBuilder ve EnergyPlus programına tanımlanarak enerji modeli oluşturulmuştur. Ölçüm ve gözlemlerle toplanan gerçek veriler üzerinden, analitik/matematiksel kalibrasyon uygulanmıştır. Süreç aşağıdaki adımlar takip edilerek tamamlanmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Modelin oluşturulması ve kalibrasyonu süreci akış şeması

i. Verilerin toplanması

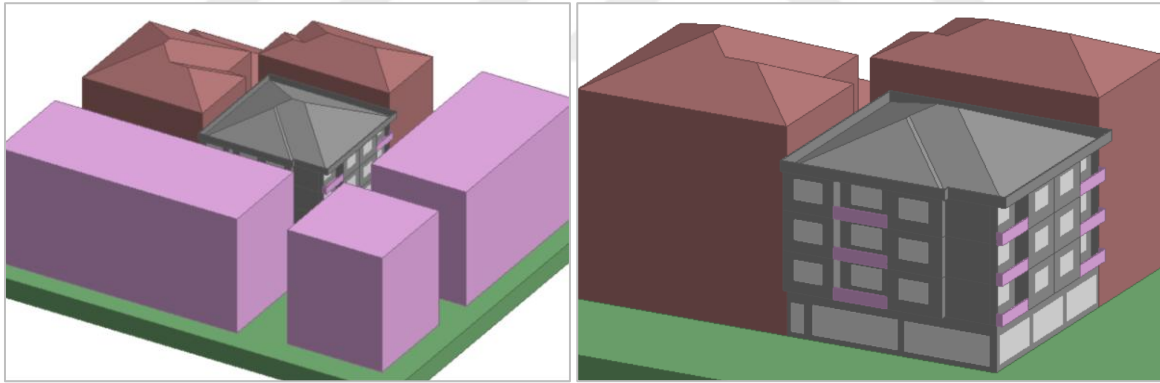
Bu bölüm, binaya ait idari kurumlardan temin edilen mimari çizimler ile yapı malzemelerine ilişkin detayların derlenmesi ve ölçüm çalışmalarının yürütülmesi aşamasını kapsamaktadır. Mekanik sistem, aydınlatma ekipmanları ve kullanıcıyla ilgili parametreler, saha ziyaretleri yapılarak toplanmıştır. İklim verileri, PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*)⁷ programında harita üzerinden mevcut binanın enlem ve boylamı girilerek indirilmiştir.

⁷ PVGIS, (2025) Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi. URL: <https://pvgis.com/>

Mevcut bir binanın enerji modellemesinde, bilgisayarda oluşturularak simüle edilen veriler ile ölçülen gerçek veriler arasında bir uyum yakalamak kritik önem taşımaktadır. Bu sayede binanın enerji performansını daha doğru bir şekilde tahmin etmek ve iyileştirmek mümkün olmaktadır. Enerji kullanımıyla ilgili bilgiler, aylık elektrik veya doğalgaz faturalarındaki toplam tüketim miktarı veya özel cihazlarla saatlik olarak ölçülen ve kaydedilen enerji kullanım verileri olabilmektedir. Bu iki yöntem, bir binanın veya mekânın enerji tüketim alışkanlıklarını anlamak için kullanılmaktadır (Zuhaib, Hajdukiewicz, ve Goggins, 2019). Bu kapsamda kalibrasyon için gereken iç sıcaklık verileri, yaklaşık kırk günlük bir zaman dilimi boyunca ikinci katta yer alan dairenin (Tip 2) yaşam alanına yerleştirilen sıcaklık ve nem ölçüm cihazıyla⁸ saatlik olarak kaydedilmiştir.

ii. Enerji modelinin oluşturulması

Bu aşamada Bölüm 4.1’de detaylı olarak anlatılan yapının DesignBuilder programında mevcut bina geometrisi modellenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Seçilen binanın 3 boyutlu modeli

Ardından Çizelge 4.3’te detaylı olarak verilen yapı bilgileri programa tanımlanarak model simülasyon için hazır hale getirilmiştir.

⁸ Bu çalışmada kullanılan Cem DT-172 Sıcaklık ve Nem Kayıt Cihazı, yazarın araştırmacı olarak yer aldığı ERA-NET tarafından desteklenen “GEOTHERMICA & JPP Akıllı Enerji Sistemleri” (Proje Kodu: 210447-4401) adlı proje bütçesiyle temin edilmiştir.

Çizelge 4.3. Binaya ait yapısal ve teknik bilgiler

Bina Geometrisi	Yönlenişi	Kuzey doğu	
	Kat Sayısı	Bodrum+4 kat	
	Cephe Alanı (bodrum hariç) (m ²)	581,69	
Pencereler	Normal katlarda cephe Saydamlık Oranı (%)	30	
	Zemin (dükkân) katta cephe Saydamlık Oranı (%)	60	
	Binanın Alanı (m ²)	1065,73	
Binanın Genel Tanımı	Strüktür tipi/malzemesi	Betonarme iskelet	
	Dış duvar gövde malzemesi	Tuğla	
	Hava sızdırmazlık düzeyi	0,5	
	Kullanım yoğunluğu (kişi/m ²)	0,0188	
	Binanın yaşı	36	
Yapı teknolojisi ve sistemlerin genel özellikleri	Bina sistemleri	Isıtma	Bireysel kombi
		Isıtma-Ekipman	Radyatör
		Isıtma-Yakıt	Doğal gaz
		Isıtma sistemi verimliliği	0,85
		Sıcak Su	Kombi
		Sıcak Su-Yakıt	Doğal gaz
		Sıcak su sistemi verimliliği	0,85
		Soğutma	-
		Havalandırma	Doğal
	Opak bileşenlerin ısı geçirgenlik katsayıları	U _{duvar}	1,262
		U _{tavan}	1,425
		U _{taban}	1,932
	Saydam bileşen özellikleri	Pencere alanı (m ²)	148,94
		U	2,72

iii. Simülasyonların gerçekleştirilmesi

Kullanıcıların günlük rutinleri, kullandıkları ekipmanlar ve aydınlatma alışkanlıkları hakkında bilgi toplanmıştır. Ayrıca, binadaki mekanik sistemlerin ne zaman çalıştığı belirlenmiştir. Yerinde gözlemler yapılarak ve bina sakinleriyle konuşularak elde edilmiş bu bilgiler programa tanımlanarak simülasyon gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.4'teki belirsizlik parametreleri, literatür ve saha verileri dikkate alınarak belirlenmiş, modelin ölçüm verileriyle uyumu ise çok sayıda iteratif simülasyonla

sağlanmıştır. Kabul edilebilir hata sınırları içinde kalan parametreler sonuç değerler olarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.4. Kalibrasyonun sağlanmasında kullanılan belirsizlik parametreleri ve değerleri

Belirsizlik parametreleri	Değer aralığı	Kalibre edilen değer
Kazan Verimliliği (%)	85-95	85
Hava Sızdırmazlığı (ac/h)	0,1-0,5	0,5
Isı ayar Noktası (°C)	23-25	23

Simülasyon sonucunda metrekare başına düşen toplam nihai enerji tüketimi (ısıtma, kullanım sıcak suyu, elektrik) 142,84 kWh/m²'dir. Isıtma yaklaşık %70'lik değerle en büyük paya sahiptir. Isıtılan mekânlar için m²'ye düşen ısıtma enerjisi ihtiyacı ise 128,16 kWh/m²'dir (Çizelge 4.5). Detaylı sonuç raporu EK-1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Mevcut enerji performansı

Yıllık toplam ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh)	Yıllık toplam soğutma enerjisi ihtiyacı (kWh)	Yıllık toplam enerji ihtiyacı (kWh)	Toplam bina alanı (m ²)	m ² için ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh/m ²)	Isıtılan mekanlar m ² için ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh/m ²)	m ² için toplam enerji ihtiyacı (kWh/m ²)
97 092,42	-	152 228,37	1065,73	100,47	128,16	142,84

iv. Modelin kalibre edilmesi

Enerji modeli oluşturulan örneklemin, EnerjiPlus programı ile elde edilen simülasyon sonuçları, iç mekân sıcaklık ölçüm verileri kullanılarak kalibre edilmiştir. Bölüm 2.3.2'de detaylı olarak anlatılan $N(MBE)$ ve $CV(RMSE)$ eşitlikleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

20 Nisan 2024 - 31 Mayıs 2024 tarihleri arasında saatlik ölçüm yapılarak toplam 1008 veri üzerinden işlemler yapılmıştır. Ölçülen ve simüle edilen her bir verinin farkları toplamı ölçülen enerji verisinin toplamına bölünerek $N(MBE)$ değeri yüzde 3,75 olarak bulunmuştur (Bkz. Eş. 2.2.) (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. $N(MBE)$ 'nin hesaplanması

$\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)$	$\sum_{i=1}^n (m_i)$	$\sum_{i=1}^n (m_i - s_i) / \sum_{i=1}^n (m_i)$	$\times 100(\%)$
737,27	19651,50	0,037	3,75

Daha sonra $CV(RMSE)$ değerinin hesaplanmasına geçilmiştir. İlk olarak ölçülen ve simüle edilen her bir verinin farkları toplamının karesi, toplam veri sayısının 1 eksiği olan 1007'ye bölünmüştür. Çıkan sonucun karekökü alınarak $RMSE$ değerine ulaşılmıştır. (Bkz. Eş. 2.3) Sonrasında $RMSE$ değeri ölçülen değerlerin ortalamasına ($\bar{m}$) bölünerek $CV(RMSE)$ değeri yüzde 13,72 olarak bulunmuştur (Bkz. Eş. 2.4) (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. $CV(RMSE)$ 'nin hesaplanması

$p = 1$ $n = 1008$ $\bar{m} = 19,4955$			
$\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2 / (n - p)$	$\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2 / (n - p)}$	$1/\bar{m} \sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2 / (n - p)}$	$\times 100(\%)$
7205,35/1007	7,15	0,1372	13,72

Sonuç olarak hem iç mekân sıcaklık ölçüm verilerine hem de doğalgaz tüketim verilerine göre elde edilen $N(MBE)$ ve $CV(RMSE)$ değerlerinin, aşılmaması gereken eşik sınırları içinde bulunması dolayısıyla (Çizelge 4.8) simülasyonun gerekli tutarlılığı sağladığı kabul edilerek kalibrasyon süreci tamamlanmıştır.

Çizelge 4.8. Belirsizlik indeks sonuçlarının değerlendirilmesi

Kullanılan veri	İşlem yapılan istatistiksel göstergeler	Değer (%)	Saatlik			Sonuç
			ASHRAE	FEMP	IPMVP	
İç mekân sıcaklığına ölçüm verisi	$N(MBE)$	3,75	± 10	± 10	± 5	Uygun
	$CV(RMSE)$	13,72	30	30	20	

Çizelge 4.5'te verilen mevcut enerji simülasyonu sonuçlarının, istatistiksel göstergelere göre kalibrasyonun uygunluğu tespit edilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde bu sonuçlar referans alınarak iyileştirme performansı değerlendirilmiştir.

4.2.2. Mevcut yapının emisyon değerlendirmesi

Kalibrasyonu tamamlanan modelin yıllık enerji tüketim verileri üzerinden yıllık CO₂ emisyonu hesaplanmıştır. Bölüm 3.5.1.'de ayrıntılı olarak anlatılan Eş. 3.4 kullanılarak elde edilen yıllık toplam emisyon sonuçları çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Mevcut sistemin toplam enerji tüketim maliyeti hesaplanması

Elektrik için katsayı (kgCO ₂ /kWh): 0,478				
Doğalgaz için katsayı (kgCO ₂ /kWh): 0,234				
Elektrik tüketimi	Elektrik tüketimi için emisyon değeri	Doğalgaz tüketimi	Doğalgaz tüketimi için emisyon değeri	Yıllık toplam emisyon
(kWh)	(kgCO ₂ /yıl)	(kWh)	(kgCO ₂ /yıl)	(kgCO ₂ /yıl)
45 148,798	21 581,125	97 092,42	22 719,626	44 300,752

4.2.3. Mevcut yapının ekonomik performans değerlendirmesi

Bu bölümde, mevcut yapının enerji kullanımına bağlı olarak enerji maliyeti hesaplanmıştır. Bölüm 3.5.2'de detayları verilen, Eş. 3.6 kullanılarak mevcut sistemin toplam enerji tüketim maliyeti hesaplanmıştır. Elektrik ve doğalgaz tüketim değerleri, ilgili enerjinin birim fiyatları ile çarpılıp sonuçlar toplanarak toplam enerji tüketim maliyeti 213 153,975 TL olarak bulunmuştur (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10. Mevcut sistemin toplam enerji tüketim maliyeti hesaplanması

Elektrik birim fiyatı (TL /kWh): 2,59				
Doğalgaz birim fiyatı (TL/kWh): 0,991				
Elektrik tüketimi (kWh)	Elektrik için enerji maliyeti (TL)	Doğalgaz tüketimi (kWh)	Doğalgaz için enerji maliyeti (TL)	Toplam enerji maliyeti (TL)
45 148,798	116 935,386	97 092,42	91 493,213	213 153,975

Bu değerlendirmeler, mevcut durumun enerji ve ekonomik açıdan performansını ortaya koyarak alternatif senaryolarla yapılacak karşılaştırmalar için temel bir referans oluşturmaktadır.

4.3. Senaryoların Uygulanması ve İstatistiksel Modelin Kurulması

Bu bölümde, yapı kabuğu bileşenleri ve enerji sistemlerine ilişkin seçilen 7 faktör ve bu faktörlere ait farklı seviyeler kullanılarak oluşturulan L36 ortogonal dizisine dayalı deney kombinasyonlarının (Bkz. Çizelge 3.6), enerji simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonların sonucunda 36 kombinasyona ait enerji tüketimi, karbon emisyonu ve ekonomik performans göstergeleri elde edilmiştir. Bu bağlamda L36 dizisine ait kombinasyonların enerji, çevresel ve ekonomik performans çıktıları Çizelge 4.11’de sunulmuştur.

Çizelge 4.11. L36 ortogonal dizisine ait kombinasyonların deney sonuçları

Kombinasyon	Toplam Yıllık Enerji Tüketimi (Kwh)	Toplam Isıtma Enerjisi Tüketimi (Kwh)	Elde Edilen Enerji Tasarrufu (Kwh)	Toplam Net Emisyon (Kg Co ₂)	Geri Ödeme Süresi	Ortalama Yıllık Getiri	Maliyet Fayda Oranı
1	104558,38	49732,42	47669,99	26565,658	12,63	7,92	1,58
2	97799,62	43144,17	54428,75	25166,849	12,87	7,77	1,55
3	91514,71	37199,6	60713,66	23830,342	13,92	7,19	1,44
4	104558,38	49732,42	47669,99	26565,658	12,63	7,92	1,58
5	97799,62	43144,17	54428,75	25166,849	12,87	7,77	1,55
6	91514,71	37199,6	60713,66	23830,342	13,92	7,19	1,44
7	94916,95	40090,99	57311,42	24618,090	27,27	3,67	0,73
8	94397,7	39742,26	57830,67	24479,664	27,79	3,60	0,72
9	87529,89	33214,78	64698,48	23025,408	26,38	3,79	0,76
10	101795,99	46970,03	50432,38	30941,521	19,15	5,22	1,04
11	96746,2	42090,76	55482,17	29887,926	17,05	5,86	1,17
12	95298,77	40983,66	56929,6	29528,587	18,10	5,52	1,10
13	97378,23	42552,27	54850,14	30049,133	41,02	2,44	0,49
14	90961,15	36305,7	61267,22	28719,344	37,47	2,67	0,53
15	88499,75	34184,64	63728,62	28155,185	35,29	2,83	0,57
16	95095,31	40269,35	57133,06	29587,983	39,99	2,50	0,50
17	89922,92	35267,47	62305,45	28509,621	36,99	2,70	0,54
18	91813,99	37498,88	60414,38	28824,662	36,49	2,74	0,55
19	79426,01	41205,79	72802,36	16905,735	18,41	5,43	1,09
20	78750,28	40652,14	73478,09	16749,065	18,86	5,30	1,06
21	74845,1	36990,63	77383,27	15919,948	18,46	5,42	1,08
22	79405,65	41185,43	72822,72	16901,622	18,57	5,38	1,08

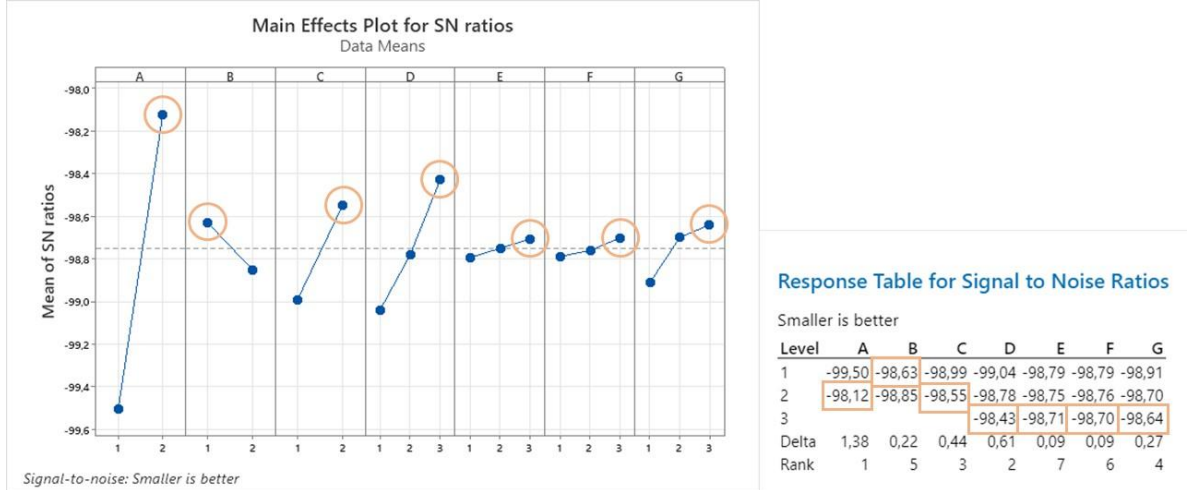
Çizelge 4.11. (devam) L36 ortagonal dizisine ait kombinasyonların deney sonuçları

23	78720,81	40622,68	73507,56	16743,114	19,29	5,18	1,04
24	74890,28	37035,81	77338,09	15929,075	17,89	5,59	1,12
25	88081,11	49860,89	64147,26	18654,065	9,23	10,83	2,17
26	84308,32	46210,18	67920,05	17871,789	8,99	11,13	2,23
27	78588,2	40733,73	73640,17	16676,055	8,60	11,63	2,33
28	79347,04	41126,82	72881,33	21823,648	23,35	4,28	0,86
29	77187,42	39089,28	75040,95	21367,232	22,64	4,42	0,88
30	76452,68	38598,2	75775,69	21178,543	21,96	4,55	0,91
31	84007,09	45786,87	68221,28	22764,979	11,58	8,63	1,73
32	87185,98	49087,85	65042,39	23386,943	9,75	10,26	2,05
33	79716,24	41861,76	72512,13	21837,782	10,27	9,74	1,95
34	85547,29	47327,07	66681,08	23076,099	10,86	9,21	1,84
35	83132,89	45034,75	69095,48	22568,217	10,01	9,99	2,00
36	82212,9	44358,43	70015,47	22342,109	10,75	9,30	1,86

4.3.1. Sinyal/gürültü oranına göre Taguchi analizlerinin yapılması

Deney simülasyonlarının gerçekleştirilmesinin ardından sonuçların analiz edilmesi adımına geçilmiştir. Her bir yanıt değişkeni için sırasıyla sinyal/gürültü (S/N) oranları hesaplanarak en etkin faktör-seviye kombinasyonuna ulaşmak amaçlanmıştır. S/N oranları, hem ortalama yanıt değerini hem de varyasyonu dikkate alarak daha kararlı bir sistem tasarımına katkı sağlamaktadır (Kapur ve Chen, 1988).

İlk olarak “Yıllık toplam enerji tüketimi” yanıt değişkeni için, "daha küçük daha iyidir" hedefi doğrultusunda sinyal/gürültü oranları hesaplanmıştır. Şekil 4.4’te faktör seviyelerinin S/N oranlarına göre ortalama etkileri gösterilmektedir.



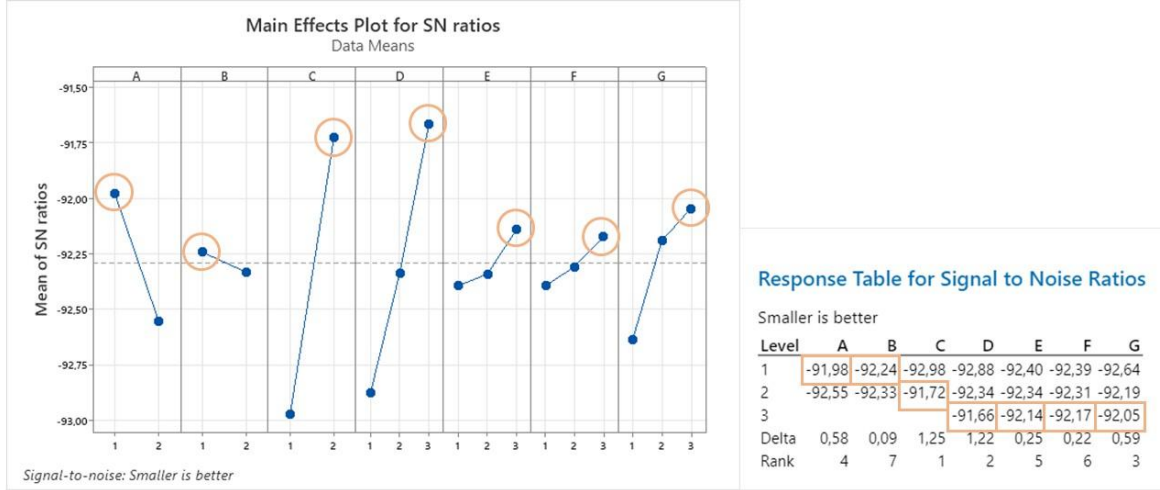
Şekil 4.4. Yıllık toplam enerji tüketimi için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu

Analiz sonucunda, yıllık toplam enerji tüketimi açısından en etkin senaryo; A2 B1 C2 D3 E3 F3 G3 olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda faktör ve seviyelerinin fiziksel karşılıklarının kullanımı ile oluşan kombinasyon Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Yıllık toplam enerji tüketimi için en etkin kombinasyon

Faktörler						
A2	B1	C2	D3	E3	F3	G3
Aydınlatma	PV panel	Isıtma Sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
LED	Var	Hava kaynaklı hibrit ısı pompası + ısıtılmalı zemin	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 15 cm	4+16+4 (Argon)

İkinci yanıt değişkeni olan “Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi” için, "daha küçük daha iyidir" hedefi doğrultusunda sinyal/gürültü oranları hesaplanmıştır. Şekil 4.5’te faktör seviyelerinin S/N oranlarına göre ortalama etkileri gösterilmektedir.



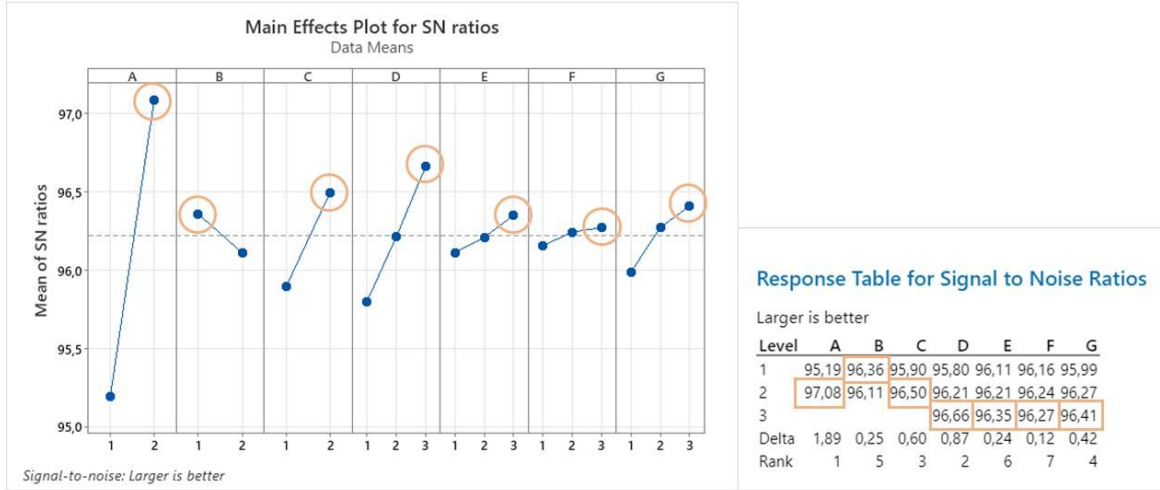
Şekil 4.5. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu

Analiz sonucunda, yıllık ısıtma enerjisi tüketimi açısından en etkin senaryo; A1 B1 C2 D3 E3 F3 G3 olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda faktör ve seviyelerinin fiziksel karşılıklarının kullanımı ile oluşan kombinasyon Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi için en etkin kombinasyon

Faktörler						
A1	B1	C2	D3	E3	F3	G3
Aydınlatma	PV panel	Isıtma Sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
Mevcut	Var	Hava kaynaklı hibrit ısı pompası + ısıtılmal zemin	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 15 cm	4+16+4 (Argon)

Üçüncü yanıt değişkeni olan “Yıllık enerji tasarrufu miktarı” için, "daha büyük daha iyidir" hedefi doğrultusunda sinyal/gürültü oranları hesaplanmıştır. Şekil 4.6’da faktör seviyelerinin S/N oranlarına göre ortalama etkileri gösterilmektedir.



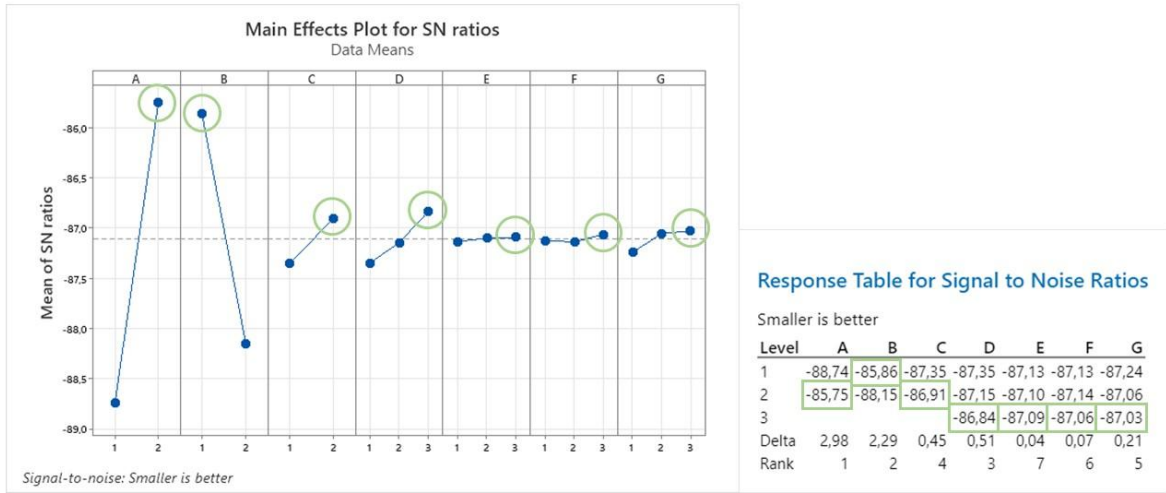
Şekil 4.6. Yıllık enerji tasarrufu miktarı için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu

Analiz sonucunda, yıllık enerji tasarrufu miktarı açısından en etkin senaryo; A2 B1 C2 D3 E3 F3 G3 olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda faktör ve seviyelerinin fiziksel karşılıklarının kullanımı ile oluşan kombinasyon Çizelge 4.14’te verilmiştir.

Çizelge 4.14. Yıllık enerji tasarrufu miktarı için en etkin kombinasyon

Faktörler						
A2	B1	C2	D3	E3	F3	G3
Aydınlatma	PV panel	Isıtma Sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
LED	Var	Hava kaynaklı hibrit ısı pompası + ısıtmalı zemin	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 15 cm	4+16+4 (Argon)

Dördüncü yanıt değişkeni olan “Yıllık CO₂ emisyonu” için, "daha küçük daha iyidir" hedefi doğrultusunda sinyal/gürültü oranları hesaplanmıştır. Şekil 4.7’de faktör seviyelerinin S/N oranlarına göre ortalama etkileri gösterilmektedir.



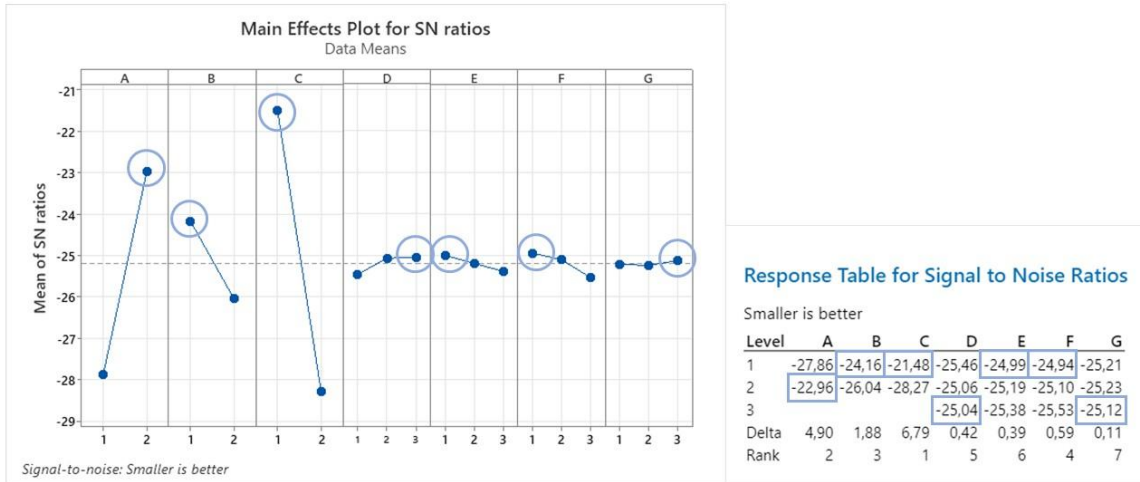
Şekil 4.7. Yıllık CO₂ emisyonu için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu

Analiz sonucunda, yıllık CO₂ emisyonu açısından en etkin senaryo; A2 B1 C2 D3 E3 F3 G3 olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda faktör ve seviyelerinin fiziksel karşılıklarının kullanımı ile oluşan kombinasyon Çizelge 4.15’te verilmiştir.

Çizelge 4.15. Yıllık CO₂ emisyonu için en etkin kombinasyon

Faktörler						
A2	B1	C2	D3	E3	F3	G3
Aydınlatma	PV panel	Isıtma Sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
LED	Var	Hava kaynaklı hibrit ısı pompası + ısıtılmalı zemin	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 15 cm	4+16+4 (Argon)

Beşinci yanıt değişkeni olan “Geri ödeme süresi” için, "daha küçük daha iyidir" hedefi doğrultusunda sinyal/gürültü oranları hesaplanmıştır. Şekil 4.8’de faktör seviyelerinin S/N oranlarına göre ortalama etkileri gösterilmektedir.



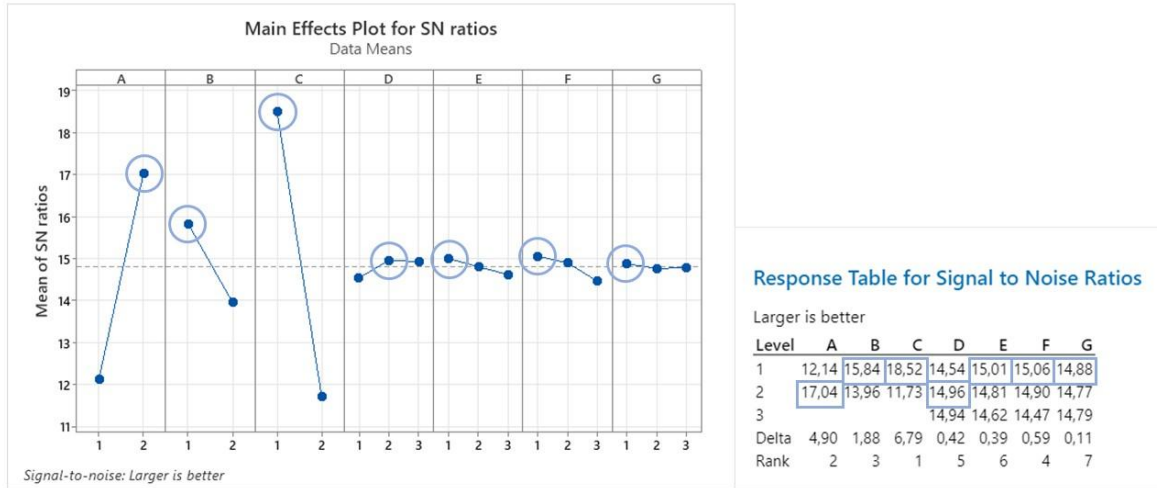
Şekil 4.8. Geri ödeme süresi için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu

Analiz sonucunda, geri ödeme süresi açısından en etkin senaryo; A2 B1 C1 D3 E1 F1 G3 olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda faktör ve seviyelerinin fiziksel karşılıklarının kullanımı ile oluşan kombinasyon Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Geri ödeme süresi için en etkin kombinasyon

Faktörler						
A2	B1	C1	D3	E1	F1	G3
Aydınlatma	PV panel	Isıtma Sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
LED	Var	0,93 verimli yoğuşmalı kazan + radyatör sistemi	EPS 15 cm	Taş y. 8 cm	XPS 6 cm	4+16+4 (Argon)

Altıncı yanıt değişkeni olan “Ortalama yıllık yatırım getirisi” için, “daha büyük daha iyidir” hedefi doğrultusunda sinyal/gürültü oranları hesaplanmıştır. Şekil 4.9’da faktör seviyelerinin S/N oranlarına göre ortalama etkileri gösterilmektedir.



