

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNA ENERJİ PERFORMANSINI
GELİŞTİRMEDE OPTİMUM ÇÖZÜMLERİ
BELİRLEMEYE YÖNELİK SİMÜLASYON VE
ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON TABANLI BİR
KARAR DESTEK MODELİ**

Aslıhan ŞENEL SOLMAZ

Haziran, 2015
İZMİR

**BİNA ENERJİ PERFORMANSINI
GELİŞTİRMEDE OPTİMUM ÇÖZÜMLERİ
BELİRLEMEYE YÖNELİK SİMÜLASYON VE
ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON TABANLI BİR
KARAR DESTEK MODELİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Mimarlık Bölümü, Yapı Bilgisi Anabilim Dalı

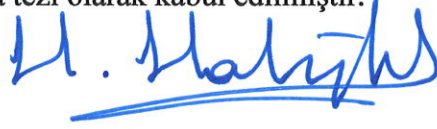
Aslıhan ŞENEL SOLMAZ

Haziran, 2015

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ASLIHAN ŞENEL SOLMAZ, tarafından YRD. DOÇ. DR. FAHRİYE HİLAL HALICIOĞLU yönetiminde hazırlanan “BİNA ENERJİ PERFORMANSINI GELİŞTİRMEDE OPTİMUM ÇÖZÜMLERİ BELİRLEMeye YÖNELİK SİMÜLASYON VE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON TABANLI BİR KARAR DESTEK MODELİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

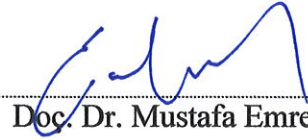


Yrd. Doç. Dr. Fahriye Hilal HALICIOĞLU

Yönetici



Prof. Dr. Halit YAZICI



Doç. Dr. Mustafa Emre İLAL

Tez İzleme Komitesi Üyesi



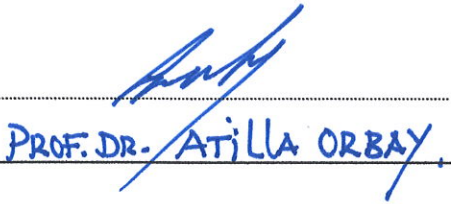
Doç. Dr. Suat GÜNHAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi



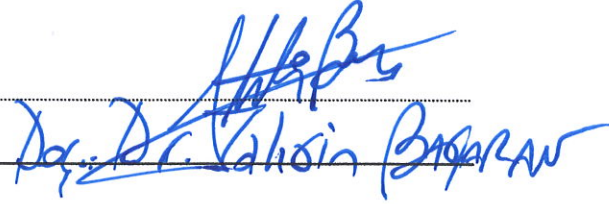
Jüri Üyesi

İkinci Danışman



PROF. DR. ATILLA ORBAY

Jüri Üyesi



Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Öncelikle arka planında zorlu ve yoğun bir çalışma sürecini içeren bu tez çalışmasının oluşmasında bilgi birikimi ve bilimsel deneyimlerinin yanı sıra, göstermiş olduğu sabır, özveri ve desteğinden dolayı, değerli tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Fahriye Hilal HALICIOĞLU'na saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum. Tezin gelişim sürecinde değerli eleştirileri ve değerlendirmeleriyle önemli katkıları olan ikinci tez danışmanım Doç. Dr. Suat GÜNHAN'a teşekkür ederim. Değerli hocam Prof. Dr. Halit YAZICI'ya tez izlemelerimdeki yapıcı eleştirileri ve çok değerli yönlendirmeleri için teşekkür ederim. Doktora çalışmam süresince gereksinim duyduğum her zaman yardım ve desteğini esirgemeyen, paylaştığı çok değerli fikirleri ve önerileriyle tezin olgunlaşmasına büyük katkı sağlayan Doç. Dr. Mustafa Emre İLAL hocama teşekkür ederim.

Doktora tez savunma sınavıma katılarak değerli bilgileri ve yapıcı eleştirileri ile desteklerini eksik etmeyen Prof. Dr. Atilla ORBAY, Prof. Dr. Nilüfer AKINCITÜRK, Doç. Dr. Tahsin BAŞARAN, Doç. Dr. Cengiz YESÜGEY ve Doç. Dr. Tuğçe KAZANASMAZ' a teşekkür ederim.

Ayrıca, bu süreçte ihtiyaç duyduğum her zaman bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve paylaştığı çok değerli fikirleriyle çalışmaya katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Gülsu ULUKAVAK HARPUTLUGİL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Alan çalışmamın gerçekleşmesinde, gerekli bilgi ve dokümanlara erişmemde ve anket formunun uygulanması sürecinde yardım ve desteklerini esirgemeyen Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi okul müdürü İmdat KÖKSAL'a, müdür yardımcısı Gül ATMACA'ya, tüm okul çalışanlarına, öğrencilerine ve öğretmenlerine teşekkür ederim.

Doktora sürecimin ilk senesini araştırma yapmak üzere Güney Kaliforniya Üniversitesi Mimarlık Bölümünde geçirdim. Bu süreçte beni araştırma grubuna kabul eden ve bir öğrencisi gibi görerek araştırma konuma yönelik bilgi birikimi

oluşturmamda büyük katkıları olan Yrd. Doç. Dr. David Jason GERBER ve arkadaşım Dr. Eve LIN'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince GenOpt optimizasyon programıyla ilgili teknik bilgi desteği ve yönlendirmeleri için Dr. Michael WETTER'e ve hassasiyet analizi uygulamasına ilişkin bilgi ve paylaşımları için Dr. Wei TIAN'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman ve her koşulda yanımda olan ve maddi manevi desteklerini daima yanımda hissettiğim başta sevgili annem Zülfüye ŞENEL'e, babam Sıddık ŞENEL'e, ablam Doç. Dr. Ayşegül Ülkü METİN'e ve ağabeyim Oğuzhan Alper ŞENEL'e ve tüm yakınlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, bu zorlu süreci benimle birlikte yaşayan ve şüphesiz en büyük desteği sağlayan sevgili eşim Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ertuğrul SOLMAZ'a gösterdiği anlayış, özveri ve bana olan güveni için ve hayattaki en güzel hediyem canım kızım N. Bilge SOLMAZ'a bana yaşattığı koşulsuz ve sonsuz sevgi için teşekkür ederim.

Aslıhan ŞENEL SOLMAZ

BİNA ENERJİ PERFORMANSINI GELİŞTİRMEDE OPTİMUM ÇÖZÜMLERİ BELİRLEMeye YÖNELİK SİMÜLASYON VE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON TABANLI BİR KARAR DESTEK MODELİ

ÖZ

Bina enerji performansını geliştirmeye yönelik karar verme sürecinde karar verici çok sayıda çözüm alternatifi arasından enerji, maliyet, çevresel etki gibi birden fazla kriteri aynı anda dikkate alarak optimum çözümü belirlemek zorundadır. Oldukça karmaşık olan bu süreçte ortaya çıkan başlıca üç problemin olduğu tespit edilmiştir. Bunlardan ilki, bu çözümlerin belirlenmesinde karar vericiyi yönlendirecek sistematik yöntemlerin yaygın olarak kullanılmamasıdır. İkincisi, bina enerji performansını geliştirme sürecinde girdi-çıkı etkileşimine yönelik bilgi desteğine ihtiyaç duyulmasıdır. Üçüncüsü ise, karar vericinin çok amaçlı optimizasyon problemiyle karşı karşıya olması ve buna çözüm üretme gerekliliğidir. Çalışmada bu problemlere çözüm olarak, hassasiyet analizi ve simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yöntemlerine dayanan bütünleşik bir yaklaşımı kapsayan bir karar destek modeli önerilmiştir. Bina enerji performansını geliştirmede optimum çözümleri belirlemeye yönelik önerilen bu model, başta mimarlar olmak üzere tüm karar vericilere karar desteği sağlayacak biçimde geliştirilmiştir.

Hassasiyet analizi yöntemi, tasarım parametrelerinin bina enerji performansı üzerindeki etki düzeylerinin belirlenmesi ve önem derecelerine göre sıralanması ile önemli bir bilgi desteği sağlamaktadır. Çok amaçlı optimizasyon yöntemi ise, birden fazla kriterin eş zamanlı ele alınmasını ve büyük çözüm kümeleri içerisinde araştırma yapılmasını gerektiren problemlere çözüm üretmede önemli bir güce sahiptir. Önerilen modelde, varyans tabanlı global hassasiyet analizi yönteminin uygulamasında EnergyPlus bina performans simülasyon programı, Matlab, Simlab ve Microsoft Excel programları bir arada kullanılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon yönteminin uygulamasında ise, GenOpt optimizasyon programı EnergyPlus simülasyon programı ve Microsoft Excel programı ile entegre bir şekilde kullanılmıştır. Böylelikle, çalışma kapsamında önerilen modelde birden fazla

programın belirli bir amaca yönelik entegre edilmesi ve yazılan bilgisayar kodlarıyla otomasyon sağlanması ile özgün bir karar destek yaklaşımı geliştirilmiştir.

Önerilen model uygulanabilirliğinin test edilmesi amacıyla mevcut bir okul binası üzerinde uygulanmıştır. Bu tez çalışmasının sonucunda önerilen karar destek modelinin: Binanın yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri ve Net Bugünkü Değer (NBD) kriterlerine göre optimum çözümlerin geliştirilmesinde; Binada odaklanması gereken öncelikli uygulama alanlarının belirlenmesinde, potansiyel bir güce sahip olduğu saptanmıştır.

Anahtar kelimeler: Bina enerji performansı, karar destek sistemi, hassasiyet analizi, çok amaçlı optimizasyon, bina performans simülasyonu, bina enerji modelleme, bina performans değerlendirme.

A DECISION SUPPORT MODEL BASED ON SIMULATION AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION TO DETERMINE OPTIMUM SOLUTIONS FOR BUILDING ENERGY PERFORMANCE

ABSTRACT

During decision making process for improving building energy performance, the decision maker is forced to determine the optimum solution out of many solution alternatives according to multiple criteria such as energy, cost and environment. This is a complex process in which there are three main problems. The first of these problems is the limited use of systematic decision making approaches that guide the decision maker to the most effective solution. Secondly, there is a need for knowledge support about input-output relationships in building energy performance. Thirdly, the decision maker is faced with a multi-objective optimization problem that needs to be solved. In this work, an integrated decision support model built on sensitivity analysis and simulation based multi-objective optimization is proposed to solve these problems. The proposed decision support model to determine optimum solutions for building energy performance is developed to mainly support architects as well as all the decision makers.

Sensitivity analysis provides knowledge support by identifying influence levels of design parameters on building energy performance and ranking their order of importance. Multi-objective optimization, on the other hand, works powerfully on problems that require solving for multiple objectives at the same time and searching in large solution spaces. EnergyPlus building performance simulation software, Matlab, Simlab and Microsoft Excel are all used together for the execution of variance based sensitivity analysis. As for multi-objective optimization, GenOpt optimization package, EnergyPlus and Microsoft Excel are used in an integrative way. Therefore, by integrating multiple software tools towards a predefined goal and implementing automation by computer codes, a novel decision support approach is developed.

The proposed model is applied to an existing school building to test its applicability. The proposed decision support model has potential for the following cases: Developing optimum solutions for building annual heating and cooling energy consumptions and Net Present Value (NPV) criteria; Identifying the primary application areas in building that should be focused on.

Keywords: Building energy performance, decision support system, sensitivity analysis, multi objective optimization, building performance simulation, building energy modelling, building performance evaluation.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	v
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xvi

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1 Problemin Tanımlanması	4
1.2 Araştırmanın Hedefi ve Amaçları	9
1.3 Araştırmanın Yöntemi ve Kapsamı	11
1.4 Araştırmanın Çerçevesi	13

BÖLÜM İKİ – LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 16

2.1 Bina Enerji Performansını Geliştirmeye Yönelik Karar Destek Süreci	23
2.2 Bina Enerji Performans Göstergeleri	25
2.3 Bina Enerji Performans Parametreleri	27
2.3.1 Bina Kabuğu Opak Yüzeylere Yönelik Parametreler	29
2.3.2 Bina Kabuğu Saydam Yüzeylere Yönelik Parametreler	31
2.3.3 Bina Kabuğu Saydam Yüzey Gölgeleme Elemanlarına Yönelik Parametreler	32
2.4 Bina Enerji Performans Değerlendirmesi	34
2.4.1 Bina Enerji Performans Simülasyonları	40
2.4.2 Bina Enerji Simülasyon Programlarının Geçerliği ve Simülasyon Modelinin Kalibrasyonu	44
2.4.3 Bina Enerji Modellemesi ve Modellerin Doğrulanması	46

2.5 Bina Enerji Performansını Geliştirmeye Yönelik Karar Destek Sistemleri...	47
2.5.1 Simülasyon Tabanlı Yaklaşımlar	50
2.5.2 Çok Kriterli Karar Verme Sistemleri	51
2.5.3 Hassasiyet Analizi	52
2.5.3.1 Hassasiyet Analizi Yönteminin Uygulama Adımları ve Çeşitleri	54
2.5.3.1.1 Lokal Hassasiyet Analizi	56
2.5.3.1.2 Global Hassasiyet Analizi	56
2.5.3.2 Binalarda Hassasiyet Analizi Uygulamasına Yönelik Mevcut Çalışmalar	58
2.5.4 Çok Amaçlı Optimizasyon	62
2.5.4.1 Binalarda Çok Amaçlı Optimizasyon Uygulamasına Yönelik Mevcut Çalışmalar	67
2.6 Mevcut Karar Destek Yaklaşımlarının Değerlendirilmesi	69
BÖLÜM ÜÇ – YÖNTEM.....	74
3.1 Bina Enerji Performansını Geliştirmede Optimum Çözümleri Belirlemeye Yönelik Simülasyon ve Çok Amaçlı Optimizasyon Tabanlı Bir Karar Destek Modeli	74
3.1.1 Bina Enerji Modeli (Taban Model) Oluşturma (1. Aşama)	76
3.1.2 Hassasiyet Analizi (2. Aşama)	77
3.1.3 Optimizasyon (3. Aşama).....	87
3.1.3.1 GenOpt Optimizasyon Programı	91
3.1.3.2 GenOpt Optimizasyon Programı İçinden Algoritma Seçimi	93
3.1.3.3 Amaç Fonksiyon	95
BÖLÜM DÖRT – ÖNERİLEN MODELİN MEVCUT BİR BİNANIN ENERJİ PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİNDE UYGULANMASI	97
4.1 Önerilen Modelin Uygulanacağı Mevcut Binanın Belirlenmesi.....	97
4.1.1 Önerilen Modelin Uygulanacağı Binaya İlişkin Bilgiler	99
4.1.1.1 Binaya İlişkin Genel Bilgiler	99

4.1.1.2 Bina Kabuğunun Özelliklerine İlişkin Bilgiler	105
4.1.1.3 Binanın Isıtma ve Soğutma Sistemlerine, Kullanıcı Yoğunluğu ve Kullanım Zamanlarına İlişkin Bilgiler	107
4.2 Önerilen Modelin Belirlenen Mevcut Binada Uygulanması.....	108
4.2.1 Bina Enerji Modeli (Taban Model) Oluşturma	108
4.2.1.1 Bina Enerji Modelini Doğrulama	114
4.2.1.2 Projenin Hedef ve Kısıtlarını Belirleme.....	116
4.2.2 Hassasiyet Analizi Yöntemi Uygulaması	123
4.2.2.1 Girdi Parametrelerini Belirleme ve Girdiler İçin Örneklem Oluşturma	123
4.2.2.2 Girdi Dosyalarını Oluşturma	126
4.2.2.3 Simülasyon ve Çıktı Dosyalarını Elde Etme	127
4.2.2.4 Hassasiyet Analizi Katsayısı Seçme ve Girdi Parametrelerini Önem Düzeylerine Göre Sıralama	127
4.2.3 Çok Amaçlı Optimizasyon Yöntemi Uygulaması.....	134
4.2.3.1 Optimizasyonda Kullanılacak Girdi Parametrelerini ve İlgili Kabuk Bileşenlerini Seçme	134
4.2.3.2 Alternatif Üretme	137
4.2.3.3 Amaç Fonksiyonu Tanımlama (Isıtma ve Soğutma Enerjisi Tüketimi ve Net Bugünkü Değer Amaç Kriterleri İle) ve Ağırlıklandırma	140
4.2.4 Bina Enerji Performansını Geliştirmeye Yönelik Optimum Çözümler .	142
4.2.4.1 Senaryo I	142
4.2.4.2 Senaryo II	153
4.2.4.3 Senaryo III	171
4.2.4.4 Örnek Bina İçin Önerilen Optimum Çözüm	179
4.3 Tartışma.....	180
BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR.....	182
KAYNAKLAR.....	206
EKLER.....	223

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Karar destek süreci	24
Şekil 2.2 Bina dış kabuğunda kullanılabilecek gölgeleme elemanı çeşitleri	34
Şekil 3.1 Önerilen modelin akış şeması	74
Şekil 3.2 Çalışma kapsamında hassasiyet analizi yönteminin uygulanmasına yönelik akış şeması	82
Şekil 3.3 Çalışma kapsamında simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yönteminin uygulanmasına ve EnergyPlus simülasyon programıyla GenOpt optimizasyon programının entegrasyonuna yönelik şema	90
Şekil 4.1 Türkiye’de mevcut okul binalarının yapım yıllarına göre oranları	98
Şekil 4.2 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi uydu görüntüsü	100
Şekil 4.3 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi giriş cephesi	100
Şekil 4.4 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi Kuzey cephesi	100
Şekil 4.5 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi zemin kat planı	102
Şekil 4.6 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi birinci kat planı	103
Şekil 4.7 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi ikinci kat planı	103
Şekil 4.8 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi üçüncü kat planı	104
Şekil 4.9 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi A-A kesiti	104
Şekil 4.10 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi Güney cephesi	104
Şekil 4.11 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi Kuzey cephesi	105
Şekil 4.12 Sketch-up Open Studio programıyla oluşturulan okul binasının 3D enerji simülasyon modeli	109
Şekil 4.13 Sketch-up Open Studio programıyla oluşturulan okul binasının 3D enerji simülasyon modeli	109
Şekil 4.14 Sketch-up Open Studio programıyla oluşturulan okul binasının 3D enerji simülasyon modeli	110
Şekil 4.15 Sketch-up Open Studio programıyla oluşturulan okul binasının 3D enerji simülasyon modeli	110

Şekil 4.16	Bina enerji modeline ait gerçek ısıtma enerjisi tüketim verileri ile simülasyon sonucunda elde edilen ısıtma enerjisi tüketim verilerinin karşılaştırılması	115
Şekil 4.17	Katılımcıların dersliklerdeki iç ortam konforsuzluk koşullarının öncelikli nedenlerine ilişkin görüşleri	119
Şekil 4.18	Girdi parametrelerinin binanın ısıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etki düzeylerine göre hesaplanan Sobol katsayıları ve parametrelerin Sobol katsayıları doğrultusunda önem düzeylerine göre sıralanması	128
Şekil 4.19	Girdi parametrelerinin binanın soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki etki düzeylerine göre hesaplanan Sobol katsayıları ve parametrelerin Sobol katsayıları doğrultusunda önem düzeylerine göre sıralanması	130
Şekil 4.20	Amaç fonksiyonunun GenOpt ile hesaplanmasıyla ortaya çıkan değeri. 8 ile 10. jenerasyonlar sırasında fonksiyon yakınsamaya başlamıştır ...	145
Şekil 4.21	Senaryo I kapsamında gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte NBD sol düşey eksen üzerinde; soğutma enerjisi tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; ısıtma enerjisi tasarrufu (IET) ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Siyah renkteki eğim çizgisi NBD'nin soğutma enerjisinden sağlanacak yıllık tasarruf miktarıyla ilişkisini göstermektedir	146
Şekil 4.22	Senaryo I kapsamında gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümlerin geri ödeme sürelerinin ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruflarıyla gösterilmesi. Grafikte geri ödeme süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; soğutma enerjisi tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; ısıtma enerjisi tasarrufu (IET) ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Siyah renkteki eğim çizgisi geri ödeme sürelerinin soğutma enerjisinden sağlanacak yıllık tasarruf miktarıyla ilişkisini göstermektedir.....	148
Şekil 4.23	Senaryo II kapsamında ilk 6 bina kabuk bileşeniyle (1. Grup) gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. grafikte geri ödeme süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; soğutma	

enerjisi tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; ısıtma enerjisi tasarrufu (IET) yüzdesi ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Kırmızı renkteki yatay çizgi 15 sene olan geri ödeme süresini göstermektedir..... 157

Şekil 4.24 Senaryo II kapsamında ilk 8 bina kabuk bileşeniyle (2. Grup) gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte geri ödeme süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; soğutma enerjisi tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; ısıtma enerjisi tasarrufu (IET) yüzdesi ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Kırmızı renkteki yatay çizgi 15 sene olan geri ödeme süresini göstermektedir..... 158

Şekil 4.25 Senaryo II kapsamında ilk 10 bina kabuk bileşeniyle (3. Grup) gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte geri ödeme süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; soğutma enerjisi tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; ısıtma enerjisi tasarrufu (IET) yüzdesi ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Kırmızı renkteki yatay çizgi 15 sene olan geri ödeme süresini göstermektedir..... 159

Şekil 4.26 Senaryo II kapsamında ilk 12 bina kabuk bileşeniyle (4. Grup) gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte geri ödeme süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; soğutma enerjisi tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; ısıtma enerjisi tasarrufu (IET) yüzdesi ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Kırmızı renkteki yatay çizgi 15 sene olan geri ödeme süresini göstermektedir..... 160

Şekil 4.27 Senaryo II kapsamında 14 bina kabuk bileşeniyle (5. Grup) gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte geri ödeme süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; soğutma

	enerjisi tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; ısıtma enerjisi tasarrufu (IET) yüzdesi ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Kırmızı renkteki yatay çizgi 15 sene olan geri ödeme süresini göstermektedir.....	161
Şekil 4.28	Çok amaçlı optimizasyonda bina kabuğu bileşen sayısı değiştirilerek elde edilen en yüksek ısıtma enerjisi tasarruf yüzdesini sağlayan çözümler ve bu çözümlerdeki soğutma enerjisi tasarruf yüzdeleri ve geri ödeme süreleri	162
Şekil 4.29	Çok amaçlı optimizasyonda bina kabuğu bileşen sayısı değiştirilerek elde edilen en yüksek soğutma enerjisi tasarruf yüzdesini sağlayan çözümler ve bu çözümlerdeki ısıtma enerjisi tasarruf yüzdeleri ve geri ödeme süreleri	166
Şekil 4.30	Çok amaçlı optimizasyonda ağırlık katsayıları ve bina kabuğu bileşen sayısı değiştirilerek elde edilen en yüksek ısıtma enerjisi tasarruf yüzdesini sağlayan çözümler ve bu çözümlerdeki soğutma enerjisi tasarruf yüzdeleri ve geri ödeme süreleri	176

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Bina enerji performansı ve çevresel kalitesine yönelik performans göstergeleri	26
Tablo 2.2 Tasarım sürecinde bina enerji performansı bağlamında ele alınan tasarım parametreleri	28
Tablo 4.1 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu lisesi binasına ait genel bilgiler ...	101
Tablo 4.2 Örnek okul binasının kabuk bileşenleri ve bileşenleri oluşturan mevcut yapı malzemelerinin termofiziksel özellikleri	106
Tablo 4.3 ASHRAE 55-2004 standardına göre 7 puanlı termal konfor ölçeği ..	118
Tablo 4.4 Katılımcıların yaz ve kış mevsimlerinde dersliklerdeki ısı konforu ASHRAE 55-2004 standardına göre değerlendirme sonucu	118
Tablo 4.5 Çalışma kapsamında hassasiyetleri incelenecek bina kabuğuna ilişkin tasarım (girdi) parametreleri	124
Tablo 4.6 Örnek okul binasına ilişkin girdi parametreleri ve parametrelerin alabileceği maksimum ve minimum değer aralıkları	125
Tablo 4.7 Isıtma ve soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki etki düzeylerine göre bina kabuk bileşenlerinin önem sıralaması	135
Tablo 4.8 İzmir iline ait 2008-2014 yılları arasındaki ortalama ısıtma ve soğutma gün derece değerleri	136
Tablo 4.9 Bina kabuk bileşenlerine yönelik olarak geliştirilen malzeme alternatifleri ve özellikleri	139
Tablo 4.10 Senaryo I kapsamında gerçekleştirilecek optimizasyon için toplam malzeme alternatifi sayısı ve çözüm kümesinin büyüklüğü ve simülasyon sürelerine ilişkin bilgiler	143
Tablo 4.11 Senaryo I kapsamında elde edilen optimizasyon sonuçları arasında Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 üzerinde belirtilen veri noktaları ve noktalara ait ilgili veriler	150
Tablo 4.12 Senaryo II kapsamında beş ayrı grupta seçilen bina kabuk bileşenleri.....	154

Tablo 4.13	Senaryo II kapsamında beş ayrı grup için gerçekleştirilecek optimizasyonlardaki toplam malzeme alternatifi sayısı ve optimizasyonların çözüm kümesinin büyüklüğü ve simülasyon sürelerine ilişkin bilgiler	155
Tablo 4.14	Isıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkilerine göre 14 bina kabuk bileşeninin önem sıralaması ve kabuk bileşen sayısı değiştirilerek gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda Isıtma Enerjisi Tasarrufunun en yüksek olduğu çözümler (bina kabuk bileşeninde kullanılabilecek malzeme alternatifi kodlarına göre belirtilmiştir) ..	164
Tablo 4.15	Isıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkilerine göre 14 bina kabuk bileşeninin önem sıralaması ve kabuk bileşen sayısı değiştirilerek çalıştırılan çok amaçlı optimizasyon sonucunda Isıtma Enerjisi Tasarrufunun en yüksek olduğu çözümler (bina kabuk bileşeninde kullanılabilecek malzeme alternatifi kodlarına göre belirtilmiştir) ...	167
Tablo 4.16	Isıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkilerine göre 14 bina kabuk bileşeninin önem sıralaması ve kabuk bileşen sayısı değiştirilerek çalıştırılan çok amaçlı optimizasyon sonucunda ısıtma ve soğutma enerjisinden yakın oranda tasarrufun sağlandığı, toplam enerji tasarrufunun en yüksek olduğu ve geri ödeme sürelerinin 15 sene ve altında olduğu çözümler (bina kabuk bileşeninde kullanılabilecek malzeme alternatifi kodlarına göre belirtilmiştir)	170
Tablo 4.17	Senaryo III kapsamında amaç fonksiyondaki amaç kriterlere farklı ağırlık katsayıları atayarak oluşturulan üç farklı amaç fonksiyon ile Senaryo I (İlk 4 bina kabuk bileşeni ile) için gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyonun tekrarlanması sonucunda Isıtma Enerjisi Tasarrufu, Soğutma Enerjisi Tasarrufu ve NBD'nin en yüksek olduğu çözümler (bina kabuk bileşeninde kullanılabilecek malzeme alternatifi kodlarına göre belirtilmiştir)	174

Tablo 4.18 Senaryo III kapsamında amaç fonksiyondaki amaç kriterlere farklı ağırlık katsayıları atanarak Senaryo I ve II için gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyonların tekrarlanması sonucunda Isıtma Enerjisi Tasarrufunun en yüksek olduğu çözümler (bina kabuk bileşeninde kullanılabilecek malzeme alternatifi kodlarına göre belirtilmiştir) .. 178

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Enerjiye olan talebin gün geçtikçe artması, küresel ısınma problemi ve devamında gelen iklim değişiklikleri sonucunda enerji ve çevresel konulara yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Bu problemlerin çözümünün enerji tüketiminin azaltılması yolu ile mümkün olduğu bilinen bir gerçektir. Dünya genelindeki birçok ülkede toplam enerji tüketiminin büyük bir bölümü binalardan (yapım ve işletim süreçlerinde) kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, doğrudan yapılı çevre ile ilişkili olan bu problemin çözümünde bina sektörü önemli bir potansiyel alan olarak görülmektedir

Binaların performans karakteristiğini tanımlayan ve tüm dünyada hızlı bir şekilde gelişen enerji etkin bina, yüksek performanslı bina, sürdürülebilir bina ya da yeşil bina yaklaşımlarının ana hedefi, binaların enerji etkinliğinin artırılmasıdır. Bu konu gerek ekolojik gerekse ekonomik faydaları nedeniyle gittikçe daha önemli hale gelmektedir. Bu doğrultuda, birçok ülkede yeni ve mevcut binaların enerji performansının geliştirilmesine yönelik önemli girişimler başlatılmıştır. Yeni binaların tasarım sürecinde enerji ve çevresel faktörler dikkate alınarak tasarım kararlarının verilmesi, mevcut binalarda ise enerji etkin iyileştirme stratejileri doğrultusunda uygulamaların yapılması gerekmektedir. Bu noktada, binalarda ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma için enerji tüketimlerinin öncelikle mimari tasarım kararlarıyla minimum düzeyde tutulması hedeflenmektedir. Yüksek performanslı ya da enerji etkin bina tasarımı yaklaşımlarında; kullanıcı konforu ve uygun maliyet koşullarının sağlanarak enerji ve kaynakların etkin şekilde kullanımına yönelik tasarım çözümleri geliştirmenin yolları aranmaktadır. Bütünleşik bir tasarım yaklaşımı ve karar verme sürecini gerektiren enerji etkin bina tasarımında; işveren, tasarımcı/mimar, mühendis, enerji analiz uzmanı gibi proje paydaşlarının eşgüdümlü ve katılımcı bir şekilde çalışarak binanın enerji performansına ilişkin hedefleri yerine getirecek şekilde tasarım kararları almaları, malzeme ve sistem seçimi yapmaları gerekmektedir. Farklı disiplinlerden katılımcılar optimum tasarım çözümünün elde edilmesi ortak hedefine odaklanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, bina performans hedefleri doğrultusunda tüm bina ve binaya ait alt

sistemler için optimum tasarım çözümlerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu noktada, özellikle tasarımcının karar ve seçimleri performans hedeflerinin başarılmasında belirleyici rol oynamaktadır. Bilinçsizce ve konunun tek boyutlu olarak ele alınmasıyla yapılan seçimler ise enerji performansı açısından yetersiz çözümlere neden olabilmektedir. Örneğin, tasarımcı binadaki gölgelendirme elemanlarına ilişkin bir seçim yaparken sadece yaz aylarında bina içinde meydana gelecek aşırı ısınmanın engellenmesine ve soğutma yüklerinin azaltılmasına değil, aynı zamanda kış aylarında da güneşten sağlanacak ısı kazançlarının en yüksek düzeyde olmasına ve ısıtma yüklerinin azaltılmasına odaklanmalıdır. Aksi halde, binada enerji tasarrufu sağlamaya yönelik verilen bir karar, bir başka açıdan enerji kayıplarına yol açabilir ve belki de sağlanacak tasarruftan çok daha fazla bir enerji tüketimi söz konusu olabilir. Aslında bu durum, performans hedefleri arasında ödünleşimin (trade-off) söz konusu olabileceğini ve tasarım kararları alınırken bina enerji performansına ilişkin birbiriyle çatışan amaçların (conflicting objectives) eş zamanlı olarak dikkate alınması ve bu doğrultuda değerlendirme yapılması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle, optimizasyon ile optimum çözümleri gerçekleştirmeye yönelik kararların verilebilmesi bina enerji performansı açısından oldukça önem kazanmaktadır.