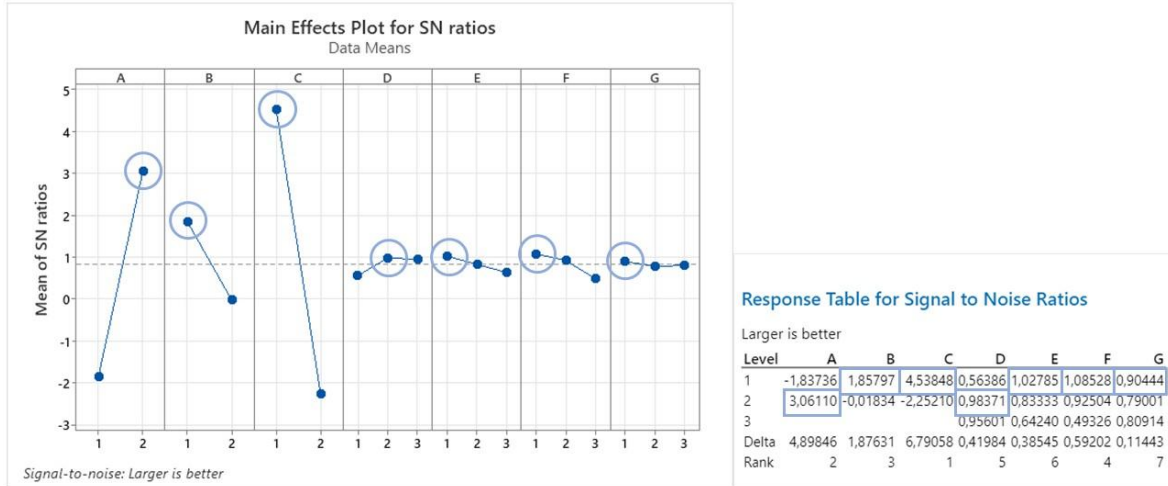
Şekil 4.9. Ortalama yıllık yatırım getirisi için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu

Analiz sonucunda, ortalama yıllık yatırım getirisi açısından en etkin senaryo; A2 B1 C1 D2 E1 F1 G1 olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda faktör ve seviyelerinin fiziksel karşılıklarının kullanımı ile oluşan kombinasyon Çizelge 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Ortalama yıllık yatırım getirisi için en etkin kombinasyon

Faktörler						
A2	B1	C1	D2	E1	F1	G1
Aydınlatma	PV panel	Isıtma Sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
LED	Var	0,93 verimli yoğunlaşmalı kazan + radyatör sistemi	EPS 10 cm	Taş y. 8 cm	XPS 6 cm	4+9+4 (Hava)

Yedinci ve son yanıt değişkeni olan “Fayda/Maliyet oranı” için, "daha büyük daha iyidir" hedefi doğrultusunda sinyal/gürültü oranları hesaplanmıştır. Şekil 4.10’da faktör seviyelerinin S/N oranlarına göre ortalama etkileri gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Fayda/Maliyet oranı için ortalama S/N oranlarına göre ana etkiler grafiği ve sonuç tablosu

Analiz sonucunda, fayda/maliyet oranı açısından en etkin senaryo; A2 B1 C1 D2 E1 F1 G1 olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda faktör ve seviyelerinin fiziksel karşılıklarının kullanımı ile oluşan kombinasyon Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.18. Fayda/Maliyet oranı için en etkin kombinasyon

Faktörler						
A2	B1	C1	D2	E1	F1	G1
Aydınlatma	PV panel	Isıtma Sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
LED	Var	0,93 verimli yoğunlaşmalı kazan + radyatör sistemi	EPS 10 cm	Taş y. 8 cm	XPS 6 cm	4+9+4 (Hava)

Belirlenmiş olan bu etkin seviyelere ait kombinasyonların simülasyon sonuçları bir sonraki adım olan regresyon modellerinin doğrulanması için kullanılmıştır.

S/N sonuçlarının genel değerlendirmesine bakıldığında ise, “daha küçük daha iyidir” veya “daha büyük daha iyidir” hedefleri doğrultusunda belirlenen S/N oranları, her faktör seviyesinin performansa etkisini istatistiksel olarak ortaya koymaktadır.

S/N oranlarına göre faktör düzeylerinin etkisi, en yüksek ve en düşük sinyal gürültü değerlerinin arasındaki farkın (delta) büyüklüğüne göre değerlendirilmektedir. Her bir yanıt

değişkeni için bu delta değerlerinden elde edilen bulgulara göre, “Yıllık Toplam Enerji Tüketimi” için en etkili faktör aydınlatma (A) olurken, duvar (D) ve ısıtma sistemi (C) de önemli katkı sağlamaktadır. “Yıllık Isıtma Enerjisi Tüketimi” açısından en belirleyici faktör Isıtma Sistemi (C)’dir. Bunu duvar (D) ve pencere (G) faktörleri takip etmektedir. “Yıllık Enerji Tasarrufu Miktarı” üzerinde esas olarak aydınlatma (A) ve ısıtma sistemi (C) etkili olurken, duvar yalıtımı (D) da önemli bir rol oynamaktadır. “Yıllık CO₂ Emisyonu” değişkeni açısından aydınlatma (A) ve yenilenebilir enerji kullanımı-PV (B) öne çıkmaktadır. Bu durum elektrik tüketiminde yapılan iyileştirmelerin çevresel faydasını ortaya koymaktadır. “Geri Ödeme Süresi” , “Ortalama Yıllık Yatırım Getirisi” ve “Maliyet/Fayda Oranı” özellikle ısıtma sistemi (C) tercihi ile güçlü şekilde ilişkili olup, aydınlatma (A) ve PV sistemi (B) gibi yatırım kalemlerinin ekonomik performansa etkisi de gözlenmektedir.

Sonuç olarak; analizler, özellikle ısıtma sistemi (C) faktörünün neredeyse tüm yanıt değişkenleri üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu, aydınlatma (A) ve PV sistemi (B) gibi enerji tüketimini ve emisyonları doğrudan etkileyen bileşenlerin de ön planda olduğunu göstermektedir. Yapı kabuğuna ait faktörlerin (Duvar, Çatı, Zemin, Pencere) etkisi ise daha çok enerji performansı üzerinde belirleyici olmuştur.

4.3.2. Regresyon modelinin kurulması ve doğrulanması

Yapılan simülasyonların sonuçlarına göre S/N analizi ile en etkin faktör seviyeleri belirlendikten sonra her bir yanıt değişkeni için regresyon modelinin oluşturulması adımına geçilmiştir. Bu amaçla öncelikle faktör seviyelerinin ilgili yanıt değişkenine olan etki ve katkılarını belirlemek için her birine sırasıyla ANOVA varyans analizi uygulanmıştır. Daha sonra bu etkileşimlerden faydalanarak regresyon modelleri kurulmuş ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Model geçerlilikleri R², hata oranları ve Normal Olasılık (*Normal Probability*) grafik sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. Ardından doğrulama deneyi olarak kullanılmış simülasyon sonuçları regresyon eşitliğinin tahmin sonuçlarıyla karşılaştırılarak modelin doğruluğu test edilmiştir.

İlk yanıt değişkeni olan “Yıllık toplam enerji tüketimi”ne ait varyans analizi sonuçları Şekil 4.11’de sunulmuştur.

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	1882069939	72,98%	1882069939	1882069939	88408,45	0,000
B	1	13461	0,00%	13461	13461	0,63	0,434
C	1	305231415	11,84%	305231415	305231415	14337,96	0,000
D	2	275646945	10,69%	275646945	137823473	6474,13	0,000
E	2	29273538	1,14%	29273538	14636769	687,55	0,000
F	2	479258	0,02%	479258	239629	11,26	0,000
G	2	85808728	3,33%	85808728	42904364	2015,39	0,000
Error	24	510920	0,02%	510920	21288		
Lack-of-Fit	21	510920	0,02%	510920	24330	*	*
Pure Error	3	0	0,00%	0	0		
Total	35	2579034205	100,00%				

Şekil 4.11. Yıllık toplam enerji tüketimine ait ANOVA sonuçları

Varyans analizine göre %95 güven düzeyinde ($p < 0,05$) A, C, D, E, F ve G faktörlerinin toplam enerji tüketimi üzerinde anlamlı etkileri olduğu tespit edilmiştir. A (aydınlatma) faktörü toplam varyansın %72,98'ini açıklamakta ve en baskın faktör olarak öne çıkmaktadır. B faktörünün p değeri 0,434 olup anlamlı değildir. Bu, B faktörünün (PV panel) enerji ihtiyacını azaltmaya yönelik değil arzı karşılamak yönünde (Bkz. Şekil 2.6) bir iyileştirme teknolojisi olması nedeniyle oldukça anlaşılır bir durumdur.

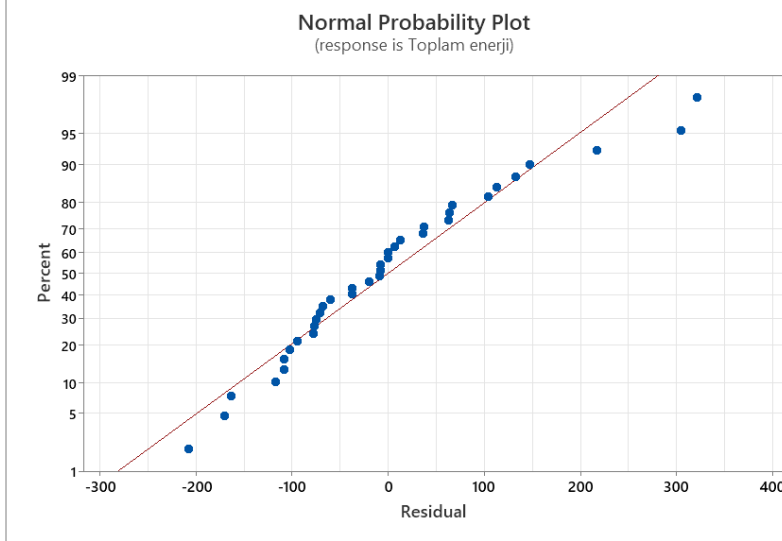
Daha sonra yıllık toplam enerji tüketimine ait regresyon modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.12). Oluşturulan modelde faktör seviyeleri bağımsız değişken olarak kullanılmış ve doğrusal regresyon yöntemiyle katsayılar belirlenmiştir. Modelde yer alan katsayılar, her bir faktör seviyesinin yıllık toplam enerji tüketimi üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.

Regression Equation

Toplam enerji = 87886,3 + 7230,5 A_1 - 7230,5 A_2 - 19,3 B_1 + 19,3 B_2 + 2911,8 C_1
 - 2911,8 C_2 + 3290,1 D_1 + 189,8 D_2 - 3479,9 D_3 + 1088,1 E_1 + 31,9 E_2
 - 1120,0 E_3 + 144,3 F_1 - 6,2 F_2 - 138,1 F_3 + 2064,4 G_1 - 416,7 G_2
 - 1647,8 G_3

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
145,905	99,98%	99,97%	1149571	99,96%	488,89	492,93



Şekil 4. 12. Yıllık toplam enerji tüketimine ait regresyon modeli

Elde edilen regresyon eşitliği, farklı kombinasyonların toplam enerji tüketimi üzerindeki etkilerini sayısal olarak ifade etmektedir. Katsayıların işaretleri, seviyelerin artırıcı ya da azaltıcı etkilerini göstermektedir.

Modelin belirleme katsayısı (R^2) %99,98 olup, çok yüksek bir uyum göstermektedir. Ayarlanmış R^2 (%99,97) ve tahmin edici R^2 (%99,96) değerleri de oldukça yüksektir. Bu durum, modelin hem öğrenme verisiyle hem de yeni verilerle güçlü tahmin performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Modelin geçerliliğini değerlendirmek amacıyla oluşturulan normal olasılık grafiği, artıkların normal dağılıma yakın bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Artık değerlerinin büyük çoğunluğunun referans doğrusal eksen boyunca hizalanması, normallik varsayımının

sağlandığını ve regresyon modelinin bu açıdan geçerli olduğunu teyit etmektedir. Dolayısıyla, modelin doğruluk ve güvenilirlik düzeyinin istatistiksel olarak kabul edilebilir olduğu söylenebilir.

Daha sonra değerlendirmesi yapılan regresyon modelinin doğrulanması aşamasına geçilmiştir. Toplam yıllık enerji ihtiyacına ilişkin elde edilen regresyon modeli, ilgili yanıt değişkenine göre en yüksek performansı gösteren ve L36 deney dizininde yer almayan kombinasyonun simülasyon sonucu ile doğrulanmıştır.

Bu kapsamda, A2 B1 C2 D3 E3 F3 G3 (Bkz. Çizelge 4.12) kombinasyonu doğrulama deneyi için hem enerji simülasyonu gerçekleştirilmiş hem de regresyon denkleminde tahmini değer hesaplanmıştır.

Örnek teşkil etmesi açısından yalnızca ilk yanıt değişkenine ait hesaplama süreci ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Diğer değişkenler için aynı prosedür izlenmiş ve sonuçlar ilgili tabloda özetlenmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Toplam Enerji regresyon eşitliği (R)} = & 87886,3 + 7230,5A_1 - 7230,5A_2 - 19,3B_1 + 19,3B_2 \\ & + 2911,8C_1 - 2911,8C_2 + 3290,1D_1 + 189,8D_2 - 3479,9D_3 \\ & + 1088,1E_1 + 31,9E_2 - 1120,0E_3 + 144,3F_1 - 6,2F_2 \\ & - 138,1F_3 + 2064,4G_1 - 416,7G_2 - 1647,8G_3 \end{aligned}$$

A2 B1 C2 D3 E3 F3 G3 kombinasyonuna göre denklemde aktif olan terimlerin katsayıları 1 aktif olmayan terimlerin katsayıları 0 olarak alınarak hesaplama yapılmıştır. Bu bağlamda;

$$\begin{aligned} R = & 87886,3 + 7230,5 \times 1 - 7230,5 \times 0 - 19,3 \times 1 + 19,3 \times 0 + 2911,8 \times 0 - 2911,8 \times 1 + 3290,1 \times 0 \\ & + 189,8 \times 0 - 3479,9 \times 1 + 1088,1 \times 0 + 31,9 \times 0 - 1120,0 \times 1 + 144,3 \times 0 - 6,2 \times 0 - 138,1 \times 1 + 2064,4 \times 0 \\ & - 416,7 \times 0 - 1647,8 \times 1 = 71338,9 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Regresyon modeli kullanılarak elde edilen tahmini değer: 71 338,9 kWh

Doğrulama deneyinin simülasyon sonucu: 71 657,89 kWh'tır.

İki değer arasındaki bağıl hata yüzdesi aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Eş. 4.1).

$$\text{Hata yüzdesi} = \left| \frac{\text{Simülasyon} - \text{Regresyon}}{\text{Simülasyon}} \right| \times 100 \quad (4.1)$$

$$\text{Hata yüzdesi} = \left| \frac{71657,89 - 71338,9}{71657,89} \right| \times 100 = 0,45$$

Çizelge 4.19. Yıllık toplam enerji tüketimine ait regresyon modeli doğrulama sonuçları

Yıllık toplam enerji tüketimi kontrol deneyi	Regresyon tahmini	Simülasyon sonucu	Hata yüzdesi
A2 B1 C2 D3 E3 F3 G3	71 338,9	71 657,89	0,45

Doğrulama deneyi için hesaplanan % 0,45 hata yüzdesi, literatürde bina enerji simülasyonlarında kabul edilen % 5 sınırının altındadır. Bu durum, regresyon modelinin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini ve güvenilir bir model olduğunu göstermektedir.

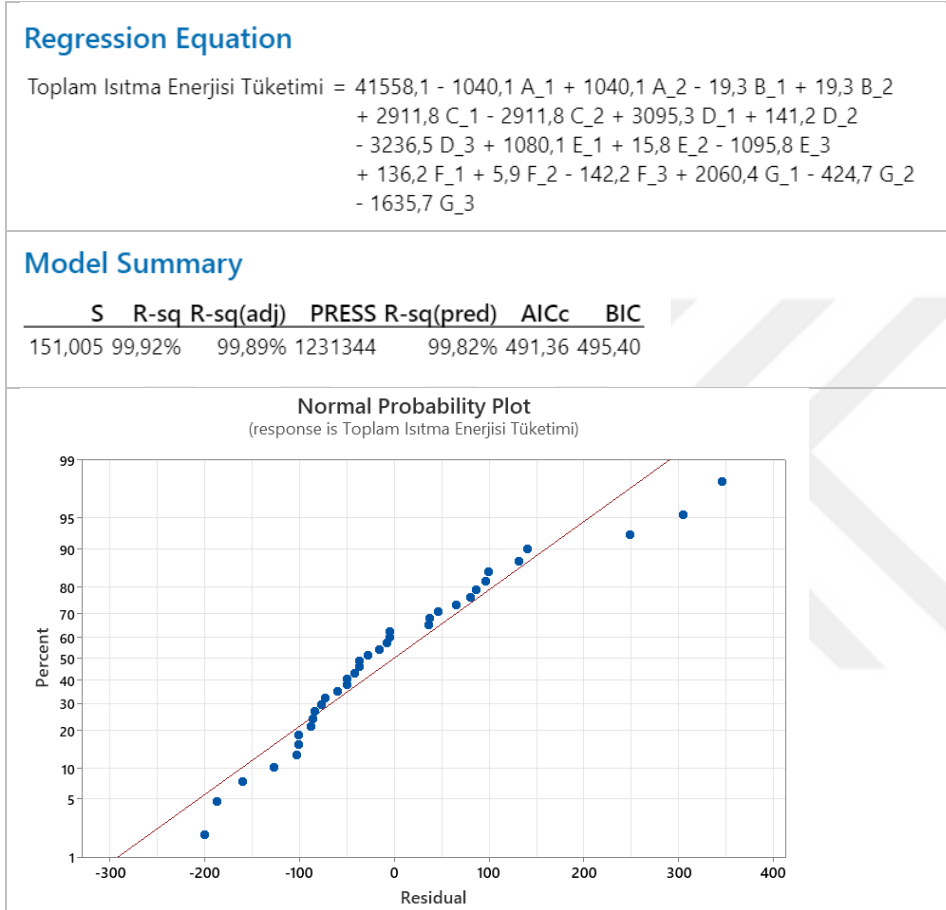
İkinci yanıt değişkeni olan “Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi”ne ait varyans analizi sonuçları Şekil 4.13’te sunulmuştur.

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	38948292	5,57%	38948292	38948292	1708,06	0,000
B	1	13460	0,00%	13460	13460	0,59	0,450
C	1	305231415	43,62%	305231415	305231415	13385,78	0,000
D	2	240902816	34,43%	240902816	120451408	5282,34	0,000
E	2	28411282	4,06%	28411282	14205641	622,98	0,000
F	2	465678	0,07%	465678	232839	10,21	0,001
G	2	85213925	12,18%	85213925	42606963	1868,51	0,000
Error	24	547264	0,08%	547264	22803		
Lack-of-Fit	21	547264	0,08%	547264	26060	*	*
Pure Error	3	0	0,00%	0	0		
Total	35	699734132	100,00%				

Şekil 4.13. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimine ait ANOVA sonuçları

Varyans analizine göre %95 güven düzeyinde ($p < 0.05$) A, C, D, E, F ve G faktörlerinin toplam enerji tüketimi üzerinde anlamlı etkileri olduğu tespit edilmiştir. C (ısıtma sistemi) faktörü toplam varyansın %43,62’sini açıklamakta ve en baskın faktör olarak öne çıkmaktadır. B faktörünün p değeri 0,45 olup anlamlı değildir. Bu, B faktörünün (PV panel) enerji ihtiyacını azaltmaya yönelik değil arzı karşılamak yönünde (Bkz. Şekil 2.6) bir iyileştirme teknolojisi olması nedeniyle oldukça anlaşılır bir durumdur.

Daha sonra yıllık ısıtma enerjisine ait regresyon modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.14). Oluşturulan modellerde faktör seviyeleri bağımsız değişken (dummy-kukla değişken) olarak kullanılmış ve doğrusal regresyon yöntemiyle katsayılar belirlenmiştir. Modelde yer alan katsayılar, her bir faktör seviyesinin yıllık ısıtma enerjisi üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.



Şekil 4.14.Yıllık ısıtma enerjisi tüketimine ait regresyon modeli

Modelin belirleme katsayısı (R^2) %99,92 olup, çok yüksek bir uyum göstermektedir. Ayarlanmış R^2 (%99,89) ve tahmin edici R^2 (%99,82) değerleri de oldukça yüksektir. Bu durum, modelin hem öğrenme verisiyle hem de yeni verilerle güçlü tahmin performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Modelin geçerliliğini değerlendirmek amacıyla oluşturulan normal olasılık grafiği, artıkların normal dağılıma yakın bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Artık değerlerinin büyük çoğunluğunun referans doğrusal eksen boyunca hizalanması, normallik varsayımının sağlandığını ve regresyon modelinin bu açıdan geçerli olduğunu teyit etmektedir.

Dolayısıyla, modelin doğruluk ve güvenilirlik düzeyinin istatistiksel olarak kabul edilebilir olduğu söylenebilir.

Daha sonra değerlendirmesi yapılan regresyon modelinin doğrulanması aşamasına geçilmiştir. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimine ilişkin elde edilen regresyon modeli, ilgili yanıt değişkenine göre en yüksek performansı gösteren ve L36 deney dizininde yer almayan kombinasyonun simülasyon sonucu ile doğrulanmıştır.

Bu kapsamda, A1 B1 C2 D3 E3 F3 G3 (Bkz. Çizelge 4.13) kombinasyonu doğrulama deneyi için hem enerji simülasyonu gerçekleştirilmiş hem de regresyon denkleminde tahmini değer hesaplanmıştır (Çizelge 4.20).

Çizelge 4.20. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimine ait regresyon modeli doğrulama sonuçları

Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi kontrol deneyi	Regresyon tahmini	Simülasyon sonucu	Hata yüzdesi
A1 B1 C2 D3 E3 F3 G3	31476,7	32 167,28	2,15

Doğrulama deneyi için hesaplanan % 2,15 hata yüzdesi, literatürde bina enerji simülasyonlarında kabul edilen % 5 sınırının altındadır. Bu durum, regresyon modelinin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini ve güvenilir bir model olduğunu göstermektedir.

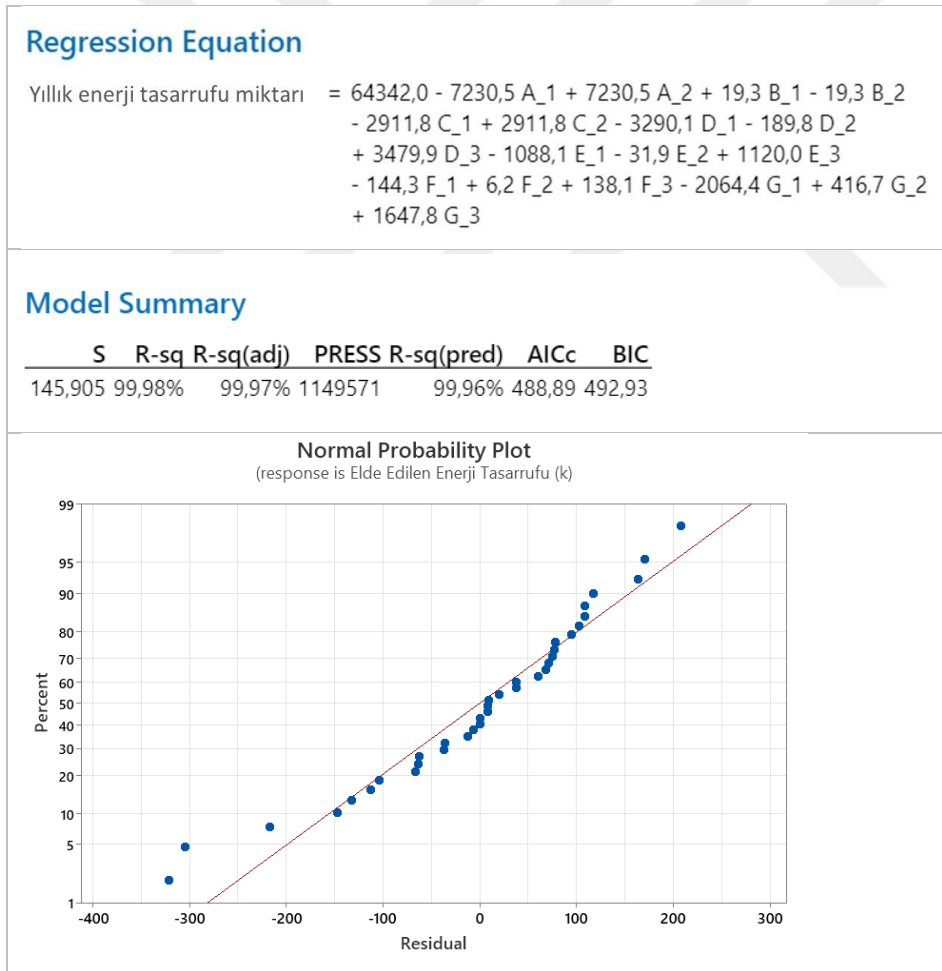
Üçüncü yanıt değişkeni olan “Yıllık enerji tasarrufu miktarı”na ait varyans analizi sonuçları Şekil 4.15’te sunulmuştur.

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	1882069939	72,98%	1882069939	1882069939	88408,45	0,000
B	1	13461	0,00%	13461	13461	0,63	0,434
C	1	305231415	11,84%	305231415	305231415	14337,96	0,000
D	2	275646945	10,69%	275646945	137823473	6474,13	0,000
E	2	29273538	1,14%	29273538	14636769	687,55	0,000
F	2	479258	0,02%	479258	239629	11,26	0,000
G	2	85808728	3,33%	85808728	42904364	2015,39	0,000
Error	24	510920	0,02%	510920	21288		
Lack-of-Fit	21	510920	0,02%	510920	24330	*	*
Pure Error	3	0	0,00%	0	0		
Total	35	2579034205	100,00%				

Şekil 4.15. Yıllık enerji tasarrufu miktarına ait ANOVA sonuçları

Varyans analizine göre %95 güven düzeyinde ($p < 0.05$) A, C, D, E, F ve G faktörlerinin toplam enerji tüketimi üzerinde anlamlı etkileri olduğu tespit edilmiştir. C (ısıtma sistemi) faktörü toplam varyansın %43,62'sini açıklamakta ve en baskın faktör olarak öne çıkmaktadır. B faktörünün p değeri 0,434 olup anlamlı değildir. Bu, B faktörünün (PV panel) enerji ihtiyacını azaltmaya yönelik değil arzı karşılamak yönünde (Bkz. Şekil 2.6) bir iyileştirme teknolojisi olması nedeniyle oldukça anlaşılır bir durumdur.

Daha sonra yıllık enerji tasarrufu miktarına ait regresyon modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.16). Oluşturulan modellerde faktör seviyeleri bağımsız değişken olarak kullanılmış ve doğrusal regresyon yöntemiyle katsayılar belirlenmiştir. Modelde yer alan katsayılar, her bir faktör seviyesinin yıllık enerji tasarrufu üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.



Şekil 4.16. Yıllık enerji tasarrufu miktarına ait regresyon modeli

Modelin belirleme katsayısı (R^2) %99,98 olup, çok yüksek bir uyum göstermektedir. Ayarlanmış R^2 (%99,97) ve tahmin edici R^2 (%99,96) değerleri de oldukça yüksektir. Bu durum, modelin hem öğrenme verisiyle hem de yeni verilerle güçlü tahmin performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Model doğruluğunu test etmek amacıyla oluşturulan normal olasılık artık grafiği, artık değerlerin büyük ölçüde referans doğrultuya yakın şekilde dağıldığını göstermektedir. Bu durum, artıkların yaklaşık olarak normal dağıldığını ve regresyon modelinin normallik varsayımını genel olarak karşıladığını göstermektedir. Özellikle orta bölgelerdeki hizalanma oldukça başarılıdır. Uç noktalarda gözlemlenen küçük sapmalar ise modelin doğruluğunu ciddi şekilde etkilememekte olup, kabul edilebilir düzeydedir.

Daha sonra değerlendirmesi yapılan regresyon modelinin doğrulanması aşamasına geçilmiştir. Yıllık enerji tasarrufu miktarına ilişkin elde edilen regresyon modeli, ilgili yanıt değişkenine göre en yüksek performansı gösteren ve L36 deney dizininde yer almayan kombinasyonun simülasyon sonucu ile doğrulanmıştır.

Bu kapsamda, A2 B1 C2 D3 E3 F3 G3 (Bkz. Çizelge 4.14) kombinasyonu doğrulama deneyi için hem enerji simülasyonu gerçekleştirilmiş hem de regresyon denkleminde tahmini değer hesaplanmıştır (Çizelge 4.21).

Çizelge 4.21. Yıllık enerji tasarrufu miktarına ait regresyon modeli doğrulama sonuçları

Yıllık enerji tasarrufu miktarı kontrol deneyi	Regresyon tahmini	Simülasyon sonucu	Hata yüzdesi
A2 B1 C2 D3 E3 F3 G3	80889,4	80570,48	0,4

Doğrulama deneyi için hesaplanan % 0,4 hata yüzdesi, literatürde bina enerji simülasyonlarında kabul edilen % 5 sınırının altındadır. Bu durum, regresyon modelinin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini ve güvenilir bir model olduğunu göstermektedir.

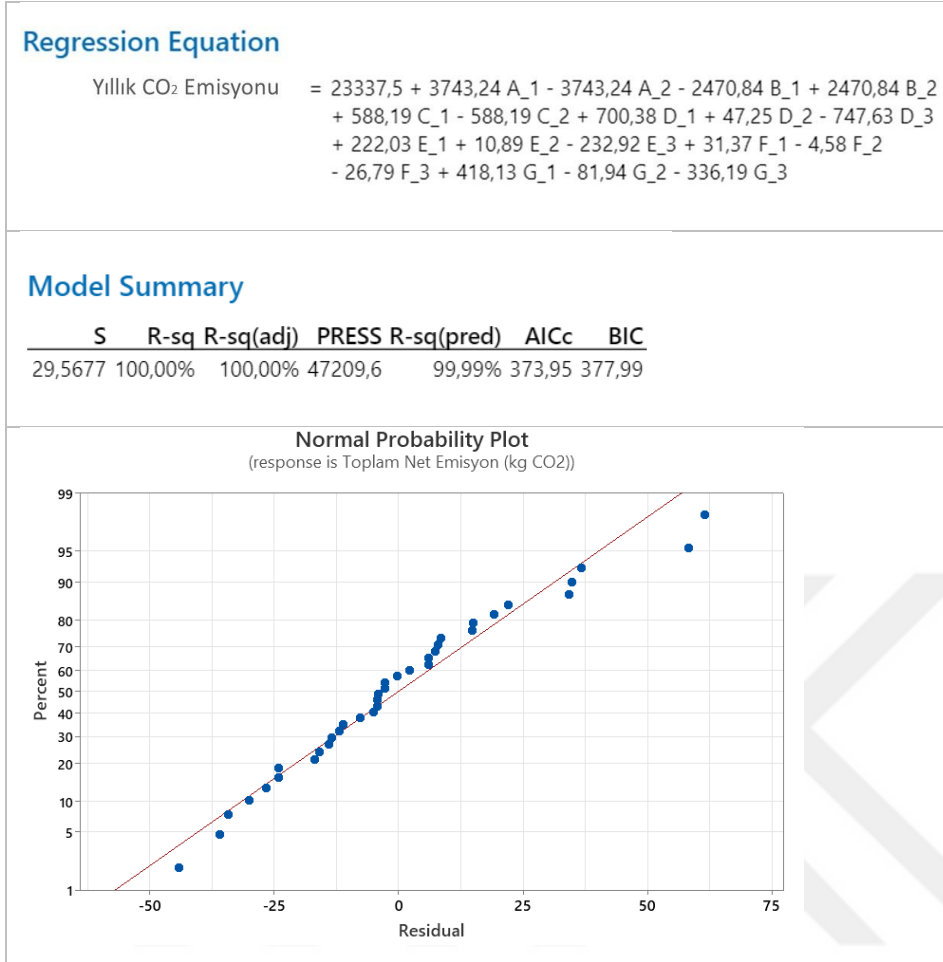
Dördüncü yanıt değişkeni olan “Yıllık CO₂ emisyonu”na ait varyans analizi sonuçları Şekil 4.17’de sunulmuştur.

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	504427666	66,89%	504427666	504427666	576982,42	0,000
B	1	219781548	29,14%	219781548	219781548	251394,00	0,000
C	1	12454663	1,65%	12454663	12454663	14246,09	0,000
D	2	12620630	1,67%	12620630	6310315	7217,96	0,000
E	2	1243994	0,16%	1243994	621997	711,46	0,000
F	2	20673	0,00%	20673	10336	11,82	0,000
G	2	3534869	0,47%	3534869	1767434	2021,65	0,000
Error	24	20982	0,00%	20982	874		
Lack-of-Fit	21	20982	0,00%	20982	999	*	*
Pure Error	3	0	0,00%	0	0		
Total	35	754105025	100,00%				

Şekil 4.17. Yıllık CO₂ emisyonuna ait ANOVA sonuçları

Varyans analizine göre %95 güven düzeyinde ($p < 0.05$) tüm faktörlerin toplam enerji tüketimi üzerinde anlamlı etkileri olduğu tespit edilmiştir. A (aydınlatma) faktörü toplam varyansın %66,89'unu açıklamakta ve en baskın faktör olarak öne çıkmaktadır.

Daha sonra yıllık CO₂ emisyonuna ait regresyon modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.18). Oluşturulan modellerde faktör seviyeleri bağımsız değişken olarak kullanılmış ve doğrusal regresyon yöntemiyle katsayılar belirlenmiştir. Modelde yer alan katsayılar, her bir faktör seviyesinin yıllık CO₂ emisyonu üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.



Şekil 4.18. Yıllık CO₂ emisyonuna ait regresyon modeli

Modelin belirleme katsayısı (R^2) %100 olup, çok yüksek bir uyum göstermektedir. Ayarlanmış R^2 (%100) ve tahmin edici R^2 (%99,99) değerleri de oldukça yüksektir. Bu durum, modelin hem öğrenme verisiyle hem de yeni verilerle güçlü tahmin performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Model doğruluğunu test etmek amacıyla oluşturulan normal olasılık artık grafiğinde, artıkların büyük çoğunluğu referans doğrultu boyunca hizalandığı görülmektedir. Bu durum, artıkların yaklaşık olarak normal dağıldığını ve regresyon modelinin temel varsayımlarından biri olan normallik koşulunu sağladığını göstermektedir. Uç değerlerde gözlemlenen sınırlı sapmalar modelin genel geçerliliğini olumsuz etkilememektedir.

Daha sonra değerlendirmesi yapılan regresyon modelinin doğrulanması aşamasına geçilmiştir. Yıllık CO₂ emisyonuna ilişkin elde edilen regresyon modeli, ilgili yanıt

değişkenine göre en yüksek performansı gösteren ve L36 deney dizininde yer almayan kombinasyonun simülasyon sonucu ile doğrulanmıştır.

Bu kapsamda, A2 B1 C2 D3 E3 F3 G3 (Bkz. Çizelge 4.15) kombinasyonu doğrulama deneyi için hem enerji simülasyonu gerçekleştirilmiş hem de regresyon denkleminde tahmini değer hesaplanmıştır (Çizelge 4.22).

Çizelge 4.22. Yıllık CO₂ emisyonuna ait regresyon modeli doğrulama sonuçları

Yıllık CO ₂ emisyonu kontrol deneyi	Regresyon tahmini	Simülasyon sonucu	Hata yüzdesi
A2 B1 C2 D3 E3 F3 G3	15191,7	15276,13	0,55

Doğrulama deneyi için hesaplanan % 0,55 hata yüzdesi, literatürde bina enerji simülasyonlarında kabul edilen % 5 sınırının altındadır. Bu durum, regresyon modelinin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini ve güvenilir bir model olduğunu göstermektedir.

Beşinci yanıt değişkeni olan “Geri ödeme süresi” için başlangıçta diğer yanıt değişkenlerinde olduğu gibi yalnızca ana faktörlerin (A–G) etkisi dikkate alınarak bir regresyon modeli oluşturulmuştur. Bu modelin ANOVA sonuçları Şekil 4.19’da sunulmuştur.

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	825,19	24,76%	825,19	825,19	117,36	0,000
B	1	362,04	10,86%	362,04	362,04	51,49	0,000
C	1	1949,56	58,51%	1949,56	1949,56	277,28	0,000
D	2	7,50	0,23%	7,50	3,75	0,53	0,593
E	2	4,34	0,13%	4,34	2,17	0,31	0,737
F	2	13,81	0,41%	13,81	6,91	0,98	0,389
G	2	1,02	0,03%	1,02	0,51	0,07	0,930
Error	24	168,74	5,06%	168,74	7,03		
Lack-of-Fit	21	168,74	5,06%	168,74	8,04	*	*
Pure Error	3	0,00	0,00%	0,00	0,00		
Total	35	3332,21	100,00%				

Şekil 4.19. Geri ödeme süresine ait ana faktörlere dayalı ilk model için ANOVA sonuçları

Ancak oluşturulan bu model, doğrulama deneyi üzerinde yapılan karşılaştırmalarda beklenen düzeyde tahmin doğruluğu sağlayamamıştır. Özellikle modelin R^2 değerleri ve kalanların dağılımı incelendiğinde, bazı varyasyonların açıklanamadığı görülmüştür (Şekil 4.20).

Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
2,65160	94,94%	92,61%	379,673	88,61%	200,32	204,36

Şekil 4.20. Geri ödeme süresine ait ana faktörlere dayalı ilk modelin özeti

Bu nedenle modelin açıklayıcılığını artırmak amacıyla, istatistiksel olarak anlamlı olabileceği öngörülen $A \times B$, $A \times C$ ve $B \times C$ etkileşim terimleri de modele dahil edilmiştir. Etkileşimli faktörler içeren bu yeni modelin ANOVA çıktıları Şekil 4.21’de verilmiştir.

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	825,19	24,76%	632,09	632,09	1081,33	0,000
B	1	362,04	10,86%	228,15	228,15	390,31	0,000
C	1	1949,56	58,51%	1541,84	1541,84	2637,63	0,000
D	2	7,50	0,23%	7,50	3,75	6,42	0,007
E	2	4,34	0,13%	4,34	2,17	3,71	0,042
F	2	13,81	0,41%	13,81	6,91	11,82	0,000
G	2	1,02	0,03%	1,02	0,51	0,87	0,432
A*B	1	50,23	1,51%	50,23	50,23	85,93	0,000
A*C	1	72,31	2,17%	72,31	72,31	123,70	0,000
B*C	1	33,93	1,02%	33,93	33,93	58,05	0,000
Error	21	12,28	0,37%	12,28	0,58		
Lack-of-Fit	18	12,28	0,37%	12,28	0,68	*	*
Pure Error	3	0,00	0,00%	0,00	0,00		
Total	35	3332,21	100,00%				

Şekil 4. 21. Geri ödeme süresine ait $A \times B$, $A \times C$ ve $B \times C$ etkileşimlerini içeren nihai modelin ANOVA sonuçları

Yeni modelde hem A, B ve C faktörlerinin F-değerleri artmış, hem de etkileşim terimlerinin tamamı istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır ($P < 0,05$). Ayrıca modelin hata varyansı (Adj MS, Error) da önemli ölçüde azalmıştır ($7,03 \rightarrow 0,58$). Bu durum, etkileşimli modelin geri ödeme süresi değişkeni üzerindeki varyasyonu çok daha iyi açıkladığını göstermektedir.

Bu etkileşimlerin daha anlamlı sonuçlar vermesinin nedeni, ekonomik analiz sonuçlarının yalnızca tekil faktörlerden değil, bu faktörlerin birlikte yarattığı ekonomik etkilerden de güçlü biçimde etkilenmesinden kaynaklanmaktadır. $A \times B$ etkileşimi, aydınlatma seçimi ile PV sisteminin birlikte yatırım maliyeti ve enerji tasarrufu üzerinde oluşturduğu birleşik etkiyi yansıtmaktadır. $A \times C$ etkileşimi, aydınlatma seçiminin ısıtma sistemiyle eş zamanlı kullanımının enerji giderleri ve dolayısıyla geri ödeme süresi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. $B \times C$ etkileşimi ise, PV sistemi entegrasyonunun farklı ısıtma sistemleriyle birlikte çalışması halinde tasarruf ve yatırım geri dönüşlerinin tek başına olduğundan daha farklı bir sonuç ortaya koymaktadır. Bu nedenle ekonomik boyutlu 3 yanıt değişkeni için de bu etkileşimli faktörler dahil edilmiştir.

Sonuç olarak, etkileşimli faktörlerin dahil edildiği regresyon modeli, hem istatistiksel olarak daha anlamlı hem de doğrulama testlerinde daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu nedenle nihai analizlerde bu model kullanılmıştır. Bu sonuçlarda C (ısıtma sistemi) faktörü toplam varyansın %58,51'ini açıklamakta ve en baskın faktör olarak öne çıkmaktadır.

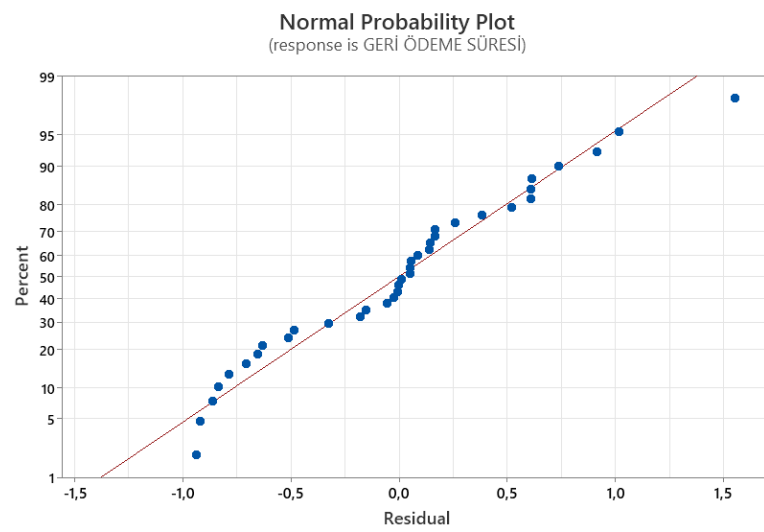
Daha sonra geri ödeme süresine ait regresyon modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.22). Oluşturulan modellerde faktör seviyeleri bağımsız değişken olarak kullanılmış ve doğrusal regresyon yöntemiyle katsayılar belirlenmiştir. Modelde yer alan katsayılar, her bir faktör seviyesinin geri ödeme süresi üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{Geri Ödeme Süresi} = & 19,758 + 4,444 A_1 - 4,444 A_2 - 2,670 B_1 + 2,670 B_2 - 6,941 C_1 \\ & + 6,941 C_2 + 0,634 D_1 - 0,211 D_2 - 0,423 D_3 - 0,491 E_1 + 0,254 E_2 \\ & + 0,237 E_3 - 0,540 F_1 - 0,327 F_2 + 0,867 F_3 + 0,117 G_1 + 0,121 G_2 \\ & - 0,238 G_3 - 1,253 A*B_1 1 + 1,253 A*B_1 2 + 1,253 A*B_2 1 - 1,253 A*B_2 2 \\ & - 1,503 A*C_1 1 + 1,503 A*C_1 2 + 1,503 A*C_2 1 - 1,503 A*C_2 2 \\ & + 1,030 B*C_1 1 - 1,030 B*C_1 2 - 1,030 B*C_2 1 + 1,030 B*C_2 2 \end{aligned}$$

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
0,764561	99,63%	99,39%	38,5160	98,84%	124,06	120,77



Şekil 4. 22. Geri ödeme süresine ait regresyon modeli

Modelin belirleme katsayısı (R^2) %99,63 olup, çok yüksek bir uyum göstermektedir. Ayarlanmış R^2 (%99,39) ve tahmin edici R^2 (%98,84) değerleri de oldukça yüksektir. Bu durum, modelin hem öğrenme verisiyle hem de yeni verilerle güçlü tahmin performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Model doğruluğunu test etmek amacıyla oluşturulan normal olasılık artık grafiğinde, artıkların büyük çoğunluğu referans doğrultu boyunca hizalandığı görülmektedir. Bu durum, artıkların yaklaşık olarak normal dağıldığını ve regresyon modelinin temel varsayımlarından biri olan normallik koşulunu sağladığını göstermektedir. Uç değerlerde gözlemlenen sınırlı sapmalar modelin genel geçerliliğini olumsuz etkilememektedir.

Daha sonra değerlendirmesi yapılan regresyon modelinin doğrulanması aşamasına geçilmiştir. Geri deme süresine ilişkin elde edilen regresyon modeli, ilgili yanıt değişkenine göre en yüksek performansı gösteren ve L36 deney dizininde yer almayan kombinasyonun simülasyon sonucu ile doğrulanmıştır.

Bu kapsamda, A2 B1 C1 D3 E1 F1 G3 (Bkz. Çizelge 4.16) kombinasyonu doğrulama deneyi için hem enerji simülasyonu gerçekleştirilmiş hem de regresyon denkleminde tahmini değer hesaplanmıştır (izelge 4.23).

Çizelge 4.23. Geri deme süresine ait regresyon modeli doğrulama sonuçları

Geri deme süresi kontrol deneyi	Regresyon tahmini	Simülasyon sonucu	Hata yüzdesi
A2 B1 C1 D3 E1 F1 G3	7,79	8,09	3,62

Doğrulama deneyi için hesaplanan %3,62 hata yüzdesi, literatürde bina enerji simülasyonlarında kabul edilen % 5 sınırının altındadır. Bu durum, regresyon modelinin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini ve güvenilir bir model olduğunu göstermektedir.

Altıncı yanıt değişkeni olan “Ortalama yıllık yatırım getirisi” için başlangıçta diğer yanıt değişkenlerinde olduğu gibi yalnızca ana faktörlerin (A–G) etkisi dikkate alınarak bir regresyon modeli oluşturulmuştur. Bu modelin ANOVA sonuçları şekil 4.23’te sunulmuştur.

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	61,320	23,07%	61,320	61,320	139,46	0,000
B	1	10,924	4,11%	10,924	10,924	24,84	0,000
C	1	180,303	67,85%	180,303	180,303	410,07	0,000
D	2	0,443	0,17%	0,443	0,221	0,50	0,611
E	2	0,953	0,36%	0,953	0,476	1,08	0,354
F	2	1,235	0,46%	1,235	0,618	1,40	0,265
G	2	0,018	0,01%	0,018	0,009	0,02	0,980
Error	24	10,553	3,97%	10,553	0,440		
Lack-of-Fit	21	10,553	3,97%	10,553	0,503	*	*
Pure Error	3	0,000	0,00%	0,000	0,000		
Total	35	265,748	100,00%				

Şekil 4. 23. Ortalama yıllık yatırım getirisine ait ana faktörlere dayalı ilk model için ANOVA sonuçları

Ancak oluşturulan bu model, doğrulama deneyi üzerinde yapılan karşılaştırmalarda beklenen düzeyde tahmin doğruluğu sağlayamamıştır. Özellikle modelin R^2 değerleri ve kalanların dağılımı incelendiğinde, bazı varyasyonların açıklanamadığı görülmüştür (Şekil 4.24).

Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
0,663091	96,03%	94,21%	23,7433	91,07%	100,53	104,57

Şekil 4.24. Ortalama yıllık yatırım getirisine ait ana faktörlere dayalı ilk modelin özeti

Bu nedenle modelin açıklayıcılığını artırmak amacıyla, istatistiksel olarak anlamlı olabileceği öngörülen $A \times B$, $A \times C$ ve $B \times C$ etkileşim terimleri de modele dahil edilmiştir. Etkileşimli faktörler içeren bu yeni modelin ANOVA çıktıları Şekil 4.25'te verilmiştir.

Analysis of Variance

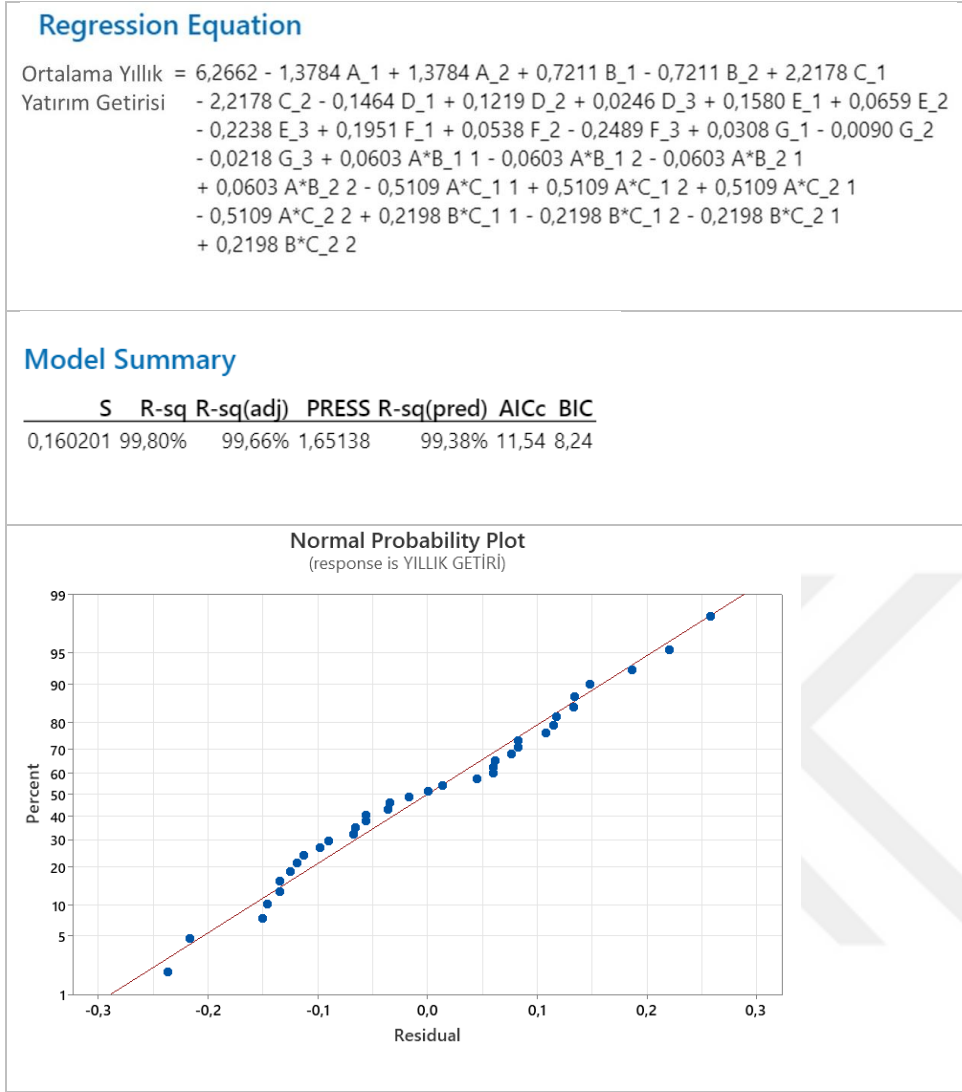
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	61,320	23,07%	60,798	60,798	2368,95	0,000
B	1	10,924	4,11%	16,642	16,642	648,43	0,000
C	1	180,303	67,85%	157,403	157,403	6133,15	0,000
D	2	0,443	0,17%	0,443	0,221	8,63	0,002
E	2	0,953	0,36%	0,953	0,476	18,56	0,000
F	2	1,235	0,46%	1,235	0,618	24,06	0,000
G	2	0,018	0,01%	0,018	0,009	0,35	0,707
A*B	1	0,116	0,04%	0,116	0,116	4,54	0,045
A*C	1	8,352	3,14%	8,352	8,352	325,41	0,000
B*C	1	1,546	0,58%	1,546	1,546	60,23	0,000
Error	21	0,539	0,20%	0,539	0,026		
Lack-of-Fit	18	0,539	0,20%	0,539	0,030	*	*
Pure Error	3	0,000	0,00%	0,000	0,000		
Total	35	265,748	100,00%				

Şekil 4. 25. Ortalama yıllık yatırım getirisine ait A×B, A×C ve B×C etkileşimlerini içeren nihai modelin ANOVA sonuçları

Yeni modelde hem A, B ve C faktörlerinin F-değerleri artmış, hem de etkileşim terimlerinin tamamı istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır ($P < 0,05$). Ayrıca modelin hata varyansı (Adj MS, Error) da önemli ölçüde azalmıştır ($0,44 \rightarrow 0,026$). Bu durum, etkileşimli modelin ortalama yıllık yatırım getirisi değişkeni üzerindeki varyasyonu çok daha iyi açıkladığını göstermektedir.

Sonuç olarak, etkileşimli faktörlerin dahil edildiği regresyon modeli, hem istatistiksel olarak daha anlamlı hem de doğrulama testlerinde daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu nedenle nihai analizlerde bu model kullanılmıştır. Bu sonuçlarda C (ısıtma sistemi) faktörü toplam varyansın %58,51'ini açıklamakta ve en baskın faktör olarak öne çıkmaktadır.

Daha sonra ortalama yıllık yatırım getirisine ait regresyon modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.26). Oluşturulan modellerde faktör seviyeleri bağımsız değişken olarak kullanılmış ve doğrusal regresyon yöntemiyle katsayılar belirlenmiştir. Modelde yer alan katsayılar, her bir faktör seviyesinin ortalama yıllık yatırım getirisi üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.



Şekil 4. 26. Ortalama yıllık yatırım getirisine ait regresyon modeli

Modelin belirleme katsayısı (R^2) %99,80 olup, çok yüksek bir uyum göstermektedir. Ayarlanmış R^2 (%99,66) ve tahmin edici R^2 (%99,38) değerleri de oldukça yüksektir. Bu durum, modelin hem öğrenme verisiyle hem de yeni verilerle güçlü tahmin performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Model doğruluğunu test etmek amacıyla oluşturulan normal olasılık artık grafiğinde, artıkların büyük çoğunluğu referans doğrultu boyunca hizalandığı görülmektedir. Özellikle orta ve üst bölgelerdeki yüksek hizalanma, modelin normallik varsayımını karşıladığını teyit etmektedir. Alt uçta gözlenen küçük sapmalar ise modelin genel geçerliliğini etkilemeyecek düzeydedir.

Daha sonra değerlendirmesi yapılan regresyon modelinin doğrulanması aşamasına geçilmiştir. Ortalama yıllık yatırım getirisine ilişkin elde edilen regresyon modeli, ilgili yanıt değişkenine göre en yüksek performansı gösteren ve L36 deney dizininde yer almayan kombinasyonun simülasyon sonucu ile doğrulanmıştır.

Bu kapsamda, A2 B1 C1 D2 E1 F1 G1 (Bkz. Çizelge 4.17) kombinasyonu doğrulama deneyi için hem enerji simülasyonu gerçekleştirilmiş hem de regresyon denkleminde tahmini değer hesaplanmıştır (izelge 4.24).

Çizelge 4.24. Ortalama yıllık yatırım getirisine ait regresyon modeli doğrulama sonuçları

Ortalama yıllık yatırım getirisi kontrol deneyi	Regresyon tahmini	Simülasyon sonucu	Hata yüzdesi
A2 B1 C1 D2 E1 F1 G1	11,75	12,09	2,81

Doğrulama deneyi için hesaplanan %2,81 hata yüzdesi, literatürde bina enerji simülasyonlarında kabul edilen % 5 sınırının altındadır. Bu durum, regresyon modelinin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini ve güvenilir bir model olduğunu göstermektedir.

Yedinci yanıt değişkeni olan “Fayda/Maliyet oranı” için de başlangıçta diğer yanıt değişkenlerinde olduğu gibi yalnızca ana faktörlerin (A–G) etkisi dikkate alınarak bir regresyon modeli oluşturulmuştur. Bu modelin ANOVA sonuçları şekil 4.27’de sunulmuştur.

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	2,4528	23,07%	2,45280	2,45280	139,46	0,000
B	1	0,4370	4,11%	0,43696	0,43696	24,84	0,000
C	1	7,2121	67,85%	7,21214	7,21214	410,07	0,000
D	2	0,0177	0,17%	0,01771	0,00886	0,50	0,611
E	2	0,0381	0,36%	0,03811	0,01905	1,08	0,354
F	2	0,0494	0,46%	0,04940	0,02470	1,40	0,265
G	2	0,0007	0,01%	0,00072	0,00036	0,02	0,980
Error	24	0,4221	3,97%	0,42210	0,01759		
Lack-of-Fit	21	0,4221	3,97%	0,42210	0,02010	*	*
Pure Error	3	0,0000	0,00%	0,00000	0,00000		
Total	35	10,6299	100,00%				

Şekil 4.27. Fayda/Maliyet oranına ait ana faktörlere dayalı ilk model için ANOVA sonuçları

Ancak oluşturulan bu model, doğrulama deneyi üzerinde yapılan karşılaştırmalarda beklenen düzeyde tahmin doğruluğu sağlayamamıştır. Özellikle modelin R^2 değerleri ve kalanların dağılımı incelendiğinde, bazı varyasyonların açıklanamadığı görülmüştür (Şekil 4.28).

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
0,132618	96,03%	94,21%	0,949731	91,07%	-15,35	-11,31

Şekil 4.28. Fayda/Maliyet oranına ait ana faktörlere dayalı ilk modelin özeti

Bu nedenle modelin açıklayıcılığını artırmak amacıyla, istatistiksel olarak anlamlı olabileceği öngörülen $A \times B$, $A \times C$ ve $B \times C$ etkileşim terimleri de modele dahil edilmiştir. Etkileşimli faktörler içeren bu yeni modelin ANOVA çıktıları Şekil 4.29’da verilmiştir.

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	2,4528	23,07%	2,43190	2,43190	2368,95	0,000
B	1	0,4370	4,11%	0,66567	0,66567	648,43	0,000
C	1	7,2121	67,85%	6,29613	6,29613	6133,15	0,000
D	2	0,0177	0,17%	0,01771	0,00886	8,63	0,002
E	2	0,0381	0,36%	0,03811	0,01905	18,56	0,000
F	2	0,0494	0,46%	0,04940	0,02470	24,06	0,000
G	2	0,0007	0,01%	0,00072	0,00036	0,35	0,707
A*B	1	0,0047	0,04%	0,00466	0,00466	4,54	0,045
A*C	1	0,3341	3,14%	0,33406	0,33406	325,41	0,000
B*C	1	0,0618	0,58%	0,06183	0,06183	60,23	0,000
Error	21	0,0216	0,20%	0,02156	0,00103		
Lack-of-Fit	18	0,0216	0,20%	0,02156	0,00120	*	*
Pure Error	3	0,0000	0,00%	0,00000	0,00000		
Total	35	10,6299	100,00%				

Şekil 4.29. Fayda/Maliyet oranına ait A×B, A×C ve B×C etkileşimlerini içeren nihai modelin ANOVA sonuçları

Yeni modelde hem A, B ve C faktörlerinin F-değerleri artmış, hem de etkileşim terimlerinin tamamı istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır ($P < 0,05$). Ayrıca modelin hata varyansı (Adj MS, Error) da önemli ölçüde azalmıştır ($0,01 \rightarrow 0,001$). Bu durum, etkileşimli modelin fayda/maliyet oranı değişkeni üzerindeki varyasyonu çok daha iyi açıkladığını göstermektedir.

Sonuç olarak, etkileşimli faktörlerin dahil edildiği regresyon modeli, hem istatistiksel olarak daha anlamlı hem de doğrulama testlerinde daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu nedenle nihai analizlerde bu model kullanılmıştır. Bu sonuçlarda C (ısıtma sistemi) faktörü toplam varyansın %67,85'ini açıklamakta ve en baskın faktör olarak öne çıkmaktadır.

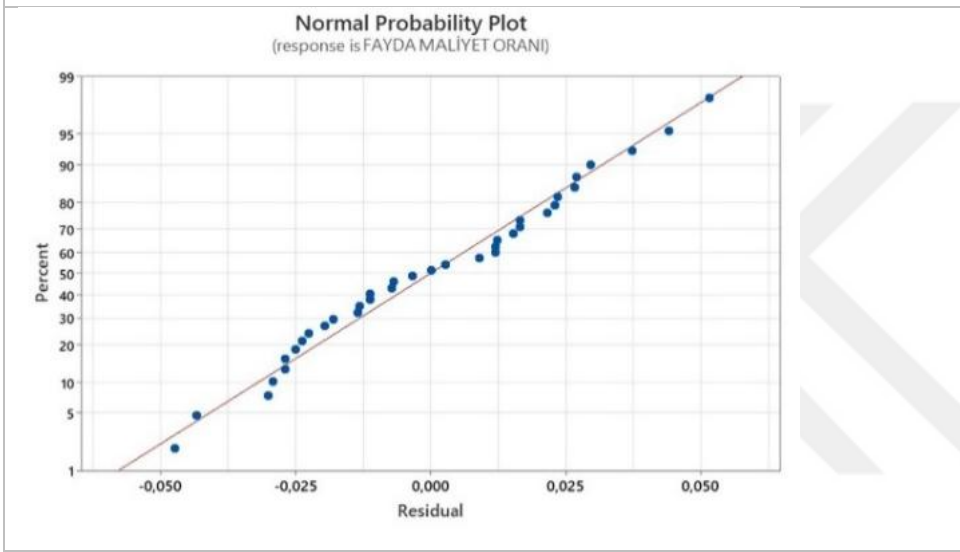
Daha sonra fayda/maliyet oranı ait regresyon modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.30). Oluşturulan modellerde faktör seviyeleri bağımsız değişken olarak kullanılmış ve doğrusal regresyon yöntemiyle katsayılar belirlenmiştir. Modelde yer alan katsayılar, her bir faktör seviyesinin fayda/maliyet oranı üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.

Regression Equation

Fayda/Maliyet Oranı = $1,25323 - 0,27568 A_1 + 0,27568 A_2 + 0,14423 B_1 - 0,14423 B_2 + 0,44357 C_1 - 0,44357 C_2 - 0,02929 D_1 + 0,02437 D_2 + 0,00491 D_3 + 0,03159 E_1 + 0,01317 E_2 - 0,04476 E_3 + 0,03903 F_1 + 0,01075 F_2 - 0,04978 F_3 + 0,00617 G_1 - 0,00180 G_2 - 0,00437 G_3 + 0,01206 A*B_1 1 - 0,01206 A*B_1 2 - 0,01206 A*B_2 1 + 0,01206 A*B_2 2 - 0,10217 A*C_1 1 + 0,10217 A*C_1 2 + 0,10217 A*C_2 1 - 0,10217 A*C_2 2 + 0,04396 B*C_1 1 - 0,04396 B*C_1 2 - 0,04396 B*C_2 1 + 0,04396 B*C_2 2$

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
0,0320402	99,80%	99,66%	0,0660554	99,38%	-104,34	-107,64



Şekil 4.30. Fayda/Maliyet oranına ait regresyon modeli

Modelin belirleme katsayısı (R^2) %99,80 olup, çok yüksek bir uyum göstermektedir. Ayarlanmış R^2 (%99,66) ve tahmin edici R^2 (%99,38) değerleri de oldukça yüksektir. Bu durum, modelin hem öğrenme verisiyle hem de yeni verilerle güçlü tahmin performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Model doğruluğunu test etmek amacıyla oluşturulan normal olasılık artık grafiğinde, artıkların büyük çoğunluğu referans doğrultu boyunca hizalandığı görülmektedir. Özellikle orta ve üst bölgelerdeki yüksek hizalanma, modelin normallik varsayımını karşıladığını teyit etmektedir. Alt uçta gözlenen küçük sapmalar ise modelin genel geçerliliğini etkilemeyecek düzeydedir.

Daha sonra değerlendirmesi yapılan regresyon modelinin doğrulanması aşamasına geçilmiştir. Fayda/maliyet oranına ilişkin elde edilen regresyon modeli, ilgili yanıt

değişkenine göre en yüksek performansı gösteren ve L36 deney dizininde yer almayan kombinasyonun simülasyon sonucu ile doğrulanmıştır.

Bu kapsamda, A2 B1 C1 D2 E1 F1 G1 (Bkz. Çizelge 4.18) kombinasyonu doğrulama deneyi için hem enerji simülasyonu gerçekleştirilmiş hem de regresyon denkleminde tahmini değer hesaplanmıştır (Çizelge 4.25).

Çizelge 4.25. Fayda/Maliyet oranına ait regresyon modeli doğrulama sonuçları

Fayda/maliyet oranı kontrol deneyi	Regresyon tahmini	Simülasyon sonucu	Hata yüzdesi
A2 B1 C1 D2 E1 F1 G1	2,35	2,41	2,49

Doğrulama deneyi için hesaplanan %2,49 hata yüzdesi, literatürde bina enerji simülasyonlarında kabul edilen % 5 sınırının altındadır. Bu durum, regresyon modelinin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini ve güvenilir bir model olduğunu göstermektedir.

4.3.3. Regresyon denklemleri ile 648 kombinasyonun hesaplanması ve veri setinin hazırlanması

Bu bölümde, 4.3.2’de oluşturulan regresyon denklemleri kullanılarak, 7 faktörün tüm olası seviye kombinasyonları hesaplanmıştır. Çalışmada 3 tanesi 2, 4 tanesi 3 seviyeli olan 7 faktörün toplamda 648 ($2^3 \times 3^4$) farklı kombinasyonu EK-2’de sunulmuş olan kodlar kullanılarak oluşturulmuştur.

Daha sonra her bir yanıt değişkeni için kurulan regresyon denklemleri bu 648 kombinasyona uygulanmış, her kombinasyon için EK-3’te sunulmuş olan kodlar kullanılarak enerji, emisyon ve ekonomik göstergeler elde edilmiştir. Ardından EK-4’te verilen kod kullanılarak ise sonuçlar çok kriterli karar verme aşamasına altlık oluşturacak tek bir karar matrisi halinde veri seti olarak hazırlanmıştır. Oluşturulan bu veri seti ise EK-5’te sunulmuştur.

4.4. Çok Kriterli Karar Verme Sonuçları

Materyal ve yöntem bölümünde açıklanan çok kriterli karar verme süreci bu bölümde sonuçlarıyla birlikte sunulmuştur. MOORA yöntemi kullanılarak elde edilen nihai sıralama, farklı ağırlık senaryoları ve alternatif yöntem olan TOPSIS ile kıyaslanmış, bu bağlamda karar modelinin güvenilirliği çok yönlü olarak test edilmiştir. Her iki yöntem için hesaplamalar Python programlama dili aracılığıyla yapılmıştır. Hesaplama sürecinde kullanılan Python kodlarına çalışmanın ekler bölümünde yer verilmiştir. Böylece değerlendirme süreci hem şeffaf hale getirilmiş hem de araştırmanın tekrarlanabilirliği sağlanmıştır.

4.4.1. MOORA yöntemi ile en uygun kombinasyonun belirlenmesi

Bu çalışmada geliştirilen regresyon modelleri yardımıyla, 648 adet kombinasyon için tahmin edilen sonuçlar 7 adet karar kriteri (toplam enerji tüketimi, ısıtma enerjisi tüketimi, enerji tasarrufu, CO₂ emisyonu, geri ödeme süresi, ortalama yıllık yatırım getirisi ve maliyet/fayda oranı) üzerinden MOORA yöntemi ile değerlendirilmiştir.

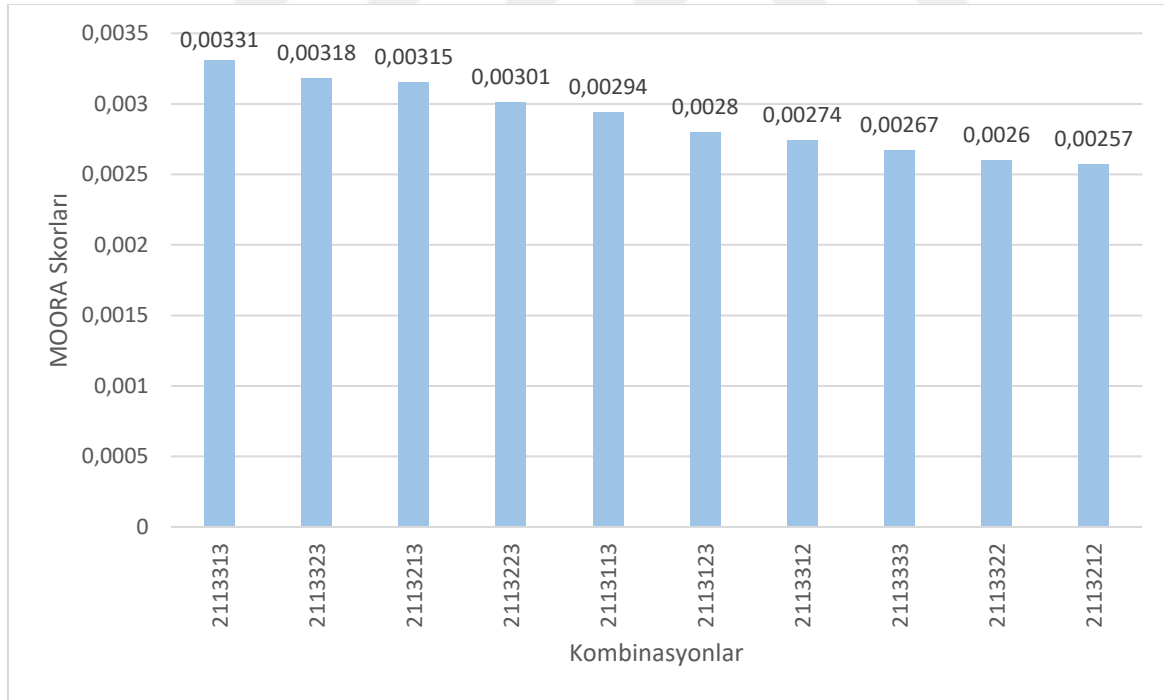
MOORA yöntemi, karar matrisinin normalize edilmesini, kriterlerin yönelimlerine göre ağırlıklandırılmasını ve her alternatif için nihai bir skorun hesaplanmasını içermektedir. Bu kapsamda yapılan hesaplamalara ait kullanılan kodlara EK-6'da yer verilmiştir. Python ortamında, karar matrisinin oluşturulması, normalize edilmesi, ağırlıklandırılması ve yönelime göre skorların belirlenmesi aşamaları adım adım uygulanmıştır.