Yukarıda belirtilen kapsamda bir tasarım yaklaşımı ve karar verme süreci, tasarımcılardan daha önce alışık olmadıkları konularda çaba sarf etmelerini ve çözüm üretmelerini gerektirmektedir. Buna karşılık, tasarımcılar/mimarlar mimarlık disiplini içerisinde enerji performansı ve bina teknolojilerine yönelik konuların önemini bazen göz ardı edebilmekte ya da bu konuları mühendislerin uzmanlık alanı olarak görmektedir. Bu düşüncenin temelinde ise genellikle, enerji ve çevresel konulara yönelik bilgi eksiklikleri yatmaktadır. Bu durum, enerji ve çevre ile ilgili gerekliliklerin/kriterlerin diğer tasarım kriterleriyle entegre edilmesini zorlaştırmakta ve sonuç olarak tasarım süreci boyunca üretilen tasarım alternatiflerinin enerji, konfor, çevresel etki gibi performans kriterlerine göre sergileyeceği performans çoğu zaman bilinmemektedir (Flager, Welle, Bansal, Soremekun ve Haymaker, 2009; Schlueter ve Thesseling, 2009).

Tasarım süreci boyunca alınan kararların enerji ya da diğer performans kriterlerine etkisinin belirlenebilmesi, bu kararların ölçülebilir olmasını gerektirmektedir. Tasarım süreci çok sayıda kararın alındığı yinelemeli bir süreçtir. Bu kararların birçoğu tasarımcının biçimlendirme yaklaşımı ve/veya tasarım denemeleri sonucunda ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, bu tür kararları biçimsel olarak tanımlamak ya da herhangi bir formüle bağlı olarak şekillendirmek güç olduğu gibi, değerlendirme araçlarıyla da desteklemek zordur. Bunların dışındaki bazı kararlar ise, genellikle iyi tanımlanmış bir dizi tasarım alternatifinin karşılaştırılmasını ve belirlenen bir takım proje kısıtları çerçevesinde en iyi alternatifin seçilmesini gerektirmektedir. Seçilen bu alternatifin uygunluğu ise genellikle enerji, konfor, çevresel etki gibi çeşitli performans kategorilerindeki ölçümlere dayanarak açıklanmaktadır. Test edilen alternatifin ilgili performans ölçümleri, bu alternatifin tasarım programında ifade edilen gereksinimleri karşılamadaki yeterliğini nicelik olarak belirtmektedir. Dolayısıyla, bina enerji performansını geliştirmeye yönelik doğru ve etkin tasarım kararlarının alınabilmesi, tasarım değişkenleri ile enerji performans kriterleri arasındaki yakın ilişki üzerinde odaklanmayı ve enerji performans analizini gerektirmektedir. Bu noktada, özellikle tasarım sürecinin erken evrelerinde verilen kararların binaların toplam enerji performansını önemli derecede etkilediği ve belirli bir performans hedefine ulaşmada belirleyici rol oynadığı unutulmamalıdır (US Energy Information Administration, 2011).

Bina enerji performansını geliştirmede doğru ve etkin tasarım kararlarının alınabilmesi için performans simülasyonları gibi karar desteği sağlayacak sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Performans simülasyonlarından elde edilen sonuçların optimizasyon ve tasarıma ilişkin alternatif çözümler içermesi de tasarım kararlarını yönlendirmede önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, tasarım kararlarının bina enerji performansına etkisinin değerlendirilmesi amacıyla bina performans modelleme, bina performans analizi ve bina performans optimizasyonu konuları giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Farklı disiplinlerin tüm proje kapsamında karar verme sürecine dahil olduğu bütünlük tasarım yaklaşımı, binalarda enerji performans hedeflerinin yerine getirilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Dolayısıyla, gerek yeni binaların gerekse mevcut binaların enerji performansını geliştirmeye yönelik alınan kararlar tüm proje paydaşlarını ilgilendirmektedir. Dolayısıyla, genel başlıkta “karar vericiler” olarak tanımlanan paydaşlar işveren, mimarlar/tasarımcı, mühendis, bina uzmanı, yatırımcı gibi karar vermede önemli rol oynayan kişilerdir. Bu noktada en önemli eksiklik ise, performans simülasyonları gibi destek sistemlerin kullanımının neredeyse zorunlu hale geldiği böyle bir süreçte, karar vermede kullanılan mevcut yöntemlerin yetersiz kalmasıdır. Enerji performansını geliştirmeye yönelik verilen kararlar genellikle karar vermede yetkili olan kişilerin deneyimlerine veya mevcut uygulamaların tekrarlanmasına dayanmaktadır. Bu durum ise, yanlış seçim ve uygulamalara ya da hedeflenen bina enerji performansının gerçekleştirilememesine yol açabilmektedir. Bu nedenle, günümüzde erken tasarım aşamasında performans değerlendirmeye dayanan sistematik karar desteği yaklaşımlarına duyulan ihtiyaç kendini önemli derecede göstermektedir (Hopfe, 2009).

1.1 Problemin Tanımlanması

Binaların enerji performansını geliştirmeye yönelik çözümlerin belirlenmesi aşamasında ortaya çıkan başlıca üç problemin olduğu tespit edilmiştir. Bunlar aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

Bu problemlerden birincisi, bina projelerinin yaşam döngüsünü içeren bir yaklaşımla gerek tasarım aşamasında gerekse kullanım/işletim döneminde binanın enerji performansını geliştirmeye/iyileştirmeye yönelik karar verme sürecinde sistematik yöntemlerin yaygın olarak kullanılmamasıdır. Yeni binaların tasarım sürecinde veya mevcut binaların enerji etkin iyileştirilmesinde enerji ve çevresel performans kriterleri başta olmak üzere bina performans hedeflerinin tümünü gerçekleştirmeye yönelik alınan tasarım kararları genellikle sezgilere, geçmişte edinilen deneyimlere veya mevcut uygulamaların tekrarlanmasına dayanmaktadır. Bu kararları alışlagelmiş kurallar ve rehberler yardımıyla bile gerçekleştirmenin zor

olduğu bu süreçte mimarlar/tasarımcılar, mühendisler gibi karar vericilerin enerji ve çevresel performansa yönelik karar vermede kullandıkları bu yaklaşımlar yetersiz kalmakta ve bu durum enerji performansı açısından yeterli olmayan tasarım çözümlerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu durumun temel nedeni, karmaşık bir sistem olan bina enerji performansını geliştirme sürecinin, tasarım değişkenleri ve enerji performans kriterleri arasındaki ilişkilerin anlaşılmasını ve alınan kararların enerji performans analizleriyle test edilmesini gerektirmesidir. Dolayısıyla, bina performans simülasyonları gibi performans analizi ve değerlendirmesi ile önemli bir karar desteği sağlayan sistemlerin kullanımının neredeyse zorunlu hale geldiği bu süreçte, yukarıda belirtilen mevcut karar mekanizmaları yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, tasarım kararları ve malzeme seçimlerine ilişkin enerji performans analizleri, çevresel etki, konfor hesaplamaları gibi konularda karar vericiyi yönlendirecek destek sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde yapı teknolojisindeki gelişmelerin paralelinde malzeme ve bileşen teknolojilerindeki gelişmeler de enerji etkinlik, düşük çevresel etki gibi performans hedeflerini gerçekleştirmeye yönelik doğru ve etkin seçimler yapılabilmesi için destek sistemlere olan ihtiyacın önemini vurgulamaktadır. Bina enerji performansını geliştirmeye yönelik bu teknolojiler enerji korunum önlemleri olup bina kabuğuna ilişkin malzeme ve bileşenlerden, enerji etkin ekipman kullanımına, ileri kontrol ve yenilenebilir enerji sistemlerinden, ileri ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinin kullanımına kadar çok çeşitlidir. Çok sayıda ve farklı özelliklere sahip olan bu teknolojiler arasından bina için en etkin uygulama çözümlerinin belirlenebilmesi, bina ve alt sistemlerine ilişkin performans analizlerinin yapılmasını gerektirmektedir. Bu analizler yapılmadan, doğrudan mevcut uygulamaların tekrarlanması ile önerilen çözümler ise, her zaman performans açısından başarılı sonuçlar sağlamayabilmektedir. Çünkü her bina farklı sistem ve karakteristiklere sahiptir dolayısıyla bir bina için önerilen bir uygulama başka bir bina için uygun olmayabilir. Bu nedenle, tasarım kararları alınırken önerilecek çözümlerin o bina özelinde olması gerekmektedir. Bu noktada temel problem; yukarıda da belirtildiği gibi, enerji performansına yönelik tasarım çözümlerini geliştirmede kullanılan genel kabul görmüş kurallar, kişisel deneyimler, mevcut uygulamaların tekrarlanması gibi mevcut karar verme yöntemlerinin yerini, performans değerlendirmeye dayanan

sistematik bir karar verme sürecinin ve bunu sağlayacak yöntemlerin alması gerektiğidir. Diğer bir ifadeyle, binaların enerji ve çevresel performansını geliştirmeye yönelik karar verme sürecinde karar vericiye problemin anlaşılması ve uygun çözümün bulunması yönünde rehberlik edecek basitleştirilmiş karar destek sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Murray ve Sullivan, 2012).

İkinci problem ise; bina projelerinin yaşam döngüsünde bina enerji performansına ilişkin bilgi desteği gereksinimine yöneliktir. Binalar mimari, mekanik, çevresel ve hatta sosyal boyutları olan karmaşık sistemlerdir. Çok boyutlu bu sistem özelliği binanın enerji performansını geliştirme sürecini de karmaşıklştırmaktadır. Bina performansını etkileyen tek bir parametre yoktur, aksine performans birden çok parametrenin aynı anda etkileşimi sonucunda belirlenir. Dolayısıyla, binada girdi-çıkıtkı etkileşimi oldukça fazladır ve basit hesaplarla veya yukarıda belirtilen karar verme sürecindeki mevcut yaklaşımlarla bu etkileşimleri yeterli düzeyde tanımlamak mümkün değildir. Karmaşık bina sistemlerinin enerji performansını değerlendirmede bugün için en etkili araç bina enerji performans simülasyon programlarıdır. Bu programlar, bina performansını etkileyen birçok parametreyi değerlendirebilmesi nedeniyle doğru ve etkin enerji korunum çözümlerinin geliştirilebilmesinde önemli bir güce sahiptir. Ancak, karar verme sürecinde mimarlar/tasarımcılar gibi karar vericiler çoğunlukla teknik bilgi altyapısı gerektiren simülasyon sonuçlarını anlamakta zorluk yaşayabilmektedir. Bina performans simülasyonlarının karmaşık yapıları ve bina fiziğine yönelik bilgi gerektirmeleri, tasarım sürecine entegrasyonu ve yaygın kullanımına yönelik önemli engellerdir. Bu noktada, özellikle iklim koşulları gibi çevresel etkenlere, bina ve bina karakteristiklerine göre önem düzeyi değişebilen tasarım değişkenleriyle ilişkili biçim, boyut, yönlenme ve bina sistemlerinin boyutlandırılmasında uygun değerlerin belirlenebilmesi konusu oldukça karmaşıktır ve bilgi desteği olmadan doğru tasarım çözümlerinin geliştirilebilmesi oldukça zordur. Bu durumun temel nedeni, tasarımdaki tüm parametrelerin enerji, konfor, çevresel etki gibi tanımlı bir performans kriteri üzerinde aynı etkiye sahip olmamasıdır. Diğer bir ifadeyle, tüm parametreler bina performansını aynı önem ve ölçüde etkilememektedir. Bir parametre tanımlı bir performans kriteri üzerinde pozitif yönde bir etki gösterirken diğer bir parametre aynı kriter üzerinde tam tersi bir

etki gösterebilmektedir. Ayrıca, parametrelerin birbirleriyle etkileşimi ve aralarında oluşan ilişkiler nedeniyle, herhangi bir parametrenin bina performansı üzerinde tek başına yapacağı etki, diğer parametrelerle bir arada yapacağı etkiye göre farklılık göstermektedir. Karar vericiler tarafından tüm bu ilişkiler zincirinin bilinmesi; bina enerji performansı üzerinde etkili olan parametrelerin ve parametreler arasındaki etkileşimlerin anlaşılmasına, karar vericiye bilgi desteği sağlanmasına ve bina için öncelikli çözümlerin tanımlanarak karar verme sürecinin etkinliğinin artırılmasına olanak sağlayacaktır. Dolayısıyla, parametrelerin önem düzeylerine, etkilerine ve birbirleriyle etkileşimlerine yönelik bilgiler ile sağlanacak bilgi desteği, bilinçsizce yapılan seçimlerin ve performans açısından yetersiz çözümlerin önüne geçecektir. Tasarımcının tasarım sürecinde tasarım değişkenleri ve enerji performans kriterleri arasındaki bu ilişkileri bilmesi, aynı zamanda simülasyon sonuçlarını anlayabilmesine ve sebep-sonuç ilişkisi kurabilmesine de yardımcı olacaktır. Sonuçta, her bir tasarım kararı bina performansına yönelik tekil bir etkinin ötesinde bir etkiler zinciri oluşturmaktadır. Bu nedenle, tasarımcı/mimar, mühendis gibi proje paydaşlarının, enerji performansı açısından başarılı bir çözüm geliştirebilmeleri için yukarıda açıklanan tüm bu ilişkilerin farkında olarak karar vermeleri gerekmektedir.

Bina enerji performansını geliştirmeye yönelik karar verme sürecinde ortaya çıkan üçüncü problem, bina performansının farklı kriterlere göre değerlendirilmesi ihtiyacı doğrultusunda karar süreçlerinin karmaşıklaşmasıdır. Bir bina projesinde enerji performansına ilişkin kararlar, enerji korunumuna yönelik bir dizi alternatif çözüm arasından yapılan seçimler sonucunda verilir. Bu noktada, karar vericiler (işveren, mimar/tasarımcı, mühendis, bina uzmanı, yatırımcı) en etkin çözümü belirlerken enerji, maliyet, çevresel etki gibi birden fazla kriteri aynı anda dikkate almak zorundadır. Diğer bir ifadeyle, çoğu zaman birbiriyle çatışan ya da birbirini olumsuz yönde etkileyen amaç kriterler arasında optimum oranları sağlayacak bir çözüm geliştirmek durumundadır. Ayrıca, optimum çözüm önerisi için çoklu enerji korunum önlemlerinin performansının değerlendirilmesi ihtiyacı, performans kriterleri arasındaki lineer ve lineer olmayan ilişkilerin anlaşılmasını gerektirir ki, bu durum karar vericiler için zor ve bunaltıcı olabilmektedir (Holst, 2003). Binanın enerji korunumuna yönelik tek bir uygulama önerisi optimum çözümü başaramayabilir ve

uzun dönemde beklenmedik problemlere yol açabilir. Dolayısıyla, çok sayıda çözüm alternatifi arasından enerji korunumuna yönelik en etkin çözümün belirlenmesi, optimum çözüme ulaşma olasılığını da arttıracaktır. Çok geniş çözüm kümeleri içerisinde araştırma yapılırken, birbiriyle çatışan birden fazla kriterin/amacın eş zamanlı olarak dikkate alınması gereken durumlarda kriterler arasında ödünleşim (trade-off) meydana gelebilmekte ve karar verici “çok amaçlı optimizasyon” problemiyle karşı karşıya kalmaktadır (Ma, Cooper, Daly ve Ledo, 2012). Bu noktada, optimizasyonun mutlaka dikkate alınması ve optimum çözümleri gerçekleştirmeye yönelik kararların verilmesi gerekmektedir. Örneğin, sıcak iklimlerde bina kabuğundaki pencere alanının artırılması kışın güneşten sağlanacak ısı kazançlarını da artırarak binanın ısıtma yükünü azaltabilir. Yazın ise tam tersine aşırı ısınmaya neden olarak binanın soğutma yükünü artırabilir. Güneşten kaynaklanan aşırı ısınmaya engel olmak için pencere alanının azaltılması ise, gün ışığından yeterince faydalanamamaya neden olabilir. Bu durumda, binanın soğutma yükünün azaltılması için verilen bir karar, binanın aydınlatma enerjisi tüketimini artıracak ve belki de sağlanacak tasarruftan çok daha fazla bir enerji tüketimi söz konusu olacaktır. Bina enerji performansına yönelik doğru ve etkin kararların verilebilmesi için gerek performans hedefleri arasında meydana gelen ödünleşimin (trade-off) dikkate alınması zorunluluğu gerekse geniş bir çözüm kümesi içerisinde çok sayıda çözüm alternatifinin değerlendirilmesi gerekliliği, karar verme sürecinin karmaşıklığını gittikçe artırmakta ve destek sistemlerin kullanımını neredeyse zorunlu hale getirmektedir (Yi ve Malkawi, 2009). Her ne kadar her bir amaç kriteri aynı anda sağlayacak global bir çözümün bulunması imkansız olsa da, ideal çözüme ulaşılabilmesi için çeşitli karar destek sistemleri kullanılmaktadır (Kolokotsa, Diakaki, Grigoroudis, Stavrakakis ve Kalaitzakis, 2009). Doğru ve etkin çözüm önerilerinin geliştirilmesinde bu karar destek sistemlerinden bina performans simülasyonları ve çok kriterli karar verme teknikleri ön plana çıkmaktadır ancak bu sistemlerin “sınırlı sayıda çözüm alternatifi” arasında araştırma yapabilmeleri önemli bir kısıtlamadır (Diakaki ve diğer., 2010). Bu noktada, tasarım kararlarının enerji, maliyet, çevresel etki ve diğer performans kriterlerine göre optimizasyonu gereksinimi doğrultusunda, bina performans simülasyonlarının yanı sıra çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin de kullanılmasına ve performans simülasyonları ve

tasarım araçlarıyla entegre edilmesine yönelik ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, bina performansını geliştirmeye yönelik en etkin tasarım çözümlerinin belirlenebilmesinde, enerji, maliyet, termal konfor gibi aralarında ödünleşimin (trade-off) söz konusu olabileceği birden fazla kriterin eş zamanlı olarak ele alınabilmesine ve büyük bir çözüm kümesi içinde araştırma yapılabilmesine olanak sağlayacak karar desteği yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır (Ma ve diğer., 2012).

Yukarıda açıklanan problemler bina enerji performansını geliştirme odaklı çalışmaların gerekliliğini işaret etmektedir. Tez çalışmasının ikinci bölümünde ilgili literatürde yer alan çalışmalara yönelik irdellemeler detaylı bir şekilde açıklanmakta ve elde edilen çıkarımlar sunulmaktadır. Literatür araştırmasının sonucunda, bina enerji performansını geliştirmeye/iyileştirmeye yönelik doğru ve etkin tasarım çözümlerinin önerilebilmesine olanak sağlayacak yaklaşımların geliştirilmesi odaklı yoğun araştırmalara rağmen, yukarıda belirtilen problemlerin derinlemesine irdelendiği ve tümünün çözümüne yönelik çalışmalara ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir.

1.2 Araştırmanın Hedefi ve Amaçları

Yukarıda belirtilen problemler; binaların enerji performansını geliştirmeye yönelik bina ve binaya ait alt sistemler ile çevresel faktörler arasındaki karmaşık etkileşimlerin doğru şekilde analiz edilmesi, tutarlı sentezlere ulaşılabilmesi ve sonuç olarak doğru ve etkin enerji korunum önlemlerinin/stratejilerinin tanımlanmasında sistematik bir yaklaşımın geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmada, binaların enerji performansını geliştirmede/iyileştirmede optimum çözümleri belirlemeye yönelik karar desteği sağlayacak bir modelin önerilmesi hedeflenmektedir.

Bu hedef doğrultusunda belirlenen amaçlar ise şunlardır:

- Bina enerji performansı olgusunun irdelenmesi,

- Bina enerji performansını değerlendirme yollarının tespit edilmesi,
- Bina enerji performans simülasyonlarının bina performansını değerlendirmede ve tasarım kararları almadaki yeri ve öneminin belirlenmesi,
- Bina enerji modellemesi ve performans simülasyonuna yönelik gerekli adımların tespit edilmesi,
- Bina enerji performansını geliştirmeye/iyileştirmeye yönelik karar destek sürecinin ve ana bileşenlerinin analiz edilmesi,
- Bina enerji performansını geliştirmeye/iyileştirmeye yönelik olarak kullanılan karar destek sistemlerinin ve geliştirilen yaklaşımların analiz edilmesi,
- Bina enerji performansını geliştirmeye/iyileştirmeye yönelik mevcut karar destek yaklaşımlarının eksikliklerinin belirlenmesi,
- Hassasiyet analizi yönteminin tanımlanması ve bina enerji performansında kullanımına yönelik olarak geliştirilen yaklaşımların analiz edilmesi,
- Hassasiyet analizi yönteminin çeşitlerinin ve bunlar arasındaki temel farkların araştırılması,
- Hassasiyet analizi yönteminin uygulamasına yönelik ana adımların belirlenmesi,
- Hassasiyet analizi yönteminin uygulanması ile bina enerji performans kriterleri ve tasarım parametreleri arasındaki ilişkilerin analiz edilmesi ve bu parametrelerin performans kriterleri üzerindeki etki düzeylerine/önem derecelerine göre sıralanması,
- Hassasiyet analizi yönteminin karar verme sürecindeki yeri ve öneminin analiz edilmesi,
- Hassasiyet analizi yönteminin optimizasyon sürecini ne şekilde yönlendireceği ve destekleyeceğinin tespit edilmesi,

- Çok amaçlı optimizasyon yönteminin tanımlanması ve bina enerji performansı alanında kullanımına yönelik olarak geliştirilen yaklaşımların analiz edilmesi,
- Çok amaçlı optimizasyon yönteminin bileşenlerinin irdelenmesi,
- Çok amaçlı optimizasyon yönteminin karar verme sürecindeki yeri ve öneminin analiz edilmesi,
- Bina projelerindeki performans hedeflerini belirten farklı performans kriterleri (amaç kriterler) ile çok amaçlı optimizasyon yönteminin uygulanabilmesi için gerekli olan amaç fonksiyonun tanımlanması,
- Bina performansını geliştirme/iyileştirme sürecinde binanın ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimi ve yatırımın ekonomik faydasının olup olmadığını gösteren Net Bugünkü Değer (NBD) kriterlerine göre optimum çözüm önerilerinin geliştirilmesi,
- Amaç fonksiyonu oluşturan amaç kriterler arasında meydana gelen ödünleşimlerin (trade-offs) analiz edilmesi,
- Amaç fonksiyonu oluşturan amaç kriterlerin birbirlerine göre önem ve öncelik sıralarının değişmesi durumunun amaç fonksiyona aktarılması ve optimum çözümler üzerindeki etkisinin incelenmesi,
- Bina enerji performansını geliştirmeye/iyileştirmeye yönelik bir karar destek modelinin önerilmesi ve bir bina üzerinde uygulanarak modelin test edilmesi.

1.3 Araştırmanın Yöntemi ve Kapsamı

Bina enerji performansının geliştirilmesi ve buna yönelik karar verme süreci ile ilgili olarak kapsamlı bir literatür araştırması yapılmış ve bu alandaki bilimsel çalışmalar ve yaklaşımlar detaylı şekilde irdelenmiştir. Literatür araştırmasının sonucunda var olan problemlerin çözümüne yönelik olarak entegre bir karar destek yaklaşımına ihtiyaç olduğu ortaya çıkmış ve bu bağlamda bir model önerisi gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında, binaların enerji performansını geliştirmede optimum çözümleri belirlemeye yönelik karar desteği sağlaması amacıyla önerilen model; varyans tabanlı global hassasiyet analizi ve simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin bütünleşik bir şekilde kullanımına dayanmaktadır.

Hassasiyet analizi yöntemi tasarım aşamasında bina enerji performansı üzerindeki etkilerine göre en etkili parametrelerin belirlenmesi ile önemli bir bilgi desteği sağlamaktadır. Çok amaçlı optimizasyon yöntemi ise birden fazla amacın aynı anda ele alınmasını gerektiren problemlere çözüm getirebilmede ve büyük çözüm kümeleri içerisinde araştırma yapabilmeye olanak sağlayarak zaman alıcı problemlerle başa çıkmada önemli bir güce sahiptir ve çok daha az sayıda hesaplamayla birincil yaklaşımlara göre (kaba kuvvet yaklaşımı, simülasyon tabanlı yaklaşım) daha iyi performans göstermektedir (Ferreira, Pinheiro ve Brito, 2013). Bu iki yöntem bir arada kullanılarak bütünleşik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen bu yaklaşımda, hassasiyet analizi sonucunda elde edilen parametreler ve performans kriterleri arasındaki ilişkiler matematiksel optimizasyon için ön bilgi olarak kullanılmakta ve optimizasyon sürecini yönlendirmektedir. Diğer bir ifadeyle, hassasiyet analizi yöntemi optimizasyon sürecinde binanın enerji performansı üzerindeki en etkili parametrelere odaklanılmasını sağlamak ve optimizasyon sürecini daha etkili hale getirmek amacıyla bir ara adım olarak kullanılmıştır. Böylelikle, hassasiyet analizi bina enerji performansını geliştirmeye yönelik en etkin çözümün belirlenmesi sürecinde karar vericiyi girdi-çıkı ilişkilerinin ortaya çıkarılması yolu ile desteklemektedir.

Varyans tabanlı global hassasiyet analizi yönteminin uygulanması sürecinde, EnergyPlus bina performans simülasyon programı, Matlab, Simlab ve Microsoft Excel programları bir arada kullanılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon sürecinde ise; EnergyPlus simülasyon programı GenOpt optimizasyon programı ve Microsoft Excel programıyla entegre bir şekilde kullanılmıştır.

Bu tezin kapsamı ve sınırları şu şekildedir:

- Çalışmada önerilen model her ne kadar bina performansını geliştirmeye yönelik genel ve bütünsel bir yaklaşımı temsil etse de, performans kriterleri olarak binanın yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri ve yatırımın ekonomik faydasının olup olmadığını gösteren ve belirli bir dönemde yatırımdan sağlanacak kazancı, başlangıç maliyetini ve geri ödeme süresini kapsayan Net Bugünkü Değer (NBD) kriterlerine odaklanılmıştır.
- Bina performansını geliştirmeye yönelik kararların alınmasında önemli rolü olan mimarlar/tasarımcılar modelin hedef kullanıcıları olarak belirlenmiştir. Bununla beraber diğer proje katılımcılarının da karar verme sürecine doğrudan ya da dolaylı olarak dahil olabilmesi nedeniyle “karar vericiler” başlığı altında diğer proje paydaşları da modelin potansiyel kullanıcıları olarak görülmüştür.
- Önerilen model özel bir bina tipine yönelik olarak değil tüm bina tiplerine uygulanabilecek şekilde geliştirilmiştir.
- Önerilen model yeni bina projelerinin erken tasarım aşamasında ve mevcut binaların enerji performansının iyileştirilmesi sürecinde kullanılabilecek özellikte geliştirilmiştir.

1.4 Araştırmanın Çerçevesi

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. Bölümlerin içerikleri aşağıda açıklanmaktadır.

Birinci bölüm, tez konusunun genel çerçevesinin açıklandığı “Giriş” bölümüdür. Bu bölümde çalışmanın önemi belirtilmiştir. Sonrasında, çalışmada ele alınan problemlerin tanımı yapılmış, hedef ve amaçlar belirtilmiş ve çalışmanın yöntemi açıklanmıştır.