İlk olarak enerji öncelikli bir senaryo kapsamında belirlenen kriter ağırlıkları ile MOORA hesaplaması yapılmıştır. Bu senaryoda enerjiye ilişkin yanıt değişkenlerine %60, çevresel boyuta %10, ekonomik boyuta ise %30 ağırlık verilmiş; her bir kriterin yönelimi (maksimize veya minimize) göz önünde bulundurulmuştur (Bkz. Çizelge 3.8).

MOORA yöntemi ile yapılan analiz sonucunda, her kombinasyon için bir performans skoru hesaplanmış ve bu skorlar sıralanarak en uygun çözüm belirlenmiştir. İlk 10 alternatifin MOORA skorları Çizelge. 4.26'da sunulmakta, sıralamaya göre grafiksel dağılım ise Şekil 4.31'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.26. Enerji odaklı birinci senaryo kapsamında ilk 10 alternatifin sonuçları ve MOORA skorları

Sıra	A	B	C	D	E	F	G	Yıllık Toplam Enerji Tüketimi	Yıllık Isıtma Enerjisi Tüketimi	Yıllık Enerji Tasarrufu Miktarı	Yıllık CO ₂ Emisyonu	Geri Ödeme Süresi	Ortalama Yıllık Yatırım Getirisi	Maliyet/Fayda Oranı	MOORA Skor
1	2	1	1	3	3	1	3	77444,9	39658,9	74783,4	16426,24	8,52	11,228	2,24	0,00331
2	2	1	1	3	3	2	3	77294,4	39528,6	74933,9	16390,29	8,73	11,086	2,21	0,00318
3	2	1	1	3	2	1	3	78596,8	40770,5	73631,5	16670,05	8,54	11,517	2,30	0,00315
4	2	1	1	3	2	2	3	78446,3	40640,2	73782	16634,1	8,75	11,376	2,27	0,00301
5	2	1	1	3	1	1	3	79653	41834,8	72575,3	16881,19	7,79	11,609	2,32	0,00294
6	2	1	1	3	1	2	3	79502,5	41704,5	72725,8	16845,24	8,01	11,468	2,29	0,00280
7	2	1	1	3	3	1	2	78676	40869,9	73552,3	16680,49	8,88	11,240	2,24	0,00274
8	2	1	1	3	3	3	3	77162,5	39380,5	75065,8	16368,08	9,93	10,784	2,15	0,00267
9	2	1	1	3	3	2	2	78525,5	40739,6	73702,8	16644,54	9,09	11,099	2,21	0,00260
10	2	1	1	3	2	1	2	79827,9	41981,5	72400,4	16924,3	8,90	11,530	2,30	0,00257



Şekil 4.31. İlk 10 alternatifin MOORA skorları

Bu analiz sonucunda en iyi performansa sahip yapı bileşimi A2 B1 C1 D3 E3 F1 G3 kombinasyonu olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda faktör ve seviyelerinin fiziksel karşılıklarının kullanımı ile oluşan kombinasyon Çizelge 4.27’de verilmiştir.

Çizelge 4.27. Birinci senaryo kapsamında elde edilen en iyi kombinasyon

Faktörler						
A	B	C	D	E	F	G
Aydınlatma	PV panel	Isıtma Sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
LED	Var	0,93 verimli yoğuşmalı kazan + radyatör sistemi	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 6 cm	4+16+4 (Argon)

Bu kombinasyon, hem enerji verimliliği açısından yüksek performans göstermekte hem de ekonomik ve çevresel kriterler açısından dengeli sonuçlar üretmektedir.

Böylece çalışmada tercih edilen MOORA yöntemi sayesinde, çok sayıda alternatif arasında en uygun çözüm nesnel ve hesaplama dayalı bir yöntemle ortaya konulmuştur.

4.4.2. Farklı ağırlık senaryolarına göre sıralama değişimi ve duyarlılık analizi

Bu bölümde, karar kriterlerine verilen ağırlıkların değiştirilmesiyle elde edilen MOORA skorlarının ve alternatif sıralamalarının nasıl etkilendiği incelenmiştir. Bu amaçla bölüm 3.7.2’de tanımlanan senaryolar (Bkz. Çizelge 3.9) için de MOORA yöntemi yeniden uygulanmıştır. Her bir senaryo sonucunda elde edilen sıralamalar karşılaştırılmış ve kombinasyonların sıralamadaki yer değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

- Senaryo 1 (Enerji Odaklı): Enerji kriterlerine toplamda %60 (her biri %20), çevresel kriterlere %10 ve ekonomik kriterlere toplamda %30 (her biri %10) ağırlık verilmiştir.
- Senaryo 2 (Çevresel Odaklı): Çevresel kriter %40, enerji kriterleri toplamda %30 (her biri %10) ve ekonomik kriterler toplamda %30 (her biri %10) ağırlık verilmiştir.
- Senaryo 3 (Ekonomik Odaklı): Ekonomik kriterlere toplamda %50 (her biri %16,67), enerji kriterlerine %40 (her biri %13,33) ve çevresel kriterlere %10 ağırlık verilmiştir.

Her senaryo için MOORA yöntemi ile elde edilen skorlar hesaplanarak ilk 10 alternatif sıralanmıştır. Çizelge 4.26’da birinci senaryoya ait sonuçlar verilmişken, çizelge 4.28 ve çizelge 4.29’da sırasıyla ikinci ve üçüncü senaryoların en iyi 10 alternatifi sunulmaktadır.

Çizelge 4.28. Çevresel odaklı ikinci senaryo kapsamında ilk 10 alternatifin sonuçları ve MOORA skorları

Sıra	A	B	C	D	E	F	G	Yıllık Toplam Enerji Tüketimi	Yıllık Isıtma Enerjisi Tüketimi	Yıllık Enerji Tasarrufu Miktarı	Yıllık CO ₂ Emisyonu	Geri Ödeme Süresi	Ortalama Yıllık Yatırım Getirisi	Maliyet/Fayda Oranı	MOORA Skor
1	2	1	1	3	3	1	3	77444,9	39658,9	74783,4	16426,24	8,52	11,228	2,245	0,85274
2	2	1	1	3	2	1	3	78596,8	40770,5	73631,5	16670,05	8,54	11,517	2,30	0,83811
3	2	1	1	3	3	2	3	77294,4	39528,6	74933,9	16390,29	8,73	11,086	2,21	0,85165
4	2	1	1	3	1	1	3	79653	41834,8	72575,3	16881,19	7,79	11,609	2,32	0,82274
5	2	1	1	3	2	2	3	78446,3	40640,2	73782	16634,1	8,75	11,376	2,27	0,83805
6	2	1	1	3	1	2	3	79502,5	41704,5	72725,8	16845,24	8,01	11,468	2,29	0,82305
7	2	1	1	3	3	1	2	78676	40869,9	73552,3	16680,49	8,88	11,240	2,24	0,83166
8	2	1	1	3	2	1	2	79827,9	41981,5	72400,4	16924,3	8,90	11,530	2,30	0,81729
9	2	1	1	3	3	2	2	78525,5	40739,6	73702,8	16644,54	9,09	11,099	2,21	0,83070
10	2	1	1	3	1	1	2	80884,1	43045,8	71344,2	17135,44	8,15	11,6226	2,32	0,80273

Çizelge 4.29. Ekonomi odaklı üçüncü senaryo kapsamında ilk 10 alternatifin sonuçları ve MOORA skorları

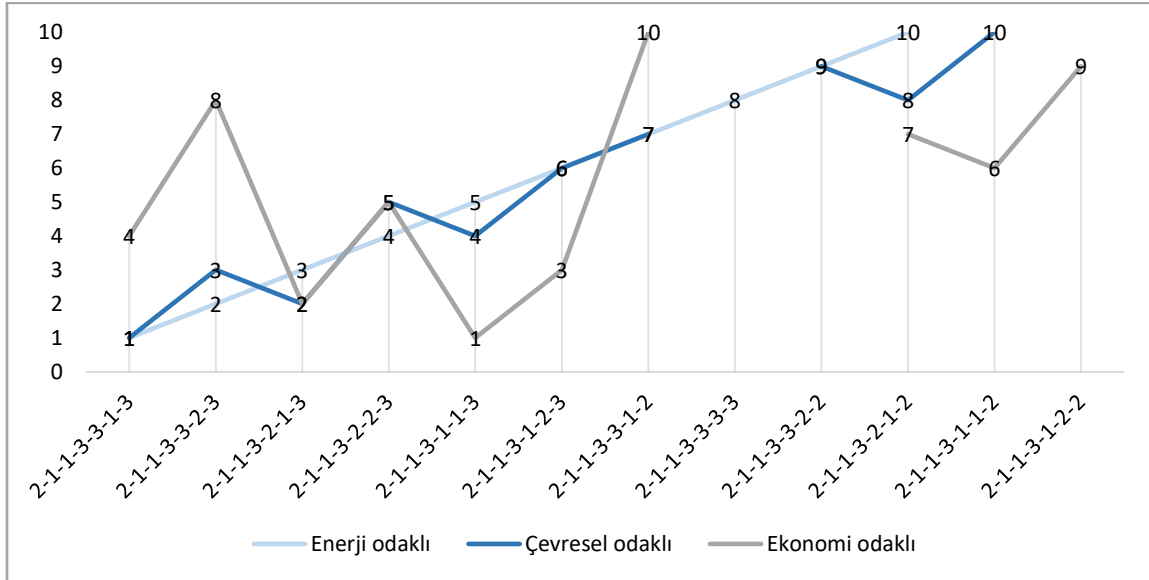
Sıra	A	B	C	D	E	F	G	Yıllık Toplam Enerji Tüketimi	Yıllık Isıtma Enerjisi Tüketimi	Yıllık Enerji Tasarrufu Miktarı	Yıllık CO ₂ Emisyonu	Geri Ödeme Süresi	Ortalama Yıllık Yatırım Getirisi	Maliyet/Fayda Oranı	MOORA Skor
1	2	1	1	3	1	1	3	79653	41834,8	72575,3	16881,19	7,79	11,609	2,32	0,82274
2	2	1	1	3	2	1	3	78596,8	40770,5	73631,5	16670,05	8,54	11,517	2,30	0,83811
3	2	1	1	3	1	2	3	79502,5	41704,5	72725,8	16845,24	8,01	11,468	2,29	0,82305
4	2	1	1	3	3	1	3	77444,9	39658,9	74783,4	16426,24	8,52	11,228	2,24	0,85274
5	2	1	1	3	2	2	3	78446,3	40640,2	73782	16634,1	8,75	11,376	2,27	0,83805
6	2	1	1	3	1	1	2	80884,1	43045,8	71344,2	17135,44	8,15	11,6226	2,32	0,80273
7	2	1	1	3	2	1	2	79827,9	41981,5	72400,4	16924,3	8,90	11,530	2,30	0,81729
8	2	1	1	3	3	2	3	77294,4	39528,6	74933,9	16390,29	8,73	11,086	2,21	0,85165
9	2	1	1	3	1	2	2	80733,6	42915,5	71494,7	17099,49	8,36	11,4813	2,29	0,80286
10	2	1	1	3	3	1	2	78676	40869,9	73552,3	16680,49	8,88	11,240	2,24	0,83166

Bu sıralamalar karşılaştırıldığında, bazı kombinasyonların tüm senaryolarda ilk sıralarda yer aldığı, bazılarının ise senaryo değişimine duyarlı olarak sıralamasının önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir. Farklı ağırlık senaryolarına göre ilk 10 kombinasyon ve sıralamaları Çizelge 4.30'da sunulurken, Şekil 4.32'de bu sıralama değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Yatay eksenle kombinasyonlar, düşey eksenle ise her senaryo için ilgili kombinasyonun sıralaması yer almaktadır.

Çizelge 4.30. Her bir senaryoya göre ilk 10 kombinasyon ve sıralamaları

Sıra	Kombinasyon	Enerji odaklı sıralama (senaryo 1)	Çevresel odaklı sıralama (senaryo 2)	Ekonomik odaklı sıralama (senaryo 3)
1	2-1-1-3-3-1-3	1	1	4
2	2-1-1-3-3-2-3	2	3	8
3	2-1-1-3-2-1-3	3	2	2
4	2-1-1-3-2-2-3	4	5	5
5	2-1-1-3-1-1-3	5	4	1
6	2-1-1-3-1-2-3	6	6	3
7	2-1-1-3-3-1-2	7	7	10
8	2-1-1-3-3-3-3	8		
9	2-1-1-3-3-2-2	9	9	
10	2-1-1-3-2-1-2	10	8	7
11	2-1-1-3-1-1-2		10	6
12	2-1-1-3-1-2-2			9

Eğriler arasındaki farklar, ağırlıklandırmanın MOORA skorlarına etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Bu farklılıklar, karar vericinin önceliklerine göre nihai kararların değişebileceğini, ancak bazı kombinasyonların tüm senaryolarda üst sıralarda yer aldığını göstermektedir. Bu durum, önerilen yapı ve sistem bileşimlerinin karar önceliklerine karşı oldukça dayanıklı olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 4.32. Farklı ağırlık senaryoları altında ilk 10 kombinasyonun sıralama değişimleri

Sonuçlar değerlendirildiğinde ortaya çıkan tablo, senaryolar arası uyum ve ayrışmaları anlamak açısından oldukça önemlidir. Bu bağlamda enerji odaklı senaryo (Senaryo 1) ile çevresel odaklı senaryo (Senaryo 2) arasında dikkat çekici bir paralellik gözlemlenmektedir. Örneğin ilk sıradaki kombinasyon (2-1-1-3-3-1-3) her iki senaryoda da birinci sırada yer almıştır. Benzer şekilde 2. ve 3. sıradaki kombinasyonlar da birbirine yakın sıralamalarda konumlanmıştır. Bu durum, enerji tüketiminde sağlanan düşüşün doğrudan CO₂ emisyonlarında da azalmaya yol açtığını, dolayısıyla bu iki kriterin birbirini desteklediğini ortaya koymaktadır. Enerji verimliliği hedeflendiğinde, çevresel faydanın da eş zamanlı olarak sağlandığı söylenebilir.

Buna karşın, ekonomik odaklı senaryo (Senaryo 3) sıralamaları ile enerji ve çevresel senaryolar arasında belirgin bir farklılık gözlemlenmiştir. Ekonomik senaryo, yatırım getirisi, geri ödeme süresi ve maliyet/fayda oranı gibi kriterlere göre ağırlıklandırıldığından, bazı enerji açısından ya da çevresel açıdan yüksek performanslı kombinasyonlar, bu senaryoda daha alt sıralarda yer almıştır. Örneğin, enerji odaklı senaryoda 1. sırada yer alan kombinasyon ekonomik odaklı senaryoda 4. sıraya gerilemiştir. Benzer şekilde enerji odaklı sıralamada 5. sıradaki kombinasyon ekonomik açıdan en iyi alternatif olarak ilk sıraya yerleşmiştir. Bu sonuçlar, her senaryo kapsamında öncelik verilen kriterlerin sıralamayı ciddi şekilde etkilediğini ve karar vericilerin farklı ağırlıklandırma tercihleri doğrultusunda farklı sonuçlara ulaşabileceklerini göstermektedir. Bu nedenle enerji verimliliği, çevresel

sürdürülebilirlik ve ekonomik geri dönüş kriterleri birlikte ele alınmalı, çok kriterli karar verme yaklaşımı ile dengeli ve bütüncül çözümler üretilmelidir.

4.4.3. MOORA ve TOPSIS yöntemleri ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Bu bölümde, karar destek sürecinde uygulanan MOORA yönteminden elde edilen sıralamalar, çok kriterli karar verme literatüründe daha yaygın olarak kullanılan TOPSIS yöntemi ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. MOORA, özellikle basitliği ve doğrusal hesaplama yapısı nedeniyle tercih edilmiştir. Ancak yöntemin güvenilirliğini değerlendirebilmek adına, aynı kriterler ve ağırlık yapısı kullanılarak birinci senaryo (enerji odaklı) için TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Bu kapsamda yapılan hesaplamalara ait kullanılan kodlara EK-6'da yer verilmiştir. Uygulama sonrasında elde edilen ilk 10 kombinasyona ait sonuçlar Çizelge 4.31'de sunulmuştur.

Çizelge 4.31. Enerji odaklı birinci senaryo kapsamında ilk 10 alternatifin sonuçları ve TOPSIS skorları

Sıra	A	B	C	D	E	F	G	Yıllık Toplam Enerji Tüketimi	Yıllık Isıtma Enerjisi Tüketimi	Yıllık Enerji Tasarrufu Miktarı	Yıllık CO ₂ Emisyonu	Geri Ödene Süresi	Ortalama Yıllık Yatırım Getirisi	Maliyet/Fayda Oranı	TOPSIS Skor
1	2	1	1	3	3	1	3	77444,9	39658,9	74783,4	16426,24	8,52	11,228	2,25	0,85274
2	2	1	1	3	3	2	3	77294,4	39528,6	74933,9	16390,29	8,73	11,086	2,22	0,85165
3	2	1	1	3	3	3	3	77162,5	39380,5	75065,8	16368,08	9,93	10,784	2,16	0,84251
4	2	1	1	3	2	1	3	78596,8	40770,5	73631,5	16670,05	8,54	11,517	2,30	0,83811
5	2	1	1	3	2	2	3	78446,3	40640,2	73782	16634,1	8,75	11,376	2,28	0,83805
6	2	1	1	3	3	1	2	78676	40869,9	73552,3	16680,49	8,88	11,240	2,25	0,83166
7	2	1	1	3	2	3	3	78314,4	40492,1	73913,9	16611,89	9,94	11,073	2,21	0,83145
8	2	1	1	3	3	2	2	78525,5	40739,6	73702,8	16644,54	9,09	11,099	2,22	0,83070
9	2	1	1	3	1	2	3	79502,5	41704,5	72725,8	16845,24	8,01	11,468	2,29	0,82305
10	2	1	1	3	1	1	3	79653	41834,8	72575,3	16881,19	7,79	11,609	2,32	0,82274

Daha sonra her iki yöntem ile elde edilen ilk 10 kombinasyon çizelge 4.32'de özetlenmiştir. Kombinasyonlara ait MOORA ve TOPSIS skorları, sıralama dereceleri ve sıralama farkları birlikte değerlendirilmiş, benzerliklerin ve ayrışmaların olup olmadığı analiz edilmiştir.

Çizelge 4.32. MOORA ve TOPSİS sonuçlarının karşılaştırılması

A	B	C	D	E	F	G	MOORA Sırası	TOPSIS Sırası	Sıralama Farkı
2	1	1	3	3	1	3	1	1	0
2	1	1	3	3	2	3	2	2	0
2	1	1	3	2	1	3	3	4	1
2	1	1	3	2	2	3	4	5	1
2	1	1	3	1	1	3	5	10	5
2	1	1	3	1	2	3	6	9	3
2	1	1	3	3	1	2	7	6	1
2	1	1	3	3	3	3	8	3	5
2	1	1	3	3	2	2	9	8	1
2	1	1	3	2	1	2	10	-	

Her iki yöntem sonucunda elde edilen ilk 10 kombinasyon karşılaştırıldığında, özellikle ilk üç sıradaki kombinasyonlar arasında yüksek derecede benzerlik gözlemlenmiştir. Bu durum, MOORA yönteminin literatürdeki yaygın yöntemlerden biri olan TOPSIS ile tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Sonuca bakıldığında, hem MOORA hem de TOPSIS yönteminde en üst sıralarda yer alan 2-1-1-3-3-1-3 ve 2-1-1-3-3-2-3 kombinasyonları her iki yöntemde de benzer performans sergilemiştir.

Öte yandan, sıralamalarda gözlemlenen bazı farklılıklar, yöntemlerin algoritmik yapılarındaki ayrımlardan kaynaklanmaktadır. MOORA yöntemi, normalize edilmiş karar matrisinden fayda ve maliyet kriterlerinin doğrudan farkını alarak bir skor üretirken; TOPSIS, ideal ve negatif-ideal çözüme olan uzaklıkları dikkate alarak göreceli yakınlık katsayısı üzerinden sıralama yapmaktadır. Bu nedenle bazı kombinasyonların orta sıralarda farklı konumlara yerleştiği görülmüştür. Bu karşılaştırmalı analiz sonucunda, MOORA yönteminin hem hesaplama kolaylığı hem de sonuç tutarlılığı açısından güvenilir bir alternatif sunduğu anlaşılmıştır. Özellikle enerji ve sürdürülebilirlik odaklı bina performansı çalışmalarında karar vericiler, MOORA gibi daha az karmaşık yöntemleri kullanarak literatürle uyumlu, anlamlı sonuçlar elde edebilmektedir.

Sonuç olarak, yapılan analizde, ilk sıralarda yer alan kombinasyonların büyük ölçüde örtüştüğü, her iki yöntemin benzer şekilde optimum kombinasyonları öne çıkardığı görülmüştür. Bu durum, çalışmada kullanılan MOORA yönteminin güvenilirliğini desteklemekte, farklı algoritmalarla benzer sonuçlara ulaşılmasının, modelin kararlılığı açısından olumlu bir gösterge olduğu değerlendirilmektedir.



5. TARTIŞMA

Bu çalışma, bina enerji performansının optimizasyonu için Taguchi deney tasarımı, regresyon modelleme ve çok kriterli karar verme (MOORA ve TOPSIS) yöntemlerini entegre eden kapsamlı bir metodoloji sunmaktadır. Elde edilen bulgular, yapı kabuğu bileşenleri ve enerji sistemlerine yönelik iyileştirme önlemlerinin enerji, çevresel ve ekonomik boyutlardaki etkilerini derinlemesine analiz etme olanağı sağlamıştır. Çalışmanın temel amacı, çok sayıda tasarım kombinasyonu arasından en uygun olanları belirleyerek, mevcut binaların enerji etkin iyileştirilmesi ve sürdürülebilirliğine somut katkılar sunmaktır.

Çalışmada benimsenen bütünleşik yaklaşım, literatürdeki benzer çalışmalara kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle, Taguchi deney tasarımının kullanılması, geleneksel tam faktöriyel tasarımların gerektirdiği yüksek deney sayısını (648 olası kombinasyon yerine L36 ortogonal dizi ile 36 deney) önemli ölçüde azaltarak zaman ve kaynak verimliliği sağlamıştır. Bu durum, karmaşık sistemlerde çok sayıda faktörün ve seviyenin bulunduğu durumlarda pratik uygulanabilirlik açısından önemlidir. Montgomery (2017) ve Taguchi ve diğerleri (2005) gibi kaynaklar, Taguchi yönteminin bu tür durumlardaki etkinliğini vurgulamaktadır.

Çalışmada, Taguchi yönteminin ölçülebilen sayısal kriterlerle birlikte ölçülemeyen nitel kriterleri de ele alabilme yeteneği; enerji performansı, çevresel etki ve ekonomik göstergeler gibi farklı boyutlardaki yanıt değişkenlerinin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Sonrasında regresyon modellemesinin (Çoklu Doğrusal Regresyon - MLR) kullanılması, simülasyonla elde edilen sınırlı veri setinden (36 deney) tüm olası kombinasyonlar (648 kombinasyon) için güvenilir tahminler yapılabilmesini sağlamıştır. Bu yaklaşım, tasarım alanının tamamının analiz edilebilir hale getirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Regresyon modelinin basitliği ve yorumlanabilirliği, her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin doğrudan anlaşılmasına olanak tanımıştır.

Çok kriterli karar verme yöntemlerinden MOORA ve TOPSIS'in metodolojiye entegrasyonu ise enerji, çevresel ve ekonomik kriterler arasındaki potansiyel çelişkileri dikkate alarak optimum çözümlerin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Özellikle MOORA yönteminin

düşük işlem yükü, basit matematiksel yapısı ve yüksek güvenilirliği (Önay, 2015), geniş veri setlerinin değerlendirildiği mühendislik temelli çalışmalarda pratik bir avantaj sunmuştur.

Çalışmada yapılan duyarlılık analizleri, farklı ağırlıklandırma senaryoları altında kararların istikrarlılığını test ederek, karar destek sisteminin güvenilirliğini pekiştirmiştir. Bu yaklaşımla, karar vericilere esnek ve şeffaf bir araç sunulmuştur.

Bu çalışmanın bulguları, Taguchi yönteminin bina enerji performansı optimizasyonundaki etkinliğini gösteren önceki araştırmalarla uyumludur. Sadeghifam ve diğerleri (2019), Chen ve diğerleri (2023), Chlela ve diğerleri (2007), Yüce ve diğerleri (2022), Chiu ve diğerleri (2025) ve Alafzadeh ve diğerleri (2024) gibi çalışmalar, Taguchi yönteminin yapı kabuğu optimizasyonu, HVAC sistemleri ve havalandırma performansı gibi farklı alanlarda başarılı bir şekilde uygulandığını ortaya koymuştur. Bu çalışma, Taguchi yönteminin EnergyPlus gibi simülasyon araçlarıyla entegrasyonunun, bina ölçeğinde sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedeflerine ulaşmada önemli bir avantaj sağladığını bir kez daha teyit etmektedir.

Çalışmanın literatüre en önemli katkılarından biri, farklı enerji tasarruf senaryolarının tüm yıl boyunca detaylı olarak analiz edilmesi, elde edilen verilerin istatistiksel olarak modellenmesi ve sonrasında çok kriterli karar verme sürecine entegre edilmesinin nadiren bir arada ele alındığı bir alanda bütüncül bir yaklaşım sunmasıdır. Bu tez çalışması, enerji, çevresel ve ekonomik kriterleri aynı çatı altında toplayarak çok boyutlu analiz yapması, simülasyon sonuçlarını regresyonla genelleyerek tüm kombinasyonları taraması ve nihai kararları MOORA ve TOPSIS gibi yöntemlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirmesiyle literatürdeki boşluğu doldurmaktadır. Bu, özellikle karmaşık ve çok kriterli karar problemlerinde rasyonel, sistematik ve izlenebilir çözümler üretmek açısından önemli bir ilerlemedir.

Bu çalışmada geliştirilen metodoloji ve elde edilen bulgular, bina sektöründeki tasarımcılar, mühendisler ve karar vericiler için önemli pratik çıkarımlar sağlamaktadır. Yöntem, mevcut yapıların enerji performansını iyileştirmeye yönelik çeşitli aktif ve pasif önlemlerin (dış cephe yalıtımı, çatı yalıtımı, zemin yalıtımı, saydam yüzey iyileştirmeleri, ısıtma sistemi değişiklikleri, LED aydınlatma, fotovoltaik sistemler) enerji, çevresel ve ekonomik etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirme imkanı sunmaktadır. Bu sayede, tek bir kritere odaklanmak yerine, maliyet, çevresel etki ve enerji tasarrufu gibi farklı hedefler arasında

denge kurularak optimum iyileştirme stratejileri belirlenebilir. Özellikle, DesignBuilder ve EnergyPlus gibi yaygın simülasyon yazılımları ile Minitab ve Python gibi istatistiksel analiz araçlarının entegrasyonu, metodolojinin sektör profesyonelleri tarafından kolayca benimsenebilir ve uygulanabilir olmasını sağlamaktadır. Geliştirilen bu yaklaşım enerji verimliliği odaklı tasarım ve yenileme projelerinde daha bilinçli ve veri tabanlı kararlar alınmasına yardımcı olacaktır. Çalışmanın esnek yapısı, karar vericinin önceliklerine ve ağırlık değişimlerine göre farklı senaryoların değerlendirilmesine olanak tanıyarak, her projeye özgü çözümlerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.





6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma, enerji, çevre ve ekonomik performans göstergelerini dikkate alarak mevcut bir yapının iyileştirilmesine yönelik karar destek sisteminin geliştirilmesini amaçlamıştır. Literatüre bakıldığında, yapı kabuğu ve enerji sistemlerine yönelik parametrelerin ve bu parametrelerin fazla sayıda farklı seviyelerinin olması nedeniyle yüzlerce hatta binlerce simülasyon gerçekleştirilmesi gerektiği görülmektedir. Bu durum, zaman ve maliyet açısından önemli bir yük getirmekte ayrıca hata payını da artırmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar çoğu zaman ya sezgisel yaklaşımlarla bazı kombinasyonları tercih etmekte ya da oldukça uzun bir analiz süreci sonunda karar verebilmektedir.

Çalışmanın metodolojisi yukarıda belirtilen bu sorunsala alternatif olarak sistematik bir karar destek modeli sunmayı hedeflemiştir. Bu bağlamda kurgulanan yöntem, Taguchi deney tasarımı, regresyon modelleme ve çok kriterli karar verme yöntemleri (MOORA) olarak üç ana bileşenin entegrasyonuna dayanmaktadır. Bu entegre yaklaşım, çok sayıda yapı kabuğu bileşeni (duvar, çatı, zemin, pencere) ve enerji sistemi (ısıtma, aydınlatma, yenilenebilir enerji) faktörlerinin farklı seviyelerdeki kombinasyonlarının enerji, çevresel ve ekonomik performanslarını sistematik bir şekilde analiz etmeyi sağlamıştır. Geleneksel tam faktöriyel tasarımların gerektirdiği yüksek deney sayısını (648 olası kombinasyon) Taguchi L36 ortogonal dizisi ile 36 deneye indirgeyerek zaman ve kaynak verimliliği elde edilmiştir. Simülasyonlar DesignBuilder ve EnergyPlus yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler Minitab ve Python (NumPy, Pandas, Itertools kütüphaneleri) ile analiz edilmiştir. Regresyon modelleri, deneysel olarak test edilmeyen kombinasyonlar için güvenilir tahminler yapılmasına olanak tanıyarak, ÇKKV yöntemleri ise enerji, çevresel ve ekonomik göstergelerin birlikte optimize edildiği optimum yapı bileşeni kombinasyonlarının belirlenmesini sağlamıştır. Ayrıca, farklı ağırlıklandırma senaryoları altında yapılan duyarlılık analizleri ile karar destek sisteminin güvenilirliği pekiştirilmiştir. Bu bütüncül yaklaşım, karar vericilere esnek, şeffaf ve veri tabanlı bir araç sunarak, enerji verimliliği odaklı tasarım ve yenileme projelerinde daha bilinçli kararlar alınmasına yardımcı olmayı hedeflemiştir.

Çalışmada, üçüncü bölümünde teorik olarak aktarılmış olan yaklaşım, dördüncü bölümde bir model üzerinde uygulanmıştır. Materyal ve yöntem bölümünde açıklanan yaklaşım “Sığ-

Jeotermal Kaynaklı Düşük Sıcaklıklı Bölgesel Isıtma Sistemi” isimli ERA-NET projesi kapsamında çalışılan Samsun Havza ilçesinde bulunan mevcut bir konut binası üzerinde adım adım uygulanmıştır. Bu doğrultuda öncelikle yapının enerji modeli oluşturulmuş ve iç mekan ölçüm verilerine göre kalibrasyonu yapılmıştır. Ardından çevresel, ekonomik ve enerjiye yönelik performans göstergeleri tanımlanarak yanıt değişkenleri belirlenmiştir. Yapı kabuğu ve enerji sistemlerine ait 7 faktör ve bunlara ait 2 ya da 3 seviyeden oluşan deney düzeni, Taguchi L36 ortogonal dizi ile planlanmıştır.

Taguchi L36 ortogonal dizisi kullanılarak oluşturulan deney matrisi, her bir deney senaryosu için yapı kabuğu elemanları ve enerji sistemi parametrelerinin çeşitli kombinasyonlarını sistematik bir şekilde belirlemiştir. Bu matris, DesignBuilder yazılımında simüle edilecek 36 farklı senaryonun temelini oluşturmuştur. Simülasyon sürecinde, her bir deney kombinasyonu için model parametreleri düzenli olarak güncellenmiş ve simülasyonlar bir yıllık periyodu kapsayan 8760 saatlik zaman diliminde gerçekleştirilmiştir. Dış iklim koşulları, kullanıcı davranış modelleri, iç yük profilleri ve bina geometrisi gibi kontrol değişkenleri sabit tutularak, yalnızca deneysel değişkenlerin (iyileştirme önlemleri) etkisi incelenmiştir. Her bir simülasyon senaryosu için, “Yıllık toplam enerji tüketimi”, “Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi”, “Yıllık enerji tasarrufu miktarı”, “Yıllık CO₂ emisyonu”, “Geri ödeme süresi”, “Ortalama yıllık yatırım getirisi”, “Fayda/Maliyet oranı” yanıt değişkenlerinin hesaplanmasını sağlayacak veriler elde edilmiştir.

Bu deneysel çalışma sonrasında ve S/N ve varyans (ANOVA) analizleri ile anlamlı faktörler belirlenerek her bir yanıt değişkeni için regresyon modelleri oluşturulmuş ve doğrulama testleriyle denklemlerin güvenilirliği sınanmıştır. Ardından 648 farklı kombinasyon bu denklemler aracılığıyla tahmin edilerek veri seti oluşturulmuştur. Bir çok kriterli karar verme yöntemi olan MOORA yardımıyla “Yıllık toplam enerji tüketimi”, “Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi”, “Yıllık enerji tasarrufu miktarı”, “Yıllık CO₂ emisyonu”, “Geri ödeme süresi”, “Ortalama yıllık yatırım getirisi”, “Fayda / Maliyet oranı” yanıt değişkenlerinin her biri bir karar kriteri olarak kabul edilerek farklı senaryolara göre en uygun kombinasyonlar belirlenmiştir. Duyarlılık analizleriyle ağırlık seçimlerinin etkisi gözlemlenmiştir. Tüm hesaplamalar Python programlama dili ile yapılmış ve kullanılan kodlara eklerde yer verilmiştir.