İkinci bölüm, “Literatür Araştırması” başlığı altında çalışmaya altyapı oluşturacak temel bilgilendirmenin yapıldığı ve çalışmanın arka planının sunulduğu bölümdür. Bu bölümün ana çerçevesini bina enerji performansını geliştirmeye yönelik karar destek süreci ve sürecin temel bileşenleri oluşturmuştur. Bu doğrultuda, bina enerji performansı olgusu tanımlanmış, bina enerji performansına yönelik tasarım parametreleri, performans göstergeleri (kriterleri) ve bina performansını değerlendirme yolları açıklanmış ve bina enerji performansını geliştirmeye yönelik karar destek sistemleri ve mevcut yaklaşımlar incelenmiştir. Gerek yeni binaların gerekse mevcut binaların enerji performansının değerlendirilmesinde yaygın kullanılan bina enerji performans simülasyonlarının detaylarına yer verilmiştir. Bu bölümün sonunda mevcut karar destek yaklaşımlarının genel bir değerlendirmesi yapılmış ve eksiklikler saptanmıştır.

Üçüncü bölüm, “Yöntem: Bina Enerji Performansını Geliştirmede Optimum Çözümleri Belirlemeye Yönelik Simülasyon ve Çok Amaçlı Optimizasyon Tabanlı Bir Karar Destek Modeli” başlığı altında çalışma kapsamında önerilen modelin açıklandığı bölümdür. Üç ana aşamadan oluşan modelin birinci aşaması; performans simülasyon programıyla bina enerji simülasyon modelinin oluşturulması, modelin doğrulanması, projenin hedef ve kısıtlarının belirlenmesi uygulama adımlarını kapsamaktadır. İkinci ana aşamada, birinci aşama sonunda elde edilen bina simülasyon modeli, projenin hedef ve kısıtları doğrultusunda belirlenen tasarım parametreleri ve performans göstergeleri kullanılarak Varyans Tabanlı Global Hassasiyet Analizi yöntemi uygulanmaktadır. Elde edilen veriler doğrultusunda girdi parametreleri ve performans göstergeleri/kriterleri olan çıktı parametreleri arasındaki ilişkiler belirlenmekte ve her bir çıktı parametresi üzerindeki etki düzeylerine/önem derecelerine göre girdi parametreleri sıralanmaktadır. Modelin üçüncü adımında; ikinci adım sonunda elde edilen önem derecelerine göre sıralanmış girdi parametreleri arasından projenin hedefleri doğrultusunda en etkili girdi parametreleri seçilmektedir. Seçilen girdi parametrelerinin ait olduğu bina bileşenleri tanımlanarak bunlara yönelik malzeme alternatifleri üretilmektedir. Sonrasında ise, binanın ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri ve Net Bugünkü Değer (NBD) kriterlerini içeren amaç fonksiyon tanımlanarak simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yöntemi

uygulanmakta ve elde edilen çözümler alternatifleri arasından optimum çözümler seçilmektedir.

Dördüncü bölüm, “Önerilen Modelin Mevcut Bir Binanın Enerji Performansının Geliştirilmesinde Uygulanması” başlığı altında önerilen modelin uygulanabilirliğinin test edilmesi amacıyla mevcut bir okul binasında yapılan uygulama anlatılmıştır. Ayrıca, bu bölümde uygulama sonucunda elde edilen bulgular değerlendirilerek tartışılmıştır.

Beşinci bölüm, “Sonuçlar” bölümüdür. Bu bölümde tez çalışmasından elde edilen bulgulardan çıkartılan sonuçlar açıklanmış, önerilen karar destek modelinin bina enerji performansı alanına yapacağı katkılar ve gelecek çalışmalara ilişkin öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda ortaya çıkan küresel ısınma problemi ve giderek artan enerji ihtiyacı sonucunda çevresel yöntemlerin araştırılması ve bu yöndeki uygulamalar hız kazanmıştır. Dünya genelinde birçok ülkede toplam enerji tüketiminin büyük bölümünün yapılı çevreyi oluşturan binalardan kaynaklandığı bilinmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency-IEA) tarafından hazırlanan raporda sektörlere bağlı enerji tüketim istatistikleri incelendiğinde, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %30-35'inin binalardan (konut, ticari ve kamu) kaynaklandığı görülmektedir (International Energy Agency [IEA], 2014). Bina sektörü özellikle binanın kullanım/işletimi, yapımı ve yapı malzemelerinin üretimi aşamalarında yenilenemeyen enerji kaynaklarının tüketiminde önemli bir pay sahibidir. Bina düzeyinde ise enerji tüketiminin büyük bir bölümü binanın ısıtması, soğutması, havalandırması, aydınlatması gibi binaya servis veren elemanlardan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, bina sektörü enerji tüketiminin azaltılmasında önemli bir potansiyele sahiptir. Bu doğrultuda artık günümüz bina tasarımı pratiğinde binaların belirli bir süre, maliyet ve kalitede üretilmesini hedeflemenin yanı sıra, çevreye duyarlı, az enerji tüketen ve hatta kendi enerjisini üretebilen ve kullanıcılarının sağlıklı yaşam kalitesini de yükseltme hedefli çözüm arayışları ortaya çıkmıştır.

Genel çerçevede enerji tüketimi, kaynak tüketimi, çevresel problemler ve ortaya çıkan küresel iklim değişikliği gibi problemler doğrudan yapılı çevreyle ilişkili olduğundan odak noktası binalarda enerji performansı ve binalarda enerji etkinliği olan genel araştırma alanlarının tanımlanmasına yol açmıştır. Hem yeni hem de mevcut binalarda enerji etkinliğinin artırılmasına yönelik uygulamalar için yöntemlerin geliştirilmesi arayışına girilmiştir. Bina enerji performansı genel başlığı altında yeni binaların tasarım sürecinde gerekli enerji etkinlik düzeyinin sağlanabilmesi için gerekli rehberler, yönetmelikler ve araçlardan mevcut binaların iç çevre koşullarının geliştirilmesine, yenilenemeyen enerji kaynaklarının tüketiminin azaltılmasına, karbondioksit salınımının azaltılmasına kadar bina performansını

geliştirme odaklı çok sayıda alt araştırma alanları bulunmaktadır (Örneğin, yeşil binalar, düşük enerjili ve sıfır emisyonlu binalar, mevcut binaların enerji etkin iyileştirilmesi vb. araştırma alanları).

Bu gelişmeler tüm dünyada özellikle Avrupa Birliği (AB)'nde acil eylemler konusunda itici güç olmuştur. Mevcut ve yeni yapılacak binaların enerji etkinliğinin geliştirilmesi ve karbondioksit salınımlarının azaltılmasına yönelik çok sayıda yasal düzenleme yapılmıştır ve bu alandaki çalışmalar devam etmektedir. AB'nin Avrupa Parlamentosu ve Konseyi tarafından 2002 yılında yayımlanan Binalarda Enerji Performansı Direktifi (Energy Performance of Buildings Directive-EPBD) ile binalarda enerji performansının değerlendirilmesine yönelik standartlar ve ortak bir metodolojinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. (European Union [EU], 2002). Bu direktife göre Avrupa Birliğine üye ülkelerin enerji etkinlik konularının desteklenmesi doğrultusunda kendi yasal düzenlemelerini yapmaları ve binalar için enerji sertifikası şemaları oluşturmaları gerektirmektedir. Sonrasında “sıfır enerjili bina” konseptine yönelik uygulamaları başlatmak amacıyla bu direktif revize edilmiş ve 2010 yılında “EPBD recast” olarak yayımlanmıştır (EU, 2010). EPBD üç ana bölümden oluşmaktadır: enerji performansı gereksinimleri, enerji performans sertifikaları ve enerji performansı denetimi. Enerji performansı gereksinimleri bina türleri (yeni ya da mevcut) dikkate alınarak oluşturulmuştur. Enerji performans sertifikaları binaların enerji performans düzeyini göstermektedir. Enerji performansı denetimi ise, ısıtma-soğutma-havalandırma gibi binaya servis veren sistemlerin daha az enerji tüketimi için denetlenmesini kapsamaktadır ve ayrıca sistemler için öneriler sağlamaktır.

Türkiye’de ise binalarda enerji performansı konusundaki gelişmeler özellikle gelişmiş ülkelerdekine oranla daha yavaş olsa da son zamanlarda bazı önemli adımların atıldığı görülmektedir. 1998 yılında yayımlanan ve binaların ısıtılması için gerekli olan enerji ihtiyacının hesaplanmasına yönelik program öneren “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları-TS 825” standardını (Türk Standartları Enstitüsü [TSE], 2008) destekleyici olarak 2000 yılında “Binalarda Isı Yalıtımı Yönetmeliği” yayımlanmıştır (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2008a). Sonrasında, her iki yasal uygulama yeniden

düzenlenerek 2008 yılında revizyonları yapılmıştır. AB tarafından yayımlanan EPBD (Directive 2002/91/EC)'ye uyum sağlamak amacıyla 2007 yılında “Enerji Verimliliği Kanunu” yayımlanmıştır (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007). Daha sonra ise, bu kanun ve EPBD direktifi doğrultusunda 2008 yılında “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği” (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2008b) yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik 2010 yılında da EPBD-recast (Directive 2010/31/EU)'e uyumluluk ve bazı gerekli düzenlemeler nedeniyle revize edilmiştir (Bayram, 2011a). Yapılan bu yasal düzenlemelerle şu uygulamalar hedeflenmiştir:

- Binaların yıllık enerji tüketimleri baz alınarak enerji performanslarının değerlendirilmesi,
- Binaların enerji tüketimlerine ve karbondioksit salınım miktarlarına göre sınıflandırılması,
- Mevcut binalar için minimum enerji performansı gereksinimlerinin belirlenmesi,

2011 yılında ise, başta EN ISO 13790 standardı ve onun yönlendirdiği EPBD-recast (Directive 2010/31/EU) ile uyumlu olarak Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından binaların enerji performansının değerlendirilmesi ve enerji performans sınıfının belirlenmesi amacıyla hazırlanan “Bina Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi: BEP-TR” geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır. Web tabanlı BEP-TR programı, basit saatlik dinamik hesaplamaya dayanan (yarı dinamik) bir hesaplama yöntemine sahiptir (Bayram, 2011b). Yasal düzenlemelere göre, yönetmelik kapsamına giren tüm yeni binaların yıllık enerji tüketim miktarları ve karbondioksit salınım değerlerinin BEP-TR programıyla hesaplanması ve tüketim değerleri sınıfına göre “Enerji Kimlik Belgesi” almaları gerekmektedir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2012 yılında yayımlanan “İklim Değişikliği Eylem Planı 2011-2023” adlı raporda, özellikle ticari ve kamu binalarında ısı yalıtımı ve enerji etkin sistem uygulamaları ile yönetmelik koşullarının karşılanması; Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ve enerji verimliliğine yönelik diğer düzenlemelerin 2017 yılına kadar etkin şekilde uygulanmasının sağlanması; enerji etkinliğiyle ilişkili finansal destek

sağlayacak projelerin geliştirilmesi; yeni ve mevcut tüm binaların 2017 yılına kadar enerji kimlik belgesi alması; binalarda yıllık enerji tüketiminin 2015 yılına kadar % 10, 2013 yılına kadar ise % 20 oranlarında azaltılması; mevcut binaların enerji etkinliğini artırmaya yönelik uygulamaların geliştirilmesi; entegre bina tasarımı yaklaşımı ve sıfır karbon emisyonlu binalara yönelik kriterlerin geliştirilmesi; enerji etkinliği sağlamaya yönelik ölçütlerin fayda maliyet analizlerinin yapılması; enerji etkinliğe yönelik araştırmaların desteklenmesi gibi bir dizi uygulamanın hayata geçirilmesi hedeflenmektedir (The Ministry of Environment and Urbanization, 2012).

Bu aşamaya kadar sıklıkla kullanılan bina performansı, bina enerji performansı, binalarda enerji etkinliği gibi bazı kavramların tanımlanması konunun daha iyi anlaşılması açısından önemli görülmektedir. Bu kavramlar aşağıda açıklanmaktadır.

Uluslararası Bina ve Yapım Araştırma ve Yenilikler Konseyi (International Council for Research and Innovation in Building and Construction-CIB) tarafından 1982 yılında hazırlanan “Binalarda Performans Yaklaşımıyla Çalışmak” başlıklı raporda “performans yaklaşımı süreçten ziyade sonuç üzerinde düşünme ve çalışma pratiğidir. Bir bina ya da bina ürününün nasıl inşa edileceğinin tarif edilmesiyle değil neye gereksinim duyacağı ile ilgilenir” şeklinde tanımlanmaktadır (International Council for Research and Innovation in Building and Construction [CIB], 1982). Bina performansı konsepti; enerji performansı, kullanıcı konforu (ısıl konfor, iç ortam hava kalitesi, akustik, görsel konfor vb.) çevresel etki performansı, strüktürel performans, ekonomik performans gibi çeşitli performans kriterlerini içermektedir. Bu çalışmada ele alınan performans kriteri ise “bina enerji performansı”dır.

Bina performansının enerji boyutu (kriteri) farklı yollarla ele alınabilmektedir. “enerji performansı”, “ısıl (termal performans)” ve “çevresel performans” bina ya da bina bileşenlerinin ve sistemlerinin termofiziksel davranışlarının tanımlanmasında literatürde yaygın kullanılan üç kavramdır (Hui, 1996). Bu üç kavram bazı durumlarda birbirinin yerine kullanılabilmekte ve birbirilerinden ayırt edilmesi zorlaşmaktadır. Enerji performansı; binanın nihai enerji kullanımına ve enerji tüketen

ekipmanlarına odaklanır. Enerji performansı mevcut ya da öneri bir binanın enerji tüketimi veya kullanımı olarak tanımlanmaktadır (ASHRAE, 1990). Enerji performansı genel olarak tüm binayı, bina elemanlarını ve sistemlerini olduğu kadar bireysel elemanları da içermektedir. Tüm bina düşünüldüğünde enerji performansı; bireysel performansları, karmaşık analizleri ve optimizasyon sürecini bir araya getirmektedir (Hui, 1996). Binalarda enerji performansı; tüketilen enerjinin miktarı ya da binalarda ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma ve sıcak su için standart kullanımın tahmin edilmesi olarak tanımlanabilir. Ayrıca iklim koşulları ve güneş ısınım durumuna göre yönelme ve yerleşim, mevcut çevre yapıların etkisi, yalıtım, tesisat karakteristikleri, enerji üretimi gibi ölçütler binalarda enerji performansını etkilemektedir (European Union [EU], 2002). Sonuç olarak, binaların enerji performansı enerji tüketimini referans alan ve bina performansının düzeyini açıklayan nümerik bir göstergedir.

Bina enerji performansına paralel olarak kullanılan diğer bir kavram ise “enerji etkinlik” dir. Binaların enerji etkinliği; enerji yönetim programı dahilinde enerji tasarrufu sağlamaya yönelik bir dizi iyileştirmenin sonucudur (ASHRAE, 1999). Diğer bir ifadeyle, doğrudan binanın enerji kullanımının azaltılması için olanaklar ve önlemler ile ilişkilidir. Termal (ısı) performans ise; genel olarak ısı yüklerine (ısıtma ve soğutma yükleri) odaklanır ve bu yüklerin karşılanması için ekipmanlar tarafından kullanılan enerjiyi yansıtır. Termal performans, bina ısı kazanç ve kayıplarının, bina bileşenlerinin ısı kapasiteleri ve ısı transfer karakteristiklerinin hesaplanması olarak özetlenebilir (CIBSE, 2003). Son olarak “çevresel performans” ise daha genel amaçlar içerir ve termal konfor, aydınlatma, hava hareketi ve akustik gibi iç çevre faktörlerine odaklanır (Hui, 1996).

Birbirleriyle örtüşen yanları olan yukarıda açıklanan bu kavramların kullanımları ilgili çalışmanın içeriğine bağlıdır. Her ne kadar çalışmalarda terminoloji farklılık gösterse de tüm bu kavramların temeli binaların enerji performansının geliştirilmesine dayanmaktadır.

Bina enerji performansı alanında yapılan çalışmaları bütüncül bir bakış açısıyla değerlendiren Baird, Donn, Pool, Brander ve Chan (1984) bu çalışmaların arkasındaki itici gücün nedenlerini: pratikte enerji kullanımını etkileyen faktörlerin anlaşılmasını sağlamak; bina enerji performansını ölçme ve değerlendirmeyi sağlayacak yolları bulmak; ve mevcut bina simülasyon yöntemleriyle yapılan tahminlerin doğruluğunu araştırmak olarak açıklamaktadır.

Bina enerji performansının değerlendirilmesi ve geliştirilmesi konuları, yeni binaların tasarım sürecinde ve mevcut binaların enerji etkin iyileştirilmesinde bina enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu durum tasarım değişkenleri (parametreleri) ve enerji performansı arasındaki yakın ilişki üzerine odaklanılmasının temelini oluşturmaktadır. Özellikle erken tasarım aşamasında alınan kararlar binanın kullanım sürecindeki performansını önemli düzeyde etkileyeceğinden dolayı son derece önem kazanmaktadır. Örneğin, pasif ısıtma stratejileri doğrultusunda bina geometrisinin kompakt olması ve güney yönüne bakan cephedeki pencerelerin geniş olması, bina kabuğunda termal kütlesi yüksek bileşen kullanımı gibi birçok strateji sayılabilir. Ayrıca, mevcut binaların enerji etkin iyileştirilmesinde önerilen stratejilerin de o bina için optimum stratejiler olması oldukça önemlidir.

Bina enerji performansını geliştirmeye yönelik önerilen çözümlerin binanın performans gereklerini karşılayıp karşılamadığı ise ancak “performans değerlendirme” sonucunda belirlenebilmektedir. Bina performans değerlendirmesi ise “performans göstergeleri/kriterleri” temeline dayanmaktadır. Örneğin, bina enerji performansını değerlendirmek için binanın ısıtma ve soğutma yükleri, yıllık enerji tüketimi gibi çeşitli performans göstergeleri referans alınabilmektedir. Önerilen tasarım çözümlerinin bina performansına etkisi ise bu göstergeler referans alınarak ölçme, hesaplama veya simülasyon yöntemi yardımıyla çıkartılabilmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, performans bazlı bina tasarımı ya da enerji etkin iyileştirme süreçleri enerji, kullanıcı konforu ve çevresel etki gibi ilgili performans kriterlerini geliştirme odaklı stratejileri ve dolayısıyla kararları gerektirmektedir.

Günümüz tasarım pratiğinde, bina enerji performansını geliştirmeye yönelik alınan kararlar genellikle sezgilere, geçmişte edinilen deneyimlere veya mevcut uygulamaların tekrarlanmasına dayanmaktadır. Enerji ve çevresel performans kriterleri genellikle yönetmelik koşullarının yerine getirilip getirilmediğinin tespitinde dikkate alınmaktadır. Bu tür yaklaşımlar, özellikle enerji performansı açısından yeterli olmayan tasarım çözümlerinin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Ancak, bu kararları alışlagelmiş kurallar, rehberler yardımıyla bile gerçekleştirmek oldukça zordur.

Erken tasarım aşaması çok sayıda kararın alındığı bir süreçtir. Alınan kararların birçoğu tasarımcının biçimlendirme yaklaşımı veya tasarım denemeleri sonucunda ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, bu tür kararları biçimsel olarak tanımlamak güç olduğu gibi, değerlendirme araçlarıyla da desteklemek zordur. Bunların dışındaki bazı kararlar ise genellikle iyi tanımlanmış bir dizi alternatifin karşılaştırılmasını ve belirlenen bir takım proje kısıtları çerçevesinde en iyi alternatifin seçilmesini gerektirir. Seçilen bu alternatifin uygunluğu ise genellikle farklı performans kategorilerindeki ölçümlere dayanarak açıklanır. Test edilen alternatifin ilgili performans ölçümleri, bu alternatifin tasarım programında ifade edilen gereksinimleri karşılamadaki yeterliğini nicelik olarak belirtir (Hopfe, 2009). Daha önce de belirtildiği gibi, farklı kriterlere göre yapılan performans değerlendirmelerinde, o kritere ilişkin performans göstergeleri kullanılır. Performans göstergeleri, tasarım hedefini net olarak ortaya koymaya ve performans düşüncesini bu hedef etrafında düzenlemeye yardımcı olur.

Bu açıklamalar doğrultusunda, bina enerji performansına yönelik doğru ve etkin çözümlerin geliştirilebilmesinin sistematik bir karar verme sürecini ve karar destek yaklaşımlarını gerektirdiği söylenebilir. Bu gereklilik doğrultusunda, tez çalışmasının konusunu oluşturan bina enerji performansını geliştirmeye yönelik karar destek süreci, Bölüm 2.1’de açıklanmaktadır.

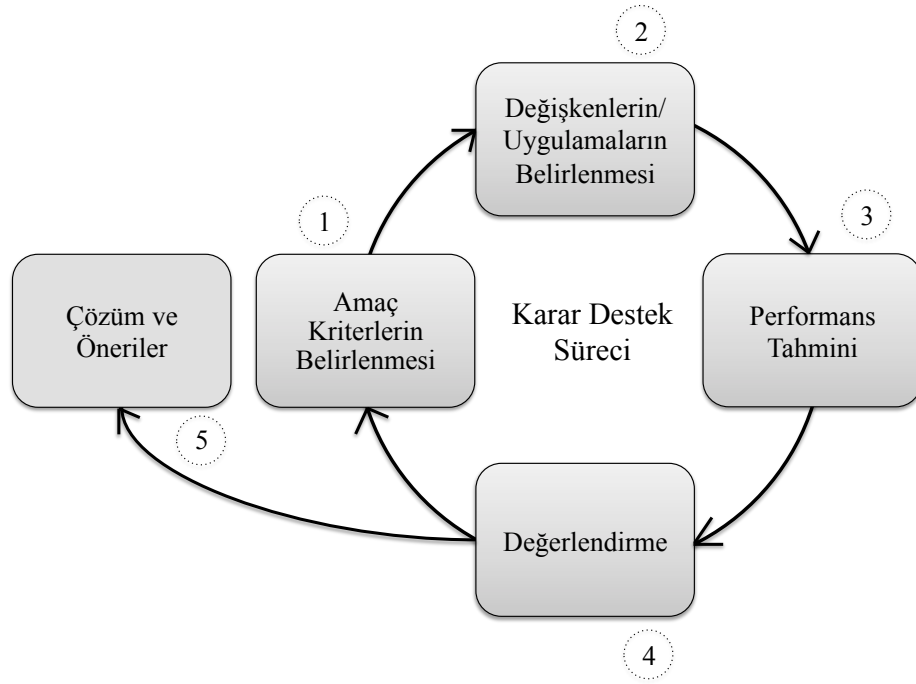
2.1 Bina Enerji Performansını Geliştirmeye Yönelik Karar Destek Süreci

Binaların tasarım ya da kullanım/işletim sürecinde enerji performansını geliştirmeye yönelik en etkin uygulamaların/stratejilerin tanımlanması sistematik bir karar verme sürecini gerektirmektedir.

Literatürde karar destek sürecine yönelik çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Örneğin, Jaffal, Inard ve Ghiaus (2009) ve Simon (1977) karar destek süreci yaklaşımını bina tasarımı için uyarlamıştır. Uyarlanan bu yaklaşım dört uygulama adımından oluşmaktadır:

- Bilgi: hedeflerin tanımlanması, verilerin toplanması ve doğrulanması, problemin tanımlanması ve formüle edilmesi,
- Tasarım: model strüktürü ve değişkenlerin seçilmesi, performans kriterlerinin tanımlanması, alternatif çözüm önerilerinin geliştirilmesi,
- Seçme: alternatifler arasından tanımlanan hedeflere göre en iyi olanının seçilmesi, seçimin açıklanması,
- Değerlendirme: seçme aşamasının çıktılarının doğrulanması veya yinelemeli karar destek sürecinin yeniden başlatılması.

Benzer şekilde Alanne (2004) tarafından şematik hale getirilen karar destek süreci ise Şekil 2.1’de izlenebilmektedir.



Şekil 2.1 Karar destek süreci (Alanne, 2004)

Şekil 2.1’de özetlenen karar destek süreci beş adımdan oluşmaktadır. İlk adım bina performans göstergeleri olarak da adlandırılan amaç kriterlerin belirlenmesini içermektedir. Bu aşamada tanımlanan proje hedef(ler)i doğrultusunda binaların hangi kriter(ler)e göre performansının değerlendirileceği belirlenmektedir. Bina performansını değerlendirmeye yönelik performans kriterleri Bölüm 2.2’de “Bina Enerji Performans Göstergeleri” başlığı altında açıklanmaktadır. İkinci adımda, tasarım değişkenleri ve bu doğrultuda alternatif uygulama çözümlerinin belirlenmesi adımı vardır. Bu adım ise Bölüm 2.3’te “Bina Enerji Performans Parametreleri” başlığı altında açıklanmaktadır. Üçüncü adım olan bina performansının tahmini ise belirlenen amaç kriterlere göre alternatif uygulama çözümlerinin performansının değerlendirilmesini ya da tahmin edilmesini içermektedir ve bu aşama Bölüm 2.4’te “Binalarda Enerji Performans Değerlendirmesi” başlığı altında açıklanmaktadır. Dördüncü adım yani değerlendirme süreci ise, performansları belirlenen alternatif uygulama çözümlerinin ilk adımda belirlenen amaç kriterlere göre değerlendirilmesini ve aralarından en etkin uygulama çözümünün seçilmesini içermektedir. Bu adım Bölüm 2.5’te “Binalarda Enerji Performansını Geliştirmeye Yönelik Karar Destek Sistemleri” başlığı altında detaylandırılmaktadır. Son adımda

ise, belirlenen en etkin uygulama çözümünün proje paydaşları olan işveren, tasarımcı/mimar, mühendis, bina uzmanı gibi karar vericiler tarafından kabul edilmesi ile karar destek süreci sonlanmakta ya da yeni çözüm önerilerinin geliştirilmesi için süreç yinelemeli olarak devam etmektedir. Bina enerji performansını geliştirmeye yönelik karar destek sürecinin ana bileşenleri Şekil 2.1'deki akış dikkate alınarak aşağıda açıklanmaktadır.

2.2 Bina Enerji Performans Göstergeleri

Binanın performans değerlendirmesi tanımlanan performans kriter(ler)ine ilişkin performans göstergeleri temel alınarak yapılmaktadır. Dolayısıyla, performans göstergeleri binanın performans hedeflerinin açık ve nicel kriterler yoluyla belirtilmesi olarak tanımlanabilir.

Bu çalışmanın konusunu oluşturan “enerji” kriteri ana performans kriteri olarak seçilmiştir. Bu nedenle Tablo 2.1’de bina enerji performansına ve çevresel kalitesine yönelik ana performans kriterleri ve her bir kritere göre performans değerlendirmesi yapılabilmesi için kullanılan bazı performans göstergeleri örneklenmektedir. Bu göstergelerin kapsamını genişletmek ya da daraltmak mümkün olmakla birlikte, hangi performans göstergelerinin kullanılacağı bina projesinin performans hedefleri doğrultusunda belirlenmektedir. Ayrıca, göstergelerin öncelikleri ve gerekliliği binadan binaya değişiklik gösterebilmektedir.

Tablo 2.1 incelendiğinde, örneklenen kriterler arasında birbirini olumsuz yönde etkileyen kriterin olduğu görülmektedir. Bina enerji performansını geliştirmeye/iyileştirmeye yönelik çözümlerin geliştirilmesi konusu birbiriyle çatışan birden fazla kritere odaklanılmasını gerektirebilmektedir. Dolayısıyla, binaların tasarım ya da kullanım/işletim aşamasında hedeflenen performans gereklerini karşılayacak çözümlere ulaşılabilmesi için karar desteği sağlayacak sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 2.1 Bina enerji performansı ve çevresel kalitesine yönelik performans göstergeleri (Kolokotsa, Diakaki, Grigoroudis, Stavrakakis ve Kalaitzakis, 2009'dan uyarlanmıştır)

Ana Performans Kriterleri		Performans Göstergeleri
Enerji Kullanımı		– Binanın toplam ısıtma ve soğutma yükleri – Normalize yıllık enerji tüketimi ve ısıtma için kullanılan enerji tüketimi – Yıllık elektrik tüketimi – Enerji ve zaman tüketim indeksi
İç Çevre Kalitesi ve Kullanıcı Konforu	Termal Konfor	– İç sıcaklık ve nem – Yaz veya kış boyunca oluşan konforsuzluk saatleri – Günlük aşırı ısınma – Kullanıcı tatminsizlik indeksi yüzdesi – Yaz mevsimi ısıl konforsuzluk önem indeksi
	İç Hava kalitesi	– CO2 konsantrasyon indeksi – Havalandırma oranı
	Görsel Konfor	– Gün ışığı varlığı – Aydınlatma ve görsel konfor – Güneş ışığı faktörü – Konforsuz kamaşma önem indeksi
	Akustik Konfor	– Çalışma alanlarındaki gürültü seviyesi (dB) – Gürültü oranı indeksi
Küresel Çevre		– Yıllık küresel ısınma potansiyeli emisyonları – Küresel ısınma emisyonlarının azaltılma potansiyeli – Yaşam döngüsü çevresel etkisi – Asitleşme potansiyeli – Su kullanımı
Maliyet		– Doğrudan maliyet ve ilk yatırım maliyeti – Ekonomik ömür uzunluğu – Yıllık sürekli bakım masrafları – Yıllık devamlı masraflar – Enerji yatırımının net bugünkü değeri – Enerji yatırımının geri dönüşlerinin iç oranı – Yaşam döngüsü maliyeti – Kazanılan enerji maliyeti
Diğer		– Belirsizlik faktörleri – İşlevsellik (uygulamalarının kolaylığı, mekan gereksinimleri, mevcut yapıya adapte edilebilirlik, kullanılabilirlik, – Bina enerji yönetim sistemlerinin ve akıllı binaların çalışma etkinliği – Güvenlik

2.3 Bina Enerji Performans Parametreleri

Tasarım sürecinde, gerekli tasarım parametreleri ve belli kısıtlara bağılı olarak performansa yönelik bir takım kriterler arasında dengenin en iyi şekilde sağlanması hedeflenmektedir. Bu nedenle bina performansını geliştirmeye yönelik karar süreci öncelikli olarak, genel hedefe yönelik performans kriter(ler)ini ve performans parametrelerini tanımlamayı gerektirir. Binaların enerji ve çevresel yükleri, kullanıcı konforu, ısıtma ve soğutma enerjileri tüketimi gibi enerji performansına yönelik çeşitli açılardan gösterdikleri performanslar binanın formu, yönlenme durumu, bina kütlesi, binanın çevre binalara göre konumu, iç ve dış ortam iklim koşulları, bina kabuğunun ısı özellikleri, pencere tipi ve pencere/duvar alanı oranı, güneş kontrolü ve gölgeleme durumu, ısıtma-soğutma ve havalandırma sistemlerinin özellikleri ve kullanıcı davranışları gibi pek çok parametreye bağılıdır. Binanın gerçek performansı belirlenirken bu parametreler dikkate alınarak hesaplamaların yapılması gerekmektedir.

Bina performansını geliştirmeye yönelik yapılması önerilen uygulamalar genel olarak “enerji korunum önlemleri ya da stratejileri” olarak adlandırılmaktadır. Binaların enerji performansına yönelik enerji korunum stratejileri *pasif* ve *aktif* olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Pasif stratejiler binanın formu, yönlenmesinden bina kabuğu elemanlarını oluşturan malzemelere kadar değişmektedir. Aktif sistemler ise ısıtma-soğutma-havalandırma sistemi, aydınlatma sistemi gibi binaya servis veren mekanik sistemlere yöneliktir. Ayrıca bu stratejiler, binanın tasarım ya da kullanım/işletim aşamasında olmasına göre değişebildiği gibi proje kısıtlarına ya da binanın mevcut koşullarına göre de değişebilmektedir.

Enerji performansını geliştirmeye yönelik doğru ve etkin stratejilerin önerilebilmesi için o stratejilere ilişkin tüm niceliksel parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca, herhangi bir enerji korunum stratejisine yönelik binanın enerji performansını etkileyen birden çok parametre de olabilmektedir. Örneğin, bina dış kabuğunda yapılacak bir ısı yalıtım uygulamasının bina enerji performansını etkileyecek başlıca parametreleri; malzeme kalınlığı, malzemenin özgül ısı ve ısı

iletkenlik hesap değerleridir. Aynı zamanda bu parametrelerin performans kriterine bireysel etkileri de birbirlerinden farklı olabilmektedir. Örneğin, malzeme kalınlığının artması binanın enerji performansına pozitif yönde bir etki yaparken ısı iletkenlik hesap değerinin artması tam tersine negatif bir etki yapmaktadır. Bu nedenle, enerji korunumuna yönelik bina uygulamalarının önerilmesinde her bir tasarım parametresi dikkate alınmalıdır.

Her tasarım kendine özgüdür. Dolayısıyla, her tasarımda öne çıkan parametreler projenin hedef ve kısıtları doğrultusunda değişkenlik göstermektedir. Bu bakış açısıyla, tasarım parametreleri ve alabilecekleri değerler de tasarımdan tasarıma farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca, söz konusu mevcut bir binanın enerji performansının iyileştirilmesi olduğunda tasarım sürecindeki bir binaya göre incelenecek parametrelerin kapsamı da değişebilmektedir.

Morbitzer (2003) tarafından yapılan çalışmada bina tasarım süreci üç aşamaya ayrılmış ve her bir aşamada bina enerji performansına etkisi olduğu düşünülen ve bu süreçte az veya çok ele alınan parametreler belirtilmiştir. Ancak parametreler bu çalışmada verilenlerle sınırlı olmayıp kapsamını genişletmek mümkündür. Bina enerji performansına yönelik tasarım parametreleri Tablo 2.2’de izlenebilmektedir.

Tablo 2.2 Tasarım sürecinde bina enerji performansı bağlamında ele alınan tasarım parametreleri (Morbitzer, 2003)

Tasarım Aşaması	Tasarım Parametreleri
Taslak Tasarım	– Bina yönlenmesi – Mekan boyutları – Mekan organizasyonu – Bina kabuğunu oluşturan elemanların yalıtım durumu – Termal kütle – Pencere alanı – Güneş kontrolü – Hava değişim oranı
Şematik Tasarım	– Bina kabuğu saydam yüzey elemanları detaylandırması (boyut ve konumu) – Pencere tipi ve gölgeleme sistemi seçimi – Yapay aydınlatma stratejileri – Soğutma gerekip gerekmediği (HVAC gereklilikleri): evet ya da hayır
Detaylı Tasarım	– Pasif ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinin değerlendirilmesi – Farklı ısıtma ve soğutma kontrol stratejilerinin değerlendirilmesi

Daha önce de belirtildiği gibi, her bina kendine özgüdür ve enerji performansı bağlamında öne çıkan parametreler de binadan binaya değişmektedir. Bu noktadan hareketle, çalışmanın bu bölümünde detaylarına yer verilecek olan tasarım parametrelerinin kapsamı da, ilgili probleme göre genişletilebilir ya da daraltılabilir. Bu noktada amaç, tez çalışması kapsamında incelenecek olan tasarım parametrelerinin detaylarını açıklamaktır.

İç ve dış ortamı birbirinden ayıran bina kabuğunun kullanıcıların ısı, görsel ve akustik konfor koşullarını sağlaması beklenir. Bina kabuğuna ait elemanlar: dış duvarlar, döşemeler, çatı ve yüzeydeki boşluklardır. Isı transferinden ve güneş ışınlamından kaynaklanan ısı kazanç ve kayıpları büyük oranda bina kabuğundan kaynaklandığı için, bu bileşenleri oluşturan yapı malzemelerinin termofiziksel özellikleri binanın enerji performansını belirlemede gerekli olan parametrelerdir.

Bina enerji performansı üzerinde etkili olan bina kabuk bileşenlerine ilişkin parametreler aşağıda açıklanmaktadır.

2.3.1 Bina Kabuğu Opak Yüzeylere Yönelik Parametreler

Bina kabuğunda ısı akışının olduğu opak yüzeyler: dış duvarlar, zemine (toprağa) oturan döşeme ve çatı döşemesidir. Isı akışı iç ve dış ortam arasında oluşan sıcaklık farkından dolayı oluşur ve ısı akış yönüne göre binada ısı kazanç ya da kayıpları meydana gelir. Diğer bir ifadeyle, bina kabuğu sahip olduğu ısı dirençle doğru orantılı olarak ısı akışını azaltır. Böylece iç ortamdaki hava sıcaklığı korunur ve binanın ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri azalır. Bu nedenle duvar, döşeme gibi kabuk bileşenlerini oluşturan yapı malzemelerinin ısı ile ilgili fiziksel özellikleri (termofiziksel özellikler), kalınlıkları ve kabuk içerisindeki yerleşimleri önem kazanmaktadır. Dolayısıyla, bina kabuğuna yönelik malzeme seçimleri enerji performansı ve termal konfor açısından önemlidir.

Bina kabuğu temel bileşenlerinin ısı geçirme katsayısı ve ısı kütlesi kapasitesi özellikleri binadaki ısı akışını belirleyen temel özelliklerdir ve binanın enerji

performansı üzerinde etkilidir. Kabuk bileşeninin ısı geçirme katsayısı (U değeri) bileşenin toplam ısıl direncinin tersi alınarak hesaplanır. Isıl direnç ise malzemenin ısı iletkenlik hesap değeri ve kalınlığına bağlıdır. Yapı malzemelerinin ısı iletkenlik hesap değeri, malzemenin ısı enerjisini iletim becerisidir ve önemli termofiziksel özelliklerindendir. Kabuk bileşenlerinin U değerinin azalması, diğer bir ifadeyle ısıl direncinin artması kabukta meydana gelen ısı akışını azaltır ve bu sayede iç ortam hava sıcaklığı korunarak enerji tasarrufu sağlanır.

Isıl kütle kapasitesi (ısı sığası), bina kabuğu opak bileşeninin ısı depolama kapasitesi olarak tanımlanabilir. Isıl kapasite malzemenin sıcaklığını bir derece (1 °C) değiştirebilmek için gerekli ısı miktarıdır. Kabuk bileşeninin ısı depolama kapasitesi, bileşeni oluşturan yapı malzemelerinin özgül ısı ve kütlesiyle doğru orantılıdır ve gerek yoğunluğu gerekse özgül ısı yüksek yapı malzemelerinin kullanılması, büyük miktarda ısı depolamasını sağlayacaktır. Malzemenin özgül ısı ise, malzemenin birim kütlesinin sıcaklığını bir derece (1 °C) değiştirebilmek için gerekli ısı miktarıdır. Bina kabuğunun opak bileşenleri için geçerli olan “zaman geciktirmesi” ve “genlik küçültme faktörü” bileşenin ısıl kütlesinin bir özelliğidir ve ısıl kütleyle bağlı olarak değişim gösterir. Zaman geciktirme fonksiyonu, gün boyunca kabuk bileşenin dış yüzeyinde meydana gelen en yüksek sıcaklığın, bileşenin iç yüzeyinde en yüksek sıcaklığı oluşturuncaya kadar geçen süreyi tanımlar. Bu fonksiyon ile gün içinde ısının depolanması ve iç mekanda aşırı ısınmanın engellenmesi sağlanırken, akşam saatlerinde de depolan ısı iç mekana verilerek mekan ısının aniden düşmesi engellenir. Genlik küçültme faktörü ise, gün içinde iç mekanda oluşan maksimum ve minimum sıcaklık farkının dış yüzeyde oluşan maksimum ve minimum sıcaklık farklarına olan oranın düşmesini sağlar. Bu özellik ile dış yüzeyde meydana gelen sıcaklık farkları, iç mekanda daha az sıcaklık değişimine neden olmaktadır (Zorer Gedik, 2014).

Daha önce de belirtildiği gibi gerek ısıl direnç gerekse ısıl kapasite özelliklerinin binanın enerji performansına etkisi dikkate alındığında kabuktaki katmanları oluşturan yapı malzemelerinin seçimi oldukça önem kazanmaktadır. Bu nedenle yapı malzemelerinin ısı iletkenlik hesap değeri, özgül ısı ve yoğunluğu, güneş ışınımına

karşı yutuculuk ve yansıtıcılık, ısı yayma katsayısı gibi özellikleri ve malzeme kalınlığı bina enerji performansı bağlamında dikkat edilmesi gereken parametrelerdir.

2.3.2 Bina Kabuğu Saydam Yüzeylere Yönelik Parametreler

Bina kabuğunun saydam bileşenleri, dış çevreyle görsel ilişkiyi kurma, doğal aydınlatma, doğal havalandırma ve dış ortamdan gelen gürültüyü engelleme gibi konfora yönelik çeşitli görevleri üstlenir. Kabuk saydam bileşeni olan pencerelerin tasarımı binanın ısıtma, soğutma, yapay aydınlatma ve havalandırma için tüketileceği enerji düzeylerini etkilemektedir. Saydam bileşenler güneş ışımasını iç mekana alması nedeniyle güneşten sağlanacak ısı kazancında önemli rol oynamaktadır. Saydam bir yüzey, opak yüzeye kıyasla daha az ısı bariyer oluşturduğundan, yüksek oranda ısı kazanç ve kayıplarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, kabuk saydam yüzey elemanları olan camların boyutları, kullanılacak camın optik ve termofiziksel özellikleri ve doğrama tipi dikkate alınarak seçim yapılması bina enerji performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Diğer bir ifadeyle, binada hava sızdırmazlık koşulunun sağlandığı ve doğal havalandırmanın hesaplama dahil edilmediği durumlarda saydam yüzeylerde iletim, taşınım ve ısıma yolları ile oluşan ısı transferi ve güneş ışınlamından kaynaklanan ısı kazanç ve kayıplarıyla bina enerji performansını etkilemektedir. Bu etkilerin düzeyi; iç-dış ortam sıcaklık farkları, alınan güneş ışınlamı miktarı, çevresel iklim koşulları ve saydam yüzeyin termofiziksel, optik ve sızdırmazlık özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Ayçam ve Utkutuş, 1999).

Kabuktaki saydam yüzeylerin alanı binanın enerji performansı üzerinde etkili olan önemli parametreler arasındadır. Saydam yüzey alanının kabuk bütününe oranı enerji performansına yönelik sıklıkla kullanılan bir parametredir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu oran arttıkça binanın yönelimine göre güneşten sağlanacak ısı kazançları ve aynı zamanda kayıpları da artacaktır. Bu nedenle, pencerelerin boyutları ve konumu binanın enerji performansı ve termal konfor açısından önemlidir.

Saydam yüzeylerden kaynaklanan ısı kazanç ve kayıplarına yönelik diğer bir önemli parametre, camın ısı geçirme katsayısı yani U değeridir. Bu değer pencereyi oluşturan katmanların (cam, boşluk, boşluğu dolduran gazın cinsi, film tabakaları, çerçeve) hepsini kapsayan ortalama bir değerdir. Bu değer in soğuk dönemde ısı kaybını azaltması, sıcak dönemde ise aşırı ısınmaya engel olacak şekilde binanın bulunduğu iklim koşulları da dikkate alınarak belirlenmesi gerekmektedir.

Binanın enerji performansı üzerinde etkili bir diğer saydam yüzey parametresi ise, güneş ısı kazanç katsayısıdır. Bu değer camlar tarafından engellenen güneş ışınımının miktarının ölçüsü olarak açıklanabilir. Diğer bir ifadeyle, bu katsayı hem güneş kontrolü hem de güneşten sağlanacak ısı kazancı ile ilişkilidir. Örneğin kış koşullarında güneş ısı kazanç katsayısı yüksek olan bir camın kullanılması güneşten sağlanacak ısı kazancını artıracak için uygundur. Yaz koşullarında aşırı ısınmanın engellenmesinin ve güneş kontrolünün istendiği durumlarda ise tam tersine güneş ısı kazanç katsayısı küçük olan bir camın seçilmesi uygundur. Böylelikle, binanın aşırı ısınması engellenerek soğutma yükü de azalacaktır.

Sonuç olarak, bina enerji performansı üzerinde etkili olan kabuk saydam yüzeylerine ilişkin başlıca parametreler: cam yüzeyi/opak yüzey oranı (pencere/duvar oranı), camın U değeri, güneş ısı kazanç katsayısı, güneş ışınımı geçirgenliği, yansıtıcılık, yutuculuk ve ısı yayma katsayısıdır.

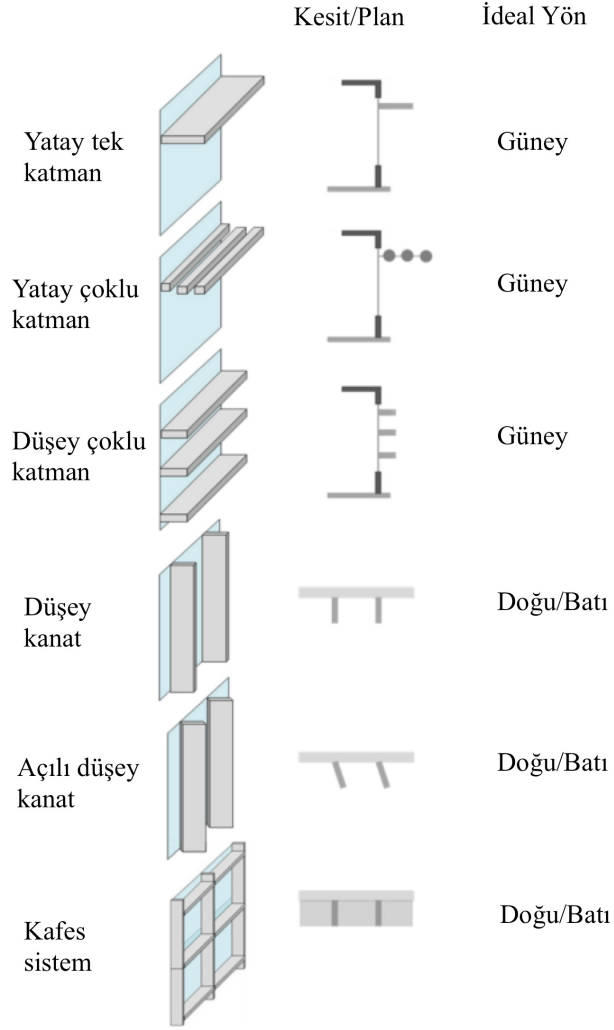
2.3.3 Bina Kabuğu Saydam Yüzey Gölgeleme Elemanlarına Yönelik Parametreler

Gölgeleme, bina enerji performansı üzerinde etkili olan en önemli parametrelerdendir. Bina dış ya da iç gölgelemesi binanın ısıtma soğutma ve aydınlatmasını etkilediği kadar gün ışığı, doğal havalandırma ve görsel erişim ile de ilişkilidir. Ayrıca, güneş kontrolü, aşırı ısınma, yansımalar ve kamaşmanın önlenmesinde etkilidir.

Örneğin, yatay gölgeleme elemanları güneş ışıını açısının yüksek olduğu güneye bakan cephelerde iyi performans gösterirken, düşey elemanlar ise doğu ve batı yönlerine bakan cephelerde daha etkilidir.

Güneşten kaynaklı aşırı ısınma ve ışık problemi gerek enerji performansı gerekse kullanıcı konforu açısından olumsuzluklar oluşturmaktadır. Bu gibi durumlarda Bölüm 2.3.2’de açıklanan cam malzemenin sahip olduğu fiziksel özelliklerin dışında doğrudan güneş kontrolü sağlamak da öncelikli performans kriterleri arasındadır. Bu amaca yönelik olarak güneş kesiciler ya da gölgeleme elemanları yaygın kullanılan kabuk bileşenleridir. Gölgeleme elemanının kullanılması bina enerji performansına yönelik tasarım stratejileri arasında önemli bir yere sahiptir. Gölgeleme elemanının bina enerji performansını geliştirdiği, kamaşmayı önlediği, faydalı günışığı mevcudiyetini artırdığı bilinmektedir. Bu doğrultuda, çeşitli gölgeleme konfigürasyonları (sabit, manuel, otomatik hareketli, iç ve dış gölgeleme elemanı) geliştirilmiştir. Ayrıca, gölgeleme tasarımını desteklemek amacıyla çok sayıda simülasyon programı (DAYSIM, EnergyPlus IES-VE, Ecotect) kullanılmaktadır.

Şekil 2.2’de dış kabuk gölgeleme elemanlarına yönelik birkaç örnek verilmektedir. Dış gölgeleme elemanlarını en basit şekilde yatay ve düşey elemanlar olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Farklı yönlerdeki bina cephelerinde gölgelemenin etkin şekilde sağlanabilmesi için çeşitli geometrilerde farklı konfigürasyonlar oluşturulabilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Bina dış kabuğunda kullanılabilecek gölgeleme elemanı çeşitleri (BEMbook, b.t)

Gölgeleme elemanlarının konumu, boyutu, açısı, mekanizması, malzemesi gibi özellikleri bina enerji performansını belirlemede önemli olan parametrelerdir.

2.4 Bina Enerji Performans Değerlendirmesi

Binaların enerji etkin tasarımına ilişkin verilen kararların ve enerji korunumuna yönelik önerilen stratejilerin binanın enerji performansı üzerinde yapacağı etki ancak bina performans değerlendirmesi ile belirlenebilir. Yeni binaların tasarım sürecinde yapılacak enerji analizleri, uygun tip ve boyutta bina sistem ve bileşenlerinin seçilmesinde yardımcı olur. Ayrıca tasarım ödünleşimlerinin etkilerinin anlaşılması, inovatif kontrol stratejilerinin faydalarının değerlendirilmesi ve yeni ekipman ve

tasarım alternatiflerinin etkinliğinin araştırılması konularında destek sağlar. Mevcut binaların enerji araştırması ve analizi için de enerji performans değerlendirmesi gerekli bir adımdır.

Bina performans değerlendirmesi henüz tasarım sürecinde tasarlanmakta olan bir bina için yapılabildiği gibi gerçekte var olan bir bina için de yapılabilmektedir. Örneğin, tasarım sürecinde bina performans değerlendirmesi için kullanılan yöntemlere bakıldığında, Morbitzer (2003) bina tasarımcısına enerji ve çevre ile ilgili konularda karar desteği sağlayacak yaklaşımları “Enerji ve Çevresel Tasarım Kararı Destek Sistemi” başlığı altında beş grupta ele almıştır. Her ne kadar tasarım kararı destek sistemleri başlığı altında ele alınıyor olsa da, bu sistemler temel olarak önerilen bir tasarımın bina performansını tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşımlar tasarım rehberleri ve geçmiş deneyimler gibi geleneksel yöntemlerden, temel amacı erken tasarım aşamasında bina performansını tahmin etmek olan simülasyon programlarına kadar çeşitlenmektedir. Bu yaklaşımlar sırasıyla şu şekildedir:

- Tasarım rehberleri ya da geçmiş deneyimler (rule of thumbs): Bu sistemler bina performansını doğrudan tahmin etmezler, sadece belirli performans hedefini gerçekleştirmeye yönelik yapılması gerekenleri, tasarıma yönelik genel tavsiyeleri içerirler.
- Geleneksel hesap yöntemleri: Bu sistemler binada sınırlı sayıdaki ya da sadece tek bir fiziksel olguya odaklanırlar ve binadaki belirli bir fiziksel sürecin tahmin edilmesini amaçlarlar. Örneğin, bina kabuk bileşenlerinin ısı geçirme katsayısının (U değerleri) hesaplanması. Bu hesaplar günümüzde yaygın olarak bilgisayar programlarıyla yapılmaktadır ancak bunları el ile de yapabilmek mümkündür.
- Korelasyon tabanlı yöntemler: Geleneksel hesap yöntemlerindeki yetersizlikler binadaki fiziksel süreçleri kısıtlamaya ve sadece bazılarını odaklanmaya izin verir. Ancak binalar çok sayıda fiziksel sürecin meydana geldiği oldukça karmaşık yapıdadır. Örneğin, bina enerji tüketimi sadece

iletim yoluyla olan ısı kayıplarından etkilenmez bunun yanı sıra havalandırmadan kaynaklanan ısı kayıpları, güneşten sağlanan ısı kazançları gibi olaylar ve aralarındaki etkileşimler sonucunda binanın toplam ısı tüketimi belirlenir. Korelasyon tabanlı yöntemler binadaki bu karmaşık etkileşimleri dikkate alarak bina performans tahmini yapılmasına dayanmaktadır. Bu korelasyonlar ileri simülasyonlarla yapılan çoklu parametrik analizlerle oluşturulabilir. Ancak, bu yöntemlerde tasarımcı çoğunlukla belirli bir parametreyi tanımlar ve sonrasında program binanın nasıl bir performans sergileyeceğini bildirir.

- Bina simülasyonları: Sanal bir bina modeli oluşturularak tasarımcı tarafından bina performansını etkileyecek detaylı parametrelerin tanımlanmasına ve sanal bina üzerinden performans tahminlerinin yapılmasına dayanmaktadır.
- Küçük ölçekli modellemeler: Binaya ait küçük ölçekli maketlerin yapılması ve bunlar üzerinden bina performansının test edilmesine dayanmaktadır. Örneğin rüzgar türbini testleri ya da binalarda gün ışığının değerlendirilmesi için bu yöntem kullanılmaktadır.

Binanın enerji tüketimi ve iç iklimlendirmesi; dış çevre koşulları (hava sıcaklığı, nem, güneş radyasyonu, rüzgar hızı ve yönü), bina strüktürü, iç ısı kazançları ve ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatmaya ilişkin bina servis sistemleri arasındaki dinamik termal etkileşimlerle belirlenir. Yukarıda belirtilen tasarım sürecinde bina performans değerlendirmesi için kullanılabilecek araçlardan bina simülasyonları dışındakiler basitleştirilmiş tasarım araçları olarak adlandırılmaktadır.

Tüm bu araçlar içerisinde karmaşık bina sistemlerinin performansını değerlendirme ve analizi için en etkili ve en uygun teknik **bina simülasyonlarıdır**. Bina simülasyonları bina performansını etkileyen tüm parametreleri dikkate alabilmektedir. Bu nedenle Hensen (1994) bina enerji simülasyonlarının tasarıma yönelik kararlar alınırken kullanılması gerektiğini belirtmektedir. Bina simülasyonlarının doğrudan kullanılması ile yapılan performans tahmini kullanılan en yaygın yöntem olmakla birlikte simülasyon sonuçlarının kullanılması ile

geliştirilen istatistiksel modeller de bazı durumlarda performans tahmini için kullanılabilir. Bu yaklaşımdaki temel prensip, bina enerji ihtiyacı, çevresel değişkenler ve tasarım değişkenleriyle ilişkili matematiksel bir fonksiyon geliştirilmesi ve fonksiyonun katsayılarının regresyon metoduyla tanımlanmasıdır.

Mevcut olan bir binanın ya da bir bölümünün performans değerlendirmesinde ise üç ana yaklaşımın olduğu söylenebilir (De Wilde, 2004, s. 16).

- Görüntüleme yöntemi (monitoring), gerçek binanın işletimsel koşullar altındaki davranışlarının doğrudan gözlemlenerek değerlendirilmesine olanak sağlar. Görüntüleme işlemiyle toplanan veriler binanın işlevselliğine yönelik bilgi edinilmesini sağlarken bazen de bina ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlar. Ancak, görüntüleme yöntemi maliyeti yüksek olan bir uygulamadır ve iklim özellikleri, kullanıcı davranışı gibi işletimsel koşulların da kontrol edilmesi zordur. Ayrıca, bina ve binanın enerji etkinliğine yönelik elemanları arasındaki karmaşık etkileşim de bu yöntemle elde edilen bilgilerin diğer binalar ve farklı bina tasarımlarına aktarılmasını zorlaştırmaktadır.
- Deneysel düzenekler, maliyeti azaltırken ve deneysel koşullar üzerindeki kontrolü geliştirirken (Örneğin: iklim odasındaki sıcaklık ve hava basıncının kontrol edilmesi gibi) binanın bir bölümünün (Örneğin: pencere ya da cephenin bir bölümü) davranışlarının ölçülmesine olanak sağlar. Deneylerden elde edilen bulguların tüm bina davranışlarına dönüştürülebilmesi hala önemli bir araştırma konusu olarak devam etmektedir.
- Mevcut binalar ya da deney düzenekleri üzerinde yapılan ölçümlere alternatif olan değerlendirme hesaplamalı değerlendirmedir (computational assessment). Hesaplamalı değerlendirme bina davranışlarını matematiksel denklemler kullanarak ortaya koymaktır. Bu denklemler bazen manuel olarak çözülebilir ancak daha kompleks problemler için genellikle bilgisayar programları kullanılır. Bina davranışı durumlarının hesaplamalı değerlendirmesi için

kullanılan bilgisayar programları “bina performans simülasyonları” olarak adlandırılırlar. Hesaplamalı değerlendirme yönteminin, ölçümle yapılan değerlendirme yöntemlerine (görüntüleme yöntemi ve deneysel düzenekler) göre maliyeti daha azdır. Ayrıca, tamamen aynı koşullar altındaki farklı bina davranışlarının ve bina seçeneklerinin karşılaştırılabilmesine olanak sağlayacak tek değerlendirme yöntemidir. Daha da önemlisi, gerçekte var olmayan binaların davranışlarının doğru şekilde tahmin edilmesini sağlayacak olan tek yöntemdir. Bu nedenle hesaplamalı değerlendirme günümüzde en çok tercih edilen yöntemdir.