Taguchi yönteminin temel bileşenlerinden biri olan Sinyal-Gürültü (S/N) oranı analizleri, her bir yanıt değişkeni için optimum faktör seviyelerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Çalışmada, yıllık toplam enerji tüketimi, yıllık ısıtma enerjisi tüketimi ve yıllık CO₂ emisyonu için “Daha küçük daha iyidir” S/N oranı, yıllık enerji tasarrufu miktarı, ortalama yıllık yatırım getirisi ve fayda/maliyet oranı için ise “Daha büyük daha iyidir” S/N oranı kullanılmıştır. Analiz sonucunda her bir yanıt değişkeni için belirlenen en etkin faktör seviyesi kombinasyonları 648 kombinasyon arasındaki ilgili değişken sonuçları ile tam uyum göstermektedir. Bu bağlamda S/N analizleri tek kriterli analizlerde optimum kriter dizilimine sahip kombinasyonu tespit etme imkânı sunmaktadır. Her bir yanıt değişkeni için en etkili sistem tercihleri Çizelge 6.1’de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. S/N analizi sonuçlarına göre yanıt değişkenlerine ait en etkin kombinasyonlar

	Faktörler						
	A	B	C	D	E	F	G
Yanıt değişkeni	Aydınlatma	PV	Isıtma Sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
1. Yıllık toplam enerji tüketimi	LED	Var	Hava k. hibrit ısı pompası + ısıtmalı z.	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 15 cm	4+16+4 (Argon)
2. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi	Mevcut	Var	Hava k. hibrit ısı pompası + ısıtmalı z.	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 15 cm	4+16+4 (Argon)
3. Yıllık enerji tasarrufu miktarı	LED	Var	Hava k. hibrit ısı pompası + ısıtmalı z.	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 15 cm	4+16+4 (Argon)
4. Yıllık CO ₂ emisyonu	LED	Var	Hava k. hibrit ısı pompası + ısıtmalı z.	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 15 cm	4+16+4 (Argon)
5. Geri ödeme süresi	LED	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör sistemi	EPS 15 cm	Taş y. 8 cm	XPS 6 cm	4+16+4 (Argon)
6. Ort. yıllık yatırım getirisi	LED	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör sistemi	EPS 10 cm	Taş y. 8 cm	XPS 6 cm	4+9+4 (Hava)
7. Fayda /Maliyet oranı	LED	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör sistemi	EPS 10 cm	Taş y. 8 cm	XPS 6 cm	4+9+4 (Hava)

Gerçekleştirilen S/N (Sinyal/Gürültü) oranı analizleri sonucunda, bütün yanıt değişkenleri için faktörlerin görelî etkisi belirlenmiş ve bu etkilere göre en kritik tasarım parametreleri ortaya konmuştur. “Yıllık Toplam Enerji Tüketimi” açısından en yüksek etkiye sahip faktör aydınlatma (A) olarak belirlenmiş, bunu sırasıyla duvar yalıtımı (D) ve ısıtma sistemi (C) takip etmiştir. Bu bulgu, iç mekân elektrik yüklerini azaltmanın toplam enerji performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

“Yıllık Isıtma Enerjisi Tüketimi” değişkeninde ısıtma sistemi (C) belirleyici faktör olarak öne çıkmakta, bu sistemi duvar yalıtımı (D) ve pencere (G) faktörleri izlemektedir. Bu durum, ısıtma ihtiyacına yönelik sistem seçiminin ve ısı kayıplarını azaltan yapı kabuğu bileşenlerinin, ısıtma yüklerini minimize etmedeki rolünü vurgulamaktadır.

“Yıllık Enerji Tasarrufu” değişkeni, başta aydınlatma (A) ve ısıtma sistemi (C) olmak üzere duvar yalıtımı (D) ile de güçlü şekilde ilişkilidir. Bu da enerji etkin sistem ve kabuk iyileştirmelerinin birlikte ele alınmasının tasarruf potansiyelini artırdığını göstermektedir.

“Yıllık CO₂ Emisyonu” açısından en etkili faktörler aydınlatma (A) ve PV panel kullanımı (B) olmuştur. Bu sonuç, özellikle elektrik tüketimini azaltan ya da yenilenebilir kaynaklara yönelen sistem tercihleriyle çevresel etkilerin azaltılabileceğini desteklemektedir.

Ekonomik yanıt değişkenleri olan “Geri Ödeme Süresi”, “Ortalama Yıllık Getiri” ve “Maliyet/Fayda Oranı” en çok ısıtma sistemi (C) ile ilişkilidir. Bu faktörü aydınlatma (A) ve PV sistemi (B) takip etmektedir. Bu durum, sistem yatırım tercihlerinin ekonomik geri dönüşler üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak; S/N analiz bulguları, ısıtma sisteminin (C) enerji, ekonomik ve çevresel tüm performans kriterlerinde merkezi bir rol oynadığını; aydınlatma (A) ve PV panel (B) gibi sistem bileşenlerinin ise özellikle enerji verimliliği ve emisyon azaltımı açısından kritik etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Yapı kabuğu bileşenlerinden duvar (D), çatı (E), zemin (F) ve pencere (G) faktörleri ise özellikle enerji tüketimi ve tasarrufu üzerinde önemli katkılar sunmuştur.

Bir sonraki aşamada 36 deneyden elde edilen simülasyon verileri kullanılarak varyans analizi yapılmıştır. Böylece faktörlerin yanıt değişkenleri üzerindeki etkilerinden faydalanarak Çoklu Doğrusal Regresyon modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller kullanılarak deneysel olarak test edilmeyen 648 olası kombinasyonun tamamı için enerji, çevresel ve ekonomik performans değerlerinin güvenilir bir şekilde tahmin edilmesini sağlanmıştır. Regresyon modellerinin basitliği ve yorumlanabilirliği, her bir bağımsız değişkenin (yapı kabuğu bileşenleri ve enerji sistemleri) bağımlı değişkenler (enerji tüketimi, CO₂ emisyonu, geri ödeme süresi vb.) üzerindeki etkisinin doğrudan anlaşılmasına olanak tanımıştır. Modelin yüksek R-kare değerleri ve düşük hata oranları, tahminlerin

doğruluğunu ve güvenilirliğini teyit etmiştir. Bu sayede tasarım alanının tamamının analiz edilebilir hale getirilmesi ve potansiyel optimum çözümlerin daha geniş bir perspektiften değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır.

Her bir yanıt değişkenine ait regresyon modelinin doğrulama sonrası elde edilen hata yüzdeleri Çizelge 6.2’de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre regresyon modelleri istatistiksel olarak %5 güvenilirlik sınır koşulunu sağlamaktadır.

Çizelge 6.2. Her bir yanıt değişkenine ait regresyon modelinin hata yüzdeleri

Yanıt değişkeni	Hata yüzdesi
1. Yıllık toplam enerji tüketimi	0,45
2. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi	2,15
3. Yıllık enerji tasarrufu miktarı	0,4
4. Yıllık CO2 emisyonu	0,55
5. Geri ödeme süresi	3,62
6. Ortalama yıllık yatırım getirisi	2,81
7. Fayda/Maliyet oranı	2,49

Bir sonraki adımda regresyon modelleri kullanılarak hesaplanan 648 kombinasyona MOORA uygulanmıştır. Bu sayede enerji, çevresel ve ekonomik kriterler arasındaki potansiyel çelişkileri dikkate alarak, çok boyutlu optimum çözümlerin belirlenmesi sağlanmıştır. Özellikle MOORA yönteminin düşük işlem yükü, basit matematiksel yapısı ve yüksek güvenilirliği, geniş veri setlerinin değerlendirildiği mühendislik temelli çalışmalarda pratik bir avantaj sunmuştur.

Çalışmada yapılan duyarlılık analizleri, karar vericinin farklı kriterlere atfettiği ağırlıkların, nihai optimum çözüm üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymuştur. Bu analizler, karar verme sürecinin şeffaflığını artırmakta ve farklı karar vericilerin (tasarımcı, yatırımcı vb.) kendi önceliklerine en uygun çözümü seçebilmelerine fırsat tanımaktadır. Bu çerçevede yöntem sadece teknik bir optimizasyon değil, aynı zamanda stratejik bir karar destek aracı olarak değerlendirilebilir. Örneğin, enerji maliyetlerinin yüksek olduğu bir senaryoda enerji tasarrufuna daha fazla ağırlık verilirken, başlangıç yatırım bütçesinin kısıtlı olduğu bir

durumda geri ödeme süresine daha fazla odaklanılabilir. Bu esneklik, metodolojinin geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmasını sağlamaktadır.

Bu bağlamda çalışma kapsamında 3 farklı ağırlık senaryosu uygulanmıştır. Her bir senaryo sonucunda elde edilen en yüksek skora sahip faktör ve seviyelerinin fiziksel karşılıklarının kullanımı ile oluşan kombinasyonlar Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Farklı ağırlık senaryolarına ait optimum kombinasyonlar

Senaryo	Aydınlatma	PV panel	Isıtma Sistemi	Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
1. senaryo (%60 enerji, %10 çevresel, %30 ekonomik)	LED	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör sistemi	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 6 cm	4+16+4 (Argon)
2. senaryo (%30 enerji, %40 çevresel, %30 ekonomik)	LED	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör sistemi	EPS 15 cm	Taş y. 18 cm	XPS 6 cm	4+16+4 (Argon)
3. senaryo (%40 enerji, %10 çevresel, %50 ekonomik)	LED	Var	0,93 verimli y. kazan + radyatör sistemi	EPS 15 cm	Taş y. 8 cm	XPS 6 cm	4+16+4 (Argon)

Ayrıca, elde edilen optimum kombinasyonların enerji, çevresel ve ekonomik performans sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Mevcut bina performansı ile senaryolar arasındaki farklar Çizelge 6.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 6.4. Mevcut durum ve optimum senaryoların enerji, çevresel ve ekonomik performans sonuçları

	Yıllık Toplam Enerji Tüketimi	Yıllık Isıtma Enerjisi Tüketimi	Yıllık Enerji Tasarrufu Miktarı	Yıllık CO ₂ Emisyonu	Geri Ödeme Süresi	Ortalama Yıllık Yatırım Getirisi	Maliyet/Fayda Oranı
Mevcut durum	152228,37	97092,42	-	44300,752	-	-	-
1. senaryo (enerji odaklı)	77444,9	39658,9	74783,4	16426,24	8,525	11,228	2,24559
2. senaryo (çevresel odaklı)	77444,9	39658,9	74783,4	16426,24	8,525	11,228	2,24559
3. senaryo (ekonomik odaklı)	79653	41834,8	72575,3	16881,19	7,79	11,609	2,32

Bulgular, enerji ve çevresel odaklı senaryoların mevcut duruma kıyasla yıllık toplam enerji tüketimini yaklaşık %49, CO₂ emisyonlarını ise yaklaşık %63 oranında azalttığını göstermektedir. Ekonomik performans göstergeleri açısından bu senaryolarda geri ödeme süresi 8,5 yıl, fayda/maliyet oranı 2,24 ve yıllık yatırım getirisi %11,22 olarak gerçekleşmiştir. Ekonomik odaklı senaryoda ise enerji ve emisyon kazanımları biraz daha düşük olmakla birlikte geri ödeme süresi 7,8 yıla inmiş, fayda/maliyet oranı 2,32 ve yıllık yatırım getirisi %11,6 olmuştur.

Bu sonuçlar, optimum çözümün karar vericinin önceliklerine göre farklılaşabileceğini göstermektedir. Enerji verimliliği ve çevresel fayda öncelikli olduğunda enerji/çevresel odaklı senaryolar daha uygun bir alternatif sunarken, yatırımın geri dönüş hızının öncelikli olduğu durumlarda ekonomik odaklı senaryo öne çıkmaktadır. Geliştirilen metodoloji bu bağlamda farklı önceliklere uygun esnek ve uygulanabilir çözümler sunmaktadır.

Elde edilen bulgular, enerji verimliliği iyileştirmelerinin çevresel (CO₂ emisyonları) ve ekonomik (geri ödeme süresi, ortalama yıllık yatırım getirisi, fayda/maliyet oranı) boyutlardaki etkileşimleri ile ilgili önemli bulgular sunmaktadır. Değerlendirmeler enerji tasarrufu sağlayan önlemlerin genellikle CO₂ emisyonlarını da azalttığını göstermiştir. Ancak ekonomik göstergeler açısından aynı düzeyde doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır.

Sonuç olarak, yıllık toplam enerji tüketimindeki azalma, doğrudan yıllık CO₂ emisyonlarında da azalmaya yol açmıştır. Bu, enerji verimliliği iyileştirmelerinin iklim değişikliğiyle mücadelede doğrudan ve ölçülebilir bir fayda sağladığını teyit etmektedir. Yüksek enerji tasarrufu sağlayan bazı kombinasyonların, daha yüksek başlangıç yatırım maliyetleri nedeniyle daha uzun geri ödeme sürelerine sahip olabileceği veya ortalama yıllık yatırım getirisinin veya fayda/maliyet oranının düşük kalabileceği gözlemlenmiştir. Bu durum, karar vericilerin sadece enerji tasarrufuna odaklanmak yerine, yatırım maliyeti ve geri ödeme süresi gibi ekonomik faktörleri de dikkate alması gerektiğini göstermektedir. Örneğin, üçüncü seviye yalıtım gibi yüksek performanslı ancak maliyetli çözümlerin, ekonomik açıdan her zaman en cazip seçenek olmayabileceği ortaya konmuştur. Bu durum optimum çözümün her zaman en yüksek enerji tasarrufunu sağlayan değil, aynı zamanda ekonomik olarak da uygulanabilir olan kombinasyonlar arasından seçilebileceğini göstermektedir.

Son aşamada, TOPSIS ile yapılan paralel analizler, MOORA ile elde edilen sonuçların tutarlılığını teyit ederek, önerilen kombinasyonların farklı ÇKKV yaklaşımları altında da yüksek performans gösterdiğini ve dolayısıyla daha güvenilir olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, karar destek sisteminin sağlamlığını ve farklı değerlendirme bakış açılarına karşı dayanıklılığını vurgulamaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, çalışmanın başında ortaya konulan;

“Enerji etkin bina iyileştirme sürecinde, yapı kabuğu ve enerji sistemlerine ait çok sayıda faktör ve seviyeden oluşan alternatiflerin, hem enerji hem de çevresel ve ekonomik performans kriterleri açısından birlikte değerlendirilmesini sağlayacak pratik, güvenilir ve uygulanabilir bir karar destek modeli geliştirilebilir mi?” sorusu, elde edilen bulgular ışığında olumlu şekilde yanıtlanmıştır. Geliştirilen bütünsel yaklaşım, Taguchi deney tasarımı, enerji simülasyonları, regresyon modelleme ve çok kriterli karar verme yöntemlerinin bir arada uygulanmasıyla, çok sayıda alternatif senaryo içinden enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik uygunluk bakımından en uygun kombinasyonların düşük analiz yüküyle belirlenmesini mümkün kılmıştır.

Bu kapsamda, aynı şekilde çalışmanın başında kurulan;

“Enerji etkin iyileştirme önlemlerinin (yapı kabuğu ve enerji sistemi iyileştirmeleri) mevcut binalara uygulanması, yıllık enerji tüketimini ve çevresel etkileri önemli ölçüde azaltırken, aynı zamanda ekonomik olarak da uygulanabilir çözümler sunarak bina performansını ve sürdürülebilirliğini artıracaktır. Taguchi deney tasarımı, bina enerji simülasyonları, regresyon modelleme ve çok kriterli karar verme yöntemlerinin bütünleşik olarak uygulanmasıyla, enerji, çevresel ve ekonomik hedefleri eş zamanlı olarak optimize eden en uygun iyileştirme kombinasyonları daha az sayıda analizle güvenilir şekilde belirlenebilir.” hipotezi de doğrulanmış, yapı kabuğu ve enerji sistemlerine yönelik iyileştirme önlemlerinin mevcut binalara uygulanmasının, yıllık enerji tüketimini ve çevresel etkileri önemli ölçüde azalttığı, aynı zamanda ekonomik olarak uygulanabilir çözümler sunduğu ortaya konulmuştur. Taguchi deney tasarımı, enerji simülasyonları, regresyon modelleme ve çok kriterli karar verme yöntemlerinin bütünleşik olarak kullanılmasıyla enerji, çevresel ve ekonomik hedefleri eş zamanlı olarak optimize eden iyileştirme kombinasyonları daha az sayıda analizle güvenilir biçimde belirlenebilmiştir. Bu sonuçlar, söz konusu hipotezin geçerliliğini desteklemekte ve önerilen modelin sürdürülebilir bina iyileştirmeleri için etkili bir karar aracı olduğunu göstermektedir.

Sınırlılıklar ve gelecek çalışmalar için öneriler

Bu çalışmada, kapsamlı bir metodoloji sunulmaya çalışılsa da bazı sınırlamalar söz konusu olmuştur. Çalışmada kullanılan ekonomik analiz yöntemleri (geri ödeme süresi, ortalama yıllık yatırım getirisi, fayda/maliyet oranı) paranın zaman değerini göz önüne almayan statik yöntemlerdir.

Türkiye gibi ekonomisi dalgalanmalara açık ülkelerde uzun vadeli ekonomik tahminlerin zorluğu göz önüne alındığında bu bir tercih olsa da, daha dinamik ekonomik analiz yöntemlerinin (örn. net bugünkü değer, iç karlılık/verim oranı) entegrasyonu, ekonomik değerlendirmelerin sağlamlığını artırabilir. Gelecek çalışmalarda, ekonomik analizlerin dinamik yöntemlerle desteklenmesi ve belirsizlik analizlerinin dahil edilmesi, sonuçların daha gerçekçi ve kapsamlı olmasını sağlayacaktır.

Ek olarak, çalışmada CO₂ emisyon hesaplamaları yalnızca operasyonel enerji tüketimine (elektrik ve doğalgaz) dayalı olarak yapılmıştır. Bu yaklaşım, yapı malzemeleri ve inşaat süreci gibi yaşam döngüsünün diğer aşamalarını kapsamamaktadır. Bu nedenle çevresel

etkinin sınırlı bir bakış açısıyla değerlendirildiği söylenebilir. Gelecek çalışmalarda, yapı bileşenlerinin ve sistemlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yöntemiyle analiz edilmesi, daha bütüncül ve sürdürülebilir kararlar alınmasına katkı sağlayacaktır.

Çalışmada belirlenen faktör ve faktör seviyeleri, piyasa araştırmalarına ve TS 825, 2024 standardına dayanmaktadır. Farklı iklim bölgeleri veya bina tipolojileri için ek faktörlerin veya farklı seviyelerin değerlendirilmesi, metodolojinin genellenebilirliğini artırabilir. Kullanıcı davranışlarının enerji tüketimi üzerindeki etkisi, bu çalışmada sabit tutulan bir kontrol değişkeni olsa da, gelecek araştırmalarda kullanıcı davranış modellerinin dinamik olarak entegrasyonu, simülasyonların ve optimizasyon sonuçlarının doğruluğunu daha da artırabilir.

Gelecek çalışmalar kapsamında, bu tezde önerilen bütünlük karar destek yönteminin bir algoritma mantığı ile otomatikleştirilmesi ve kullanıcı dostu bir ara yüz aracılığıyla erişilebilir hale getirilmesi önerilmektedir. Böyle bir yazılım altyapısı, farklı bina tipleri ve iklim bölgeleri için hızlı, esnek ve sistematik analiz yapılmasına olanak sağlayarak hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar açısından karar verme süreçlerini kolaylaştıracaktır. Bu kapsamda geliştirilecek bir ara yüz ile kullanıcılar, faktör ve seviyeleri tanımlayabilecek, simülasyon verilerini yükleyebilecek, regresyon modellerini sisteme entegre edebilecek ve çok kriterli karar verme analizlerini grafiksel olarak takip edebilecektir. Böylece önerilen yaklaşım, tekrarlanabilir ve ölçeklenebilir bir dijital karar destek aracına dönüştürülebilecektir. Son olarak, yapay zeka ve makine öğrenmesi tekniklerinin regresyon modelleme ve optimizasyon süreçlerine derinlemesine entegrasyonu, daha hızlı ve daha bütünlük tasarım modellerinin geliştirilmesine olanak tanıyabilir. Bu tür yaklaşımlar, özellikle büyük veri setleriyle çalışırken ve karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri yakalamada önemli potansiyeller sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Alafzadeh, M., Moubed, M. ve Haghighat, S. (2024). Indoor temperature and energy optimization using Energyplus and Taguchi method: A case study. *Energy Equipment and Systems*, 12 (2), 91–99.
- Alajmi, A. (2012). Energy audit of an educational building in a hot summer climate. *Energy and Buildings*, 47, 122–130.
- Alghamdi, S., Tang, W., Kanjanabootra, S. ve Alterman, D. (2023). Optimal configuration of architectural building design parameters for higher educational buildings. *Energy Reports*, 10, 1925–1942.
- Ali, U., Bano, S., Shamsi, M. H., Sood, D., Hoare, C., Zuo, W., Hewitt, N. ve O'Donnell, J. (2024). Urban building energy performance prediction and retrofit analysis using data-driven machine learning approach. *Energy and Buildings*, 303, 113768.
- Ankenman, B. E. (1999). Design of experiments with Two-and Four-level factors. *Journal of Quality Technology*, 31 (4), 363–375.
- ASHRAE. (2014). Measurement of energy, demand, and water savings. *ASHRAE Guide 14*, 1-150.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M. ve Vanoli, G. P. (2017). Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance. *Energy and Buildings*, 144, 303-319.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mastellone, M., Mauro, G. M., ve Vanoli, G. P. (2020). The role of the occupant behavior in affecting the feasibility of energy refurbishment of residential buildings: Typical effective retrofits compromised by typical wrong habits. *Energy and Buildings*, 223, 110217.
- Avrupa Birliği. (1993). Enerji verimliliğini artırarak karbondioksit emisyonlarını sınırlandırılması, 13 Eylül 1993 tarih ve 93/76/EEC sayılı Direktif (SAVE Direktifi). *Avrupa Birliği Resmi Gazetesi*, L 237, 28-30. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:31993L0076> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Avrupa Birliği. (2002). Binalarda Enerji Performansı üzerine, 16 Aralık 2002 tarih ve 2002/91/EC sayılı Direktif. *Avrupa Birliği Resmi Gazetesi*, L 1, 65-71. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0071:en:PDF> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Avrupa Birliği. (2010). Binalarda Enerji Performansına ilişkin 19 Mayıs 2010 tarih ve 2010/31/EU sayılı Direktif. *Avrupa Birliği Resmi Gazetesi*, L 153, 13-35. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:en:PDF> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.

- Avrupa Birliği. (2012). Enerji Verimliliğine ilişkin 25 Ekim 2012 tarih ve 2012/27/EU sayılı Direktif. *Avrupa Birliği Resmi Gazetesi*, L 315, 1-56. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:en:PDF> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Avrupa Birliği. (2018a). Binalarda Enerji Performansına ilişkin 30 Mayıs 2018 tarih ve 2018/844/EU sayılı Direktif. *Avrupa Birliği Resmi Gazetesi*, L 156, 75-91. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Avrupa Birliği. (2023). Enerji Verimliliğine ilişkin 13 Eylöl 2023 tarih ve 2023/1791/EU sayılı Direktif. *Avrupa Birliği Resmi Gazetesi*, L 231/1 URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L1791&qid=1750399730123> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Avrupa Birliği. (2024). Binalarda Enerji Performansına ilişkin 24 Nisan 2024 tarih ve 2024/1275/EU sayılı Direktif. *Avrupa Birliği Resmi Gazetesi*, L 136, 1-82 URL: <https://eurlex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Barlow, S. ve Fiala, D. (2007). Occupant comfort in UK offices—How adaptive comfort theories might influence future low energy office refurbishment strategies. *Energy and Buildings*, 39 (7), 837–846.
- Bayraktar, M., Schulze, T. ve Yılmaz, Z. (2009). *Binalarda Enerji Simulasyonları için Veri Toplama Listeleri Aracılığıyla Veri Yönetimi Modelinin Oluşturulması*. IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
- Bayraktar, ř. ve şentürk, E. (2022). Multi-criteria decision-making applications in conventional and unconventional machining techniques. *Advanced Manufacturing Methods*: CRC Press, 57–82.
- Biserni, C., Valdiserri, P., D’Orazio, D., ve Garai, M. (2018). Energy retrofitting strategies and economic assessments: The case study of a residential complex using utility bills. *Energies*, 11(8), 2055.
- Bjelland, D., Brozovsky, J.ve Hrynyszyn, B. D. (2024). Systematic review: Upscaling energy retrofitting to the multi-building level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 198, 114402.
- Brunelli, C., Castellani, F., Garinei, A., Biondi, L. ve Marconi, M. (2016). A procedure to perform multi-objective optimization for sustainable design of buildings. *Energies*, 9(11), 915.
- Chanda, P. R.ve Biswas, A. (2024). Carving a niche in building energy using modern vernacular house with passive wall materials - A multi-criteria decision-making framework. *Energy*, 312, 133539.

- Chen, W.-L., Currao, G., Li, Y.-H. ve Kao, C.-C. (2023). Employing Taguchi method to optimize the performance of a microscale combined heat and power system with Stirling engine and thermophotovoltaic array. *Energy*, 270, 126897.
- Chiu, S.-H., Chiang, C.-Y., Lee, S.-K. ve Chen, C.-Y. (2025). Development of a Location-based Rapid Building Performance Simulation Tool Combined with Design of Experiment Method for Energy Efficiency Enhancement in Existing Healthcare Building Retrofitting. *Sensors & Materials*, 37(4), 1615–1638.
- Chlela, F., Husaunndee, A., Riederer, P. ve Inard, C. (2007). *A statistical method to improve the energy efficiency of an office building*. Building Simulation 2007 Conference, In Beijing, China.
- Chong, A., Gu, Y. ve Jia, H. (2021). Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. *Energy and Buildings*, 253, 111533.
- Coakley, D., Raftery, P. ve Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123–141.
- Coşkun, A. (2024). Bina cephe görünümü. Yazarın arşivi.
- Dal, A. Ö., Tomrukçu, G., Kızıldağ, H., Avgan, G., Ashrafiyan, T., Özdemir, E. K. ve Sağlam, N. G. (2023, 26–29 Nisan). *Bina Enerji Performans Analizi; Simülasyon, Doğrulama ve Kalibrasyon Yöntemleri Üzerine Bir Araştırma*. 15. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E. ve Kolokotsa, D. (2008). Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, 40 (9), 1747–1754.
- Draper, N. R. ve Beggs, W. J. (1971). Errors in the factor levels and experimental design. *The Annals of Mathematical Statistics*, 42(1), 46–58.
- Ekici, B. (2022). Towards Self-Sufficient High-Rises Performance Optimisation using Artificial Intelligence. *A+BE Architecture and the Built Environment*, 10, 1–306.
- Fabrizio, E. ve Monetti, V. (2015). Methodologies and advancements in the calibration of building energy models. *Energies*, 8 (4), 2548–2574.
- Gedik, T., Akyüz, K. C. ve Akyüz, İ. (2005). Yatırım Projelerinin Hazırlanması ve Değerlendirilmesi (İç Karlılık Oranı ve Net Bugünkü Değer Yöntemlerinin İncelenmesi). *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 7 (7), 51–61.
- Gram-Hanssen, K. (2014). Existing buildings–Users, renovations and energy policy. *Renewable Energy*, 61, 136–140.
- Grossi, F., Ge, H., Zmeureanu, R. ve Baba, F. (2024). Assessing the effectiveness of building retrofits in reducing GHG emissions: A Canadian school case study. *Journal of Building Engineering*, 91, 109622.

- Hafezalkotob, A., Hafezalkotob, A., Liao, H. ve Herrera, F. (2019). An overview of MULTIMOORA for multi-criteria decision-making: Theory, developments, applications, and challenges. *Information Fusion*, 51, 145–177.
- Hardy, M. A. (1993). *Regression with dummy variables* (Quantitative Applications in the Social Sciences, No. 93). Newbury Park: Sage Publications, 12-19.
- Harris, J., Anderson, J. ve Shafron, W. (2000). Investment in energy efficiency: a survey of Australian firms. *Energy policy*, 28 (12), 867–876.
- Hekimoğlu, B., Altındağ, M. ve Demirbaş, A. R. (2007). *Samsun ilinin fiziki durumu ve avantajları* (Samsun Tarım İl Müdürlüğü Yayını). T.C. Samsun Valiliği, Tarım İl Müdürlüğü. URL: https://samsun.tarimorman.gov.tr/Belgeler/Yayinlar/Kitaplarimiz/samsun_ilinin_fiziki_durumu_ve_avantajlari.pdf Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Hensen, J. (2003). Simulating building performance: just how useful is it? *Rehva Journal*, 3 (4), 18–24.
- Hisam, M. W., Dar, A. A., Elrasheed, M. O., Khan, M. S., Gera, R. ve Azad, I. (2024). The versatility of the Taguchi method: Optimizing experiments across diverse disciplines. *Journal of Statistical Theory and Applications*, 23 (4), 365–389.
- IPMVP. (2002). *International performance measurement and verification protocol: Concepts and options for determining energy and water savings (Vol. I)*. Efficiency Valuation Organization.
- İnternet: Avrupa Birliği. (2022b). Minimum Energy Performance Standards (MEPS) in the Residential Sector. URL: <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/publications-other-work/publications/minimum-energy-performance-standards-meps-residential-sector> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Avrupa Komisyonu. (2024a). 2050 long-term strategy. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Avrupa Komisyonu. (2020b). Energy Performance Certificates. URL: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2016-11/enerperfcertificates_0.pdf Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Avrupa Komisyonu. (2019). *Avrupa Yeşil Mutabakatı*. COM(2019) 640 final. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Avrupa Komisyonu. (2020a). *Yenileme Dalgası: Avrupa için binaların çevresel ayak izini azaltma*. COM(2020) 662 final. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0662> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Avrupa Komisyonu. (2021). *55'e Uyum (Fit for 55) Paketi*. COM(2021) 550 final. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.

- İnternet: Avrupa Komisyonu. (2022). *REPowerEU Planı*. COM(2022) 230 final. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52022DC0230> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Avrupa Komisyonu. (2024b). National energy and climate plans. URL: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-energy-and-climate-plans_en. Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Avrupa Komisyonu. (2025). Key facts on energy and EU buildings. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en?utm_source Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: CIBSE, Guide. F. (2012). Energy Efficiency in Buildings. *The Chartered Institution of Building Services Engineers* URL: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/8883/1/42.pdf> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: ÇŞB. (2015). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. *İzleme ve Raporlama Tebliği Sektörel Hesaplama Örnekleri*. URL: https://webdosya.csb.gov.tr/db/destek/icerikler/sektorel_hesaplama_ornekler--20191127114542.pdf Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: ÇŞİB. (2025). Çevre Şehircilik ve İklim Bakanlığı. *2025 Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları*. URL: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/2025-yili-b-r-m-f-yatlari-20250117121853.pdf> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: ETBK. (2024). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. URL: <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Elektrozirve, (2025). URL: <https://electrozirve.com/1-kwh-elektrik-fiyati-2025te-ne-kadar/>. Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: IEA. (2023). International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/reports/empowering-urban-energy-transitions/executive-summary?utm_source Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: IICEC. (2025). Istanbul International Center for Energy and Climate. *Türkiye Enerji Verimliliği Görünümü* URL: https://iicec.sabanciuniv.edu/sites/iicec.sabanciuniv.edu/files/inline-files/IICEC_TEOO_25.pdf?utm_source Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: IPCC. (2022). Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-9/?utm_source Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.

- İnternet: ISICAM. (2025). 07.04.2025 Tarihli Isıcam Fiyat Listesi. URL: <http://www.yasasan.com.tr/db/liste/Is%C4%B1cam.pdf> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Minitab Support. (2023). Taguchi designs. URL: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Samgaz, (2025). URL: <https://www.samgaz.com.tr/>. Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi. (2025). Türkiye Enerji Dönüşümü Görünümü 2024. URL: <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2025/04/SHURA-EDM-Turkiye-Enerji-Donusumu-Gorunumu-Raporu-16.04.2025-1.pdf> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Unal, R. ve Dean, E. B. (1990). *Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview*. 1991 Annual conference of the international society of parametric analysts. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2974374> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- İnternet: Weather Spark. (2025). Havza Bölgesinde Yıl Boyu İklim ve Hava Durumu. URL: https://tr.weatherspark.com/y/99322/Havza-T%C3%BCrkiye-Ortalama-Hava-Durumu-Y%C4%B1l-Boyunca#google_vignette Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Jakob, M. (2006). Marginal costs and co-benefits of energy efficiency investments: The case of the Swiss residential sector. *Energy policy*, 34(2), 172-187.
- Kacker, R. N., Lagergren, E. S. ve Filliben, J. J. (1991). Taguchi's orthogonal arrays are classical designs of experiments. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 96 (5), 577.
- Kaklauskas, A., Zavadskas, E. K. ve Raslanas, S. (2005). Multivariant design and multiple criteria analysis of building refurbishments. *Energy and Buildings*, 37 (4), 361–372.
- Kangalli Uyar, S. G., Ozbay, B. K. ve Dal, B. (2025). Interpretable building energy performance prediction using XGBoost Quantile Regression. *Energy and Buildings*, 340, 115815.
- Kapur, K. C. ve Chen, G. (1988). Signal-to-noise ratio development for quality engineering. *Quality and Reliability Engineering International*, 4 (2), 133–141.
- Krarti, M. (2020). *Energy audit of building systems: an engineering approach*. Third Edition (3rd ed.). CRC press. 200-240.
- Lamberts, R. ve Hensen, J. L. (2011). *Building performance simulation for design and operation*. London, UK: Spoon Press. 400-480.