Yukarıda açıklanan değerlendirme yaklaşımları entegre edilerek bir arada kullanılabilmektedir. Ancak, yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, günümüzde bina performans değerlendirmesine yönelik yaygın kullanılan yöntem hesaplamalı değerlendirmedir. Bu nedenle, hesaplamalı değerlendirme yöntemi aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

Literatürde bina enerji performansının hesaplanması ve değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin gruplamasına ilişkin çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Avrupa Birliği standartlarına göre binaların enerji performansı değerlendirmesi için kullanılan hesap yöntemleri üç gruba ayrılmaktadır (EN ISO 13790):

- Aylık/mevsimsel statik hesaplama yöntemi,
- Basit saatlik dinamik hesaplama yöntemi (yarı dinamik),
- Detaylı dinamik hesaplama yöntemi,

Hunn (1996) bina enerji modelleme tekniklerini statik (steady-state), yarı statik (quasi steady-state) ve dinamik (dynamic) modeller olmak üzere üç gruba ayırmıştır. Bu modellere dayanan bina enerji analizi ya da hesaplama yöntemlerini ise iki ana başlık altında toplamıştır:

- Basitleştirilmiş yöntemler (simplified methods),
- Simülasyon yöntemleri (simulation methods),

Basitleştirilmiş yöntemlerde genellikle mevsimlik ya da yıllık bazda değişkenlerin ortalaması alınırken, detaylı yöntemler olan simülasyon yöntemlerinde ise saatlik ya da daha kısa süreler için değişkenlerin ortalaması alınır. Hunn (1996)'un yaptığı sınıflandırmada hemen hemen tüm basitleştirilmiş yöntemlerin statik modellere dayandığını sadece bazılarının yarı statik modeller olduğu belirtilmektedir. Simülasyon yöntemlerinin ise yarı statik modeller ya da dinamik modellere dayandığı açıklanmaktadır. Statik modeller iç ortam ve çevresi arasındaki anlık ya da zaman ortalamalı sıcaklık farklarına dayanmaktadır. Bu modeller sadece her bir hesaplama koşulu (ortam sıcaklığı) için tüm özellikler ve değişkenler sabit varsayıldığı zaman geçerlidir. Bu modeller genellikle binadaki ve binanın ısıtma-soğutma ve havalandırma sistemi dinamikleri göz ardı edildiği koşullarda, mevsimlik enerji kullanımını hesaplamak amacıyla kullanılmaktadır. Ancak, bu modellerde ısı enerji depolama ve kötü durum koşulları veya ortalama değerlere dayanan dış değişkenler hesaba katılmamaktadır. Yarı statik modellerde, mekan içindeki ısı enerji depolama, bina kabuğu elemanlarının içsel ısı kapasitesine bağlı oluşan ısı kazanç ya da kayıplarının kullanılmasıyla dikkate alınmaktadır. Dinamik modeller ise binaya ait sürekli zaman değişikliklerinin gösterilmesine yönelik ara saat dilimlerini kapsayan hesaplamalara dayanmaktadır (Hunn, 1996).

Enerji hesap prosedürünün karmaşıklığı enerji sürecinin sunumundaki detaylara, ayrı ortam koşullarının sayısına, değişkenleri yönlendiren zaman adımlarına ve hesaplamalarda kullanılan zaman artışlarına bağlıdır. Bu açıdan bakıldığında, basitleştirilmiş yöntemler tek ve çok ölçütlü olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Tek ölçütlü yöntemler derece-gün gibi sadece bir ölçütün kullanıldığı ve basit sistem ve uygulamalar için uygun olan yöntemlerdir. Hesapların doğruluk düzeyinin artırılması ise enerji tüketimiyle korelasyon sağlayabilmek için daha fazla bilgi ya da ölçütün kullanıldığı basitleştirilmiş çok kriterli yöntemlerle mümkün olabilmektedir (Hun, 1996). Basitleştirilmiş yöntemler çok çeşitlidir ve en yaygın kullanılanları ise: bin yöntemi (bin methods), derece-gün yöntemi (degree-day method), değişkene dayalı

derece gün yöntemi (variable-base degree-day method), modifiye bin yöntemi (modified bin method), basitleştirilmiş aylık ısı dengesi yöntemi (simplified monthly heat balance method), eş değer dolu yük saatleri yöntemidir (equivalent full load hours) (Doyle, 2008). Bu yöntemler tezin kapsamı dışında olduğundan detaylarına yer verilmemektedir.

Simülasyon yöntemleri ise dinamik yöntemlerdir. Isı transferi ve mekandaki ısı depolama ile ilişkili iletim (conduction), taşınım (convection) ve ışıma (radiation) süreçlerinin çözümü için gerçek zamanlı dış veriler kullanırlar. İçsel ve dışsal değişkenlerin gerçekçi değişim oranlarına dayanan değişkenliği sunar. Simülasyon, kullanıcıların tasarım ve performans parametreleri arasındaki karşılıklı ilişkileri anlamasına olanak sağlar. Bunun yanı sıra potansiyel problem alanlarının tanımlanmasında ve tasarım üzerinde yapılan değişikliklerin uygulanması ve uygunluğunun test edilmesini sağlar. Tasarımın daha iyi konfor düzeyi ve hava kalitesiyle birlikte daha etkin enerji kullanımı ile sonuçlanmasını sağlar (Clarke, 2001). Genellikle bilgisayar simülasyonlarının binalar için güçlü ve esnek enerji analiz aracı olduğu düşünülür.

Gerek tasarlanmakta gerekse mevcut olan bir binanın performans değerlendirmesinde/analizinde bugün için kullanılan en yaygın yöntem olan bina performans simülasyonları tez çalışmasının da odaklandığı konulardan biridir. Bu nedenle, bina performans simülasyonları ve bina enerji modellemesine yönelik detaylı bilgilendirme aşağıda yapılmaktadır.

2.4.1 Bina Enerji Performans Simülasyonları

Karmaşık simülasyon programlarının kullanımından önce bina tasarımcıları tarafından karmaşık el hesaplamaları kullanılmaktaydı. Önceden belirlenmiş tasarım koşulları, genel kabul görmüş yöntemler ve geçmiş yıllara ilişkin verilere dayanarak değerlerin belirlenmesi gibi yaklaşımlar çoğu zaman düşük enerji performansı ile sonuçlanan tasarımların ortaya çıkmasına yol açmaktaydı.

Bina simülasyonlarına yönelik çalışmaların başlangıcı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. İlk yıllarda bina simülasyonu için çoğunlukla enerji transferi gibi temel teoriler çalışılmaktaydı. 1970'lerde ise enerji krizinin de etkisiyle yapılan çalışmalar, ısıtma ve soğutma yükleri ve enerji transferine ilişkin simülasyonlar için algoritmaların geliştirilmesine yoğunlaşmıştır. 1980'li yıllarda ise özellikle kişisel bilgisayarların gelişmesiyle birlikte bina simülasyonları yaygınlaşmaya başlamıştır. Sonuç olarak, 1990'lı yıllarda bina simülasyonları çalışma alanı, aydınlatma, akustik ve hava akış problemlerinin çözümü için yeni simülasyon programlarının geliştirilmesiyle birlikte genişlemiştir. Özellikle çevresel konulara yönelik endişeler bina simülasyonlarına olan ilginin artmasına neden olmuştur (De Wilde, 2004).

Clarke (2001) simülasyon programlarının gelişimini incelemiş ve bu programları dört jenerasyona ayırmıştır:

Birinci jenerasyon (1970'li yılların ortalarına kadar): Analitik formüller ve birçok basitleştirilmiş tahminlere dayanan manuel yöntemleri içermektedir. Kullanımları kolay olmasına rağmen, gerçek dünya koşullarına çevrilmesi zor, sınırlı uygulamalara sahip ve eksiklikler görünür değildir.

İkinci jenerasyon (1970-1980): Bu jenerasyonda bilgisayar programları ortaya çıkmaya başlamıştır. Problemin zaman boyutuna özelliklede uzun zaman alan bileşenlere (örneğin, çok katmanlı yapılar) odaklanılmıştır.

Üçüncü jenerasyon (1980'lerin ortasından 1990'lara kadar): Nümerik metotlara dayanmaktadır. Bu metotlar simülasyonların kişisel bilgisayarlarda çalıştırılabilmesi ve entegrasyonuna izin vermektedir

Dördüncü jenerasyon (1990'ların ortasından günümüze): Bu jenerasyonda “birlikte işlerlik” özelliği dahil olmuştur.

Yukarıdaki sınıflamaya göre simülasyon programlarının her bir jenerasyonda kapasitesi artmakta ve buna paralel olarak programların karmaşıklığı da artmaktadır.

Bina simülasyon programları temel algoritmaların karmaşıklığını, hesaplama yükünü ve kullanıcıdan beklenen girdileri azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Detaylı simülasyon programları kompleks matematiksel modellerin geliştirilmesi ve binadaki her bir olası enerji akışının yansıtılabilmesi ile uğraşmaktadır (Doyle, 2008). Diğer bir ifadeyle, simülasyon programları binayı ve binanın enerji ve konfora yönelik (akustik, görsel ve ısı konfor) performans kriterlerini formüle ederek sürekli etkileşim halinde olan birden çok kompleks denklemin bilgisayar ortamında bir araya getirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır (Yılmaz, 2012).

Bina performansına yönelik olarak kullanılan simülasyon programları hesap yöntemleri, modelleme düzeyleri, kullanım alanları gibi çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmaktadır.

Hong (2000) tarafından yapılan çalışmada bina simülasyon programları, tasarım araçları (design tools) ve detaylı simülasyon programları (detailed simulation programs) olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Tasarım araçları genellikle statik programlar olup projenin erken tasarım evresinde kullanılırlar. Bu programlar, kompleks programlara göre daha basit ve daha az veriye ihtiyaç duyarlar. Örneğin, tasarım araçları, bina standartlarına uygunluğun kontrol edilmesi için oldukça faydalıdır. Ayrıca, bu tip araçları geliştirmek ve test etmek de oldukça kolaydır. Buna karşılık detaylı simülasyon programları, bina yükleri ve enerji hesaplamaları için hesaplama teknikleriyle entegre edilmiştir. Bu programlar binanın bir bütün olarak performansını analiz edebilen bina performans simülasyon programlarıdır. Dinamik araçlar, konfor ve enerji tüketimiyle ilişkili ısı bazdaki tüm elemanlar (bina kabuğu, ısıtma-soğutma ve havalandırma sistemleri, aydınlatma ve kontrol sistemleri) arasındaki dinamik etkileşimleri hesaba katabilmek için genellikle saatlik bazda (bazen dakika bazında) ve her zon için ayrı hesaplamalar yaparlar. Detaylı simülasyon programları tasarımın yanı sıra performans bazlı bina enerji standartlarına uygunlukları da kontrol eder.

Hesap yöntemlerine göre Clarke (2001) simülasyon programlarını iki gruba ayırmıştır:

- Basitleştirilmiş (statik) simülasyon programları,
- Detaylı (dinamik) simülasyon programları,

Günümüzde kullanılan simülasyon programlarının çoğu detaylı (dinamik) metotlar olan tepki fonksiyonu metotlarına (Response function methods) ya da nümerik metotlara (Numerical methods) dayanmaktadır. Simülasyonda kullanılan tepki fonksiyonu metotları ise zaman alanı (Time domain) ve sıklık alanıdır (Frequency domain) (Clarke, 2001). Örneğin, Admittance metot sıklık alanı tepki fonksiyon grubundadır. Yaygın kullanılan enerji performans simülasyon programı Ecotect, Admittance metodu kullanmaktadır. Sonuçlarının doğruluk düzeyi yüksek dinamik simülasyon programları ise, Nümerik yöntemler grubunda olan sonlu farklar (Finite difference), sonlu elemanlar (Finite elements) ve sınır elemanı (Boundary element) yöntemlerini bina yükleri ve enerji hesaplamaları için kullanmaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi detaylı (dinamik) simülasyon programları, çoğunlukla enerji ile ilişkili (binanın ısıtma-soğutma yükleri, enerji tüketim hesaplamaları ve ısı sistemlerin etkileşimi) analizler için kullanılmaktadır. Bu nedenle detaylı simülasyon programları genellikle “bina enerji simülasyon programları” ya da “bina enerji performans simülasyon programları” olarak adlandırılmaktadır.

Bina performans simülasyon programları çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Bunlardan bazıları şunlardır: Bina ısıtma ve soğutma yükleri hesaplamaları; tasarım süreci ve binanın enerji etkin iyileştirilmesi sürecinde enerji performans analizleri; bina yönetmelik, kod ve standartlarına uygunlukları sağlamak; pasif enerji tasarruf alternatiflerinin değerlendirilmesi; bina enerji yönetimi ve kontrol sistemleri; hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve maliyet analizidir (Hong, 2000).

Bina enerji simülasyon programının seçimi de önemli bir konudur. Bu programların seçimindeki kriterler şu şekilde özetlenebilir (Hong, 2000; Attia, Hensen, Beltran ve Herde, 2012):

- Programların doğruluk düzeyi ve detaylı ve karmaşık bina sistemlerini simüle etme kabiliyeti (hesaplama kapasitesi),
- Kullanılabilirlik ve bilgi yönetimi,
- Veri değişim kapasitesi,
- Veri tabanı desteği,
- Bina modellemesi ile birlikte işlerlik,
- Bina tasarım sürecine entegrasyon,

Günümüzde bina performans değerlendirmesi için kullanılan çok sayıda performans simülasyonu bulunmaktadır. Bu programlardan güvenilirliği test edilmiş EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r, EQUEST gibi dinamik simülasyon programları yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.4.2 Bina Enerji Simülasyon Programlarının Geçerliği ve Simülasyon Modelinin Kalibrasyonu

Günümüzde bina enerji simülasyon programlarının kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır dolayısıyla gerek tasarımcıların gerekse diğer program kullanıcılarının ortaya çıkan simülasyon sonuçlarına güven duymaları gerekmektedir. Bu nedenle, bu programların doğrulanması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Enerji simülasyon programlarının doğruluğu ve güvenilirliği, simülasyonu analitik doğrulama, deneysel sağlama ve karşılaştırmalı test etmeye dayanan temel bir konudur (Judkoff ve Neymark, 1995). Simülasyon programlarını doğrulamaya yönelik sistematik bir yaklaşımın önerildiği çalışmada Judkoff (1988), tüm bina

enerji simülasyon programlarının doğruluğunun değerlendirilmesi için üç farklı tekniğe değinmiştir:

- Analitik Doğrulama (Analytical Verification): Program veya aloritmadan elde edilen hesaplama sonuçlarının bilinen analitik çözümlerden ya da genellikle kabul edilen nümerik metotlardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmasına dayanmaktadır.
- Deneysel Sağlama (Empirical Validation): Program veya aloritmadan elde edilen hesaplama sonuçlarının gerçek binalardan, test hücrelerinden ya da deneylerden elde edilen ölçüm (görüntüleme) verileriyle karşılaştırılmasına dayanmaktadır.
- Karşılaştırmalı Test (Comparative Testing): Programın kendisiyle ya da diğer programlarla karşılaştırılmasına dayanmaktadır.

Bina enerji simülasyon programlarının doğruluğu ve güvenilirliğinin belirlenmesi ve programların karşılaştırılması amacıyla Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency) tarafından BESTEST (IEA Building Energy Simulation Test) olarak adlandırılan bir yöntem geliştirilmiştir (Judkoff ve Neymark, 1995). Bu yöntem ASHRAE 140 Standardının (ASHRAE, 2004a) geliştirilmesinde de kullanılmıştır. BESTEST yönteminin temel amacı, bir dizi örnek bina ve onlara ait test sonuçları oluşturarak enerji simülasyon programlarını karşılaştırmak ve programdaki hata paylarını belirlemektir. Analiz için gerekli girdi verileri programdan programa farklılık gösterebileceğinden, BESTEST içinde farklı programlarının test edilmesi için “nitelik” ve “hata belirleme” olmak üzere iki ana başlık altında birçok farklı test bulunmaktadır.

BESTEST yöntemi birçok örnek binayı ve onlara ait test sonuçlarını içermektedir. Herhangi bir simülasyon programı kullanılarak oluşturulan modele ait sonuçlar bu test sonuçlarıyla karşılaştırılmakta ve limit değerler arasında hata payına göre program testi geçtiğinde doğruluğu ve güvenilirliği sağlanmaktadır.

Bina enerji modelinin simülasyonundan elde edilecek verilerin geçerliliği, kullanılan simülasyon programının doğruluğu kadar, programın doğru şekilde kalibre edilmesine de bağlıdır. Bina ya da zonun modellenmesiyle oluşturulan enerji simülasyon modelinden elde edilen verilerin, binanın gerçek tüketim verileriyle karşılaştırılması ve limit değerler arasında kalan hata paylarının elde edilebilmesi, kullanılan en yaygın kalibrasyon yöntemidir. Eğer söz konusu mevcut bir bina ise, binaya ait gerçek tüketim verilerine ulaşılabileceğinden bu şekilde bir simülasyon modeli kalibrasyonu yapılabilir. Ancak, henüz tasarım aşamasında ise, yani gerçekte var olan bir bina söz konusu değilse, deney sonuçları ya da literatürde mevcut olan daha önceden yapılmış çalışmaların sonuçları binanın simülasyon modelinin kalibrasyonu için baz alınabilmektedir (Clarke, 2001).

Gerek tasarlanmakta gerekse mevcut olan bir binanın enerji modellemesinde, geçerliliği ve güvenilirliği olan dinamik bir enerji simülasyon programının kullanılması ve oluşturulan bina enerji modelinin kalibrasyonu sonuçların güvenilirliği ve doğruluk düzeyi açısından önem kazanmaktadır.

2.4.3 Bina Enerji Modellemesi ve Modellerin Doğrulanması

Literatür incelemesi sonucunda, bina modellemesi için iki ana yaklaşımın olduğu tespit edilmiştir. İlk yaklaşım basitleştirilmiş model yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, tüm binayı temsil eden tek bir ısı zonun modellenmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşımda amaç, modelin basitleştirilmesiyle simülasyon süresinin azaltılmasıdır. İkinci yaklaşım ise çok zonlu modelleme yaklaşımı ya da tüm bina enerji simülasyonudur (Whole building energy simulation). Çok zonlu modelleme yaklaşımında da farklı uygulamalar söz konusudur. Örneğin, ısıtma ve soğutma sistemlerindeki benzerliklere göre zonlar birleştirilerek ve gruplandırılarak modellenebileceği gibi (Örneğin, binanın her bir katının mekanlar dikkate alınmaksızın tek bir zon olarak kabul edilmesi) tamamıyla mimari kat planlarındaki mekan bölüntülerine uyularak daha gerçekçi şekilde de modellenebilmektedir. Ancak, oluşturulan model ne kadar gerçeğe uygun yapılırsa o kadar karmaşıklaşacak ve modelin simülasyon süresi de o kadar uzayacaktır. Modelin doğruluk düzeyinin

oldukça önemli olduğu durumlarda özellikle de mevcut bina verileriyle model verilerinin karşılaştırılması gereken durumlarda ikinci yaklaşım olan çok zonlu modelleme yaklaşımı kullanılarak kat planındaki mekan bölüntülerine uygun olarak modelin oluşturulması önerilmektedir (Hensen, 2011).

2.5 Bina Enerji Performansını Geliştirmeye Yönelik Karar Destek Sistemleri

Karar destek sistemleri karar vericiye problemin anlaşılması ve uygun çözümün bulunması yönünde rehberlik ederek karar desteği sağlamaktadır. Karar problemleri, iyi planlanmış karar problemleri, eksik planlanmış karar problemleri ve planlanmamış karar problemleri olarak üç gruba ayrılabilir. Bunlardan eksik planlanmış karar problemleri genellikle çoklu ve çatışan amaçları içermekte ve kararların sonuçlarının tahmin edilmesi zorlaşmaktadır (Sprague ve Watson, 1989). Bina performansına yönelik karar destek sistemleri, eksik planlanmış karar problemlerinin çözümüne yardımcı olmak üzere kullanılan sistemlerdir.

Bina enerji performansını geliştirmeye yönelik karar destek sürecinin “Değerlendirme” adımı binaların karmaşıklığından kaynaklanan zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu süreçte ortaya çıkan ana konular şu şekildedir (Kolokotsa, Diakaki, Grigoroudis, Stavrakakis ve Kalaitzakis, 2009):

- Kriterler genellikle birden çoktur ve çatışmaktadır (enerji tüketimi, yatırım maliyeti ve kullanıcı konforu),
- Uygulamalar göz ardı edilemeyecek kadar çok sayıda tasarım değişkeni içermektedir.

Gerek tasarlanmakta gerekse mevcut olan bir binanın enerji performansını geliştirmeye yönelik çözüm uygulamalarının belirlenmesi aşamasında karşılaşılan en büyük zorluk, en etkin enerji korunum önlem(ler)inin tanımlanmasıdır. Bina enerji performansını etkileyen tek bir parametre yoktur, aksine bina performansı birden çok parametrenin aynı anda etkileşimi sonucunda belirlenir. Bina performansını tanımlayan bina enerji tüketimi, maliyet ve termal konfor gibi kriterlerin birbiriyle

çatışan hedefler olması da etkin enerji korunum önlemlerinin geliştirilmesi sürecini zorlaştırmaktadır.

Binaya yönelik tek bir enerji korunum önlemi optimum çözümü sağlayamayabilir ve uzun dönemde beklenmeyen problemlere yol açabilir. Optimum çözümü bulmak için binaya çoklu enerji korunum önlemlerinin önerilmesi ise, bunlar arasındaki lineer ve lineer olmayan ilişkilerin anlaşılmasını gerektirir ki bu durum tasarımcılar için zorlayıcı olabilir (Holst, 2003). Daha önce de belirtildiği gibi, en etkin çözümün belirlenmesinde, karar vericilerin enerji, maliyet, çevresel ve hatta sosyal kriterleri dikkate almaları gerekmektedir. Farklı etkinlik alanları birbiriyle çatışan amaçları da beraberinde getirerek ödünleşim (trade-off) ilişkilerini ortaya çıkarır. Bu durumda karar vericiler çok amaçlı optimizasyon problemiyle karşı karşıyadır ve optimum çözümler amaç kriter arasındaki ödünleşimleri ortaya koyar.

Günümüzde binalar için aktif ve pasif olmak üzere enerji korunumuna yönelik çok sayıda teknoloji bulunmaktadır. Bu teknolojiler bina kabuğuna yönelik uygulamalardan, binalarda enerji etkin ekipman kullanımına, ileri kontrol ve yenilenebilir enerji sistemlerinden, ileri ısıtma ve soğutma sistemlerinin kullanımına kadar çok çeşitlidir. Bu noktada, binanın enerji performansını geliştirmeye yönelik hangi teknolojinin kullanılacağına ilişkin kararın verilmesi de yine çok amaçlı optimizasyon problemi alanına girmektedir.

Binalar için çok sayıda enerji korunum teknolojisi olmasına rağmen, en etkin çözümün belirlenebilmesini sağlayacak yöntemlerin eksikliği önemli bir teknik kısıtlamadır. Bu doğrultuda, binaların enerji ve çevresel performansını geliştirmeye yönelik karar verme sürecinde basitleştirilmiş karar destek yaklaşımlarına ihtiyaç olduğu ortaya çıkmaktadır (Murray ve Sullivan, 2012).

Bina sektöründe enerji yönetimi ve sürdürülebilirlik konularında karar destek sistemlerine ilişkin çalışmalar genel olarak üç ana aşamadan oluşmaktadır (Asadi, Silva, Antunes ve Dias, 2013):

- Projenin ana hedeflerinin ve bu doğrultuda performans kriterlerinin tanımlanması,
- Çözüm alternatiflerinin (enerji korunumuna yönelik uygulama alternatifleri) tanımlanması (burada alternatifler ya açıkça belirtilir ya da matematiksel model ile tanımlanır),
- Model için uygun değerlendirme yönteminin seçilmesi.

Karar verme sürecinde değerlendirme aşamasında kullanılan yöntemlere bakıldığında, Diakaki, Grigoroudis ve Kolokotsa (2008) bu yöntemleri iki ana başlık altında kategorize etmektedir. İlk yaklaşım, geliştirilen çok sayıda alternatif çözümün simülasyon tabanlı bina enerji analiziyle analiz edilmesi ve sonuçta aralarından en iyi alternatifin seçilmesini içermektedir. İkinci yaklaşım ilk yaklaşıma göre daha metodiktir ve çok kriterli karar verme (Multi-Criteria Decision Making-MCDM) ve çok amaçlı optimizasyon (Multi-Objective Optimization-MOO) gibi karar destek sistemlerinin kullanımını içerir. Kolokotsa ve diğer. (2009) ise karar verme yöntemlerini, “ayrık karar problemleri yaklaşımı (Discrete Decision Problem Approaches)” ana başlığı altında dört kategoriye ayırmaktadır. Bu yaklaşımlar sırasıyla: simülasyon tabanlı; çok kriterli karar analizi (Multi-Criteria Decision Analysis-MCDA); çok amaçlı programlama (Multi-Objective Programming-MOP) ve birleşik ya da karma yaklaşımlardır.

Bu çalışmada, bina enerji performansını geliştirmeye yönelik karar destek sistemleri dört ana başlık altında incelenmektedir:

- Simülasyon tabanlı yaklaşımlar,
- Çok kriterli karar verme sistemleri,
- Hassasiyet analizi,
- Çok amaçlı optimizasyon.

Bazı araştırmacılar çok amaçlı optimizasyon yöntemini, çok kriterli karar verme yönteminin bir parçası olarak kategorize etse de, bu çalışmada ayrı başlıklar altında ele alınmaktadır.

2.5.1 Simülasyon Tabanlı Yaklaşımlar

Türkçede “Benzetim” olarak da kullanılan “simülasyon” genel bir ifadeyle bir sistemin (örneğin, bina, uçak ya da kimyasal üretim tesisi) fiziksel davranışlarının taklit edilmesidir. Simülasyonlar son zamanlarda çoğunlukla bilgisayar kullanımı ile gerçekleştirilmektedir. Tanımdan da anlaşılacağı gibi simülasyon, sistemin fiziksel modellemesine, davranışını tanımlayan matematiksel denklemlere, bu matematiksel denklemlerin çözümlerine ve sonuçların sunumuna (görselleştirme) dayanmaktadır. Fiziksel modelleme bir sistemin bir takım iç değişkenler, belirli sistem sınırları ve dış değişkenler olarak tanımlanması ile sistemin gerçek dünyadaki davranışının idealize edilmesini, ölçülmesini ve basitleştirilmesini sağlamak ve ortaya çıkan sonuç fiziksel model olarak isimlendirilmektedir (De Wilde, 2004). Fiziksel modele ait değişkenler arasındaki bir takım ilişkilerin tanımlanması matematiksel modelle sonuçlanmakta ve bazen matematiksel modelin geliştirilmesi nümerik yaklaşımlar yapılmasını içermektedir. Nümerik modelleri oluşturan formüller ise istenen programlama dilinin içine dahil edilebilmektedir.

Simülasyon programları karmaşık sistemlerin ele alınmasında neredeyse zorunlu hale gelmiştir. Tasarımcılar/mimarlar artık dinamik simülasyon programı kullanarak binanın termal ya da enerji durumunu analiz etmekte ve düşük enerji tüketimi, kabul edilebilir termal konfor düzeyi, düşük karbon emisyonu gibi belirli performans hedeflerine ulaşmaya çalışmaktadır. “Parametrik simülasyon metodu” olarak da adlandırılan bu yaklaşım bina performansının geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Simülasyon programlarıyla oluşturulan bina modeli üzerinde her seferinde bir girdi parametresine çeşitli değerler atayarak ve diğer parametreleri sabit tutarak, hedeflenen bina performansı üzerindeki etkisi izlenebilir. Bu işlem diğer girdi parametreleri için yinelemeli olarak tekrarlanabilir. Bu yaklaşım oldukça zaman

alıcıdır ve girdi parametreleri arasındaki lineer olmayan etkileşimler nedeniyle simülasyon sonuçlarında ancak kısmi bir iyileşme sağlanabilir (Nguyen, 2013).

Simülasyon tabanlı yaklaşımlar aynı zamanda çözüm alternatifleri üretme ve performanslarını değerlendirme sürecine dayanmaktadır. Geliştirilen bir dizi alternatif senaryo, EnergyPlus, TRNSYS, Esp-R gibi geçerli bir simülasyon programıyla değerlendirilmekte ve aralarından en iyi çözümü sağlayan senaryo seçilmektedir. Bina enerji simülasyon modeli oluşturulduktan sonra, basit statik ya da detaylı dinamik simülasyon yöntemleri kullanılarak performans değerlendirmesi yapılır (Clarke, 2001). Simülasyon tabanlı karar verme sürecinde, karar verici bir dizi alternatif senaryo arasında araştırma yaparak en iyi çözümü bulmak zorundadır ve bu da oldukça zaman alıcı bir süreçtir.

2.5.2 Çok Kriterli Karar Verme Sistemleri

Bu yaklaşımda karar verici önceliklerine yönelik bilgileri tanımlar ve bu doğrultuda sonlu sayıda çözüm alternatifleri oluşturulur. Her bir kritere önem düzeyi atanması yoluyla karar üzerindeki etkileri belirlenir. Burada amaç optimum çözümü bulmaktan çok baskın olmayan çözümü bulmaktır. Çok kriterli karar verme sistemleri baskın olmayan çözümlerin sayısı arttığı zaman kullanıcının en çok tercih edilen çözümü bulmasında yardımcı olur.

Çok kriterli karar verme sistemleri bina enerji performansı alanında birçok çalışmada kullanılmıştır. İlk örnekler arasında Gero, Cruz ve Radford (1983) tarafından önerilen çok kriterli analiz modeli yer almaktadır. Önerilen bu modelle bina tasarım sürecinde binanın ısıl performansı, yatırım maliyeti ve net kullanılabilir alan gibi kriterler arasındaki ödünleşimlerin (trade-offs) tanımlanması hedeflenmiştir. Jaggs ve Palmer (2000) tarafından geliştirilen EPIQR olarak adlandırılan yöntemle bina iyileştirme uygulamalarına yönelik enerji, iç ortam çevre kalitesi ve yatırım konularında bina sahiplerine karar desteği sağlanması amaçlanmıştır. Model; bina kullanıcılarına ilişkin araştırma ve alan araştırmasını kapsayan detaylı veri toplama işlemi, binada enerji kazancının sağlanabileceği öncelikli alanların belirlenmesi ve bina enerji analizi gibi birçok uygulama adımını

içermektedir. Önerilen model üzerinden geliştirilen yazılımla kullanıcıların maliyet etkin bina iyileştirme alternatifini seçmesine olanak sağlanacağı vurgulanmaktadır. Flourentzou ve Roulet (2002) ise bina iyileştirme senaryolarının geliştirilmesinde uzmanlara yardımcı olacak çok kriterli analiz tabanlı bir yöntem önermiştir. Birçok adımdan oluşan ve yinelemeli bir süreci içeren yöntem ve bu doğrultuda geliştirilen bilgisayar programı ile ilgili maliyet hesaplamaları, enerji performans hesapları ve uygulamalar arasındaki uygunluk durumları belirlenebilmektedir. Ayrıca, kullanıcılar hızlı şekilde farklı senaryo üretimi konusunda desteklenmektedir. ORME adı verilen çok kriterli puanlama yöntemi ofis binaları için geliştirilen iyileştirme senaryolarının binanın ısıtma ve soğutma enerjileri tüketimi, iç çevre kalitesi ve maliyet kriterlerine göre sıralanması amacıyla geliştirilmiştir (Roulet ve diğer., 2002). Rey (2004) tarafından ELECTRE III programı kullanılarak çevresel, sosyokültürel ve maliyet kriterleri ağırlıklandırılmış ve çok kriterli karar verme yöntemi ofis binaları için geliştirilen iyileştirme stratejileri üzerinde uygulanmıştır. Zhao, Wu ve Zhu (2009) ise çok kriterli karar verme sistemlerinden “Analitik Hiyerarşi Sürecini” kullanarak üç aşamalı kontrol ve değerlendirme sistemi geliştirmiş ve Çin’de bulunan konut binalarının enerji performansının geliştirilmesinde uygulamıştır.

2.5.3 Hassasiyet Analizi

“Hassasiyet Analizi (Sensitivity Analysis-SA)” terimi kullanılan metotlar, ele alınan problemin özellikleri, amaçlardaki farklılıklar nedeniyle farklı disiplinlerde çeşitli şekilde tanımlanmaktadır. Hassasiyet analizi, model sonuçları üzerindeki etkili parametrelerin tanımlanmasını sağlayan model geliştirme sürecindeki bir adımdır. Bu parametrelerin hassasiyet analizi sadece modelin doğruluğu için önem taşımamakta aynı zamanda gelecek çalışmalar için rehber olmaktadır (Hamby, 1994). Hassasiyet analizi genel olarak, belirli girdilerin çıktılar üzerindeki etkisinin ölçülmesi olarak tanımlanmaktadır (Saltelli, 2000).

Hassasiyet Analizi (HA), girdi-çıkıtı ilişkilerinin anlaşılmasını ve model çıktıları üzerindeki etkili girdi parametrelerinin tanımlanmasını amaçlar. HA aynı zamanda belirsizlik analiziyle (Uncertainty Analysis-UA) de ilişkilidir. Belirsizlik

analizi ise, çıktılarıdaki belirsizliklerle girdilerdeki belirsizlikler arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır (Simlab, 2004).

Matematiksel model geliştirme sürecinde bir adım olan HA, çok çeşitli nedenlerle kullanılabilir. Örneğin: Bilgi tabanını güçlendirmek ve çıktılarıdaki belirsizliği azaltmak için hangi parametrelerin daha fazla araştırılması gerektiğini; hangi parametrelerin önemsiz olduğu ve modelden çıkarılabileceğini; hangi girdilerin çıktılarıdaki değişime katkı sağladığını; hangi girdilerin çıktılarıyla çok fazla korelasyonu olduğunu; tanımlanan girdi parametrelerinin değişimi ile sonuçlarıdaki değişimin ne olduğunu belirlemek için kullanılmaktadır (Hamby, 1994).

Simülasyon tabanlı yaklaşımların kullanıldığı bina araştırmalarında ise HA çoğunlukla girdi parametrelerindeki değişimin simülasyon sonuçlarında (çıkı parametreleri) yaptığı farklılıkla ölçülmektedir. HA tasarımcıya çeşitli tasarım parametrelerinin etkilerinin ölçülmesinde ve belirsizliklerin kaynağının tanımlanmasında bilgi desteği sağlayan güçlü bir araçtır.

HA'nın özü ya da felsefesi, tasarım parametrelerinin ilişkileri ve bina performansı üzerindeki göreceli önemlerinin anlaşılabilmesini sağlayarak, uygun tasarım parametrelerinin seçilmesi yoluyla bina performansının geliştirilmesidir (Nguyen, 2013). Bina performans simülasyonlarında çeşitli nedenlerle kullanılan HA'nın yararları şu şekilde sıralanabilir (Pannell, 1997):

- Simülasyon programlarıyla elde edilen sonuçların, girdi faktörlerinde belirsizlik olması durumundaki hassasiyetlerinin ölçülmesi için kullanılabilir. Diğer bir ifadeyle, her bir girdinin önem düzeyi nitelik ve nicelik olarak ölçülmektedir. Girdideki değişimin model çıktısı üzerindeki etkileri araştırılmakta ve hassasiyet analizi karar desteği (What-if analysis) sağlamaktadır.
- Simülasyon programı aracılığıyla bina modelinin girdileri ve çıktıları arasındaki ilişkilerin belirlenmesini sağlamaktadır.

- Önemli girdileri tanımlayarak simülasyon çıktılarındaki belirsizliklerin azaltılmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak, çıktılar üzerinde az ya da hiç etkisi olmayan girdilerin dikkate alınmaması ile modelin ayarlarının basitleştirilmesine yardımcı olmaktadır.
- Girdilerle ilişkili olarak beklenmeyen çıktıların belirlenmesi ile modeldeki hatalar bulunabilmektedir.
- Girdi faktörleri uzayında simülasyon sonuçlarının maksimum ya da minimum olduğu alanlara bakılarak optimizasyon için destek sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında uygulanan yöntemlerden bir tanesi hassasiyet analizidir. Bu nedenle, yöntemin içeriğine ve binalarda uygulanmasına yönelik detaylı bilgilendirme yapılması gerekli görülmektedir.

2.5.3.1 Hassasiyet Analizi Yönteminin Uygulama Adımları ve Çeşitleri

Hassasiyet analizinin kullanıldığı çok sayıda yaklaşım bulunmaktadır. Ancak, genel çerçevede hassasiyet analizi adımları değişmemektedir. Hassasiyet analizi yönteminin uygulama adımları şu şekildedir (Saltelli, Tarantola, Campolongo ve Ratto, 2004):

- 1. Adım: Analizin amacının tanımlanması ve bu doğrultuda çıktı parametrelerinin (performans göstergeleri) belirlenmesi,
- 2. Adım: Analizde kullanılacak girdi parametrelerinin belirlenmesi,
- 3. Adım: Girdilere değer aralığı atanarak belirsizliklerin ve her birinin olasılık yoğunluk fonksiyonun (probability density function) hesaplanması,
- 4. Adım: Ele alınan problemin türü, modelin değerlendirme sayısı, modelin bitiş süresi, girdi faktörleri arasındaki korelasyon varlığı gibi kriterler doğrultusunda hassasiyet analizi metodunun seçilmesi,

- 5. Adım: N sayıda girdi matrisi içeren girdi örnekleminin üretilmesi,
- 6. Adım: N sayıda girdi matrisine sahip modelin çalıştırılması ve ilgili çıktıların elde edilmesi,
- 7. Adım: Girdi ve çıktıların analiz edilmesi ve seçilen hassasiyet analizi metoduna (4. Adım) göre sonuçların görselleştirilmesi.

Bu akış içerisinde 4. Adımı oluşturan kullanılan hassasiyet analizi metodunun seçimi çok önemlidir. Daha önce de belirtildiği gibi çok sayıda hassasiyet analizi yöntemi bulunmaktadır ve hassasiyet analizi alanında yapılan araştırmalarda hassasiyet analizi yöntemleri problemin çekirdeğini oluşturmaktadır (Nguyen, 2013).

Hassasiyet analizi yöntemlerine yönelik çeşitli sınıflandırmalara Hamby (1994), Saltelli ve diğer. (2004), Heiselberg ve diğer. (2009), European Comission (2009) tarafından yapılan çalışmalarda yer verilmiştir. Örneğin, Hamby (1994) tarafından yapılan çalışmada bu yöntemler üç grupta ele almıştır:

- Bir seferde tek değişkene göre çıktının değerlendirilmesi yaklaşımı (6 yöntem içerir);
- Girdi vektörlerinin ve ilişkili çıktıların üretilmesine dayalı yaklaşım (10 yöntem içerir);
- Çıktı vektöründeki sonuçlara göre girdi vektörünün parçalara ayrılarak uygulanması (4 yöntem içerir).

Heiselberg ve diğer. (2009) tarafından yapılan çalışmada ise hassasiyet analizi yöntemleri üç gruba ayrılmıştır: lokal hassasiyet analizi (local sensitivity analysis), global hassasiyet analizi (global sensitivity analysis) ve görüntüleme yöntemleri (screening methods).

European Comission (2009) tarafından yapılan çalışmada ise yöntemler dört grupta ele alınmıştır: lokal yöntemler, Monte-Carlo yöntemi, görüntüleme yöntemleri ve varyans tabanlı yöntemler.

Hassasiyet analizi yöntemlerinin sınıflandırmasında belirtildiği gibi farklı yaklaşımlar olmakla birlikte literatürde bu yöntemler yaygın olarak iki ana grupta ele alınmaktadır (Saltelli ve diğer., 2012): lokal hassasiyet analizi ve global hassasiyet analizi.

2.5.3.1.1 Lokal Hassasiyet Analizi. Diferansiyel hassasiyet analizi olarak da tanımlanan Lokal Hassasiyet Analizi, “OAT (One factor At a Time)” yöntemleri sınıfında olan bir yöntemdir. Bu yöntemde hassasiyetler genellikle yalnızca bir parametrenin değeri değiştirilerek diğer parametrelerin sabit bırakılmasıyla ölçülür. Bu nedenle taban model seçimi bu yöntemde çok önemlidir. Bu yöntemin asıl amacı, bireysel girdideki değişimin çıktı üzerinde yaptığı değişikliğin ölçülmesidir (Hamby, 1994). Lineer modeller için uygun olan bu yöntem bireysel hassasiyetlerin bulunmasına odaklanır. Bu yöntem global hassasiyet analizine göre çok kolaydır ve bu yönden daha avantajlıdır. Kısacası, bu yöntem kolaylıkla uygulanabilir ve anlaşılabilir. Yine global hassasiyet analizine göre daha az simülasyon gerektirir. Ancak, taban modelde az sayıda girdi parametresine bakılabilmesi ve parametreler arasındaki etkileşimin dikkate alınmaması (parametrelerin bağımsız kabul edilmesi) gibi eksiklikleri vardır (Tian, 2013).

2.5.3.1.2 Global Hassasiyet Analizi. Global Hassasiyet Analizi örneklem tabanlı bir yöntemdir. Bu analizde, girdi değişkenlerinin örnekleme eş zamanlı yapılır ve girdilerden kaynaklanan belirsizlikler nedeniyle oluşan toplam hassasiyetler değerlendirilir.

Daha önce de belirtildiği gibi, lokal hassasiyet analizinde girdi-çıkı ilişkileri lineer kabul edilmekte ve girdi parametreleri arasındaki korelasyon dikkate alınmamaktadır. Global hassasiyet analizi ise lineer ve monoton olmayan ilişkilerde de anlamlı bilgiler verebildiğinden lokal hassasiyet analizine göre daha güvenilirdir.

Global hassasiyet analizi yöntemleri örneklem tabanlı (sampling based) yöntemlerdir. Örneklem yöntemlerinden bazıları şunlardır: Rastgele örneklem (random sampling), önem örneklem (importance sampling), Latin hypercube örneklem (Latin hypercube sampling-LHS).

Global hassasiyet analizi şu yöntemleri içermektedir (Tian, 2013):

- Regresyon tabanlı yöntem (regression-based method),
- Görüntüleme tabanlı yöntem (screening-based method),
- Varyans tabanlı yöntem (variance-based method),
- Meta-model tabanlı yöntem (meta-model based method).

Regresyon tabanlı yöntem, örneklem tabanlı analiz yöntemidir. Hızlı hesaplanır ve kolay anlaşılır olduklarından bina enerji analizi çalışmalarında kullanılan en yaygın yöntemdir. Örneklem tabanlı olan Monte Carlo analizi uygulandıktan sonra SRC (Standardized Regression Coefficients), PCC (Partial Correlation Coefficients), SRRC (Standardized Rank Regression Coefficient), PRCC (Partial Rank Correlation Coefficient) gibi göstergeler kullanılarak analiz sonuçlanır.

Görüntüleme tabanlı yöntemde, çok sayıda olan girdi faktörleri sayısı çıktı varyansı azaltılmadan azaltılır (Saltelli ve diğer., 2004). Bu yöntemin temel amacı, yüksek boyutlu modellerdeki hesaplama yükünü indirmektedir. Morris metot bina performans analizlerinde kullanılan en yaygın görüntüleme tabanlı yöntemidir.

Varyans tabanlı yöntemde, ilgili girdiler için çıktılardaki belirsizliğin ayrışmasıdır (Saltelli ve diğer., 2004). Bu yaklaşımda birinci derece etkiler (first order effects) ve toplam etkiler (total effects) olmak üzere iki ana hassasiyet ölçütü kullanılmaktadır. Birinci derece etkiler, ilgili girdiden kaynaklanan çıktı değişikliklerindeki ana etkileri inceler. Toplam etkiler ise, girdiler arasındaki etkileşimden kaynaklanan birinci derece ve üst seviye etkileri içeren ilgili girdideki değişimin çıktının varyansına olan toplam etkisini açıklar. Dolayısıyla, birinci derece

etkiler ve toplam etkiler arasındaki fark da değişkenler arasındaki etkileşimi gösterebilir. Eğer çalışmanın amacı enerji modellerindeki önemsiz faktörlerin sabitlenmesi ise, toplam hassasiyet etkilerinin kullanılması önerilir. Ancak, çalışmada enerji korunum önlemlerinin öncelik sıralaması hedefleniyorsa, birinci derece etkilerin kullanımı daha uygundur (Tian, 2013). Varyans tabanlı yöntemler modelden bağımsız yaklaşımlar olarak adlandırılırlar. Bu yöntemler non-lineer ve non-monotonik modeller için uygundur. FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) ve Sobol en yaygın kullanılan iki varyans tabanlı yöntemdir (Saltelli, Ratto, Tarantola ve Campolongo, 2012). Sobol metotta tüm çıktı varyansları ayrıştırılır. Böylelikle, analizden sonra çıktılar için varyans kalmaz.

Meta-model tabanlı yöntem, iki aşamalı hassasiyet analizi yaklaşımıdır (Saltelli ve diğer., 2012). İlk olarak parametrik olmayan regresyon yöntemleri kullanılarak meta-model oluşturulur. Bunun nedeni, parametrik olmayan regresyon modellerinin, lineer ve lineer olmayan regresyonların aksine önceden belirlenebilen bir formda olmayan karmaşık modeller için uygun olmasıdır. İkinci olarak, oluşturulan meta-model kullanılarak varyans tabanlı metotlara göre hassasiyet ölçütleri hesaplanmaktadır. Meta-model yaklaşımında istatistiksel yöntemler veya yapay zeka yöntemleri kullanılarak amaç fonksiyon tanımlanmaktadır (Levy, 2010). Meta-modellerin kullanımındaki temel neden; bu modellerin detaylı bina enerji simülasyon modellerine göre daha kısa sürede çalışabilmesidir. Dolayısıyla, meta-model yöntemi varyans tabanlı yöntemlere göre daha etkin hassasiyet göstergesi sağlamaktadır (Saltelli ve diğer., 2008).

2.5.3.2 Binalarda Hassasiyet Analizi Uygulamasına Yönelik Mevcut Çalışmalar

Hassasiyet analizi yöntemi birçok bilim dalında uygulandığı gibi bina araştırmalarında da uygulanmaktadır. Hassasiyet analizi, enerji simülasyon modelleri ve bina enerji analizine yönelik çalışmalarda yaygın kullanılan etkili bir yöntemdir. Bina tasarımı, enerji modellerinin kalibrasyonu, bina enerji retrofiti uygulamaları, iklim değişikliğinin binalar üzerindeki etkileri gibi çeşitli uygulamalarda da

kullanılabilen Hassasiyet Analizi, binanın enerji performans karakteristiklerinin anlaşılmasına yönelik önemli bir karar desteği sağlamaktadır (Tian, 2013).

Bina performans simülasyonlarıyla yapılan hassasiyet analizi; girdilerin çıktılar üzerindeki etki düzeylerinin tanımlanması, girdilerin önem sıralarına göre sıralanması, girdi sayısının azaltılması ve modelin ayarlanması gibi nedenlerle uygulanmaktadır.

Hassasiyet analizi metodolojisi bina enerji analizinde farklı türdeki uygulamalar için aynıdır. Yöntemin bina performans simülasyonlarıyla uygulanması sırasında izlenen genel adımlar şu şekildedir (Tian, 2013):

- Girdi faktörlerinin çeşitlerinin (ya da olasılık dağılımlarının) belirlenmesi,
- Girdi çeşitlerine göre bina enerji modelinin oluşturulması,
- Enerji modelinin simüle edilmesi,
- Simülasyon sonuçlarının toplanması,
- Hassasiyet analizinin çalıştırılması,
- Hassasiyet analizi sonuçlarının sunulması.

Binalarda hassasiyet analizi uygulamalarına yönelik çalışmalara genel olarak bakıldığında, yöntemin çoğunlukla bina tasarım aşamasında belirlenen bir grup tasarım parametresi arasından tanımlı bina performans kriteri (ısıtma enerjisi tüketimi, soğutma enerjisi tüketimi, termal konfor vb.) üzerindeki en etkili parametrelerin tanımlanması amacıyla kullanıldığı görülmektedir (Lomas ve Eppel, 1992; Lam ve Hui, 1996; Hopfe, 2009; De Wilde ve Tian, 2010; Hygh, 2011). Örneğin Lam ve Hui (1996) lokal hassasiyet analizi yöntemini çeşitli tasarım parametrelerinin binanın enerji tüketimi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla kullanmıştır. Lokal hassasiyet analizi için DOE-2 simülasyon programı kullanılmış ve Hong Kong’da bir ofis binası üzerinde araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, her bir

girdi parametresi ayrı ayrı ele alınarak çıktıların girdilere göre hassasiyetleri belirlendiğinden parametreler arası karmaşık ilişkiler ölçülememiştir. Bu nedenle, çalışmada elde edilen sonuçlar ikna edici olmamaktadır. Lam, Wan ve Yang (2008), lokal hassasiyet analizini Hong Kong’da mevcut 10 ayrı ofis binasına uygulamış ve binanın elektrik tüketimini azaltmaya yönelik en etkin enerji korunum önlemlerini tanımlamışlardır. Ulukavak Harputlugil (2009) tasarım sürecinde bina performansını geliştirmeye yönelik karar desteği için tasarım kılavuzlarının gerekliliğini savunmuştur. Bu doğrultuda, öncelikle lokal hassasiyet analizi yöntemi uygulamasıyla tanımlanan bir modülün enerji tüketimi üzerindeki en etkili tasarım parametreleri belirlenmiştir. Sonrasında bu modülün tekrarlanmasıyla oluşturulan farklı tipteki plan şemaları, Türkiye’de farklı iklim bölgeleri için analiz edilmiştir. Bu adımda global hassasiyet analizi yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda tasarımcılar için bir tasarım rehberi modeli önerilmiştir. Murray ve Sullivan (2012) tarafından yapılan çalışmada da lokal hassasiyet analizi kullanılarak mevcut bir üniversite binasının enerji tüketimi üzerinde en etkili parametreler belirlenerek seçilmiş ve bu parametreler yapılacak yatırımın geri getirisini (return on investment-ROI) maksimize etmek için kullanılmıştır. Benzer şekilde Heiselberg ve diğer. (2009) tarafından yapılan çalışmada bir çeşit lokal hassasiyet analizi olan Morris metot (Morris, 1991) Danimarka’da bir ofis binası tasarımında uygulanmış ve belirlenen tasarım parametrelerinin binanın toplam enerji tüketimi üzerindeki etkileri ölçülmüştür. Bu çalışma sonucunda; tasarım sürecinin erken evrelerinde hassasiyet analizi uygulamasının tasarımın sonraki evrelerinde hangi parametrelere odaklanılması gerektiği konusunda önemli bir bilgi desteği sağlayabileceği, tasarım sürecinin etkinliğini geliştirebileceği ve bina performans optimizasyonunda çok faydalı olabileceği saptanmıştır.

Hopfe (2009), tasarımcılara karar desteği sağlamak amacıyla global hassasiyet analizini kullanarak bina erken tasarım aşamasında kullanılan ve binanın enerji tüketimi ve termal konfor düzeyine etki eden en hassas parametreleri ve bunlara ilişkin değer aralıklarını araştırmıştır. Çalışmada belirsizlik ve hassasiyet analizi üç farklı amaç için kullanılmıştır: Girdi-çıkıtı ilişkilerini göstererek tasarımcılara yardımcı olmak ve tasarım sürecini desteklemek; belirsizlik ve hassasiyet analizlerini

çok kriterli karar verme sistemlerine entegre etmek; hassasiyet analizini çok amaçlı optimizasyon sürecine entegre etmek. Global hassasiyet analizinin örneklem tabanlı olduğu ve eş zamanlı üretilen girdi değişkenleri ve değişkenlerdeki belirsizliklerden kaynaklanan toplam hassasiyetlerin değerlendirilmesiyle ilgili olduğuna önceki bölümlerde değinilmişti (bkz. Bölüm 2.5.3.1.2). De Wilde ve Tian (2009) regresyon tabanlı global hassasiyet analizi olan Monte Carlo analizini EnergyPlus simülasyon modeliyle birleştirerek, iklim değişikliğine karşı bir ofis binasının enerji kullanımının tahmininde baskın olan faktörleri tanımlamışlardır. Hopfe ve Hensen (2011) tarafından yapılan çalışmada, hassasiyet analizi ve belirsizlik analizi uygulamasıyla, fiziksel parametreler, tasarım parametreleri ve senaryo parametreleri olmak üzere üç grupta ele alınan girdi parametrelerinin binanın yıllık ısıtma ve soğutma ihtiyacına olan etkileri belirlenmiştir. Girdi parametreleri için oluşturulan örneklem LHS metoduyla üretilmiş ve hassasiyet ölçümü için SRRC katsayısı kullanılmıştır. Hassasiyet analizinin karar desteği özelliğinin vurgulandığı bu çalışmada, hava değişim oranı ve zon geometrisi modeldeki en hassas parametreler olarak belirlenmiştir. Yıldız (2012) tarafından yapılan çalışmada ise Monte Carlo analizi ile az katlı konut yapılarında soğutma yüküne etki eden hassas parametreler belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda tasarımcılara karar desteği sağlaması hedeflenen bir tasarım rehberi modeli önerilmiştir.

Regresyon tabanlı metotların aksine varyans tabanlı hassasiyet analizi metotlarının modelden bağımsız olması ve lineer olmayan veya monotonik olmayan karakterdeki modeller için yararlı olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti (bkz. Bölüm 2.5.3.1.2). Ancak bu metotlar daha fazla simülasyon gerektirdiğinden regresyon tabanlı metotlara göre daha fazla bilgisayar gücü gerektirmektedir (Saltelli ve diğer., 2008). Mara ve Tarantola (2008) tarafından yapılan çalışmada, ANOVA tabanlı global hassasiyet analizi, oluşturulan bina termal modeline uygulanmış ve simülasyon model elemanlarının iç ortam sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenerek en etkin elemanlar belirlenmiştir. Shen ve Tzempelikos (2013) varyans tabanlı global hassasiyet analizi yöntemi olan FAST metodunu, ofis mekanlarının enerji ve güneş ışığı performanslarına yönelik karar desteği için kullanmıştır.

Eisenhower ve diğer. (2012) bina enerji modeli için meta-model yöntemi tabanlı yaklaşım geliştirmişlerdir. Yaklaşımın ana adımları: EnergyPlus simülasyon programıyla bina enerji modelinin karakterize edilmesi; Monte Carlo örneklem yöntemiyle bina geometrisi ve malzemeden ısıtma-soğutma ve havalandırma ekipmanlarına kadar 1009 farklı girdi parametresi için üniform (tekdüze) dağılım kullanılarak örneklem oluşturulması; her bir girdi vektörü için PMV ve yıllık enerji tüketimi değerlerinin hesaplanması; yapay zeka yaklaşımı olan Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine-SVM) kullanılarak meta-model (modelin formüle edilmesi) hesaplanması; Hassasiyet analizi uygulaması ile çıktı değişkenleri üzerindeki en etkili parametrelerin tanımlanması; en etkili parametrelerin kullanılması ile indirgenmiş yeni meta-model'in oluşturulmasıdır. Sonrasında meta-model IPOPT ve NOMAD optimizasyon programlarıyla entegre edilerek ve farklı amaç fonksiyonlar tanımlanarak, binanın enerji tüketimi minimize edilirken termal konfor maksimize edilmeye çalışılmıştır. Önerilen meta-model yaklaşımı iki katlı mevcut bir binaya uygulanmıştır. Meta-model'in oluşturulması aşamasında çok sayıda kapsamlı veriyle işlem yapılması gerekmekte ve dolayısıyla çok fazla işlem gücüne ihtiyaç duyulmaktadır.

2.5.4 Çok Amaçlı Optimizasyon

Karar problemlerine yönelik son yaklaşım ise çok amaçlı optimizasyondur. Bölüm 2.5.1'de simülasyon tabanlı yaklaşımların genel anlamda alternatif senaryolar üretme ve bunları analiz etme sürecine dayandığı, zaman alıcı olduğu ve girdi parametreleri arasındaki karmaşık etkileşimler nedeniyle sonuçlarda ancak kısmi iyileşme sağlanabildiği konularına değinilmişti. Daha kısa sürede ve daha az uğraşı ile optimum çözümün bulunabilmesi için geniş bir çözüm kümesi içinde araştırma yapılarak süreç yinelemeli şekilde ilerlemelidir. Yinelemeli süreçlerin doğası gereği bilgisayar programlarına ihtiyaç vardır. Bu yöntemler nümerik optimizasyon ya da simülasyon tabanlı optimizasyon olarak tanımlanmaktadır (Nguyen, 2013).

Her ne kadar bilgisayar ve matematiksel optimizasyon yöntemlerinin avantajları temel alınarak nümerik optimizasyon uygulamaları 1990'lı yıllarda başladıysa da

bina araştırmalarına yönelik çalışmalarda, bina enerji simülasyon programları ile algoritmik optimizasyon programlarının/motorlarının entegre edilerek kullanılması ancak 2000’li yıllarda yaygınlaşmış ve özellikle 2005 yılından itibaren ciddi boyutta ivme kazanmıştır (Nguyen, Reiter ve Rigo, 2014). Wright (1986) tarafından yapılan çalışma bu alandaki nc çalışmalardan biridir.

Bina performans optimizasyonu çalışmaları incelendiğinde tek amaçlı optimizasyon probleminin (sadece bir amaç fonksiyonu ve bir amaç kriteri mevcut) ele alındığı çok sayıda çalışma vardır. Ancak gerçek hayatta bina performansına yönelik karar destek sürecinde tasarımcı, mimar veya mühendis gibi proje paydaşları optimum tasarım seçeneğini bulabilmek için çok sayıda çatışan kriteri (enerji, konfor, maliyet vb.) dikkate almak zorundadırlar. Örneğin tasarımcıdan tasarım sürecinde maksimum enerji tasarrufu ve minimum yapımlı maliyetini birlikte ele alarak çözüm üretmesi beklenebilir. Bu şekilde birden çok kritere göre değerlendirmeyi içeren bu problemlerin çözümünde çok amaçlı optimizasyon yöntemi yaygın kullanılan karar destek sistemidir. Diğer bir ifadeyle, çok amaçlı optimizasyon sürecinde ele alınan problem birden fazla amaç kriterini içeren bir optimizasyon problemidir ve özellikle çatışan kriterler ve ters ilişkilerle uğraşırken yararlı olmaktadır. Bilimsel anlamda ise matematiksel optimizasyon, tanımlı bir problem için bir dizi alternatif arasından en iyi sonucun bulunması sürecini tanımlamaktadır.

Çok amaçlı optimizasyon problemleri tek bir optimum çözüm üretmezler. Bunun temel nedeni, tüm amaç fonksiyonlarını (ya da amaç kriterleri) aynı anda optimize eden ideal çözümün pek mümkün olmamasıdır. Bunun yerine farklı amaç fonksiyonlarıyla bir dizi çözüm üretirler (Kolokotsa ve diğer., 2009). Çok amaçlı problemlerin çözümüne yönelik, skalerleştirme yaklaşımı (scalarization approach) ve Pareto-eniyileme (Pareto optimality) gibi yöntemler bulunmaktadır. Bina performans optimizasyonuna yönelik kararları desteklemek amacıyla çeşitli optimizasyon araçları geliştirilmiştir. Genel olarak bu araçlar üç kategoride gruplanabilir: Özel programlanmış algoritmalar, genel optimizasyon paket programları ve bina tasarımı için özel optimizasyon araçları (Machairas, Tsangrassoulis ve Axarli, 2014).