- Li, M., Wang, Z., Chang, H., Wang, Z. ve Guo, J. (2024). A novel multi-objective generative design approach for sustainable building using multi-task learning (ANN) integration. *Applied Energy*, 376, 124220.
- Li, P., Cheng, J., Yang, Y., Yin, H. ve Zang, N. (2024). Research on multi-objective optimization configuration of solar ground source heat pump system using data-driven approach. *Energy*, 313, 133793.
- Li, X., Lin, M., Jiang, M., Jim, C. Y., Liu, K. ve Tserng, H. (2024). BIM and Orthogonal Test Methods to Optimize the Energy Consumption of Green Buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*, 30 (8), 670–690.
- Lin, W. ve Ma, Z. (2016). Using Taguchi-Fibonacci search method to optimize phase change materials enhanced buildings with integrated solar photovoltaic thermal collectors. *Energy*, 106, 23–37.
- Liu, S.-T. (2017, 27-30 Haziran). *An application of fuzzy signal-to-noise ratio to the assessment of manufacturing processes*. Advances in Artificial Intelligence: From Theory to Practice: 30th International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, IEA/AIE 2017, Arras, Fransa, Proceedings, Part I 30, 283–288.
- Lozinsky, C. H., Casquero-Modrego, N., ve Walker, I. S. (2025). The health and indoor environmental quality impacts of residential building envelope retrofits: A literature review. *Building and Environment*, 270, 112568.
- Ma, Z., Cooper, P., Daly, D. ve Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 55, 889–902.
- Mata, É., Johnsson, F. (2017). Cost-effectiveness of retrofitting Swedish buildings. C.-G. G. F. Pacheco-Torgal, B. P. Jelle, G. P. Vanoli, N. Bianco ve J. Kurnitski (Ed.), *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting*: Elsevier, 343–362.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, 25-478.
- Niemelä, T., Kosonen, R. ve Jokisalo, J. (2017). Energy performance and environmental impact analysis of cost-optimal renovation solutions of large panel apartment buildings in Finland. *Sustainable cities and society*, 32, 9-30.
- Önay, O. (2015). *Operasyonel, Yönetmel ve Stratejik Problemlerin Çözümünde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri*. Bursa: Dora. 75-200.
- Papineau, M., Rivers, N. ve Yassin, K. (2025). Household benefits from energy efficiency retrofits: Implications for net zero housing policy. *Energy Economics*, 143, 108245.
- Piccardo, C. ve Gustavsson, L. (2023). Deep energy retrofits using different retrofit materials under different scenarios: Life cycle cost and primary energy implications. *Energy*, 281, 128131.

- Pombo, O., Rivela, B. ve Neila, J. (2016). The challenge of sustainable building renovation: Assessment of current criteria and future outlook [Review]. *Journal of Cleaner Production*, 123, 88-100.
- Ramos Ruiz, G. ve Fernandez Bandera, C. (2017). Validation of calibrated energy models: Common errors. *Energies*, 10 (10), 1587.
- Razzaq, I., Amjad, M., Qamar, A., Asim, M., Ishfaq, K., Razzaq, A. ve Mawra, K. (2023). Reduction in energy consumption and CO2 emissions by retrofitting an existing building to a net zero energy building for the implementation of SDGs 7 and 13. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1028793.
- Reddy, T. A., Maor, I., Jian, S. ve Panjapornporn, C. (2006). Procedures for reconciling computer-calculated results with measured energy data. *ASHRAE research project*, 1051, 1–60.
- Reddy, T. A., Maor, I. ve Panjapornpon, C. (2007). Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data—Part I: General methodology (RP-1051). *Hvac&R Research*, 13 (2), 221–241.
- Resmi Gazete. (2007). Enerji Verimliliği Kanunu. *Resmi Gazete*, 2 Mayıs 2007, Sayı: 26510, Kanun No: 5627. URL: https://www5.tbmm.gov.tr/tutanaklar/KANUNLAR_KARARLAR/kanuntbmmc091/kanuntbmmc091/kanuntbmmc09105627.pdf Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Resmi Gazete. (2008). Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği. *Resmi Gazete*, 5 Aralık 2008, Sayı: 27075.
- Resmi Gazete. (2021). Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. *Resmi Gazete*, 7 Ocak 2021, Sayı: 31357.
- Robertson, J., Polly, B. ve Collis, J. (2013). *Evaluation of automated model calibration techniques for residential building energy simulation* (NREL/TP-5500-60127). National Renewable Energy Laboratory. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/60127.pdf> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Romani, Z., Draoui, A. ve Allard, F. (2022). Metamodeling and multicriteria analysis for sustainable and passive residential building refurbishment: A case study of French housing stock. *Building Simulation*, 15 (3), 453–472.
- Sadeghifam, A. N., Meynagh, M. M., Tabatabaee, S., Mahdiyar, A., Memari, A. ve Ismail, S. (2019). Assessment of the building components in the energy efficient design of tropical residential buildings: An application of BIM and statistical Taguchi method. *Energy*, 188, 116080.
- Santin, O. G., Itard, L. ve Visscher, H. (2009). The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings*, 41 (11), 1223–1232.

- Sari, T. ve Timor, M. (2015). Tedarikçi seçiminde ANP, TAGUCHI VE TOPSIS yöntemleri ile otomotiv sektöründe bir uygulama. *Kafkas University. Faculty of Economics and Administrative Sciences. Journal*, 6 (10), 281.
- Sarmas, E., Marinakis, V. ve Doukas, H. (2025). Artificial Intelligence for Energy Systems: Driving Intelligent, Flexible and Optimal Energy Management. *Learning and Analytics in Intelligent Systems*, 46, 1–266.
- Schwartz, Y., Raslan, R. ve Mumovic, D. (2016). Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study. *Energy*, 97, 58-68.
- Seok, H.-T., Jo, J.-H. ve Kim, K.-W. (2009). Establishing the design process of double-skin façade elements through design parameter analysis. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 8 (1), 251–258.
- Shaikh, Z. P. (2025). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) in Organizations: Conceptualization of Theory and Methods. S. Aouadni ve I. Aouadni (Eds.), *Recent Theories and Applications for Multi-Criteria Decision-Making*. Hershey, PA, USA: IGI Global Scientific Publishing, 151–180.
- Sönmez, N. ve Maçka Kalfa, S. (2022). Avrupa Birliği Binaların Enerji Performansı Direktifi Bağlamında Üye Ülkelerin Yaklaşık Sıfır Enerji Bina Yaklaşımları ve Türkiye’de Mevcut Durum Analizi. *Yapı*, 474, 60–65.
- Storcz, T., Várady, G., Kistelegdi, I. ve Ercsey, Z. (2023). Regression Models and Shape Descriptors for Building Energy Demand and Comfort Estimation. *Energies*, 16 (16), 5896.
- Sun, X., Gou, Z. ve Lau, S. S. Y. (2018). Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building. *Journal of Cleaner Production*, 183, 35-45.
- Taguchi, G., Chowdhury, S. ve Wu, Y. (2005). *Taguchi's quality engineering handbook*. John Wiley Sons. 56-123.
- Taherdoost, H. ve Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, 3 (1), 77–87.
- Taneja, O. (2011). *Measures for maintaining low energy use in commercial buildings over their life-cycle*. ASHRAE Winter Conference, Las Vegas, NV 525.
- Tronchin, L., Manfren, M. ve Nastasi, B. (2018). Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies – A critical analysis of possible paths of integration in the built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 341–353.
- Vesterberg, J. (2014). *A regression approach for assessment of building energy performance*. Doktora Tezi, Umeå Üniversitesi, İsveç. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:748782/FULLTEXT01.pdf> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025

- Wang, S. ve Ma, Z. (2008). Supervisory and optimal control of building HVAC systems: A review. *Hvac&R Research*, 14 (1), 3–32.
- Webster, L., Bradford, J., Sartor, D., Shonder, J., Atkin, E., Dunnivant, S., Frank, D., Franconi, E., Jump, D ve Schiller, S. (2015). *M&v guidelines: measurement and verification for performance-based contracts*. US Department of Energy, 4-20.
- Wu, Z., Wang, B. ve Xia, X. (2016). Large-scale building energy efficiency retrofit: Concept, model and control. *Energy*, 109, 456–465.
- Xing, Y., Hewitt, N. ve Griffiths, P. (2011). Zero carbon buildings refurbishment—A Hierarchical pathway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (6), 3229–3236.
- Xu, P. (2012). *A model for sustainable building energy efficiency retrofit (BEER) using energy performance contracting (EPC) mechanism for hotel buildings in China*. Doktora Tezi, Polytechnic University, Hong Kong.
- Yi, H., Srinivasan, R. S. ve Braham, W. W. (2015). An integrated energy–emergy approach to building form optimization: Use of EnergyPlus, emergy analysis and Taguchi-regression method. *Building and Environment*, 84, 89–104.
- Yohanis, Y. G. (2012). Domestic energy use and householders' energy behaviour. *Energy policy*, 41, 654–665.
- Yuce, B. E., Nielsen, P. V. ve Wargocki, P. (2022). The use of Taguchi, ANOVA, and GRA methods to optimize CFD analyses of ventilation performance in buildings. *Building and Environment*, 225, 109587.
- Zhang, S., Ma, M., Zhou, N. ve Yan, J. (2024). GLOBUS: Global building renovation potential by 2070. *arXiv preprint arXiv:2406.04133*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2406.04133> Son Erişim Tarihi: 10.06.2025.
- Zheng, Y. ve Wang, D. (2023). *Multi-criteria decision making and recommender systems*. Companion Proceedings of the 28th International Conference on Intelligent User Interfaces, Conference, 181–184.
- Zuhaib, S., Hajdukiewicz, M. ve Goggins, J. (2019). Application of a staged automated calibration methodology to a partially-retrofitted university building energy model. *Journal of Building Engineering*, 26, 100866.



EK-1. Mevcut enerji simülasyon raporu

Report: Annual Building Utility Performance Summary

For: Entire Facility

Timestamp: 2025-06-07 21:42:34

Values gathered over 8760.00 hours

Site and Source Energy

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m2]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m2]
Total Site Energy	152228.37	142.84	182.20
Net Site Energy	152228.37	142.84	182.20
Total Source Energy	529900.45	497.22	634.23
Net Source Energy	529900.45	497.22	634.23

Site to Source Energy Conversion Factors

	Site=>Source Conversion Factor
Electricity	3.167
Natural Gas	1.084
District Cooling	1.056
District Heating	3.613
Steam	0.250
Gasoline	1.050
Diesel	1.050
Coal	1.050
Fuel Oil #1	1.050
Fuel Oil #2	1.050
Propane	1.050
Other Fuel 1	1.000
Other Fuel 2	1.000

EK-1. (devam) Mevcut enerji simülasyon raporu

Building Area

	Area [m2]
Total Building Area	1065.73
Net Conditioned Building Area	835.50
Unconditioned Building Area	230.23

End Uses

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	97092.42	0.00
Cooling	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	33394.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	11754.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	9987.16	156.39
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	45148.80	0.00	0.00	0.00	107079.58	156.39

Note: District heat appears to be the principal heating source based on energy usage.

EK-1. (devam) Mevcut enerji simülasyon raporu

Normalized Metrics Utility Use Per Conditioned Floor Area

	Electricity Intensity [kWh/m2]	Natural Gas Intensity [kWh/m2]	Additional Fuel Intensity [kWh/m2]	District Cooling Intensity [kWh/m2]	District Heating Intensity [kWh/m2]	Water Intensity [m3/m2]
Lighting	39.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	0.00	0.00	0.00	0.00	128.16	0.19
Other	14.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	54.04	0.00	0.00	0.00	128.16	0.19

Utility Use Per Total Floor Area

	Electricity Intensity [kWh/m2]	Natural Gas Intensity [kWh/m2]	Additional Fuel Intensity [kWh/m2]	District Cooling Intensity [kWh/m2]	District Heating Intensity [kWh/m2]	Water Intensity [m3/m2]
Lighting	31.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	0.00	0.00	0.00	0.00	100.47	0.15
Other	11.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	42.36	0.00	0.00	0.00	100.47	0.15

Electric Loads Satisfied

	Electricity [kWh]	Percent Electricity [%]
Fuel-Fired Power Generation	0.000	0.00
High Temperature Geothermal*	0.000	0.00
Photovoltaic Power	0.000	0.00
Wind Power	0.000	0.00
Power Conversion	0.000	0.00
Net Decrease in On-Site Storage	0.000	0.00
Total On-Site Electric Sources	0.000	0.00
Electricity Coming From Utility	45148.798	100.00
Surplus Electricity Going To Utility	0.000	0.00
Net Electricity From Utility	45148.798	100.00
Total On-Site and Utility Electric Sources	45148.798	100.00
Total Electricity End Uses	45148.798	100.00

EK-2. Gerekli kütüphanelerin çağırılıp, kombinasyonları oluşturulması

```
import pandas as pd
import itertools

# Faktörler ve seviyeleri
factors = {
    'A': [1, 2],      # Aydınlatma
    'B': [1, 2],      # PV
    'C': [1, 2],      # Isıtma sistemi
    'D': [1, 2, 3],   # Duvar
    'E': [1, 2, 3],   # Çatı
    'F': [1, 2, 3],   # Zemin
    'G': [1, 2, 3]    # Pencere
}

# Tüm kombinasyonları üret
keys, values = zip(*factors.items())
combinations = [dict(zip(keys, v)) for v in itertools.product(*values)]

# DataFrame'e aktar
df = pd.DataFrame(combinations)
df.head()
```

EK-3. Regresyon denklemlerine göre her bir yanıt değişkeni için tahminlerin hesaplanması

```
def toplam_enerji_tuketimi(row):
    return (
        87886.3 +
        7230.5 * (1 if row['A'] == 1 else -1) +
        -19.3 * (1 if row['B'] == 1 else -1) +
        2911.8 * (1 if row['C'] == 1 else -1) +
        (3290.1 if row['D'] == 1 else 189.8 if row['D'] == 2 else -3479.9) +
        (1088.1 if row['E'] == 1 else 31.9 if row['E'] == 2 else -1120.0) +
        (144.3 if row['F'] == 1 else -6.2 if row['F'] == 2 else -138.1) +
        (2064.4 if row['G'] == 1 else -416.7 if row['G'] == 2 else -1647.8)
    )

# Tahminleri hesapla
df['Toplam_Enerji_Tuketimi'] = df.apply(toplam_enerji_tuketimi, axis=1)

# İlk 5 sonucu kontrol et
df[['A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'Toplam_Enerji_Tuketimi']].head()
```

```
def isitma_enerjisi_tuketimi(row):
    return (
        41558.1 +
        (-1040.1 if row['A'] == 1 else 1040.1) +
        (-19.3 if row['B'] == 1 else 19.3) +
        (2911.8 if row['C'] == 1 else -2911.8) +
        (3095.3 if row['D'] == 1 else 141.2 if row['D'] == 2 else -3236.5) +
        (1080.1 if row['E'] == 1 else 15.8 if row['E'] == 2 else -1095.8) +
        (136.2 if row['F'] == 1 else 5.9 if row['F'] == 2 else -142.2) +
        (2060.4 if row['G'] == 1 else -424.7 if row['G'] == 2 else -1635.7)
    )

# Fonksiyonu uygula
df['Isitma_Enerjisi_Tuketimi'] = df.apply(isitma_enerjisi_tuketimi, axis=1)

# Sonuçları göster
df[['A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'Isitma_Enerjisi_Tuketimi']].head()
```

```
def enerji_tasarrufu(row):
    return (
        64342.0 +
        (-7230.5 if row['A'] == 1 else 7230.5) +
        (19.3 if row['B'] == 1 else -19.3) +
        (-2911.8 if row['C'] == 1 else 2911.8) +
        (-3290.1 if row['D'] == 1 else -189.8 if row['D'] == 2 else 3479.9) +
        (-1088.1 if row['E'] == 1 else -31.9 if row['E'] == 2 else 1120.0) +
        (-144.3 if row['F'] == 1 else 6.2 if row['F'] == 2 else 138.1) +
        (-2064.4 if row['G'] == 1 else 416.7 if row['G'] == 2 else 1647.8)
    )

# Tahminleri hesapla
df['Enerji_Tasarrufu'] = df.apply(enerji_tasarrufu, axis=1)

# Kontrol için ilk 5 sonucu göster
df[['A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'Enerji_Tasarrufu']].head()
```

EK-3. (devam) Regresyon denklemlerine göre her bir yanıt değişkeni için tahminlerin hesaplanması

```
def net_emisyon(row):
    return (
        23337.5 +
        (3743.24 if row['A'] == 1 else -3743.24) +
        (-2470.84 if row['B'] == 1 else 2470.84) +
        (588.19 if row['C'] == 1 else -588.19) +
        (700.38 if row['D'] == 1 else 47.25 if row['D'] == 2 else -747.63) +
        (222.03 if row['E'] == 1 else 10.89 if row['E'] == 2 else -232.92) +
        (31.37 if row['F'] == 1 else -4.58 if row['F'] == 2 else -26.79) +
        (418.13 if row['G'] == 1 else -81.94 if row['G'] == 2 else -336.19)
    )

# Tahminleri uygula
df['Net_Emisyon'] = df.apply(net_emisyon, axis=1)

# İlk 5 sonucu görüntüle
df[['A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'Net_Emisyon']].head()
```

```
def geri_odeme_suresi(row):
    # Ana etkiler
    y = 19.758
    y += 4.444 if row['A'] == 1 else -4.444
    y += -2.670 if row['B'] == 1 else 2.670
    y += -6.941 if row['C'] == 1 else 6.941
    y += 0.634 if row['D'] == 1 else -0.211 if row['D'] == 2 else -0.423
    y += -0.491 if row['E'] == 1 else 0.254 if row['E'] == 2 else 0.237
    y += -0.540 if row['F'] == 1 else -0.327 if row['F'] == 2 else 0.867
    y += 0.117 if row['G'] == 1 else 0.121 if row['G'] == 2 else -0.238

    # Etkileşim terimleri (A*B)
    if row['A'] == 1 and row['B'] == 1: y += -1.253
    if row['A'] == 1 and row['B'] == 2: y += 1.253
    if row['A'] == 2 and row['B'] == 1: y += 1.253
    if row['A'] == 2 and row['B'] == 2: y += -1.253

    # Etkileşim terimleri (A*C)
    if row['A'] == 1 and row['C'] == 1: y += -1.503
    if row['A'] == 1 and row['C'] == 2: y += 1.503
    if row['A'] == 2 and row['C'] == 1: y += 1.503
    if row['A'] == 2 and row['C'] == 2: y += -1.503

    # Etkileşim terimleri (B*C)
    if row['B'] == 1 and row['C'] == 1: y += 1.030
    if row['B'] == 1 and row['C'] == 2: y += -1.030
    if row['B'] == 2 and row['C'] == 1: y += -1.030
    if row['B'] == 2 and row['C'] == 2: y += 1.030

    return y

# Uygula
df['Geri_Odeme_Suresi'] = df.apply(geri_odeme_suresi, axis=1)

# Kontrol et
df[['A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'Geri_Odeme_Suresi']].head()
```

EK-3. (devam) Regresyon denklemlerine göre her bir yanıt değişkeni için tahminlerin hesaplanması

```
def ortalama_yillik_getiri(row):
    # Ana etkiler
    y = 6.2662
    y += -1.3784 if row['A'] == 1 else 1.3784
    y += 0.7211 if row['B'] == 1 else -0.7211
    y += 2.2178 if row['C'] == 1 else -2.2178
    y += -0.1464 if row['D'] == 1 else 0.1219 if row['D'] == 2 else 0.0246
    y += 0.1580 if row['E'] == 1 else 0.0659 if row['E'] == 2 else -0.2238
    y += 0.1951 if row['F'] == 1 else 0.0538 if row['F'] == 2 else -0.2489
    y += 0.0308 if row['G'] == 1 else -0.0090 if row['G'] == 2 else -0.0218

    # A x B etkileşimleri
    if row['A'] == 1 and row['B'] == 1: y += 0.0603
    if row['A'] == 1 and row['B'] == 2: y += -0.0603
    if row['A'] == 2 and row['B'] == 1: y += -0.0603
    if row['A'] == 2 and row['B'] == 2: y += 0.0603

    # A x C etkileşimleri
    if row['A'] == 1 and row['C'] == 1: y += -0.5109
    if row['A'] == 1 and row['C'] == 2: y += 0.5109
    if row['A'] == 2 and row['C'] == 1: y += 0.5109
    if row['A'] == 2 and row['C'] == 2: y += -0.5109

    # B x C etkileşimleri
    if row['B'] == 1 and row['C'] == 1: y += 0.2198
    if row['B'] == 1 and row['C'] == 2: y += -0.2198
    if row['B'] == 2 and row['C'] == 1: y += -0.2198
    if row['B'] == 2 and row['C'] == 2: y += 0.2198

    return y

# Tahminleri uygula
df["Ortalama_Yillik_Getiri"] = df.apply(ortalama_yillik_getiri, axis=1)

# Sonuçları kontrol et
df[["A", "B", "C", "D", "E", "F", "G", "Ortalama_Yillik_Getiri"]].head()
```

```
def fayda_maliyet_orani(row):
    # Ana etkiler
    y = 1.25323
    y += -0.27568 if row['A'] == 1 else 0.27568
    y += 0.14423 if row['B'] == 1 else -0.14423
    y += 0.44357 if row['C'] == 1 else -0.44357
    y += -0.02929 if row['D'] == 1 else 0.02437 if row['D'] == 2 else 0.00491
    y += 0.03159 if row['E'] == 1 else 0.01317 if row['E'] == 2 else -0.04476
    y += 0.03903 if row['F'] == 1 else 0.01075 if row['F'] == 2 else -0.04978
    y += 0.00617 if row['G'] == 1 else -0.00180 if row['G'] == 2 else -0.00437

    # A x B etkileşimleri
    if row['A'] == 1 and row['B'] == 1: y += 0.01206
    if row['A'] == 1 and row['B'] == 2: y += -0.01206
    if row['A'] == 2 and row['B'] == 1: y += -0.01206
    if row['A'] == 2 and row['B'] == 2: y += 0.01206

    # A x C etkileşimleri
    if row['A'] == 1 and row['C'] == 1: y += -0.10217
    if row['A'] == 1 and row['C'] == 2: y += 0.10217
    if row['A'] == 2 and row['C'] == 1: y += 0.10217
    if row['A'] == 2 and row['C'] == 2: y += -0.10217

    # B x C etkileşimleri
    if row['B'] == 1 and row['C'] == 1: y += 0.04396
    if row['B'] == 1 and row['C'] == 2: y += -0.04396
    if row['B'] == 2 and row['C'] == 1: y += -0.04396
    if row['B'] == 2 and row['C'] == 2: y += 0.04396

    return y

# Tahminleri uygula
df["Fayda_Maliyet_Orani"] = df.apply(fayda_maliyet_orani, axis=1)

# İlk sonuçlara bakalım
df[["A", "B", "C", "D", "E", "F", "G", "Fayda_Maliyet_Orani"]].head()
```

EK-4. Tüm tahmin sonuçlarını içeren karar matrisinin oluşturulması

```
# Tahmin sonuçlarını içeren DataFrame'i Excel dosyası olarak dışa aktar  
df.to_excel("648_kombinasyon_tahmin_sonuçları.xlsx", index=False)
```

EK-5. Tüm tahmin sonuçlarını içeren veri seti

	A	B	C	D	E	F	G	Toplam Enerji Tüketimi	Isıtma Enerjisi Tüketimi	Enerji Tasarrufu	Net Emisyon	Geri Ödeme Suresi	Ortalama Yıllık Getiri	Fayda Maliyet Oranı
1	1	1	1	1	1	1	1	104596,2	49782,5	47632,1	26570	12,585	7,8334	1,5667
2	1	1	1	1	1	1	2	102115,1	47297,4	50113,2	26069,93	12,589	7,7936	1,55873
3	1	1	1	1	1	1	3	100884	46086,4	51344,3	25815,68	12,23	7,7808	1,55616
4	1	1	1	1	1	1	2	104445,7	49652,2	47782,6	26534,05	12,798	7,6921	1,53842
5	1	1	1	1	1	1	2	101964,6	47167,1	50263,7	26033,98	12,802	7,6523	1,53045
6	1	1	1	1	1	1	2	100733,5	45956,1	51494,8	25779,73	12,443	7,6395	1,52788
7	1	1	1	1	1	1	3	104313,8	49504,1	47914,5	26511,84	13,992	7,3894	1,47789
8	1	1	1	1	1	1	3	101832,7	47019	50395,6	26011,77	13,996	7,3496	1,46992
9	1	1	1	1	1	1	3	100601,6	45808	51626,7	25757,52	13,637	7,3368	1,46735
10	1	1	1	1	2	1	1	103540	48718,2	48688,3	26358,86	13,33	7,7413	1,54828
11	1	1	1	1	2	1	2	101058,9	46233,1	51169,4	25858,79	13,334	7,7015	1,54031
12	1	1	1	1	2	1	3	99827,8	45022,1	52400,5	25604,54	12,975	7,6887	1,53774
13	1	1	1	1	2	2	1	103389,5	48587,9	48838,8	26322,91	13,543	7,6	1,52
14	1	1	1	1	2	2	2	100908,4	46102,8	51319,9	25822,84	13,547	7,5602	1,51203
15	1	1	1	1	2	2	3	99677,3	44891,8	52551	25568,59	13,188	7,5474	1,50946
16	1	1	1	1	2	3	1	103257,6	48439,8	48970,7	26300,7	14,737	7,2973	1,45947
17	1	1	1	1	2	3	2	100776,5	45954,7	51451,8	25800,63	14,741	7,2575	1,4515
18	1	1	1	1	2	3	3	99545,4	44743,7	52682,9	25546,38	14,382	7,2447	1,44893
19	1	1	1	1	3	1	1	102388,1	47606,6	49840,2	26115,05	13,313	7,4516	1,49035
20	1	1	1	1	3	1	2	99907	45121,5	52321,3	25614,98	13,317	7,4118	1,48238
21	1	1	1	1	3	1	3	98675,9	43910,5	53552,4	25360,73	12,958	7,399	1,47981
22	1	1	1	1	3	2	1	102237,6	47476,3	49990,7	26079,1	13,526	7,3103	1,46207
23	1	1	1	1	3	2	2	99756,5	44991,2	52471,8	25579,03	13,53	7,2705	1,4541
24	1	1	1	1	3	2	3	98525,4	43780,2	53702,9	25324,78	13,171	7,2577	1,45153
25	1	1	1	1	3	3	1	102105,7	47328,2	50122,6	26056,89	14,72	7,0076	1,40154
26	1	1	1	1	3	3	2	99624,6	44843,1	52603,7	25556,82	14,724	6,9678	1,39357
27	1	1	1	1	3	3	3	98393,5	43632,1	53834,8	25302,57	14,365	6,955	1,391
28	1	1	1	2	1	1	1	101495,9	46828,4	50732,4	25916,87	11,74	8,1017	1,62036
29	1	1	1	2	1	1	2	99014,8	44343,3	53213,5	25416,8	11,744	8,0619	1,61239
30	1	1	1	2	1	1	3	97783,7	43132,3	54444,6	25162,55	11,385	8,0491	1,60982
31	1	1	1	2	1	2	1	101345,4	46698,1	50882,9	25880,92	11,953	7,9604	1,59208
32	1	1	1	2	1	2	2	98864,3	44213	53364	25380,85	11,957	7,9206	1,58411
33	1	1	1	2	1	2	3	97633,2	43002	54595,1	25126,6	11,598	7,9078	1,58154
34	1	1	1	2	1	3	1	101213,5	46550	51014,8	25858,71	13,147	7,6577	1,53155
35	1	1	1	2	1	3	2	98732,4	44064,9	53495,9	25358,64	13,151	7,6179	1,52358
36	1	1	1	2	1	3	3	97501,3	42853,9	54727	25104,39	12,792	7,6051	1,52101
37	1	1	1	2	2	1	1	100439,7	45764,1	51788,6	25705,73	12,485	8,0096	1,60194
38	1	1	1	2	2	1	2	97958,6	43279	54269,7	25205,66	12,489	7,9698	1,59397
39	1	1	1	2	2	1	3	96727,5	42068	55500,8	24951,41	12,13	7,957	1,5914
40	1	1	1	2	2	2	1	100289,2	45633,8	51939,1	25669,78	12,698	7,8683	1,57366
41	1	1	1	2	2	2	2	97808,1	43148,7	54420,2	25169,71	12,702	7,8285	1,56569
42	1	1	1	2	2	2	3	96577	41937,7	55651,3	24915,46	12,343	7,8157	1,56312
43	1	1	1	2	2	3	1	100157,3	45485,7	52071	25647,57	13,892	7,5656	1,51313
44	1	1	1	2	2	3	2	97676,2	43000,6	54552,1	25147,5	13,896	7,5258	1,50516
45	1	1	1	2	2	3	3	96445,1	41789,6	55783,2	24893,25	13,537	7,513	1,50259
46	1	1	1	2	3	1	1	99287,8	44652,5	52940,5	25461,92	12,468	7,7199	1,54401
47	1	1	1	2	3	1	2	96806,7	42167,4	55421,6	24961,85	12,472	7,6801	1,53604
48	1	1	1	2	3	1	3	95575,6	40956,4	56652,7	24707,6	12,113	7,6673	1,53347
49	1	1	1	2	3	2	1	99137,3	44522,2	53091	25425,97	12,681	7,5786	1,51573
50	1	1	1	2	3	2	2	96656,2	42037,1	55572,1	24925,9	12,685	7,5388	1,50776
51	1	1	1	2	3	2	3	95425,1	40826,1	56803,2	24671,65	12,326	7,526	1,50519
52	1	1	1	2	3	3	1	99005,4	44374,1	53222,9	25403,76	13,875	7,2759	1,4552
53	1	1	1	2	3	3	2	96524,3	41889	55704	24903,69	13,879	7,2361	1,44723
54	1	1	1	2	3	3	3	95293,2	40678	56935,1	24649,44	13,52	7,2233	1,44466
55	1	1	1	3	1	1	1	97826,2	43450,7	54402,1	25121,99	11,528	8,0044	1,6009
56	1	1	1	3	1	1	2	95345,1	40965,6	56883,2	24621,92	11,532	7,9646	1,59293
57	1	1	1	3	1	1	3	94114	39754,6	58114,3	24367,67	11,173	7,9518	1,59036
58	1	1	1	3	1	2	1	97675,7	43320,4	54552,6	25086,04	11,741	7,8631	1,57262
59	1	1	1	3	1	2	2	95194,6	40835,3	57033,7	24585,97	11,745	7,8233	1,56465
60	1	1	1	3	1	2	3	93963,5	39624,3	58264,8	24331,72	11,386	7,8105	1,56208
61	1	1	1	3	1	3	1	97543,8	43172,3	54684,5	25063,83	12,935	7,5604	1,51209
62	1	1	1	3	1	3	2	95062,7	40687,2	57165,6	24563,76	12,939	7,5206	1,50412
63	1	1	1	3	1	3	3	93831,6	39476,2	58396,7	24309,51	12,58	7,5078	1,50155
64	1	1	1	3	2	1	1	96770	42386,4	55458,3	24910,85	12,273	7,9123	1,58248
65	1	1	1	3	2	1	2	94288,9	39901,3	57939,4	24410,78	12,277	7,8725	1,57451
66	1	1	1	3	2	1	3	93057,8	38690,3	59170,5	24156,53	11,918	7,8597	1,57194
67	1	1	1	3	2	2	1	96619,5	42256,1	55608,8	24874,9	12,486	7,771	1,5542
68	1	1	1	3	2	2	2	94138,4	39771	58089,9	24374,83	12,49	7,7312	1,54623
69	1	1	1	3	2	2	3	92907,3	38560	59321	24120,58	12,131	7,7184	1,54366
70	1	1	1	3	2	3	1	96487,6	42108	55740,7	24852,69	13,68	7,4683	1,49367
71	1	1	1	3	2	3	2	94006,5	39622,9	58221,8	24352,62	13,684	7,4285	1,4857
72	1	1	1	3	2	3	3	92775,4	38411,9	59452,9	24098,37	13,325	7,4157	1,48313
73	1	1	1	3	3	1	1	95618,1	41274,8	56610,2	24667,04	12,256	7,6226	1,52455
74	1	1	1	3	3	1	2	93137	38789,7	59091,3	24166,97	12,26	7,5828	1,51658
75	1	1	1	3	3	1	3	91905,9	37578,7	60322,4	23912,72	11,901	7,57	1,51401
76	1	1	1	3	3	2	1	95467,6	41144,5	56760,7	24631,09	12,469	7,4813	1,49627
77	1	1	1	3	3	2	2	92986,5	38659,4	59241,8	24131,02	12,473	7,4415	1,4883
78	1	1	1	3	3	2	3	91755,4	37448,4	60472,9	23876,77	12,114	7,4287	1,48573
79	1	1	1	3	3	3	1	95335,7	40996,4	56892,6	24608,88	13,663	7,1786	1,43574
80	1	1	1	3	3	3	2	92854,6	38511,3	59373,7	24108,81	13,667	7,1388	1,42777
81	1	1	1	3	3	3	3	91623,5	37300,3	60604,8	23854,56	13,308	7,126	1,4252
82	1	1	2	1	1	1	1	98772,6	43958,9	53455,7	25393,62	27,413	3,98	0,79598
83	1	1	2	1	1	1	2	96291,5	41473,8	55936,8	24893,55	27,417	3,9402	0,78801
84	1	1	2	1	1	1	3	95060,4	40262,8	57167,9	24639,3	27,058	3,9274	0,78544
85	1	1	2	1	1	2	1	98622,1	43828,6	53606,2	25357,67	27,626	3,8387	0,7677
86	1	1	2	1	1	2	2	96141	41343,5	56087,3	24857,6	27,63	3,7989	0,75973
87	1	1	2	1	1	2	3	94909,9	40132,5	57318,4	24603,35	27,271	3,7861	0,75716
88	1	1	2	1	1	3	1	98490,2	43680,5	53738,1	25335,46	28,82	3,536	0,70717