Örneğin, genel optimizasyon paket programı olan GenOpt (Wetter, 2011), farklı simülasyon motorları ve optimizasyon algoritmaları arasında bağlantı kurulmasına olanak tanıyan ve yaygın kullanılan bir optimizasyon aracıdır. Bu alanda sıklıkla kullanılan MatLab programı aslında bina performans optimizasyonu için geliştirilmemiştir ancak program içindeki optimizasyon araçları yoğun hesap gerektiren karmaşık modellerin çözümünde kullanılmaktadır. Bunların dışında BEopt, Op-E-Plus, TopLight, MOBO, jEPlus gibi çeşitli optimizasyon araçları bina tasarımı, pasif bina tasarımı ve stratejileri, enerji tüketimi, çevresel etki gibi alanlarda yapılan optimizasyon uygulamaları için kullanılmaktadır.

Optimizasyon uygulamalarında bina performans değerlendirmesi için kullanılacak olan bina modellerinin kapsamı optimizasyon süresi üzerinde etkilidir. Bu süreçte kullanılan üç tip bina modelinden söz edilebilir: basitleştirilmiş analitik modeller (simplified analytical models), detaylı bina simülasyon modelleri (detailed simulation models) ve vekil bina performans modelleri ya da meta modeller (building performance surrogate models or meta models) (Machairas, Tsangrassoulis ve Axarli, 2014).

Basitleştirilmiş analitik modeller, bina performansına yönelik basit problemlere uygulanabilir. Problemin matematiksel olarak tanımlanması kolay olmadığı gibi tararım ekibi ya da karar vericiler için de pratik değildir. Ancak araştırmalarda özellikli bir problemin çözümüne odaklanıldığında kullanılabilir. Bu tür modeller optimizasyon algoritmaları ya da kaba kuvvet yaklaşımlarıyla (brute-force approaches) bir arada kullanıldığında çözüm uzayının tamamında araştırma yapılarak doğru optimum nokta kolaylıkla bulunabilmektedir.

Detaylı bina simülasyon modelleri, oluşturmada daha önce Bölüm 2.4.3’de açıklandığı basitleştirilmiş ve çok zonlu olmak üzere iki yaklaşım söz konudur. Basitleştirilmiş modeller daha az simülasyon süresi gerektirmelerine karşın çok zonlu simülasyon modellerinin doğruluk düzeyi daha fazladır (Hensen, 2011).

Vekil bina performans modelleri (meta modeller), detaylı bina modellerinin performans simülasyonları modelin karmaşıklık düzeyine göre uzun sürebilir. Simülasyon tabanlı optimizasyon yaklaşımları için yüzlerce veya binlerce simülasyon değerlendirmesi yapılması gerekmektedir. Bu sürenin indirgenebilmesi amacıyla meta modeller probleme çözüm olarak getirilmektedir. Meta model, gerçek bina simülasyon modelinin davranışlarının yapay zeka yaklaşımları yardımıyla taklit edilmesi sonucunda oluşturulur. Meta model oluşturma süreci genellikle şu adımları içermektedir (Nguyen, Reiter ve Rigo, 2014):

- Binanın detaylı simülasyon modelinin oluşturulması, girdi vektörleri üretilmesi ve ilgili model çıktılarının hesaplanması ile veri tabanı oluşturulması,
- Seçilen yapay zeka yöntemiyle oluşturulan veri tabanı kullanılarak meta modelin oluşturulması,
- Oluşturulan meta modelin test edilmesi.

Yapay sinir ağları, genetik programlama, Bayesian ağları, destek vektör makinesi gibi yapay zeka yaklaşımları meta model oluşturulmasında yaygın kullanılmaktadır. Meta modeller lineer olmayan bina davranışlarının doğru şekilde tahmin edilmesini, hızlı şekilde amaç fonksiyonun değerlendirmesini ve büyük çözüm uzayında araştırma yapılabilmesini sağlarlar.

Meta modelleri kullanan optimizasyon yaklaşımları özellikle modelin oluşturulması ve denenmesi için yeterli sayıda istatistiksel sonuç verilerine ihtiyaç duyarlar. Dolayısıyla, bu sonuç verilerinin elde edilebilmesi için detaylı simülasyon modeli oluşturularak meta modelin doğruluk düzeyi sağlanana kadar yinelemeli olarak simülasyon yapılması gerekmektedir. Meta modelin oluşturulması için gerekli olan simülasyon sayısı muhtemelen bina simülasyon programıyla entegre olan optimizasyon programının yapacağı simülasyon sayısından daha fazla yada ona eşit olacaktır. Dolayısıyla, meta modellerin dezavantajlarından biri çok sayıda simülasyon gerektirmeleridir. Ayrıca, meta model oluşturabilmek için gerekli olan

yapay zeka yaklaşımlarının ne şekilde çalıştığı konusu da uzman bilgisi gerektirmektedir. Bu eksiklikler, meta model yaklaşımlarının bina performansına yönelik problemlerde karar vericiler tarafından pratikte kullanımı önünde kısıtlayıcı olmaktadır.

Meta-model yaklaşımının dışında optimizasyon süresini indirgeyerek süreci daha etkin hale getirmek amacıyla bazı araştırmalar yapılmıştır. Örneğin, Hopfe (2009) ve Nguyen (2013), optimizasyon sürecinin etkinliğini artırmak için regresyon tabanlı hassasiyet analizi yöntemini kullanarak parametrelerin sayısını azaltmıştır. Evins, Pointer, Vaidyanathan ve Burgess (2012) tarafından “Deney Tasarımları (Design of Experiments-DOE)” yöntemini benzer bir amaç için kullanmıştır.

Daha önce de belirtildiği gibi, bu tez çalışmasında bina performans simülasyonlarıyla optimizasyon yöntemlerinin entegre olarak kullanıldığı simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemi ele alınmaktadır. Bina performans optimizasyonuna yönelik bazı çalışmalarda (Gucyeter ve Gunaydın, 2012; Murray ve Sullivan, 2012) “Optimizasyon” kelimesi simülasyon programı kullanılarak yinelemeli bir performans geliştirme süreci sonucunda yaklaşık optimum çözümlerin belirlenmesi şeklinde kullanılmaktadır. Diğer bir ifadeyle bu yaklaşım, çözüme yönelik senaryolar üretilmesi ve bunların tümünün değerlendirilmesi sonucunda yaklaşık optimum çözümlerin geliştirilmesine dayanmaktadır. Bazı çalışmalarda ise matematiksel optimizasyon kullanılmadan, hassasiyet analizi yöntemi bina performans optimizasyonu için kullanılmıştır (Flager, Welle, Bansal, Soremekun ve Haymaker, 2009; Heiselberg ve diğer., 2009; Ren, Gao ve Ruan, 2009). Ancak, bu alanda simülasyon tabanlı optimizasyon ifadesi genellikle amaç fonksiyon ve algoritmik yaklaşımlarla tanımlanan ve problemlerin sistematik yolla çözümünü sağlayan yinelemeli ve otomatik bir süreci tanımlamaktadır.

2.5.4.1 Binalarda Çok Amaçlı Optimizasyon Uygulamasına Yönelik Mevcut Çalışmalar

Simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı, bina performansına yönelik çatışan kriterleri aynı anda yerine getirebilme potansiyeli ile önemli bir güce sahiptir. Çok amaçlı optimizasyon binanın hem tasarım hem de kullanım/işletim aşamalarında enerji performans optimizasyonuna yönelik kullanılabilmektedir. Örneğin, Wright, Loosemore ve Farmani (2002), bina tasarım aşamasında, çok amaçlı genetik algoritmayı enerji maliyeti ve termal konfor kriterleri arasındaki ödünleşimleri (trade-offs) tanımlayabilmek ve optimum ödeme karakteristiklerini bulmak için kullanılmıştır. Holst (2003), GenOpt optimizasyon programı içindeki Hooke-Jeeves algoritmasını EnergyPlus simülasyon programıyla bir arada kullanarak, 14 tasarım değişkeniyle binanın enerji kullanımı ve termal konforsuzluk göstergesini (Percentage of People Dissatisfied-PPD) minimize etmeye çalışmıştır. Verbeeck ve Hens (2007), TRNSYS simülasyon programı ve genetik algoritmayı bir arada kullanarak 3 amaç kriteri için (enerji tüketimi, NBD ve küresel ısınma potansiyeli) birden fazla Pareto optimum çözüm bulmuştur. Znouda, Ghrab-Morcos ve Hadj-Alouane (2007) geliştirdikleri genetik algoritma tabanlı optimizasyon algoritmasını statik simülasyon programıyla (CHEOPS) birleştirmiş ve bu yaklaşımla enerji tüketimi ve maliyet kriterlerini minimize edecek optimum kombinasyonu belirlemişlerdir. Magnier ve Haghighat (2010) konut binalarının tasarımında termal konfor ve enerji tüketimini optimize etmek amacıyla hızlı ve etkin bir çok amaçlı optimizasyon modeli önermişlerdir. Önerilen modelde simülasyon tabanlı yapay sinir ağı (artificial neural network-ANN) ve genetik algoritma (NSGA-II paket programı ile) yöntemleri bir arada kullanılarak TRNSYS simülasyon programıyla entegre edilmiştir. Tuhus-Dubrow ve Krarti (2010), bir simülasyon-optimizasyon aracı geliştirerek bina geometrisi ve bina kabuğu optimizasyonu için uygulamışlardır. Geliştirilen araç; genetik algoritma ve bina enerji simülasyon programını (DOE-2) bir arada kullanarak bina kabuğuna ilişkin bir dizi parametre için binaların enerji tüketimi minimize etmeye yönelik optimum değerler bulmaktadır. Çalışmada bina kabuğunun yanı sıra farklı bina geometrileri de optimizasyon sürecinde araştırılmıştır. Lin ve Gerber (2014), çok amaçlı optimizasyon için bir ara yüz

geliştirerek, Autodesk firmasının Revit parametrik programı ve Green Building Studio (GBS) enerji analiz programıyla entegre etmiş ve bu aracı bina enerji kullanımı, tasarım etkinliği ve maliyet kriterlerini optimize etmede kullanmışlardır.

Diakaki, Grigoroudis ve Kolokotsa (2008) bina tasarımı ve kullanımı aşamalarında bina kabuğu iyileştirmeleri için çok amaçlı optimizasyon tekniklerinin uygulanmasını araştırmıştır. Çalışmada ele alınan karar problemi bina yapım maliyeti ve enerji tüketimi kriterlerine dayanmaktadır. Binanın termal simülasyonu için statik model kullanılmıştır. Diakaki ve diğer. (2010) tarafından önerilen çok amaçlı karar modeliyle sonsuz sayıda alternatif kriter arasından enerji tüketimi, karbon emisyonu ve ilk yatırım maliyeti kriterlerine göre optimizasyon yapılmıştır. Sonrasında ise çok amaçlı matematiksel programlamaya dayalı bir karar modelleme yaklaşımı önerilmiş ve mevcut bir binanın iyileştirilmesi sürecinde uygulanmıştır (Diakaki, Grigoroudis ve Kolokotsa, 2013). Chantrelle, Lahmidi, Keilholz, Mankibi ve Michel (2011), mevcut binalarda bina kabuğu ve kontrol sistemlerine yönelik çeşitli parametreleri kullanarak enerji tüketimi, maliyet, termal konfor ve çevresel etki kriterlerini optimize etmek için MultiOpt adı verilen çok amaçlı araç geliştirmişlerdir. Bu araç genetik algoritma (NSGA-II paket programı ile) ve TRNSYS simülasyon programını entegre etmektedir. MultiOpt Fransa'da mevcut bir okul binasının renovasyon sürecinde uygulanmıştır. Hamdy, Hasan ve Siren (2011) genetik algoritma tabanlı çok amaçlı optimizasyon yaklaşımını IDA ICE bina performans simülasyon programıyla entegre ederek bina kabuğu ve binanın ısıtma-soğutma ve havalandırma sistemine yönelik parametreler tasarım değişkenleri olarak kullanılmış ve binanın karbon emisyonu ve ilk yatırım maliyeti kriterleri minimize edilmeye çalışılmıştır. Önerilen optimizasyon yaklaşımı yaz döneminde farklı sıcaklık düzeylerine sahip bölgelerde bulunan üç ayrı binaya uygulanarak optimum kombinasyon setleri tanımlanmıştır.

Asadi, Silva, Antunes ve Dias (2012a) etkin maliyet perspektifiyle minimum enerji kullanımını destekleyecek bina iyileştirme uygulamalarının belirlenebilmesi amacıyla çok amaçlı optimizasyon modeli önermiştir. Bu çalışmanın devamında GenOpt optimizasyon programı, TRNSYS simülasyon programı ve Matlab

programıyla bir arada kullanılarak çok amaçlı optimizasyon modeli geliştirilmiş ve binanın enerji iyileştirmesi maliyeti, enerji kazancı ve termal konfor kriterlerine göre alternatif optimizasyon şemaları tanımlanmıştır (Asadi ve diğer., 2012b). Daha sonra bu model genetik algoritma (genetic algorithm-GA) ve yapay sinir ağı (artificial neural network-ANN) yöntemleri entegre edilerek geliştirilmiş ve örnek bir bina iyileştirme projesi üzerinde uygulanmıştır (Asadi, Silva, Antunes, Dias ve Glicksman, 2014).

Murray, Walsh, Kelliher ve Sullivan (2014), statik simülasyon modellemesini (derece-gün metodu) ve optimizasyon tekniği olarak genetik algoritmayı bir arada kullanarak simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemini mevcut bir binanın enerji etkin iyileştirilmesi sürecinde optimum çözümlerin tanımlanmasında uygulamıştır. Tanımlanan amaç fonksiyon ile yatırımın geri ödeme süresi, enerji maliyeti ve karbon emisyonu kriterleri minimize edilmeye çalışılmıştır. Ferrara, Fabrizio, Virgone ve Filippi (2014) revize edilmiş Binalarda Enerji Performansı Direktifini baz alarak Fransa'da tek bir konut tipolojisi için binaların optimum maliyet düzeylerini hesaplamışlardır. Çalışmada önerilen yaklaşım TRNSYS enerji simülasyon programı ve GenOpt optimizasyon programının bir arada kullanımını içermektedir. Global maliyet fonksiyonu optimizasyonda amaç fonksiyon olarak kullanılmıştır. Ibn-Mohammed, Greenough, Taylor, Ozawa-Meida ve Acquaye (2014) ise ekonomik ve net çevresel etki (gömülü ve kullanım emisyonlarını kapsamaktadır) kriterlerine göre optimum kararların verilebilmesi için marjinal indirim maliyeti metodu (marginal abatement cost methods) ve Pareto optimizasyona dayalı bir karar destek sistemi önermiştir.

2.6 Mevcut Karar Destek Yaklaşımlarının Değerlendirilmesi

Bu aşamaya kadar bina enerji performansı alanında yapılan bireysel ya da ortak çalışmalara dayanan araştırmalar detaylı şekilde irdelenmiştir. Tasarım veya kullanım/işletim aşamalarında bina performansını geliştirmeye yönelik kararların alınmasında karar desteği sağlayacak yaklaşımlar detaylı şekilde açıklanmıştır.

Gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda bu yaklaşımlara ilişkin saptanan genel eksiklikler şu şekildedir:

- Bina performans değerlendirmesi konusunda ülkeler bazında dinamik simülasyon programlarının yerine daha çok aylık statik hesaplama metodu kullanılması binaların gerçek enerji tüketimlerinin hesaplanması için yetersizdir ve burada sadece binaların sertifikalandırılması amaçlanmaktadır. Ancak, binanın enerji performans değerlendirmesi için detaylı simülasyon programlarının kullanılması önerilmektedir (EU, 2010). Bu doğrultuda detaylı dinamik simülasyon programları kullanılarak bina modelinin oluşturulması, performans analizlerinin yapılması bina performansına yönelik temel mantığın anlaşılabilmesi açısından önemli görülmüştür.
- Çok kriterli karar verme (multi-criteria decision making-MCDM) yaklaşımlarının sübjektif performans kriterlerini tasarım sürecine entegre edebilme avantajına karşın bu yaklaşımların “sınırlı sayıda alternatif” üretirler ve daha basit problemlere yöneliktirler (Loh, Crosbie, Dawood ve Dean, 2010).
- Hassasiyet analizi yöntemi, tasarım parametrelerinin ve bina performansı üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesine olanak tanıyarak, uygun tasarım parametrelerinin seçilebilmesi yoluyla bina performansının geliştirilmesine yönelik kararların alınabilmesinde yol gösterici olabilmektedir. Hassasiyet analizine yönelik literatürde var olan çalışmalar incelendiğinde lokal hassasiyet analizi ve regresyon tabanlı global hassasiyet analizinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Özellikle, regresyon tabanlı yöntemlerin yaygın kullanımının temel nedeni, hızlı şekilde sonuç alınabilmesi ve lokal yöntemlere göre sonuçlarının çok daha güvenilir olmasıdır. Ancak, özellikle bu parametreler optimizasyon gibi başka bir süreç için kullanılacaksa parametrelerin öncelik sıralaması önem kazanmaktadır. Regresyon tabanlı yöntemlerde kullanılan katsayıya göre (Örneğin, SRC, SRRC, PCC vb.) parametrelerin önem ve öncelik sıralaması değişebilmektedir. Bu nedenle, daha fazla simülasyon süresi gerektiren ancak sonuçların güvenilirliği

açısından daha güçlü olan varyans tabanlı yöntemlerin kullanılması gerektiği düşünülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda bu konunun fazla irdelenmediği tespit edilmiştir. Bina enerji performansı alanındaki çalışmalarda hassasiyet analizinin yaygın kullanım şekli, tanımlı performans kriterleri üzerindeki etkilerine göre öncelikli parametreleri tanımlamak ve elde edilen bulgular doğrultusunda tasarım rehberleri oluşturmak şeklindedir. Ancak hassasiyet analizi yönteminin çok kriterli karar verme sistemleri veya optimizasyon gibi farklı bir yöntemle entegrasyonuna yönelik çalışmalar ise çok az sayıdadır.

- Çok amaçlı optimizasyon, zaman alıcı problemler ile başa çıkmada önemli bir güce sahiptir ve çok daha az sayıda hesaplamayla birincil yaklaşımlara göre çok daha iyi performans gösterir (Ferreira, Pinheiro ve Brito, 2013). Simülasyon tabanlı optimizasyon olarak da adlandırılan simülasyon programlarının bireysel geliştirilen algoritmaları veya optimizasyon programlarıyla entegre edilerek kullanılması çok amaçlı optimizasyon problemi çözümleri için yaygın kullanılan ve mimarlar, mühendisler için tasarım hedeflerini gerçekleştirmeye katkı sağlayan önemli bir yaklaşımdır. Bina simülasyon çıktılarının karmaşıklığı, çok amaçlı tasarım probleminin ele alınıyor olması, simülasyon zamanı gibi zorluklar ise bu yaklaşımdaki ana engellerdir. Ayrıca ön bilgi olmaksızın sadece optimizasyon sonuçlarına bakarak sebep sonuç ilişkisi kurabilmek oldukça zordur. Simülasyon süresinin azaltılması için kullanılan meta-model ve arama tekniklerinin geliştirilmesi konusu da önemli bir araştırma alanıdır. Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımının en önemli avantajı optimum çözümler için geniş bir çözüm uzayında araştırma yapılması ve bu sayede optimum çözümlere daha yakın çözümlere ulaşılabilişidir.
- Literatür araştırması kapsamında, geliştirilmesi uzun senelere dayanan ve güvenilirliği test edilmiş EnergyPlus ve TRNSYS dinamik bina simülasyon programlarının bina performans değerlendirmesinde, ve GenOpt optimizasyon programı ve Matlab optimizasyon araç kutularının da bina performans optimizasyonuna yönelik çalışmalarda yaygın kullanıldığı görülmüştür.

Mevcut çalışmaların değerlendirilmesi sonucunda elde edilen bulgular, çok amaçlı optimizasyon problemi alanına giren bina performans optimizasyonu için yukarıda açıklanan yöntemlerin olumlu yönlerinin bütünlük olarak kullanıldığı entegre bir yaklaşıma ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Binaların enerji performansını geliştirmeye yönelik bir yaklaşımın geliştirilmesi aşamasında çözülmesi gereken problemler ise şu şekilde özetlenebilir:

- **Bina enerji performansını geliştirme/iyileştirme sürecinde kullanılacak bir karar destek yaklaşımı/modeli gerekliliği:** Yukarıda incelenen çalışmaların ana motivasyonu, binaların enerji performansını geliştirmeye yönelik sistematik bir karar destek yaklaşımı/modeli/sisteminin geliştirilmesidir. Bunun temel nedeni, tasarım veya kullanım/işletim süreçlerinde bina enerji ve çevresel performansının geliştirilmesi/iyileştirilmesine yönelik kararların verilmesinde kullanılan mevcut yöntemlerin (sezgiler, geçmiş deneyimler, mevcut uygulamaların tekrarlanması vb.) yetersiz kalması ve performans değerlendirmeye dayanan yaklaşımlara ihtiyaç duyulmasıdır.
- **Bina enerji performansını geliştirmeye yönelik çözümlerin belirlenmesinde bilgi desteği gereksinimi:** Binaların mimari, mekanik, çevresel ve hatta sosyal boyutları olan karmaşık bir sistem olması; girdi-çıkı etkileşiminin fazla olması ve bu etkileşimlerin yeterli düzeyde bilinmemesi veya uzmanlık bilgisi gerektirmesi; bina performansını etkileyen birden çok parametrenin olması ve parametreler arası etkileşimin varlığı; parametrelerin bina performans kriterleri üzerinde farklı etkiye sahip olması gibi çok sayıda neden binanın enerji performansını geliştirmeye yönelik çözümlerin belirlenmesi sürecini zorlaştırmaktadır. Belirtilen bu nedenler, tasarımcı/mimar/mühendis gibi proje paydaşlarının, tüm bu ilişkilerin farkında olarak çözüm önerileri geliştirmelerini zorunlu hale getirmiştir.
- **Bina performansını değerlendirme sürecinin zorluğu:** Bina performansını geliştirmeye yönelik en etkin enerji korunum önlemlerinin/stratejilerin tanımlanabilmesi hala önemli bir engeldir. Bu sorunun çözümüne yönelik

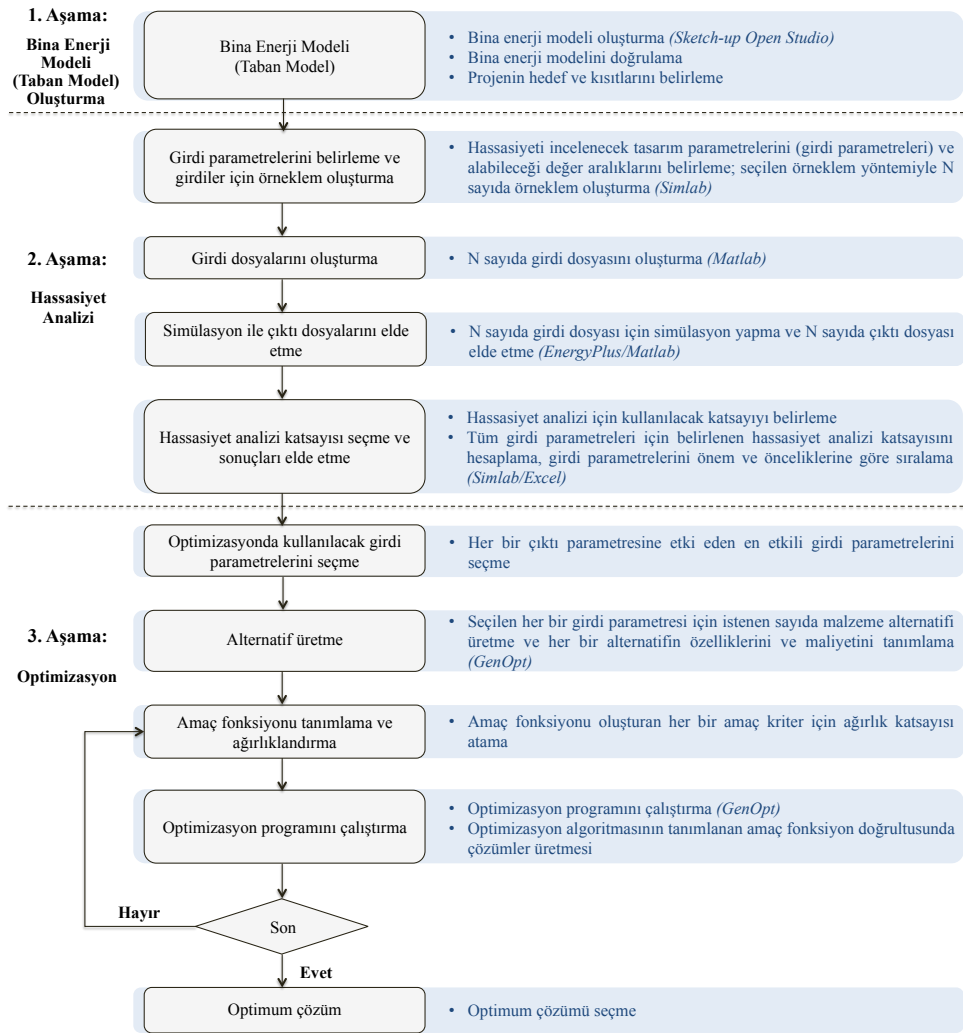
olarak kullanılan en yaygın yöntem bina performans simülasyonlarıdır. Ancak, performans simülasyonları tek başına kullanıldığında zaman alıcı olmakta ve “sınırlı sayıda alternatif” arasında arama yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum, gerek çözüm uzayının dar olması ve gerekse girdi parametreleri arasında oluşan lineer olmayan etkileşimler nedeniyle simülasyon sonuçlarında sadece kısmi iyileşme sağlanabilme problemi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, performans kriterleri arasında meydana gelecek ödünleşim (trade-off) sebebiyle, geliştirilen çözüm önerilerinin sadece tek bir kriterle göre değil, başka kriterlere göre de değerlendirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, doğru ve etkin çözümlerin geliştirilebilmesi için büyük çözüm kümelerinde birden fazla kriterle göre değerlendirme yapılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

BÖLÜM ÜÇ

YÖNTEM

3.1 Bina Enerji Performansını Geliştirmede Optimum Çözümleri Belirlemeye Yönelik Simülasyon ve Çok Amaçlı Optimizasyon Tabanlı Bir Karar Destek Modeli

Tez çalışmasında binaların enerji performansını geliştirmeye yönelik optimum çözüm önerilerinin belirlenmesinde karar desteği sağlayacak simülasyon ve çok amaçlı optimizasyon tabanlı bir model önerilmektedir. Şekil 3.1’de önerilen modelin akış şeması sunulmaktadır. Önerilen model üç ana aşamadan oluşmaktadır: 1) Bina enerji modelini oluşturma, 2) Hassasiyet analizi ve 3) Optimizasyon.



Şekil 3.1 Önerilen modelin akış şeması

Önerilen model, genel bir model olup hem tasarım sürecindeki yeni binaların hem de mevcut binaların enerji performansını geliştirmeyi amaçlamaktadır. Model binaların enerji etkinliğinin geliştirilmesinde optimum çözüm önerilerinin belirlenmesinde karar desteği sağlayacak genel bir çerçeve sunmaktadır. Modelin tasarım sürecinde ya da mevcut binalarda uygulanması sırasında ihtiyaca göre belirli adımlar eklenebilmekle birlikte modelin genel kurgusu değişmemektedir.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, önerilen modelin birinci aşaması; simülasyon programı ile bina enerji modelini ya da taban modeli oluşturma, oluşturulan modelin doğruluk düzeyini belirleme, projenin hedef ve kısıtlarını belirleme adımlarını kapsamaktadır. Bu aşamada oluşturulan taban model ve ona ait değerler bundan sonraki iki ana adım olan Hassasiyet Analizi ve Optimizasyonda kullanılacağından, modelin doğruluk düzeyi önem kazanmaktadır.

İkinci aşama, oluşturulan taban model üzerinden hassasiyet analizi yönteminin uygulanmasını içermektedir ve dört ana adımdan oluşmaktadır (Şekil 3.1). Bu aşamada, öncelikle tasarım parametrelerinin (girdi parametrelerinin) belirlenmesi ve her bir girdi parametresi için değer aralığının belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra seçilen örneklem yöntemiyle, tanımlanan değer aralıkları arasında N sayıda örneklem oluşturulmaktadır. N sayıda oluşturulan her bir örnekleme ait değerler atanarak her birine ait girdi dosyaları oluşturulmalı ve her bir girdi dosyası simülasyon programı ile simüle edilerek, çıktı parametreleri (performans göstergeleri) her bir girdi dosyası için hesaplanmaktadır.

Üçüncü aşama, hassasiyet analizi sonucunda elde edilen en etkin parametreler kullanılarak tanımlanan amaç kriterleri için optimum çözüm alternatiflerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Modelin üçüncü aşaması beş ana adımdan oluşmaktadır (Şekil 3.1).

Modeli oluşturan her bir aşama aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

3.1.1 Bina Enerji Modeli (Taban Model) Oluşturma (1. Aşama)

Önerilen modelin ilk ana aşaması aşağıdaki dört adımdan oluşmaktadır:

- Bina enerji modeli oluşturma,
- Bina enerji modelini doğrulama,
- Projenin hedef ve kısıtlarını belirleme.