EK-5. (devam) Tüm tahmin sonuçlarını içeren veri seti

	A	B	C	D	E	F	G	Toplam Enerji Tüketimi	Isıtma Enerjisi Tüketimi	Enerji Tasarrufu	Net Emisyon	Geri Odeme Suresi	Ortalama Yillik Getiri	Fayda Maliyet Orani
89	1	1	2	1	1	3	2	96009,1	41195,4	56219,2	24835,39	28,824	3,4962	0,6992
90	1	1	2	1	1	3	3	94778	39984,4	57450,3	24581,14	28,465	3,4834	0,69663
91	1	1	2	1	2	1	1	97716,4	42894,6	54511,9	25182,48	28,158	3,8879	0,77756
92	1	1	2	1	2	1	2	95235,3	40409,5	56993	24682,41	28,162	3,8481	0,76959
93	1	1	2	1	2	1	3	94004,2	39198,5	58224,1	24428,16	27,803	3,8353	0,76702
94	1	1	2	1	2	2	1	97565,9	42764,3	54662,4	25146,53	28,371	3,7466	0,74928
95	1	1	2	1	2	2	2	95084,8	40279,2	57143,5	24646,46	28,375	3,7068	0,74131
96	1	1	2	1	2	2	3	93853,7	39068,2	58374,6	24392,21	28,016	3,694	0,73874
97	1	1	2	1	2	3	1	97434	42616,2	54794,3	25124,32	29,565	3,4439	0,68875
98	1	1	2	1	2	3	2	94952,9	40131,1	57275,4	24624,25	29,569	3,4041	0,68078
99	1	1	2	1	2	3	3	93721,8	38920,1	58506,5	24370	29,21	3,3913	0,67821
100	1	1	2	1	3	1	1	96564,5	41783	55663,8	24938,67	28,141	3,5982	0,71963
101	1	1	2	1	3	1	2	94083,4	39297,9	58144,9	24438,6	28,145	3,5584	0,71166
102	1	1	2	1	3	1	3	92852,3	38086,9	59376	24184,35	27,786	3,5456	0,70909
103	1	1	2	1	3	2	1	96414	41652,7	55814,3	24902,72	28,354	3,4569	0,69135
104	1	1	2	1	3	2	2	93932,9	39167,6	58295,4	24402,65	28,358	3,4171	0,68338
105	1	1	2	1	3	2	3	92701,8	37956,6	59526,5	24148,4	27,999	3,4043	0,68081
106	1	1	2	1	3	3	1	96282,1	41504,6	55946,2	24880,51	29,548	3,1542	0,63082
107	1	1	2	1	3	3	2	93801	39019,5	58427,3	24380,44	29,552	3,1144	0,62285
108	1	1	2	1	3	3	3	92569,9	37808,5	59658,4	24126,19	29,193	3,1016	0,62028
109	1	1	2	2	1	1	1	95672,3	41004,8	56556	24740,49	26,568	4,2483	0,84964
110	1	1	2	2	1	1	2	93191,2	38519,2	59037,1	24240,42	26,572	4,2085	0,84167
111	1	1	2	2	1	1	3	91960,1	37308,7	60268,2	23986,17	26,213	4,1957	0,8391
112	1	1	2	2	1	2	1	95521,8	40874,5	56706,5	24704,54	26,781	4,107	0,82136
113	1	1	2	2	1	2	2	93040,7	38389,4	59187,6	24204,47	26,785	4,0672	0,81339
114	1	1	2	2	1	2	3	91809,6	37178,4	60418,7	23950,22	26,426	4,0544	0,81082
115	1	1	2	2	1	3	1	95389,9	40726,4	56838,4	24682,33	27,975	3,8043	0,76083
116	1	1	2	2	1	3	2	92908,8	38241,3	59319,5	24182,26	27,979	3,7645	0,75286
117	1	1	2	2	1	3	3	91677,7	37030,3	60550,6	23928,01	27,62	3,7517	0,75029
118	1	1	2	2	2	1	1	94616,1	39940,5	57612,2	24529,35	27,313	4,1562	0,83122
119	1	1	2	2	2	1	2	92135	37455,4	60093,3	24029,28	27,317	4,1164	0,82325
120	1	1	2	2	2	1	3	90903,9	36244,4	61324,4	23775,03	26,958	4,1036	0,82068
121	1	1	2	2	2	2	1	94465,6	39810,2	57762,7	24493,4	27,526	4,0149	0,80294
122	1	1	2	2	2	2	2	91984,5	37325,1	60243,8	23993,33	27,53	3,9751	0,79497
123	1	1	2	2	2	2	3	90753,4	36114,4	61474,9	23739,08	27,171	3,9623	0,7924
124	1	1	2	2	2	3	1	94333,7	39662,1	57894,6	24471,19	28,72	3,7122	0,74241
125	1	1	2	2	2	3	2	91852,6	37177	60375,7	23971,12	28,724	3,6724	0,73444
126	1	1	2	2	2	3	3	90621,5	35966	61606,8	23716,87	28,365	3,6596	0,73187
127	1	1	2	2	3	1	1	93464,2	38828,9	58764,1	24285,54	27,296	3,8665	0,77329
128	1	1	2	2	3	1	2	90983,1	36343,8	61245,2	23785,47	27,3	3,8267	0,76532
129	1	1	2	2	3	1	3	89752	35132,8	62476,3	23531,22	26,941	3,8139	0,76275
130	1	1	2	2	3	2	1	93313,7	38698,6	58914,6	24249,59	27,509	3,7252	0,74501
131	1	1	2	2	3	2	2	90832,6	36213,5	61395,7	23749,52	27,513	3,6854	0,73704
132	1	1	2	2	3	2	3	89601,5	35002,5	62626,8	23495,27	27,154	3,6726	0,73447
133	1	1	2	2	3	3	1	93181,8	38550,5	59046,5	24227,38	28,703	3,4225	0,68448
134	1	1	2	2	3	3	2	90700,7	36065,4	61527,6	23727,31	28,707	3,3827	0,67651
135	1	1	2	2	3	3	3	89469,6	34854,4	62758,7	23473,06	28,348	3,3699	0,67394
136	1	1	2	3	1	1	1	92002,6	37627,1	60225,7	23945,61	26,356	4,151	0,83018
137	1	1	2	3	1	1	2	89521,5	35142	62706,8	23445,54	26,36	4,1112	0,82221
138	1	1	2	3	1	1	3	88290,4	33931	63937,9	23191,29	26,001	4,0984	0,81964
139	1	1	2	3	1	2	1	91852,1	37496,8	60376,2	23909,66	26,569	4,0097	0,8019
140	1	1	2	3	1	2	2	89371	35011,7	62857,3	23409,59	26,573	3,9699	0,79393
141	1	1	2	3	1	2	3	88139,9	33800,7	64088,4	23155,34	26,214	3,9571	0,79136
142	1	1	2	3	1	3	1	91720,2	37348,7	60508,1	23887,45	27,763	3,707	0,74137
143	1	1	2	3	1	3	2	89239,1	34863,6	62989,2	23387,38	27,767	3,6672	0,7334
144	1	1	2	3	1	3	3	88008	33652,6	64220,3	23133,13	27,408	3,6544	0,73083
145	1	1	2	3	2	1	1	90946,4	36562,8	61281,9	23734,47	27,101	4,0589	0,81176
146	1	1	2	3	2	1	2	88465,3	34077,7	63763	23234,4	27,105	4,0191	0,80379
147	1	1	2	3	2	1	3	87234,2	32866,7	64994,1	22980,15	26,746	4,0063	0,80122
148	1	1	2	3	2	2	1	90795,9	36432,5	61432,4	23698,52	27,314	3,9176	0,78348
149	1	1	2	3	2	2	2	88314,8	33947,4	63913,5	23198,45	27,318	3,8778	0,77551
150	1	1	2	3	2	2	3	87083,7	32736,4	65144,6	22944,2	26,959	3,865	0,77294
151	1	1	2	3	2	3	1	90664	36284,4	61564,3	23676,31	28,508	3,6149	0,72295
152	1	1	2	3	2	3	2	88182,9	33799,3	64045,4	23176,24	28,512	3,5751	0,71498
153	1	1	2	3	2	3	3	86951,8	32588,3	65276,5	22921,99	28,153	3,5623	0,71241
154	1	1	2	3	3	1	1	89794,5	35451,2	62433,8	23490,66	27,084	3,7692	0,75383
155	1	1	2	3	3	1	2	87313,4	32966,1	64914,9	22990,59	27,088	3,7294	0,74586
156	1	1	2	3	3	1	3	86082,3	31755,1	66146	22736,34	26,729	3,7166	0,74329
157	1	1	2	3	3	2	1	89644	35320,9	62584,3	23454,71	27,297	3,6279	0,72555
158	1	1	2	3	3	2	2	87162,9	32835,8	65065,4	22954,64	27,301	3,5881	0,71758
159	1	1	2	3	3	2	3	85931,8	31624,8	66296,5	22700,39	26,942	3,5753	0,71501
160	1	1	2	3	3	3	1	89512,1	35172,8	62716,2	23432,5	28,491	3,3252	0,66502
161	1	1	2	3	3	3	2	87031	32687,7	65197,3	22932,43	28,495	3,2854	0,65705
162	1	1	2	3	3	3	3	85799,9	31476,7	66428,4	22678,18	28,136	3,2726	0,65448
163	1	2	1	1	1	1	1	104634,8	49821,1	47593,5	31511,68	18,371	5,831	1,1662
164	1	2	1	1	1	1	2	102153,7	47336	50074,6	31011,61	18,375	5,7912	1,15823
165	1	2	1	1	1	1	3	100922,6	46125	51305,7	30757,36	18,016	5,7784	1,15566
166	1	2	1	1	1	2	1	104484,3	49690,8	47744	31475,73	18,584	5,6897	1,13792
167	1	2	1	1	1	2	2	102003,2	47205,7	50225,1	30975,66	18,588	5,6499	1,12995
168	1	2	1	1	1	2	3	100772,1	45994,7	51456,2	30721,41	18,229	5,6371	1,12738
169	1	2	1	1	1	3	1	104352,4	49542,7	47875,9	31453,52	19,778	5,387	1,07739
170	1	2	1	1	1	3	2	101871,3	47057,6	50357	30953,45	19,782	5,3472	1,06942
171	1	2	1	1	1	3	3	100640,2	45846,6	51588,1	30699,2	19,423	5,3344	1,06685
172	1	2	1	1	2	1	1	103578,6	48756,8	48649,7	31300,54	19,116	5,7389	1,14778
173	1	2	1	1	2	1	2	101097,5	46271,7	51130,8	30800,47	19,12	5,6991	1,13981
174	1	2	1	1	2	1	3	99866,4	45060,7	52361,9	30546,22	18,761	5,6863	1,13724
175	1	2	1	1	2	2	1	103428,1	48626,5	48800,2	31264,59	19,329	5,5976	1,1195

EK-5. (devam) Tüm tahmin sonuçlarını içeren veri seti

	A	B	C	D	E	F	G	Toplam Enerji Tüketimi	Isıtma Enerjisi Tüketimi	Enerji Tasarrufu	Net Emisyon	Geri Odeme Suresi	Ortalama Yıllık Getiri	Fayda Maliyet Oranı
176	1	2	1	1	2	2	2	100947	46141,4	51281,3	30764,52	19,333	5,5578	1,11153
177	1	2	1	1	2	2	3	99715,9	44930,4	52512,4	30510,27	18,974	5,545	1,10896
178	1	2	1	1	2	3	1	103296,2	48478,4	48932,1	31242,38	20,523	5,2949	1,05897
179	1	2	1	1	2	3	2	100815,1	45993,3	51413,2	30742,31	20,527	5,2551	1,051
180	1	2	1	1	2	3	3	99584	44782,3	52644,3	30488,06	20,168	5,2423	1,04843
181	1	2	1	1	3	1	1	102426,7	47645,2	49801,6	31056,73	19,099	5,4492	1,08985
182	1	2	1	1	3	1	2	99945,6	45160,1	52282,7	30556,66	19,103	5,4094	1,08188
183	1	2	1	1	3	1	3	98714,5	43949,1	53513,8	30302,41	18,744	5,3966	1,07931
184	1	2	1	1	3	2	1	102276,2	47514,9	49952,1	31020,78	19,312	5,3079	1,06157
185	1	2	1	1	3	2	2	99795,1	45029,8	52433,2	30520,71	19,316	5,2681	1,0536
186	1	2	1	1	3	2	3	98564	43818,8	53664,3	30266,46	18,957	5,2553	1,05103
187	1	2	1	1	3	3	1	102144,3	47366,8	50084	30998,57	20,506	5,0052	1,00104
188	1	2	1	1	3	3	2	99663,2	44881,7	52565,1	30498,5	20,51	4,9654	0,99307
189	1	2	1	1	3	3	3	98432,1	43670,7	53796,2	30244,25	20,151	4,9526	0,9905
190	1	2	1	2	1	1	1	101534,5	46867	50693,8	30858,55	17,526	6,0993	1,21986
191	1	2	1	2	1	1	2	99053,4	44381,9	53174,9	30358,48	17,53	6,0595	1,21189
192	1	2	1	2	2	1	3	97822,3	43170,9	54406	30104,23	17,171	6,0467	1,20932
193	1	2	1	2	1	2	1	101384	46736,7	50844,3	30822,6	17,739	5,958	1,19158
194	1	2	1	2	1	2	2	98902,9	44251,6	53325,4	30322,53	17,743	5,9182	1,18361
195	1	2	1	2	1	2	3	97671,8	43040,6	54556,5	30068,28	17,384	5,9054	1,18104
196	1	2	1	2	1	3	1	101252,1	46588,6	50976,2	30800,39	18,933	5,6553	1,13105
197	1	2	1	2	1	3	2	98771	44103,5	53457,3	30300,32	18,937	5,6155	1,12308
198	1	2	1	2	1	3	3	97539,9	42892,5	54688,4	30046,07	18,578	5,6027	1,12051
199	1	2	1	2	2	2	1	100478,3	45802,7	51750	30647,41	18,271	6,0072	1,20144
200	1	2	1	2	2	2	1	97997,2	43317,6	54231,1	30147,34	18,275	5,9674	1,19347
201	1	2	1	2	2	2	1	96766,1	42106,6	55462,2	29893,09	17,916	5,9546	1,1909
202	1	2	1	2	2	2	1	100327,8	45672,4	51900,5	30611,46	18,484	5,8659	1,17316
203	1	2	1	2	2	2	2	97846,7	43187,3	54381,6	30111,39	18,488	5,8261	1,16519
204	1	2	1	2	2	2	3	96615,6	41976,3	55612,7	29857,14	18,129	5,8133	1,16262
205	1	2	1	2	2	3	1	100195,9	45524,3	52032,4	30589,25	19,678	5,5632	1,11263
206	1	2	1	2	2	3	2	97714,8	43039,2	54513,5	30089,18	19,682	5,5234	1,10466
207	1	2	1	2	2	3	3	96483,7	41828,2	55744,6	29834,93	19,323	5,5106	1,10209
208	1	2	1	2	2	3	1	99326,4	44691,1	52901,9	30403,6	18,254	5,7175	1,14351
209	1	2	1	2	3	1	2	96845,3	42206	55383	29903,53	18,258	5,6777	1,13554
210	1	2	1	2	3	1	3	95614,2	40995	56614,1	29649,28	17,899	5,6649	1,13297
211	1	2	1	2	3	2	1	99175,9	44560,8	53052,4	30367,65	18,467	5,5762	1,11523
212	1	2	1	2	3	2	2	96694,8	42075,7	55533,5	29867,58	18,471	5,5364	1,10726
213	1	2	1	2	3	2	3	95463,7	40864,7	56764,6	29613,33	18,112	5,5236	1,10469
214	1	2	1	2	3	3	1	99044	44412,7	53184,3	30345,44	19,661	5,2735	1,0547
215	1	2	1	2	3	3	2	96562,9	41927,6	55665,4	29845,37	19,665	5,2337	1,04673
216	1	2	1	2	3	3	3	95331,8	40716,6	56896,5	29591,12	19,306	5,2209	1,04416
217	1	2	1	3	1	1	1	97864,8	43489,3	54363,5	30063,67	17,314	6,002	1,2004
218	1	2	1	3	1	1	2	95383,7	41004,2	56844,6	29563,6	17,318	5,9622	1,19243
219	1	2	1	3	1	1	3	94152,6	39793,2	58075,7	29309,35	16,959	5,9494	1,18986
220	1	2	1	3	1	2	1	97714,3	43359	54514	30027,72	17,527	5,8607	1,17212
221	1	2	1	3	1	2	2	95233,2	40873,9	56995,1	29527,65	17,531	5,8209	1,16415
222	1	2	1	3	1	2	3	94002,1	39662,9	58226,2	29273,4	17,172	5,8081	1,16158
223	1	2	1	3	1	3	1	97582,4	43210,9	54645,9	30005,51	18,721	5,558	1,11159
224	1	2	1	3	1	3	2	95101,3	40725,8	57127	29505,44	18,725	5,5182	1,10362
225	1	2	1	3	1	3	3	93870,2	39514,8	58358,1	29251,19	18,366	5,5054	1,10105
226	1	2	1	3	2	1	1	96808,6	42425	55419,7	29852,53	18,059	5,9099	1,18198
227	1	2	1	3	2	1	2	94327,5	39939,9	57900,8	29352,46	18,063	5,8701	1,17401
228	1	2	1	3	2	1	3	93096,4	38728,9	59131,9	29098,21	17,704	5,8573	1,17144
229	1	2	1	3	2	2	1	96658,1	42294,7	55570,2	29816,58	18,272	5,7686	1,1537
230	1	2	1	3	2	2	2	94177	39809,6	58051,3	29316,51	18,276	5,7288	1,14573
231	1	2	1	3	2	2	3	92945,9	38598,6	59282,4	29062,26	17,917	5,716	1,14316
232	1	2	1	3	2	3	1	96526,2	42146,6	55702,1	29794,37	19,466	5,4659	1,09317
233	1	2	1	3	2	3	2	94045,1	39661,5	58183,2	29294,3	19,47	5,4261	1,0852
234	1	2	1	3	2	3	3	92814	38450,5	59414,3	29040,05	19,111	5,4133	1,08263
235	1	2	1	3	3	1	1	95656,7	41313,4	56571,6	29608,72	18,042	5,6202	1,12405
236	1	2	1	3	3	1	2	93175,6	38828,3	59052,7	29108,65	18,046	5,5804	1,11608
237	1	2	1	3	3	1	3	91944,5	37617,3	60283,8	28854,4	17,687	5,5676	1,11351
238	1	2	1	3	3	2	1	95506,2	41183,1	56722,1	29572,77	18,255	5,4789	1,09577
239	1	2	1	3	3	2	2	93025,1	38698	59203,2	29072,7	18,259	5,4391	1,0878
240	1	2	1	3	3	2	3	91794	37487	60434,3	28818,45	17,9	5,4263	1,08523
241	1	2	1	3	3	3	1	95374,3	41035	56854	29550,56	19,449	5,1762	1,03524
242	1	2	1	3	3	3	2	92893,2	38549,9	59335,1	29050,49	19,453	5,1364	1,02727
243	1	2	1	3	3	3	3	91662,1	37338,9	60566,2	28796,24	19,094	5,1236	1,0247
244	1	2	2	1	1	1	1	98811,2	43997,5	53417,1	30335,3	37,319	2,8568	0,57132
245	1	2	2	1	1	1	2	96330,1	41512,4	55898,2	29835,23	37,323	2,817	0,56335
246	1	2	2	1	1	1	3	95099	40301,4	57129,3	29580,98	36,964	2,8042	0,56078
247	1	2	2	1	1	2	1	98660,7	43867,2	53567,6	30299,35	37,532	2,7155	0,54304
248	1	2	2	1	1	2	2	96179,6	41382,1	56048,7	29799,28	37,536	2,6757	0,53507
249	1	2	2	1	1	2	3	94948,5	40171,1	57279,8	29545,03	37,177	2,6629	0,5325
250	1	2	2	1	1	3	1	98528,8	43719,1	53699,5	30277,14	38,726	2,4128	0,48251
251	1	2	2	1	1	3	2	96047,7	41234	56180,6	29777,07	38,73	2,373	0,47454
252	1	2	2	1	1	3	3	94816,6	40023	57411,7	29522,82	38,371	2,3602	0,47197
253	1	2	2	1	2	1	1	97755	42933,2	54473,3	30124,16	38,064	2,7647	0,5529
254	1	2	2	1	2	1	2	95273,9	40448,1	56954,4	29624,09	38,068	2,7249	0,54493
255	1	2	2	1	2	1	3	94042,8	39237,1	58185,5	29369,84	37,709	2,7121	0,54236
256	1	2	2	1	2	2	1	97604,5	42802,9	54623,8	30088,21	38,277	2,6234	0,52462
257	1	2	2	1	2	2	2	95123,4	40317,8	57104,9	29588,14	38,281	2,5836	0,51665
258	1	2	2	1	2	2	3	93892,3	39106,8	58336	29333,89	37,922	2,5708	0,51408
259	1	2	2	1	2	3	1	97472,6	42654,8	54755,7	30066	39,471	2,3207	0,46409
260	1	2	2	1	2	3	2	94991,5	40169,7	57236,8	29565,93	39,475	2,2809	0,45612
261	1	2	2	1	2	3	3	93760,4	38958,7	58467,9	29311,68	39,116	2,2681	0,45355
262	1	2	2	1	3	1	1	96603,1	41821,6	55625,2	29880,35	38,047	2,475	0,49497

EK-5. (devam) Tüm tahmin sonuçlarını içeren veri seti

	A	B	C	D	E	F	G	Toplam Enerji Tüketimi	Isıtma Enerjisi Tüketimi	Enerji Tasarrufu	Net Emisyon	Geri Odeme Suresi	Ortalama Yillik Getiri	Fayda Maliyet Orani
263	1	2	2	1	3	1	2	94122	39336,5	58106,3	29380,28	38,051	2,4352	0,487
264	1	2	2	1	3	1	3	92890,9	38125,5	59337,4	29126,03	37,692	2,4224	0,48443
265	1	2	2	1	3	2	1	96452,6	41691,3	55775,7	29844,4	38,26	2,3337	0,46669
266	1	2	2	1	3	2	2	93971,5	39206,2	58256,8	29344,33	38,264	2,2939	0,45872
267	1	2	2	1	3	2	3	92740,4	37995,2	59487,9	29090,08	37,905	2,2811	0,45615
268	1	2	2	1	3	3	1	96320,7	41543,2	55907,6	29822,19	39,454	2,031	0,40616
269	1	2	2	1	3	3	2	93839,6	39058,1	58388,7	29322,12	39,458	1,9912	0,39819
270	1	2	2	1	3	3	3	92608,5	37847,1	59619,8	29067,87	39,099	1,9784	0,39562
271	1	2	2	2	1	1	1	95710,9	41043,4	56517,4	29682,17	36,474	3,1251	0,62498
272	1	2	2	2	1	1	2	93229,8	38558,3	58998,5	29182,1	36,478	3,0853	0,61701
273	1	2	2	2	1	1	3	91998,7	37347,3	60229,6	28927,85	36,119	3,0725	0,61444
274	1	2	2	2	1	2	1	95560,4	40913,1	56667,9	29646,22	36,687	2,9838	0,5967
275	1	2	2	2	1	2	2	93079,3	38428	59149	29146,15	36,691	2,944	0,58873
276	1	2	2	2	1	2	3	91848,2	37217	60380,1	28891,9	36,332	2,9312	0,58616
277	1	2	2	2	1	3	1	95428,5	40765	56799,8	29624,01	37,881	2,6811	0,53617
278	1	2	2	2	1	3	2	92947,4	38279,9	59280,9	29123,94	37,885	2,6413	0,5282
279	1	2	2	2	1	3	3	91716,3	37068,9	60512	28869,69	37,526	2,6285	0,52563
280	1	2	2	2	2	1	1	94654,7	39979,1	57573,6	29471,03	37,219	3,033	0,60656
281	1	2	2	2	2	1	2	92173,6	37494	60054,7	28970,96	37,223	2,9932	0,59859
282	1	2	2	2	2	1	3	90942,5	36283	61285,8	28716,71	36,864	2,9804	0,59602
283	1	2	2	2	2	2	1	94504,2	39848,8	57724,1	29435,08	37,432	2,8917	0,57828
284	1	2	2	2	2	2	2	92023,1	37363,7	60205,2	28935,01	37,436	2,8519	0,57031
285	1	2	2	2	2	2	3	90792	36152,7	61436,3	28680,76	37,077	2,8391	0,56774
286	1	2	2	2	2	3	1	94372,3	39700,7	57856	29412,87	38,626	2,589	0,51775
287	1	2	2	2	2	3	2	91891,2	37215,6	60337,1	28912,8	38,63	2,5492	0,50978
288	1	2	2	2	2	3	3	90660,1	36004,6	61568,2	28658,55	38,271	2,5364	0,50721
289	1	2	2	2	3	1	1	93502,8	38867,5	58725,5	29227,22	37,202	2,7433	0,54863
290	1	2	2	2	3	1	2	91021,7	36382,4	61206,6	28727,15	37,206	2,7035	0,54066
291	1	2	2	2	3	1	3	89790,6	35171,4	62437,7	28472,9	36,847	2,6907	0,53809
292	1	2	2	2	3	2	1	93352,3	38737,2	58876	29191,27	37,415	2,602	0,52035
293	1	2	2	2	3	2	2	90871,2	36252,1	61357,1	28691,2	37,419	2,5622	0,51238
294	1	2	2	2	3	2	3	89640,1	35041,1	62588,2	28436,95	37,06	2,5494	0,50981
295	1	2	2	2	3	3	1	93220,4	38589,1	59007,9	29169,06	38,609	2,2993	0,45982
296	1	2	2	2	3	3	2	90739,3	36104	61489	28668,99	38,613	2,2595	0,45185
297	1	2	2	2	3	3	3	89508,2	34893	62720,1	28414,74	38,254	2,2467	0,44928
298	1	2	2	3	1	1	1	92041,2	37665,7	60187,1	28887,29	36,262	3,0278	0,60552
299	1	2	2	3	1	1	2	89560,1	35180,6	62668,2	28387,22	36,266	2,988	0,59755
300	1	2	2	3	1	1	3	88329	33969,6	63899,3	28132,97	35,907	2,9752	0,59498
301	1	2	2	3	1	2	1	91890,7	37535,4	60337,6	28851,34	36,475	2,8865	0,57724
302	1	2	2	3	1	2	2	89409,6	35050,3	62818,7	28351,27	36,479	2,8467	0,56927
303	1	2	2	3	1	2	3	88178,5	33839,3	64049,8	28097,02	36,12	2,8339	0,5667
304	1	2	2	3	1	3	1	91758,8	37387,3	60469,5	28829,13	37,669	2,5838	0,51671
305	1	2	2	3	1	3	2	89277,7	34902,2	62950,6	28329,06	37,673	2,544	0,50874
306	1	2	2	3	1	3	3	88046,6	33691,2	64181,7	28074,81	37,314	2,5312	0,50617
307	1	2	2	3	2	1	1	90985	36601,4	61243,3	28676,15	37,007	2,9357	0,5871
308	1	2	2	3	2	1	2	88503,9	34116,4	63724,4	28176,08	37,011	2,8959	0,57913
309	1	2	2	3	2	1	3	87272,8	32905,3	64955,5	27921,83	36,652	2,8831	0,57656
310	1	2	2	3	2	2	1	90834,5	36471,1	61393,8	28640,2	37,22	2,7944	0,55882
311	1	2	2	3	2	2	2	88353,4	33986	63874,9	28140,13	37,224	2,7546	0,55085
312	1	2	2	3	2	2	3	87122,3	32775	65106	27885,88	36,865	2,7418	0,54828
313	1	2	2	3	2	3	1	90702,6	36323	61525,7	28617,99	38,414	2,4917	0,49829
314	1	2	2	3	2	3	2	88221,5	33837,9	64006,8	28117,92	38,418	2,4519	0,49032
315	1	2	2	3	2	3	3	86990,4	32626,9	65237,9	27863,67	38,059	2,4391	0,48775
316	1	2	2	3	3	1	1	89833,1	35489,8	62395,2	28432,34	36,99	2,646	0,52917
317	1	2	2	3	3	1	2	87352	33004,7	64876,3	27932,27	36,994	2,6062	0,5212
318	1	2	2	3	3	1	3	86120,9	31793,7	66107,4	27678,02	36,635	2,5934	0,51863
319	1	2	2	3	3	2	1	89682,6	35359,5	62545,7	28396,39	37,203	2,5047	0,50089
320	1	2	2	3	3	2	2	87201,5	32874,4	65026,8	27896,32	37,207	2,4649	0,49292
321	1	2	2	3	3	2	3	85970,4	31663,4	66257,9	27642,07	36,848	2,4521	0,49035
322	1	2	2	3	3	3	1	89550,7	35211,4	62677,6	28374,18	38,397	2,202	0,44036
323	1	2	2	3	3	3	2	87069,6	32726,3	65158,7	27874,11	38,401	2,1622	0,43239
324	1	2	2	3	3	3	3	85838,5	31515,3	66389,8	27619,86	38,042	2,1494	0,42982
325	2	1	1	1	1	1	1	90135,2	51862,7	62093,1	19083,52	9,209	11,4914	2,29828
326	2	1	1	1	1	1	2	87654,1	49377,6	64574,2	18583,45	9,213	11,4516	2,29031
327	2	1	1	1	1	1	3	86423	48166,6	65805,3	18329,2	8,854	11,4388	2,28774
328	2	1	1	1	1	2	1	89984,7	51732,4	62243,6	19047,57	9,422	11,3501	2,27
329	2	1	1	1	1	2	2	87503,6	49247,3	64724,7	18547,5	9,426	11,3103	2,26203
330	2	1	1	1	1	2	3	86272,5	48036,3	65955,8	18293,25	9,067	11,2975	2,25946
331	2	1	1	1	1	3	1	89852,8	51584,3	62375,5	19025,36	10,616	11,0474	2,20947
332	2	1	1	1	1	3	2	87371,7	49099,2	64856,6	18525,29	10,62	11,0076	2,2015
333	2	1	1	1	1	3	3	86140,6	47888,2	66087,7	18271,04	10,261	10,9948	2,19893
334	2	1	1	1	2	1	1	89079	50798,4	63149,3	18872,38	9,954	11,3993	2,27986
335	2	1	1	1	2	1	2	86597,9	48313,3	65630,4	18372,31	9,958	11,3595	2,27189
336	2	1	1	1	2	1	3	85366,8	47102,3	66861,5	18118,06	9,599	11,3467	2,26932
337	2	1	1	1	2	2	1	88928,5	50668,1	63299,8	18836,43	10,167	11,258	2,25158
338	2	1	1	1	2	2	2	86447,4	48183	65780,9	18336,36	10,171	11,2182	2,24361
339	2	1	1	1	2	2	3	85216,3	46972	67012	18082,11	9,812	11,2054	2,24104
340	2	1	1	1	2	3	1	88796,6	50520	63431,7	18814,22	11,361	10,9553	2,19105
341	2	1	1	1	2	3	2	86315,5	48034,9	65912,8	18314,15	11,365	10,9155	2,18308
342	2	1	1	1	2	3	3	85084,4	46823,9	67143,9	18059,9	11,006	10,9027	2,18051
343	2	1	1	1	3	1	1	87927,1	49686,8	64301,2	18628,57	9,937	11,1096	2,22193
344	2	1	1	1	3	1	2	85446	47201,7	66782,3	18128,5	9,941	11,0698	2,21396
345	2	1	1	1	3	1	3	84214,9	45990,7	68013,4	17874,25	9,582	11,057	2,21139
346	2	1	1	1	3	2	1	87776,6	49556,5	64451,7	18592,62	10,15	10,9683	2,19365
347	2	1	1	1	3	2	2	85295,5	47071,4	66932,8	18092,55	10,154	10,9285	2,18568
348	2	1	1	1	3	2	3	84064,4	45860,4	68163,9	17838,3	9,795	10,9157	2,18311
349	2	1	1	1	3	3	1	87644,7	49408,4	64583,6	18570,41	11,344	10,6656	2,13312

EK-5. (devam) Tüm tahmin sonuçlarını içeren veri seti

	A	B	C	D	E	F	G	Toplam Enerji Tüketimi	Isıtma Enerjisi Tüketimi	Enerji Tasarrufu	Net Emisyon	Geri Ödeme Suresi	Ortalama Yıllık Getiri	Fayda Maliyet Oranı
350	2	1	1	1	3	3	2	85163,6	46923,3	67064,7	18070,34	11,348	10,6258	2,12515
351	2	1	1	1	3	3	3	83932,5	45712,3	68295,8	17816,09	10,989	10,613	2,12258
352	2	1	1	2	1	1	1	87034,9	48908,6	65193,4	18430,39	8,364	11,7597	2,35194
353	2	1	1	2	1	1	2	84553,8	46423,5	67674,5	17930,32	8,368	11,7199	2,34397
354	2	1	1	2	1	1	3	83322,7	45212,5	68905,6	17676,07	8,009	11,7071	2,3414
355	2	1	1	2	1	2	1	86884,4	48778,3	65343,9	18394,44	8,577	11,6184	2,32366
356	2	1	1	2	1	2	2	84403,3	46293,2	67825	17894,37	8,581	11,5786	2,31569
357	2	1	1	2	1	2	3	83172,2	45082,2	69056,1	17640,12	8,222	11,5658	2,31312
358	2	1	1	2	1	3	1	86752,5	48630,2	65475,8	18372,23	9,771	11,3157	2,26313
359	2	1	1	2	1	3	2	84271,4	46145,1	67956,9	17872,16	9,775	11,2759	2,25516
360	2	1	1	2	1	3	3	83040,3	44934,1	69188	17617,91	9,416	11,2631	2,25259
361	2	1	1	2	2	1	1	85978,7	47844,3	66249,6	18219,25	9,109	11,6676	2,33352
362	2	1	1	2	2	1	2	83497,6	45359,2	68730,7	17719,18	9,113	11,6278	2,32555
363	2	1	1	2	2	1	3	82266,5	44148,2	69961,8	17464,93	8,754	11,615	2,32298
364	2	1	1	2	2	2	1	85828,2	47714	66400,1	18183,3	9,322	11,5263	2,30524
365	2	1	1	2	2	2	2	83347,1	45228,9	68881,2	17683,23	9,326	11,4865	2,29727
366	2	1	1	2	2	2	3	82116	44017,9	70112,3	17428,98	8,967	11,4737	2,2947
367	2	1	1	2	2	3	1	85696,3	47565,9	66532	18161,09	10,516	11,2236	2,24471
368	2	1	1	2	2	3	2	83215,2	45080,8	69013,1	17661,02	10,52	11,1838	2,23674
369	2	1	1	2	2	3	3	81984,1	43869,8	70244,2	17406,77	10,161	11,171	2,23417
370	2	1	1	2	3	1	1	84826,8	46732,7	67401,5	17975,44	9,092	11,3779	2,27559
371	2	1	1	2	3	1	2	82345,7	44247,6	69882,6	17475,37	9,096	11,3381	2,26762
372	2	1	1	2	3	1	3	81114,6	43036,6	71113,7	17221,12	8,737	11,3253	2,26505
373	2	1	1	2	3	2	1	84676,3	46602,4	67552	17939,49	9,305	11,2366	2,24731
374	2	1	1	2	3	2	2	82195,2	44117,3	70033,1	17439,42	9,309	11,1968	2,23934
375	2	1	1	2	3	2	3	80964,1	42906,3	71264,2	17185,17	8,95	11,184	2,23677
376	2	1	1	2	3	3	1	84544,4	46454,3	67683,9	17917,28	10,499	10,9339	2,18678
377	2	1	1	2	3	3	2	82063,3	43969,2	70165	17417,21	10,503	10,8941	2,17881
378	2	1	1	2	3	3	3	80832,2	42758,2	71396,1	17162,96	10,144	10,8813	2,17624
379	2	1	1	3	1	1	1	83365,2	45530,9	68863,1	17635,51	8,152	11,6624	2,33248
380	2	1	1	3	1	1	2	80884,1	43045,8	71344,2	17135,44	8,156	11,6226	2,32451
381	2	1	1	3	1	1	3	79653	41834,8	72575,3	16881,19	7,797	11,6098	2,32194
382	2	1	1	3	1	2	1	83214,7	45400,6	69013,6	17599,56	8,365	11,5211	2,3042
383	2	1	1	3	1	2	2	80733,6	42915,5	71494,7	17099,49	8,369	11,4813	2,29623
384	2	1	1	3	1	2	3	79502,5	41704,5	72725,8	16845,24	8,01	11,4685	2,29366
385	2	1	1	3	1	3	1	83082,8	45252,5	69145,5	17577,35	9,559	11,2184	2,24367
386	2	1	1	3	1	3	2	80601,7	42767,4	71626,6	17077,28	9,563	11,1786	2,2357
387	2	1	1	3	1	3	3	79370,6	41556,4	72857,7	16823,03	9,204	11,1658	2,23313
388	2	1	1	3	2	1	1	82309	44466,6	69919,3	17424,37	8,897	11,5703	2,31406
389	2	1	1	3	2	1	2	79827,9	41981,5	72400,4	16924,3	8,901	11,5305	2,30609
390	2	1	1	3	2	1	3	78596,8	40770,5	73631,5	16670,05	8,542	11,5177	2,30352
391	2	1	1	3	2	2	1	82158,5	44336,3	70069,8	17388,42	9,11	11,429	2,28578
392	2	1	1	3	2	2	2	79677,4	41851,2	72550,9	16888,35	9,114	11,3892	2,27781
393	2	1	1	3	2	2	3	78446,3	40640,2	73782	16634,1	8,755	11,3764	2,27524
394	2	1	1	3	2	3	1	82026,6	44188,2	70201,7	17366,21	10,304	11,1263	2,22525
395	2	1	1	3	2	3	2	79545,5	41703,1	72682,8	16866,14	10,308	11,0865	2,21728
396	2	1	1	3	2	3	3	78314,4	40492,1	73913,9	16611,89	9,949	11,0737	2,21471
397	2	1	1	3	3	1	1	81157,1	43355	71071,2	17180,56	8,88	11,2806	2,25613
398	2	1	1	3	3	1	2	78676	40869,9	73552,3	16680,49	8,884	11,2408	2,24816
399	2	1	1	3	3	1	3	77444,9	39658,9	74783,4	16426,24	8,525	11,228	2,24559
400	2	1	1	3	3	2	1	81006,6	43224,7	71221,7	17144,61	9,093	11,1393	2,22785
401	2	1	1	3	3	2	2	78525,5	40739,6	73702,8	16644,54	9,097	11,0995	2,21988
402	2	1	1	3	3	2	3	77294,4	39528,6	74933,9	16390,29	8,738	11,0867	2,21731
403	2	1	1	3	3	3	1	80874,7	43076,6	71353,6	17122,4	10,287	10,8366	2,16732
404	2	1	1	3	3	3	2	78393,6	40591,5	73834,7	16622,33	10,291	10,7968	2,15935
405	2	1	1	3	3	3	3	77162,5	39380,5	75065,8	16368,08	9,932	10,784	2,15678
406	2	1	2	1	1	1	1	84311,6	46039,1	67916,7	17907,14	18,025	5,5944	1,11888
407	2	1	2	1	1	1	2	81830,5	43554	70397,8	17407,07	18,029	5,5546	1,11091
408	2	1	2	1	1	1	3	80599,4	42343	71628,9	17152,82	17,67	5,5418	1,10834
409	2	1	2	1	1	2	1	84161,1	45908,8	68067,2	17871,19	18,238	5,4531	1,0906
410	2	1	2	1	1	2	2	81680	43423,7	70548,3	17371,12	18,242	5,4133	1,08263
411	2	1	2	1	1	2	3	80448,9	42212,7	71779,4	17116,87	17,883	5,4005	1,08006
412	2	1	2	1	1	3	1	84029,2	45760,7	68199,1	17848,98	19,432	5,1504	1,03007
413	2	1	2	1	1	3	2	81548,1	43275,6	70680,2	17348,91	19,436	5,1106	1,0221
414	2	1	2	1	1	3	3	80317	42064,6	71911,3	17094,66	19,077	5,0978	1,01953
415	2	1	2	1	2	1	1	83255,4	44974,8	68972,9	17696	18,77	5,5023	1,10046
416	2	1	2	1	2	1	2	80774,3	42489,7	71454	17195,93	18,774	5,4625	1,09249
417	2	1	2	1	2	1	3	79543,2	41278,7	72685,1	16941,68	18,415	5,4497	1,08992
418	2	1	2	1	2	2	1	83104,9	44844,5	69123,4	17660,05	18,983	5,361	1,07218
419	2	1	2	1	2	2	2	80623,8	42359,4	71604,5	17159,98	18,987	5,3212	1,06421
420	2	1	2	1	2	2	3	79392,7	41148,4	72835,6	16905,73	18,628	5,3084	1,06164
421	2	1	2	1	2	3	1	82973	44696,4	69255,3	17637,84	20,177	5,0583	1,01165
422	2	1	2	1	2	3	2	80491,9	42211,3	71736,4	17137,77	20,181	5,0185	1,00368
423	2	1	2	1	2	3	3	79260,8	41000,3	72967,5	16883,52	19,822	5,0057	1,00111
424	2	1	2	1	3	1	1	82103,5	43863,2	70124,8	17452,19	18,753	5,2126	1,04253
425	2	1	2	1	3	1	2	79622,4	41378,1	72605,9	16952,12	18,757	5,1728	1,03456
426	2	1	2	1	3	1	3	78391,3	40167,1	73837	16697,87	18,398	5,16	1,03199
427	2	1	2	1	3	2	1	81953	43732,9	70275,3	17416,24	18,966	5,0713	1,01425
428	2	1	2	1	3	2	2	79471,9	41247,8	72756,4	16916,17	18,97	5,0315	1,00628
429	2	1	2	1	3	2	3	78240,8	40036,8	73987,5	16661,92	18,611	5,0187	1,00371
430	2	1	2	1	3	3	1	81821,1	43584,8	70407,2	17394,03	20,16	4,7686	0,95372
431	2	1	2	1	3	3	2	79340	41099,7	72888,3	16893,96	20,164	4,7288	0,94575
432	2	1	2	1	3	3	3	78108,9	39888,7	74119,4	16639,71	19,805	4,716	0,94318
433	2	1	2	2	1	1	1	81211,3	43085	71017	17254,01	17,18	5,8627	1,17254
434	2	1	2	2	1	1	2	78730,2	40599,9	73498,1	16753,94	17,184	5,8229	1,16457
435	2	1	2	2	1	1	3	77499,1	39388,9	74729,2	16499,69	16,825	5,8101	1,162
436	2	1	2	2	1	2	1	81060,8	42954,7	71167,5	17218,06	17,393	5,7214	1,14426
437	2	1	2	2	1	2	2	78579,7	40469,6	73648,6	16717,99	17,397	5,6816	1,13629
438	2	1	2	2	1	2	3	77348,6	392					

EK-5. (devam) Tüm tahmin sonuçlarını içeren veri seti

	A	B	C	D	E	F	G	Toplam Enerji Tüketimi	Isıtma Enerjisi Tüketimi	Enerji Tasarrufu	Net Emisyon	Geri Odeme Suresi	Ortalama Yıllık Getiri	Fayda Maliyet Oranı
442	2	1	2	2	2	1	1	80155,1	42020,7	72073,2	17042,87	17,925	5,7706	1,15412
443	2	1	2	2	2	1	2	77674	39535,6	74554,3	16542,8	17,929	5,7308	1,14615
444	2	1	2	2	2	1	3	76442,9	38324,6	75785,4	16288,55	17,57	5,718	1,14358
445	2	1	2	2	2	2	1	80004,6	41890,4	72223,7	17006,92	18,138	5,6293	1,12584
446	2	1	2	2	2	2	2	77523,5	39405,3	74704,8	16506,85	18,142	5,5895	1,11787
447	2	1	2	2	2	2	3	76292,4	38194,3	75935,9	16252,6	17,783	5,5767	1,1153
448	2	1	2	2	2	3	1	79872,7	41742,3	72355,6	16984,71	19,332	5,3266	1,06531
449	2	1	2	2	2	3	2	77391,6	39257,2	74836,7	16484,64	19,336	5,2868	1,05734
450	2	1	2	2	2	3	3	76160,5	38046,2	76067,8	16230,39	18,977	5,274	1,05477
451	2	1	2	2	3	1	1	79003,2	40909,1	73225,1	16799,06	17,908	5,4809	1,09619
452	2	1	2	2	3	1	2	76522,1	38424	75706,2	16298,99	17,912	5,4411	1,08822
453	2	1	2	2	3	1	3	75291	37213	76937,3	16044,74	17,553	5,4283	1,08565
454	2	1	2	2	3	2	1	78852,7	40778,8	73375,6	16763,11	18,121	5,3396	1,06791
455	2	1	2	2	3	2	2	76371,6	38293,7	75856,7	16263,04	18,125	5,2998	1,05994
456	2	1	2	2	3	2	3	75140,5	37082,7	77087,8	16008,79	17,766	5,287	1,05737
457	2	1	2	2	3	3	1	78720,8	40630,7	73507,5	16740,9	19,315	5,0369	1,00738
458	2	1	2	2	3	3	2	76239,7	38145,6	75988,6	16240,83	19,319	4,9971	0,99941
459	2	1	2	2	3	3	3	75008,6	36934,6	77219,7	15986,58	18,96	4,9843	0,99684
460	2	1	2	3	1	1	1	77541,6	39707,3	74686,7	16459,13	16,968	5,7654	1,15308
461	2	1	2	3	1	1	2	75060,5	37222,2	77167,8	15959,06	16,972	5,7256	1,14511
462	2	1	2	3	1	1	3	73829,4	36011,2	78398,9	15704,81	16,613	5,7128	1,14254
463	2	1	2	3	1	2	1	77391,1	39577	74837,2	16423,18	17,181	5,6241	1,1248
464	2	1	2	3	1	2	2	74910	37091,9	77318,3	15923,11	17,185	5,5843	1,11683
465	2	1	2	3	1	2	3	73678,9	35880,9	78549,4	15668,86	16,826	5,5715	1,11426
466	2	1	2	3	1	3	1	77259,2	39428,9	74969,1	16400,97	18,375	5,3214	1,06427
467	2	1	2	3	1	3	2	74778,1	36943,8	77450,2	15900,9	18,379	5,2816	1,0563
468	2	1	2	3	1	3	3	73547	35732,8	78681,3	15646,65	18,02	5,2688	1,05373
469	2	1	2	3	2	1	1	76485,4	38643	75742,9	16247,99	17,713	5,6733	1,13466
470	2	1	2	3	2	1	2	74004,3	36157,9	78224	15747,92	17,717	5,6335	1,12669
471	2	1	2	3	2	1	3	72773,2	34946,9	79455,1	15493,67	17,358	5,6207	1,12412
472	2	1	2	3	2	2	1	76334,9	38512,7	75893,4	16212,04	17,926	5,532	1,10638
473	2	1	2	3	2	2	2	73853,8	36027,6	78374,5	15711,97	17,93	5,4922	1,09841
474	2	1	2	3	2	2	3	72622,7	34816,6	79605,6	15457,72	17,571	5,4794	1,09584
475	2	1	2	3	2	3	1	76203	38364,6	76025,3	16189,83	19,12	5,2293	1,04585
476	2	1	2	3	2	3	2	73721,9	35879,5	78506,4	15689,76	19,124	5,1895	1,03788
477	2	1	2	3	2	3	3	72490,8	34668,5	79737,5	15435,51	18,765	5,1767	1,03531
478	2	1	2	3	3	1	1	75333,5	37531,4	76894,8	16004,18	17,696	5,3836	1,07673
479	2	1	2	3	3	1	2	72852,4	35046,3	79375,9	15504,11	17,7	5,3438	1,06876
480	2	1	2	3	3	1	3	71621,3	33835,3	80607	15249,86	17,341	5,331	1,06619
481	2	1	2	3	3	2	1	75183	37401,1	77045,3	15968,23	17,909	5,2423	1,04845
482	2	1	2	3	3	2	2	72701,9	34916	79526,4	15468,16	17,913	5,2025	1,04048
483	2	1	2	3	3	2	3	71470,8	33705	80757,5	15213,91	17,554	5,1897	1,03791
484	2	1	2	3	3	3	1	75051,1	37253	77177,2	15946,02	19,103	4,9396	0,98792
485	2	1	2	3	3	3	2	72570	34767,9	79658,3	15445,95	19,107	4,8998	0,97995
486	2	1	2	3	3	3	3	71338,9	33556,9	80889,4	15191,7	18,748	4,887	0,97738
487	2	2	1	1	1	1	1	90173,8	51901,3	62054,5	24025,2	9,983	9,7302	1,94602
488	2	2	1	1	1	1	2	87692,7	49416,2	64535,6	23525,13	9,987	9,6904	1,93805
489	2	2	1	1	1	1	3	86461,6	48205,2	65766,7	23270,88	9,628	9,6776	1,93548
490	2	2	1	1	1	2	1	90023,3	51771	62205	23989,25	10,196	9,5889	1,91774
491	2	2	1	1	1	2	2	87542,2	49285,9	64686,1	23489,18	10,2	9,5491	1,90977
492	2	2	1	1	1	2	3	86311,1	48074,9	65917,2	23234,93	9,841	9,5363	1,9072
493	2	2	1	1	1	3	1	89891,4	51622,9	62336,9	23967,04	11,39	9,2862	1,85721
494	2	2	1	1	1	3	2	87410,3	49137,8	64818	23466,97	11,394	9,2464	1,84924
495	2	2	1	1	1	3	3	86179,2	47926,8	66049,1	23212,72	11,035	9,2336	1,84667
496	2	2	1	1	2	1	1	89117,6	50837	63110,7	23814,06	10,728	9,6381	1,9276
497	2	2	1	1	2	1	2	86636,5	48351,9	65591,8	23313,99	10,732	9,5983	1,91963
498	2	2	1	1	2	1	3	85405,4	47140,9	66822,9	23059,74	10,373	9,5855	1,91706
499	2	2	1	1	2	2	1	88967,1	50706,7	63261,2	23778,11	10,941	9,4968	1,89932
500	2	2	1	1	2	2	2	86486	48221,6	65742,3	23278,04	10,945	9,457	1,89135
501	2	2	1	1	2	2	3	85254,9	47010,6	66973,4	23023,79	10,586	9,4442	1,88878
502	2	2	1	1	2	3	1	88835,2	50558,6	63393,1	23755,9	12,135	9,1941	1,83879
503	2	2	1	1	2	3	2	86354,1	48073,5	65874,2	23255,83	12,139	9,1543	1,83082
504	2	2	1	1	2	3	3	85123	46862,5	67105,3	23001,58	11,78	9,1415	1,82825
505	2	2	1	1	3	1	1	87965,7	49725,4	64262,6	23570,25	10,711	9,3484	1,86967
506	2	2	1	1	3	1	2	85484,6	47240,3	66743,7	23070,18	10,715	9,3086	1,8617
507	2	2	1	1	3	1	3	84253,5	46029,3	67974,8	22815,93	10,356	9,2958	1,85913
508	2	2	1	1	3	2	1	87815,2	49595,1	64413,1	23534,3	10,924	9,2071	1,84139
509	2	2	1	1	3	2	2	85334,1	47110	66894,2	23034,23	10,928	9,1673	1,83342
510	2	2	1	1	3	2	3	84103	45899	68125,3	22779,98	10,569	9,1545	1,83085
511	2	2	1	1	3	3	1	87683,3	49447	64545	23512,09	12,118	8,9044	1,78086
512	2	2	1	1	3	3	2	85202,2	46961,9	67026,1	23012,02	12,122	8,8646	1,77289
513	2	2	1	1	3	3	3	83971,1	45750,9	68257,2	22757,77	11,763	8,8518	1,77032
514	2	2	1	2	1	1	1	87073,5	48947,2	65154,8	23372,07	9,138	9,9985	1,99968
515	2	2	1	2	1	1	2	84592,4	46462,1	67635,9	22872	9,142	9,9587	1,99171
516	2	2	1	2	1	1	3	83361,3	45251,1	68867	22617,75	8,783	9,9459	1,98914
517	2	2	1	2	1	2	1	86923	48816,9	65305,3	23336,12	9,351	9,8572	1,9714
518	2	2	1	2	1	2	2	84441,9	46331,8	67786,4	22836,05	9,355	9,8174	1,96343
519	2	2	1	2	1	2	3	83210,8	45120,8	69017,5	22581,8	8,996	9,8046	1,96086
520	2	2	1	2	1	3	1	86791,1	48668,8	65437,2	23313,91	10,545	9,5545	1,91087
521	2	2	1	2	1	3	2	84310	46183,7	67918,3	22813,84	10,549	9,5147	1,9029
522	2	2	1	2	1	3	3	83078,9	44972,7	69149,4	22559,59	10,19	9,5019	1,90033
523	2	2	1	2	2	1	1	86017,3	47882,9	66211	23160,93	9,883	9,9064	1,98126
524	2	2	1	2	2	1	2	83536,2	45397,8	68692,1	22660,86	9,887	9,8666	1,97329
525	2	2	1	2	2	1	3	82305,1	44186,8	69923,2	22406,61	9,528	9,8538	1,97072
526	2	2	1	2	2	2	1	85866,8	47752,6	66361,5	23124,98	10,096	9,7651	1,95298
527	2	2	1	2	2	2	2	83385,7	45267,5	68842,6	22624,91	10,1	9,7253	1,94501
528	2	2	1	2	2	2	3	82154,6	44056,5	70073,7	22370,66	9,741	9,7125	1,94244
529	2	2	1	2	2	3	1	85734,9	47604,5	66493,4	23102,77	11,29	9,4624	1,89245
530	2	2	1	2	2	3	2	83253,8	45119,4	68974,5	22602,7	11,294	9,422	

EK-5. (devam) Tüm tahmin sonuçlarını içeren veri seti

	A	B	C	D	E	F	G	Toplam Enerji Tüketimi	Isıtma Enerjisi Tüketimi	Enerji Tasarrufu	Net Emisyon	Geri Ödeme Süresi	Ortalama Yıllık Getiri	Fayda Maliyet Oranı
534	2	2	1	2	3	1	3	81153,2	43075,2	71075,1	22162,8	9,511	9,5641	1,91279
535	2	2	1	2	3	2	1	84714,9	46641	67513,4	22881,17	10,079	9,4754	1,89505
536	2	2	1	2	3	2	2	82233,8	44155,9	69994,5	22381,1	10,083	9,4356	1,88708
537	2	2	1	2	3	2	3	81002,7	42944,9	71225,6	22126,85	9,724	9,4228	1,88451
538	2	2	1	2	3	3	1	84583	46492,9	67645,3	22858,96	11,273	9,1727	1,83452
539	2	2	1	2	3	3	2	82101,9	44007,8	70126,4	22358,89	11,277	9,1329	1,82655
540	2	2	1	2	3	3	3	80870,8	42796,8	71357,5	22104,64	10,918	9,1201	1,82398
541	2	2	1	3	1	1	1	83403,8	45569,5	68824,5	22577,19	8,926	9,9012	1,98022
542	2	2	1	3	1	1	2	80922,7	43084,4	71305,6	22077,12	8,93	9,8614	1,97225
543	2	2	1	3	1	1	3	79691,6	41873,4	72536,7	21822,87	8,571	9,8486	1,96968
544	2	2	1	3	1	2	1	83253,3	45439,2	68975	22541,24	9,139	9,7599	1,95194
545	2	2	1	3	1	2	2	80772,2	42954,1	71456,1	22041,17	9,143	9,7201	1,94397
546	2	2	1	3	1	2	3	79541,1	41743,1	72687,2	21786,92	8,784	9,7073	1,9414
547	2	2	1	3	1	3	1	83121,4	45291,1	69106,9	22519,03	10,333	9,4572	1,89141
548	2	2	1	3	1	3	2	80640,3	42806	71588	22018,96	10,337	9,4174	1,88344
549	2	2	1	3	1	3	3	79409,2	41595	72819,1	21764,71	9,978	9,4046	1,88087
550	2	2	1	3	2	1	1	82347,6	44505,2	69880,7	22366,05	9,671	9,8091	1,9618
551	2	2	1	3	2	1	2	79866,5	42020,1	72361,8	21865,98	9,675	9,7693	1,95383
552	2	2	1	3	2	1	3	78635,4	40809,1	73592,9	21611,73	9,316	9,7565	1,95126
553	2	2	1	3	2	2	1	82197,1	44374,9	70031,2	22330,1	9,884	9,6678	1,93352
554	2	2	1	3	2	2	2	79716	41889,8	72512,3	21830,03	9,888	9,628	1,92555
555	2	2	1	3	2	2	3	78484,9	40678,8	73743,4	21575,78	9,529	9,6152	1,92298
556	2	2	1	3	2	3	1	82065,2	44226,8	70163,1	22307,89	11,078	9,3651	1,87299
557	2	2	1	3	2	3	2	79584,1	41741,7	72644,2	21807,82	11,082	9,3253	1,86502
558	2	2	1	3	2	3	3	78353	40530,7	73875,3	21553,57	10,723	9,3125	1,86245
559	2	2	1	3	3	1	1	81195,7	43393,6	71032,6	22122,24	9,654	9,5194	1,90387
560	2	2	1	3	3	1	2	78714,6	40908,5	73513,7	21622,17	9,658	9,4796	1,8959
561	2	2	1	3	3	1	3	77483,5	39697,5	74744,8	21367,92	9,299	9,4668	1,89333
562	2	2	1	3	3	2	1	81045,2	43263,3	71183,1	22086,29	9,867	9,3781	1,87559
563	2	2	1	3	3	2	2	78564,1	40778,2	73664,2	21586,22	9,871	9,3383	1,86762
564	2	2	1	3	3	2	3	77333	39567,2	74895,3	21331,97	9,512	9,3255	1,86505
565	2	2	1	3	3	3	1	80913,3	43115,2	71315	22064,08	11,061	9,0754	1,81506
566	2	2	1	3	3	3	2	78432,2	40630,1	73796,1	21564,01	11,065	9,0356	1,80709
567	2	2	1	3	3	3	3	77201,1	39419,1	75027,2	21309,76	10,706	9,0228	1,80452
568	2	2	2	1	1	1	1	84350,2	46077,7	67878,1	22848,82	22,919	4,7124	0,94246
569	2	2	2	1	1	1	2	81869,1	43592,6	70359,2	22348,75	22,923	4,6726	0,93449
570	2	2	2	1	1	1	3	80638	42381,6	71590,3	22094,5	22,564	4,6598	0,93192
571	2	2	2	1	1	2	1	84199,7	45947,4	68028,6	22812,87	23,132	4,5711	0,91418
572	2	2	2	1	1	2	2	81718,6	43462,3	70509,7	22312,8	23,136	4,5313	0,90621
573	2	2	2	1	1	2	3	80487,5	42251,3	71740,8	22058,55	22,777	4,5185	0,90364
574	2	2	2	1	1	3	1	84067,8	45799,3	68160,5	22790,66	24,326	4,2684	0,85365
575	2	2	2	1	1	3	2	81586,7	43314,2	70641,6	22290,59	24,33	4,2286	0,84568
576	2	2	2	1	1	3	3	80355,6	42103,2	71872,7	22036,34	23,971	4,2158	0,84311
577	2	2	2	1	2	1	1	83294	45013,4	68934,3	22637,68	23,664	4,6203	0,92404
578	2	2	2	1	2	1	2	80812,9	42528,3	71415,4	22137,61	23,668	4,5805	0,91607
579	2	2	2	1	2	1	3	79581,8	41317,3	72646,5	21883,36	23,309	4,5677	0,9135
580	2	2	2	1	2	2	1	83143,5	44883,1	69084,8	22601,73	23,877	4,479	0,89576
581	2	2	2	1	2	2	2	80662,4	42398	71565,9	22101,66	23,881	4,4392	0,88779
582	2	2	2	1	2	2	3	79431,3	41187	72797	21847,41	23,522	4,4264	0,88522
583	2	2	2	1	2	3	1	83011,6	44735	69216,7	22579,52	25,071	4,1763	0,83523
584	2	2	2	1	2	3	2	80530,5	42249,9	71697,8	22079,45	25,075	4,1365	0,82726
585	2	2	2	1	2	3	3	79299,4	41038,9	72928,9	21825,2	24,716	4,1237	0,82469
586	2	2	2	1	3	1	1	82142,1	43901,8	70086,2	22393,87	23,647	4,3306	0,86611
587	2	2	2	1	3	1	2	79661	41416,7	72567,3	21893,8	23,651	4,2908	0,85814
588	2	2	2	1	3	1	3	78429,9	40205,7	73798,4	21639,55	23,292	4,278	0,85557
589	2	2	2	1	3	2	1	81991,6	43771,5	70236,7	22357,92	23,86	4,1893	0,83783
590	2	2	2	1	3	2	2	79510,5	41286,4	72717,8	21857,85	23,864	4,1495	0,82986
591	2	2	2	1	3	2	3	78279,4	40075,4	73948,9	21603,6	23,505	4,1367	0,82729
592	2	2	2	1	3	3	1	81859,7	43623,4	70368,6	22335,71	25,054	3,8866	0,7773
593	2	2	2	1	3	3	2	79378,6	41138,3	72849,7	21835,64	25,058	3,8468	0,76933
594	2	2	2	1	3	3	3	78147,5	39927,3	74080,8	21581,39	24,699	3,834	0,76676
595	2	2	2	2	1	1	1	81249,9	43123,6	70978,4	22195,69	22,074	4,9807	0,99612
596	2	2	2	2	1	1	2	78768,8	40638,5	73459,5	21695,62	22,078	4,9409	0,98815
597	2	2	2	2	1	1	3	77537,7	39427,5	74690,6	21441,37	21,719	4,9281	0,98558
598	2	2	2	2	1	2	1	81099,4	42993,3	71128,9	22159,74	22,287	4,8394	0,96784
599	2	2	2	2	1	2	2	78618,3	40508,2	73610	21659,67	22,291	4,7996	0,95987
600	2	2	2	2	1	2	3	77387,2	39297,2	74841,1	21405,42	21,932	4,7868	0,9573
601	2	2	2	2	1	3	1	80967,5	42845,2	71260,8	22137,53	23,481	4,5367	0,90731
602	2	2	2	2	1	3	2	78486,4	40360,1	73741,9	21637,46	23,485	4,4969	0,89934
603	2	2	2	2	1	3	3	77255,3	39149,1	74973	21383,21	23,126	4,4841	0,89677
604	2	2	2	2	2	1	1	80193,7	42059,3	72034,6	21984,55	22,819	4,8886	0,9777
605	2	2	2	2	2	1	2	77712,6	39574,2	74515,7	21484,48	22,823	4,8488	0,96973
606	2	2	2	2	2	1	3	76481,5	38363,2	75746,8	21230,23	22,464	4,836	0,96716
607	2	2	2	2	2	2	1	80043,2	41929	72185,1	21948,6	23,032	4,7473	0,94942
608	2	2	2	2	2	2	2	77562,1	39443,9	74666,2	21448,53	23,036	4,7075	0,94145
609	2	2	2	2	2	2	3	76331	38232,9	75897,3	21194,28	22,677	4,6947	0,93888
610	2	2	2	2	2	3	1	79911,3	41780,9	72317	21926,39	24,226	4,4446	0,88889
611	2	2	2	2	2	3	2	77430,2	39295,8	74798,1	21426,32	24,23	4,4048	0,88092
612	2	2	2	2	2	3	3	76199,1	38084,8	76029,2	21172,07	23,871	4,392	0,87835
613	2	2	2	2	3	1	1	79041,8	40947,7	73186,5	21740,74	22,802	4,5989	0,91977
614	2	2	2	2	3	1	2	76560,7	38462,6	75667,6	21240,67	22,806	4,5591	0,9118
615	2	2	2	2	3	1	3	75329,6	37251,6	76898,7	20986,42	22,447	4,5463	0,90923
616	2	2	2	2	3	2	1	78891,3	40817,4	73337	21704,79	23,015	4,4576	0,89149
617	2	2	2	2	3	2	2	76410,2	38332,3	75818,1	21204,72	23,019	4,4178	0,88352
618	2	2	2	2	3	2	3	75179,1	37121,3	77049,2	20950,47	22,66	4,405	0,88095
619	2	2	2	2	3	3	1	78759,4	40669,3	73468,9	21682,58	24,209	4,1549	0,83096
620	2	2	2	2	3	3	2	76278,3	38184,2	75950	21182,51	24,213	4,1151	0,82299
621	2	2	2	2	3	3	3	75047,2	36973,2	77181,1	20928,26	23,854	4,1023	0,82042
622	2	2	2	3	1	1	1	77580,2	39745,9	74648,1	21400,81			

EK-5. (devam) Tüm tahmin sonuçlarını içeren veri seti

	A	B	C	D	E	F	G	Toplam Enerji Tüketimi	Isıtma Enerjisi Tüketimi	Enerji Tasarrufu	Net Emisyon	Geri Ödeme Süresi	Ortalama Yıllık Getiri	Fayda Maliyet Oranı
627	2	2	2	3	1	2	3	73717,5	35919,5	78510,8	20610,54	21,72	4,6895	0,93784
628	2	2	2	3	1	3	1	77297,8	39467,5	74930,5	21342,65	23,269	4,4394	0,88785
629	2	2	2	3	1	3	2	74816,7	36982,4	77411,6	20842,58	23,273	4,3996	0,87988
630	2	2	2	3	1	3	3	73585,6	35771,4	78642,7	20588,33	22,914	4,3868	0,87731
631	2	2	2	3	2	1	1	76524	38681,6	75704,3	21189,67	22,607	4,7913	0,95824
632	2	2	2	3	2	1	2	74042,9	36196,5	78185,4	20689,6	22,611	4,7515	0,95027
633	2	2	2	3	2	1	3	72811,8	34985,5	79416,5	20435,35	22,252	4,7387	0,9477
634	2	2	2	3	2	2	1	76373,5	38551,3	75854,8	21153,72	22,82	4,65	0,92996
635	2	2	2	3	2	2	2	73892,4	36066,2	78335,9	20653,65	22,824	4,6102	0,92199
636	2	2	2	3	2	2	3	72661,3	34855,2	79567	20399,4	22,465	4,5974	0,91942
637	2	2	2	3	2	3	1	76241,6	38403,2	75986,7	21131,51	24,014	4,3473	0,86943
638	2	2	2	3	2	3	2	73760,5	35918,1	78467,8	20631,44	24,018	4,3075	0,86146
639	2	2	2	3	2	3	3	72529,4	34707,1	79698,9	20377,19	23,659	4,2947	0,85889
640	2	2	2	3	3	1	1	75372,1	37570	76856,2	20945,86	22,59	4,5016	0,90031
641	2	2	2	3	3	1	2	72891	35084,9	79337,3	20445,79	22,594	4,4618	0,89234
642	2	2	2	3	3	1	3	71659,9	33873,9	80568,4	20191,54	22,235	4,449	0,88977
643	2	2	2	3	3	2	1	75221,6	37439,7	77006,7	20909,91	22,803	4,3603	0,87203
644	2	2	2	3	3	2	2	72740,5	34954,6	79487,8	20409,84	22,807	4,3205	0,86406
645	2	2	2	3	3	2	3	71509,4	33743,6	80718,9	20155,59	22,448	4,3077	0,86149
646	2	2	2	3	3	3	1	75089,7	37291,6	77138,6	20887,7	23,997	4,0576	0,8115
647	2	2	2	3	3	3	2	72608,6	34806,5	79619,7	20387,63	24,001	4,0178	0,80353
648	2	2	2	3	3	3	3	71377,5	33595,5	80850,8	20133,38	23,642	4,005	0,80096

EK-6. Senaryo 1 için MOORA kodu

```

kriterler = [
    "Toplam_Enerji_Tuketimi",      # minimize
    "Isitma_Enerjisi_Tuketimi",    # minimize
    "Enerji_Tasarrufu",           # maximize
    "Net_Emisyon",                # minimize
    "Geri_Odeme_Suresi",          # minimize
    "Ortalama_Yillik_Getiri",      # maximize
    "Fayda_Maliyet_Orani"         # maximize
]

yönelim = ['min', 'min', 'max', 'min', 'min', 'max', 'max']

agirliklar = np.array([20, 20, 20, 10, 10, 10, 10]) / 100

# Karar matrisi
karar_matrisi = df[kriterler].copy()

# Normalize et
norm_matris = karar_matrisi / np.sqrt((karar_matrisi ** 2).sum())

# Ağırlıklandır
agirlikli_matris = norm_matris * agirliklar

# MOORA skorlarını hesapla
moora_skor = []
for i, yon in enumerate(yönelim):
    if yon == 'max':
        moora_skor.append(agirlikli_matris.iloc[:, i])
    else:
        moora_skor.append(-agirlikli_matris.iloc[:, i])

df['MOORA_Skor'] = sum(moora_skor)

# En iyi kombinasyonları sırala
moora_sirali = df.sort_values("MOORA_Skor", ascending=False)

# İlk 10 sonucu göster
moora_sirali.head(10)

```

EK-7. Senaryo 1 için TOPSİS kodu

```

kriterler = [
    "Toplam_Enerji_Tuketimi",
    "Isitma_Enerjisi_Tuketimi",
    "Enerji_Tasarrufu",
    "Net_Emisyon",
    "Geri_Odeme_Suresi",
    "Ortalama_Yillik_Getiri",
    "Fayda_Maliyet_Orani"
]

yönelim = ['min', 'min', 'max', 'min', 'min', 'max', 'max']

agirliklar = np.array([20, 20, 20, 10, 10, 10, 10]) / 100

# Karar matrisi
karar_matrisi = df[kriterler].copy()

# Normalize et ( $v_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum x^2}$ )
norm_matris = karar_matrisi / np.sqrt((karar_matrisi ** 2).sum())

# Ağırlıklandır
agirlikli_matris = norm_matris * agirliklar

# İdeal ve negatif ideal çözümleri belirle
ideal = []
neg_ideal = []

for i, yon in enumerate(yönelim):
    if yon == 'max':
        ideal.append(agirlikli_matris.iloc[:, i].max())
        neg_ideal.append(agirlikli_matris.iloc[:, i].min())
    else:
        ideal.append(agirlikli_matris.iloc[:, i].min())
        neg_ideal.append(agirlikli_matris.iloc[:, i].max())

# Uzaklıkları hesapla
s_plus = np.sqrt(((agirlikli_matris - ideal) ** 2).sum(axis=1))
s_minus = np.sqrt(((agirlikli_matris - neg_ideal) ** 2).sum(axis=1))

# TOPSIS skorları
df['TOPSIS_Skor'] = s_minus / (s_plus + s_minus)

# En iyi sonuçları sırala
topsis_sirali = df.sort_values("TOPSIS_Skor", ascending=False)

# İlk 10 sonucu göster
topsis_sirali.head(10)

```



Gazili olmak ayrıcalıktır