Bina enerji modelinin simülasyonundan elde edilecek verilerin geçerliliği, kullanılan simülasyon programının doğruluğu kadar, programın doğru şekilde kalibre edilmesine de bağlıdır. Bina ya da zonun modellenmesiyle oluşturulan enerji simülasyon modelinden elde edilen verilerin, binanın gerçek tüketim verileriyle karşılaştırılması ve limit değerler arasında kalan hata paylarının elde edilebilmesi, kullanılan en yaygın kalibrasyon yöntemidir. Eğer söz konusu mevcut bir bina ise, binaya ait gerçek tüketim verilerine ulaşılabileceği için bu şekilde bir simülasyon modeli kalibrasyonu yapılabilmektedir. Ancak, henüz tasarım aşamasında ise, yani gerçek bir bina henüz ortada yok ise, deney sonuçları ya da literatürde mevcut olan daha önceden yapılmış çalışmaların sonuçları binanın simülasyon modelinin kalibrasyonu için baz alınabilir (Clarke, 2001).

Enerji performans simülasyon programlarının güvenilirliği ve doğruluğu Uluslararası Enerji Ajansı tarafından geliştirilen ve BESTest (IEA Building Energy Simulation Test) olarak adlandırılan bir yönteme göre belirlenebilmektedir. Bu yöntem bir çok örnek binayı ve onlara ait test sonuçlarını içermektedir. Herhangi bir simülasyon programı ile elde edilen modeller bu sonuçlarla karşılaştırılmakta ve limit değerler arasında değer elde edilip program testi geçerse doğruluğu ve güvenilirliği sağlanmış olmaktadır. Gerek tasarlanmakta olan binanın gerekse mevcut bir binanın enerji modellemesinde, geçerliliği ve güvenilirliği olan dinamik bir enerji simülasyon programının kullanılması sonuçların güvenilirliği ve doğruluk düzeyi

açısından önemlidir. Bununla birlikte oluşturulan enerji modelinin kalibrasyonu sonuçların doğruluk düzeyi açısından önemlidir.

Önerilen modelin uygulaması BESTest standardına sahip olan ve yaygın şekilde kullanılan EnergyPlus 8.1.0 (US Department of Energy [DOE], 2014) dinamik simülasyon motorunu kullanan Sketch-up programı içinde gömülü Open Studio eklentisi (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2014) kullanılarak bina enerji modeli oluşturulmaktadır. Bir sonraki adım ise, binanın mevcut enerji tüketim verileriyle simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ve simülasyondaki hata payının bulunmasıdır. Hata payının geçerli aralıklarda olması durumunda oluşturulan simülasyon modeli mevcut binayı temsil edebilmektedir. Bu süreç sonucunda mevcut binayı temsil eden “taban model” oluşturulmakta ve geliştirilecek stratejiler taban model baz alınarak değerlendirilecektir.

Bu aşamada doğruluğu saptanan bina enerji modeli, sonraki aşamalar için, mevcut binayı temsil edecek taban model ya da referans model olarak kullanılacaktır. Bundan sonraki aşamalarda **taban model** kavramı kullanılacaktır. Sonraki aşama olan 2. Aşamada “hassasiyet analizi” yönteminin uygulanması ile binanın enerji tüketimi üzerinde etkili olan parametreler belirlenmektedir.

3.1.2 Hassasiyet Analizi (2. Aşama)

Hassasiyet analizi yöntemi, çeşitleri ve adımları Bölüm 2.5.3’te detaylı şekilde açıklanmıştı. Ayrıca, hassasiyet analizinin bina enerji performansına entegre edilmiş hali Şekil 3.1’de aşamalar halinde verilmiştir. Bu aşamada Simlab, Matlab, Microsoft Excel ve EnergyPlus programlarından faydalanılmıştır. Simlab belirsizlik analizi ve hassasiyet analizi için yaygın kullanılan bir programdır (Joint Research Centre-European Commission, 2006). Matlab güçlü ve yaygın olarak kullanılan bir numerik hesaplama yazılımıdır (MathWorks, 2012) ve özellikle hassasiyet analizi sürecini EnergyPlus bina simülasyon programı için girdi dosyalarının oluşturulması ve çıktı (output) dosyalarından verilerin alınması işlemleriyle hızlandırmaktadır. Microsoft Excel programı hassasiyet analizinin uygulanması sürecinde oluşturulan örneklem

matrisi verilerinin saklanması ve elde edilen sonuçların görsel olarak sunulması için kullanılmıştır.

Önerilen modelin ikinci aşamasında hassasiyet analizi yönteminin uygulanma nedenleri şu şekildedir:

- Bina tasarım sürecinde ya da mevcut bir bina üzerinde yapılacak enerji etkinliğe yönelik uygulamalarda, bina enerji performansı bağlamında tasarım parametrelerinin (girdi parametreleri) binanın enerji tüketimi, ısıl konfor düzeyi vb. performans göstergeleri üzerindeki etki düzeyleri ve önem sıraları hakkında bilgi vermektedir. Bu da karar vericiler (mimarlar, mühendisler vb.) için karar vermede bilgi desteği sağlamaktadır.
- Hassasiyet analizi girdi parametreleri arasındaki ters ilişkilerin tanımlanmasını sağlayarak, yine karar vericiler için karar desteği sağlar. Örneğin bir binada dış kabukta yapılacak bir ısı yalıtımı uygulaması belki binanın ısıtma yükünü azaltacaktır ancak aynı zamanda binanın soğutma yükünü artırabilecektir. Bu durumda tüm koşullar göz önünde bulundurularak karar verilmesi, bina performansının geliştirilebilmesi açısından önemlidir.
- Hassasiyet analizi sonucunda bina performansını geliştirebilmek amacıyla en öncelikli uygulamalar tanımlanabilmektedir. Örneğin, birçok uygulama içinden öncelikli olarak hangisi ya da hangileri uygulanırsa bina performansı pekiştirilebilir sorusunun cevabı alınabilmektedir.
- Hassasiyet analizi yöntemiyle en etkin parametrelerin belirlenmesi ve seçilmesi ile önerilen modelin üçüncü aşaması olan optimizasyon süreci etkinliği artırılmaktadır. Daha az parametreyle yapılan optimizasyon süreci daha kısa ve daha az karmaşıktır.

Önerilen modelde girdi parametrelerinin (tasarım parametreleri) çıktı parametreleri (performans göstergeleri) üzerindeki etkilerini belirlemek için Global Hassasiyet Analizi yöntem olarak seçilmiştir.

Daha önce de açıklandığı gibi, global hassasiyet analizi farklı metotları içermektedir. Bu çalışmada varyans tabanlı hassasiyet analizi (variance based sensitivity analysis) olan, Sobol Metodu (Sobol's Method) girdi parametrelerinin çıktılar parametreleri üzerindeki etki değerlerine göre sıralanması için kullanılmıştır. Sobol Metodunun seçilmesinin nedeni, bu örneklem metodunun ve sonucunda elde edilen hassasiyet katsayılarının modelden bağımsız olmasıdır. Yani girdi-çıkı ilişkisinin oluşturduğu matematiksel modelin belirli kurallar içerisinde olması gerekmemektedir. Ayrıca, her parametrenin girdi aralığını tamamen kullanarak bu aralığın çıktıdaki etkisini daha etkin şekilde yansıtır (Saltelli ve diğer., 2008). Sobol metod özellikle non-lineer ve non-monotonik karakteristiklere sahip modeller için uygundur. Varyans tabanlı yöntemlerin regresyon tabanlı yöntemlere göre en büyük dezavantajı fazla sayıda simülasyon yapılmasını gerektirmesidir. Ayrıca, elde edilen sonuçların pozitif veya negatif gibi ilişkilerini göstermez. Ancak regresyon tabanlı yöntemlerin Monte-Carlo analizinde aynı girdi parametreleri için farklı sıralama verebilmesi, varyans tabanlı yöntemlere göre en büyük dezavantajdır (Helton, Johnson, Sallaberry, ve Storlie, 2006). Sobol yöntemiyle gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen parametre sıralamasının güvenilir ve stabil olduğu daha önce karmaşık bir model için yapılan analizde belirtilmiştir (Nossent, Elsen ve Bauwens, 2011).

Enerji simülasyon programları binanın fiziksel özelliklerini içeren girdi dosyalarını işleyerek (simüle ederek) istenen çıktıları (veriler) kullanıcıya verebilmektedir. Global hassasiyet analizinin temelinde, simülasyon programına girdi sağlamak için oluşturulan girdi dosyalarının, örneklem yöntemleriyle üretilmesi işlemi vardır. Girdi dosyaları üretilmeden önce, örneklem yöntemi kullanılarak seçilen binaya ait fiziksel parametrelere (k adet parametre) sayısal değerler verilir ve bu birçok kez (n kere) tekrarlanarak $n \times k$ büyüklüğünde bir matris oluşturulur. Girdi parametrelerinin belirlenmesi ve örneklem matrisi oluşturulması global hassasiyet analizinin ilk aşamasını oluşturmaktadır. Girdi parametrelerine sayısal değerler atanırken farklı örneklem yöntemleri kullanılabilir. Latin Hypercube, Morris, Rastgele (veya gelişigüzel), ve Sobol örneklem üretme yöntemlerinden birkaçıdır. Oluşturulan matrisin her sütunu binanın farklı bir fiziksel parametresine denk

gelmektedir. Her bir sıradaki değerler girdi dosyalarına işlenerek sıra sayısı kadar girdi dosyası oluşturulur ve enerji simülasyon programına verilir. Bu işlem ise global hassasiyet analizinin ikinci aşamasıdır. Üçüncü aşama, programdan elde edilen çıktı dosyalarının işlenmesi ve içindeki ilgili performans göstergesine ait verilere ulaşılması uygulamalarını içermektedir. Simülasyon programının çıktılarının tamamıyla bireysel girdiler arasındaki ilişkiler (veya korelasyon değerleri) kullanıcıya hassasiyet analizinin sonuçlarını vermektedir. Bu sonuçların matematiksel bağıntılarla hesaplanmasıysa global hassasiyet analizinin son ve dördüncü aşamasıdır ve farklı global hassasiyet analiz metodlarında farklı şekilde sürdürülür. Önerilen modelin bir bina projesi kapsamında uygulanması aşamasında temel olarak varyans tabanlı hassasiyet analizi yöntemi kullanılmıştır. Bunun yanı sıra regresyon tabanlı yöntem de örneklenmiştir. Varyans tabanlı yöntemlerde yukarıda bahsedilen birinci ve dördüncü aşama için Sobol hassasiyet analizi yöntemi (örneklem oluşturulması ve katsayıların hesaplanması), regresyon tabanlı yöntemlerde ise birinci aşamada Latin Hypercube Örneklemi ile dördüncü aşamada SRRC (Standartlaştırılmış Sıralı Regresyon Katsayıları) kullanılmıştır.

Sobol örneklem yöntemi varyans tabanlı bir hassasiyet analizi tekniğidir (Sobol, 1993). Varyans, istatistiksel bir yayılımda her bir değer ortalama ne kadar saptığını ölçmektedir. Varyans hesaplanırken, her bir değerin ortalama ne kadar saptığı hesaplanır ve hesaplanan bu değerin karesi alındıktan sonra, yayılımdaki değerlerin sayısına bölünür. Varyans formülü aşağıda izlenebilmektedir:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N} \quad (3.1)$$

Burada σ^2 varyansı, X istatistiksel yayılımdaki değeri, μ ortalamayı, ve N ise yayılımdaki değerlerin sayısını vermektedir.

Modelin çıktısı (performans göstergeleri) ile birbirinden bağımsız girdi parametrelerinin (tasarım parametreleri) $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$ fonksiyonu olarak, $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$, yazılabilir. Çıktının ortalaması $E(y)$ ve varyansı $V(y)$ olarak tanımlanırsa, birinci dereceden hassasiyet katsayısı ise:

$$S_j = \frac{V(E(y|x_j))}{V(y)} \quad (3.2)$$

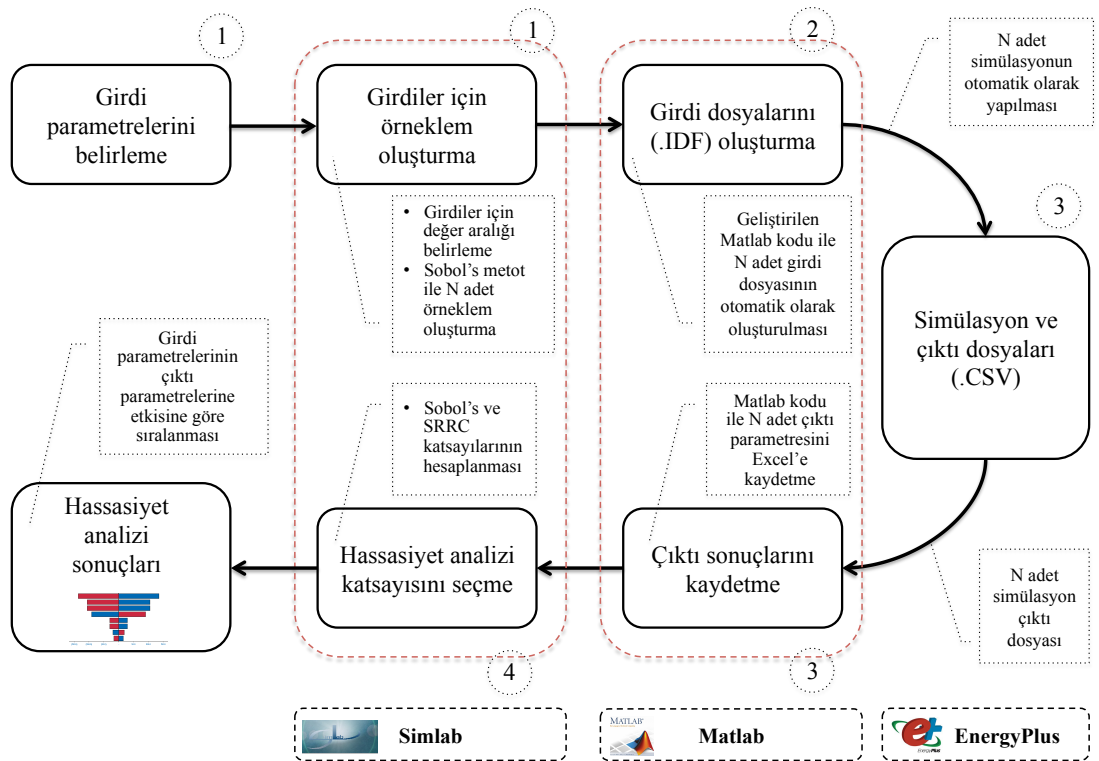
olarak tanımlanır (Saltelli ve diğer., 2008). Birinci dereceden katsayı, her bir girdi parametresinin, çıktının varyansına olan ana etkisini temsil etmektedir. $E(y|x_j)$ bir girdi parametresinin herhangi bir değere sabitlenmesiyle ($x_j = \tilde{x}_j$) oluşan çıktıdaki değişimin ortalamasıdır. $V(E(y|x_j))$ ise bu ortalamanın bütün olası girdilerle hesaplandıktan sonra alınan varyansıdır. Varyans hesaplanırken $\tilde{x}_j$ ’e bağımlılık ortadan kaybolur (Joint Research Centre-European Commission, 2008). S_j her zaman 0 ile 1 arasındadır ve parametrenin bu değerinin yüksekliği, parametrenin etki değerini göstermektedir.

Varyans tabanlı hassasiyet analizinde, birinci derece hassasiyet katsayısının yanı sıra daha yüksek dereceden katsayılar (S_{ij}) ve toplam etki katsayısı da (S_{Tj}) anlamlı bilgiler içermektedir. Ancak yüksek derecedeki katsayıların sayısı parametre sayısı (k) cinsinden ($2^k - 1$) olarak verildiğinden ve bu rakamın parametre sayısı fazla olan modellerde büyük bir sayıya (örneğin $k = 30$ için bu sayı 1.073.741.823’tür) karşılık geldiği için genellikle birinci derece ve toplam etki katsayılarının gösterdiği bilgiler tercih edilmektedir. Toplam etki katsayısı, etkisiz girdi parametrelerinin tanımlanmasında kullanılmaktadır ve her parametrenin, çıktının varyansına olan toplam etkisini temsil etmektedir (Joint Research Centre-European Commission, 2008).

Sobol hassasiyet analizinde modeldeki girdi parametrelerinin sayısına göre örneklem matrisi oluşturulur. Bu sayı belirlenirken öncelikle her parametre için belirli sayıda (m) bir örneklem vektörü oluşturulur. Simlab programı bu sayıyı minimum 16 olarak almaktadır. Yani herhangi bir girdinin aralıkları verildiğinde bu aralık 16 adet sayı oluşacak şekilde bölünür. Örneklem matrisindeki sütun sayısını girdi parametrelerinin sayısı belirlerken, satır sayısı (n) ise $n = m \cdot (2k + 2)$ formülü ile belirlenmektedir (Saltelli ve Tarantola, 2002). Aynı zamanda satır sayısı, bina performans simülasyonu sayısını vermektedir. Örneğin, otuz adet parametre için

örnekleme matrisi 992 x 30 büyüklüğündedir. Birinci dereceden hassasiyet katsayısı ve toplam etki katsayısını hesaplamak için 992 tane simülasyon gerekmektedir. Formülde $m \cdot k$ sayıda simülasyon, toplam etki katsayısını, $m \cdot (k + 2)$ sayıda simülasyon ise birinci derece hassasiyet katsayısını hesaplamak için kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında varyans tabanlı global hassasiyet analizi olan Sobol yönteminin uygulanmasına yönelik detaylar ve kullanılan programlar Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Çalışma kapsamında hassasiyet analizi yönteminin uygulanmasına yönelik akış şeması

Şekil 3.2 incelendiğinde, varyans tabanlı hassasiyet analizi yönteminin uygulamasının dört ana adımdan oluştuğu görülmektedir. Adımların içeriği ise şu şekildedir:

1. Sobol Örneklemi Oluşturma: Analiz edilecek girdi parametreleri (tasarım parametreleri) belirlenir ve her bir parametre için değer aralıkları (minimum ve maksimum değerler) atanır. Sobol örneklem yöntemiyle, belirlenen değer aralıkları arasında her bir girdi parametresi için n sayıda örneklem oluşturulur. Sobol örneklemi oluşturma işlemi Simlab programı ile yapılmaktadır. Girdi parametrelerinin sayısı örneklem matrisinin sütun sayısını (k) belirler. Simlab programıyla n sayıda oluşturulan örneklem, Excel dosyasına kaydedilmektedir. Şekil 3.2'ye bakıldığında, taban model (önerilen karar destek modelinin birinci aşaması sonunda elde edilmiştir) EnergyPlus girdi dosyası (.IDF) olarak kaydedilmekte ve bundan sonraki adım olan hassasiyet analizinde referans girdi dosyası olarak kullanılmaktadır. Kullanıcı taban model üzerinde hangi performans kriterine göre (çıkı parametresi) değerlendirme yapacağını ve hangi tasarım parametrelerinin hassasiyetini ya da etkisini ölçeceğini belirlemektedir.
2. İkinci aşama, oluşturulan örneklem matrisinden EnergyPlus simülasyon programının girdi dosyaları olan IDF uzantılı dosyaların (EnergyPlus simülasyon programı dosyası) oluşturulmasını içermektedir. Oluşturulan örneklem matrisinin her satırındaki veriler, ilgili parametrelere atanarak n adet yeni IDF dosyası üretilir. Bu işlem için çalışma kapsamında geliştirilen Matlab programı kodu (script) aracılığı ile, örneklem matrisinin kaydedildiği Excel dosyasındaki sayısal veriler alınarak taban modele ait girdi dosyasındaki ilgili girdi parametrelerinin satırları değiştirilir ve yeni bir IDF dosyası olarak kaydedilir. IDF dosyalarının isimleri sıralı olacak şekilde kaydedilmektedir.
3. Üçüncü aşamada, bir önceki adımda oluşturulan IDF dosyalarının simülasyonu yapılmaktadır. Üretilen girdi dosyalarının EnergyPlus simülasyon programıyla simülasyonu yapılır ve ilgili çıktı kriter(ler)ine (performans göstergesi) ait değerler hesaplanır. Bu işlem sonucunda n tane simülasyon dosyası (girdi dosyası) için n tane çıktı dosyası elde edilir. Simülasyonlar EnergyPlus programının EPLaunch arayüzü ile otomatik şekilde yapılabilmektedir ve her simülasyon için CSV formatında EnergyPlus çıktı dosyası oluşturulmaktadır. Her bir CSV dosyası içinde, başlangıçta

belirlenen performans kriter(ler)ine (çıktı parametreleri) ait simülasyon verileri bulunmaktadır. Örneğin bu çalışmada önerilen modelin uygulamasında binanın toplam ısıtma ve soğutma enerjileri tüketimleri performans kriterleri olarak seçilmiştir. Tüm çıktı dosyaları elde edildikten sonra yine çalışma kapsamında geliştirilen Matlab program kodu ile, her bir CSV dosyasındaki ilgili performans göstergesine ait değer alınarak Simlab programına girilmek üzere bir Excel dosyasına kaydedilmektedir.

4. Sobol katsayılarının hesaplanması: Simlab programında girdi parametrelerine ait veriler ve çıktılar kullanılarak, her bir girdi parametresine ait Sobol toplam etki ve birinci dereceden hassasiyet katsayıları belirlenir, ve bu katsayılarla göre parametreler en etkiliden en etkisize doğru sıralanır. Bu sıralama Simlab programından alınarak Excel’de görselleştirilmektedir.

Tez çalışması kapsamında önerilen modelin 3. Aşamasını oluşturan optimizasyon sürecini desteklemek amacıyla global hassasiyet analizinin diğer bir türü olan regresyon tabanlı hassasiyet analizi de ayrıca uygulanarak örneklenmiştir. Regresyon tabanlı hassasiyet analizinin genel akış şeması Şekil 3.2’yle aynıdır. Sadece birinci aşamadaki örneklem oluşturma yönteminde, Sobol örneklem yerine Latin Hypercube örneklem yöntemi; girdi-çıkı ilişkilerini gösteren katsayıların seçildiği dördüncü aşamada da Sobol katsayılarının yerine SRRC katsayıları kullanılmıştır.

Latin Hypercube örneklem (LHS) yöntemi çok katmanlı ve rastgele (random) tabanlı bir örneklem yöntemidir. Bu örneklemde amaç; girdilerin aralıklarını daha iyi kapsamaktır. Tamamen rastgele örneklem yönteminde, girdi aralığı bir parça halinde ele alınır ve rastgele sayı üreticisi (random-number generator) bu aralıkta çalışır. Latin Hypercube örneklem yönteminde ise, her girdi parametresi ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$) p sayıda aralığa bölünür ve her aralıkta rastgele sayı üreticisi çalıştırılır. Böylece girdi parametrelerinin değer aralıkları daha eşit bir şekilde değerlendirilir. Her parametrede seçilen değer, başka parametrelerde rastgele seçilen değerlerle eşleştirilir ve örneklem matrisinin ilk satırı oluşturulur. Bu doğrultuda tüm satırlar aynı şekilde parametre aralıklarından rastgele seçilerek tamamlanır.

Parametrelerin dağılımları seçilirken LHS hem normal dağılıma, hem de uniform dağılıma uygulanabilir. Dağılımın seçimi seçilen analize göre değişebilir. Örneğin belirsizlik analizinde girdi parametrelerindeki hata payının (error veya standart sapma) çıktıya olan etkisi görülmek istendiğinde, normal dağılım seçilmelidir. Özellikle bina performans simülasyonlarına yönelik hassasiyet analizi çalışmalarında uniform dağılımlı LHS yöntemi yaygın şekilde kullanılmaktadır (Macdonald ve Strachan, 2001; Tian ve De Wilde, 2011; Hopfe ve Hensen, 2011).

Uniform dağılımın yoğunluk fonksiyonu aşağıda gösterilmektedir. Burada p aralık sayısını, ÜstDeğer ve AltDeğer aralığın sınırlarını temsil etmektedir. Her aralıktaki Ağırlık değerlerinin toplamı ise 1 olmalıdır.

$$f(x) = \sum_{i=1}^p \frac{\text{Ağırlık}_i}{\text{ÜstDeğer}_i - \text{AltDeğer}_i} \quad (3.3)$$

LHS yöntemiyle üretilen örneklem matrisi verileriyle üretilen girdi dosyaları enerji simülasyon programıyla simüle edildikten sonra elde edilen çıktılar, regresyon tabanlı hassasiyet analizi katsayılarından SRRC katsayıları yardımıyla bilgi haline dönüştürülür.

Simlab programında Monte Carlo analizi yapıldığında, modelde girdilerle çıktılar arasında eşleşmeler oluşur. Bu eşleşmeler dağılım grafiğinde (scatter plot) analiz edilip girdi-çıkı ilişkileri (lineer, lineer olmayan, logaritmik vb.) ortaya çıkarılır. Bu yaklaşım en basit hassasiyet analizi yöntemidir ve böylelikle modelin öngörü hassasiyeti belirlenir. Ancak aynı anda bütün girdi parametreleri değiştirildiği için, dağılım grafikleri dağınık bir görüntü sergiler ve yorumlanması zorlaşır. Aynı zamanda her girdi-çıkı ilişkisi için bir grafik çizilmesi ise irdelenmesi gereken grafik sayısını artırır. Bu noktada girdi-çıkı ilişkileri regresyon analiziyle tanımlanır. Örneğin, korelasyon katsayılarından “Pearson Momentler Çarpımı Korelasyon Katsayısı (Pearson product moment correlation coefficient-PEAR)” değeri lineer korelasyon katsayısını verir ve Excel’de *correl* komutuyla kolaylıkla hesaplanabilir. -

1 ile +1 arasında olan bu değer, ilişkinin pozitif, negatif veya bağımsız olduğunu göstermektedir.

Hassasiyet analizi sonucunda amaç, birden çok veriyi analiz ederek hassasiyet ölçümlerinin özetlenmesidir. Regresyon analizi yöntemi bu amaç doğrultusunda kullanılan en yaygın yöntemdir. Regresyon analizinin amaçları, değişkenler arasındaki ilişkilerin hesaplanması ve matematiksel modelin çıkarılması, bu ilişkinin istatistiksel öneminin (ne kadar güvenli olduğu) ortaya çıkarılması, ve modelin öngörüsünün belirlenmesidir. Hassasiyet analizi, birden fazla değişkeni analiz etmek için çok sayıda teknik içermektedir. Bu tekniklerden bir tanesi de Standartlaştırılmış Regresyon Katsayılarıdır (Standardized Regression Coefficient-SRC). Lineer bir model için girdi-çıkı ilişkisi şöyle yazılabilir (Joint Research Centre-European Commission, 2008):

$$y_i = b_0 + \sum_j^k b_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (3.4)$$

Burada $y_i = 1, \dots$ modele ait çıktı değerleri (örneğin, 2 tane çıktı için $i = 2$), b_j bulunması gereken katsayıları, x_{ij} girdi parametreleri matrisindeki değerleri (örneklem matrisi), ε_i ise hata payını simgelemektedir. b_j katsayıları en küçük kareler (least squares) yöntemiyle hesaplanır. Simlab programında Monte Carlo analizi yapıldığı zaman, bu katsayılar ve katsayıların standardize edilmiş hallerini eş zamanlı olarak hesaplanmaktadır. Standardize edilmiş katsayılar özellikle girdi parametrelerinin etkilerini birbirleriyle karşılaştırırken gerekmektedir. Örneğin, bina fiziksel parametrelerinin sayısal değerleri ve birimleri birbirinden farklıdır. Bazı değer aralıkları diğerlerinin 1000 kat fazlası olabilmektedir (Örneğin, yapı malzemesinin özgül ısı değeri ve U değeri arasında) ve bunların aynı çıktı parametresine olan etkileri standardize edilmeden doğrudan güvenli bir şekilde karşılaştırılmaz. Standartlaştırma yapılırken öncelikle girdi parametrelerinin ve çıktı parametrelerinin ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanır. Her bir değerden ortalama çıkarılır ve standart sapmaya bölünür. Böylece yeni girdi ve çıktıların ortalamaları 0, standart sapmaları da 1'e eşit olur. Belirleme katsayısının (R^2 -

coefficient of determination) büyüklüğüne göre SRC veya SRRC birbirinden bağımsız girdi parametrelerinin modeli kullanarak çıktı parametrelerine ait değerleri ne kadar yakın tahmin edebileceğini gösterir. R^2 değerinin yüksek olduğu modeller lineer kabul edilebilir ve bu modellerde SRC katsayısı daha fazla anlam ifade eder. Diğer yandan non-lineer ve kısmi monoton ilişkilerde SRC katsayısının sıralı versiyonu olan SRRC katsayıları tercih edilmelidir. SRRC hesaplanırken SRC katsayılarının en küçük değeri birinci sıraya konulur ve geri kalan değerler de örneklem sayısına (n) kadar sıralanır (Joint Research Centre-European Commission, 2008).

SRC ve SRRC katsayıları modelden bağımsız değildir. Örneğin, model transformasyonu olduğu zaman SRRC hassasiyet katsayıları da değişim gösterir. Bu nedenle, tez çalışmasında SRRC katsayıları, parametrelerin etkilerine göre önem sıralanması için değil, girdiler ve çıktılar arasındaki pozitif ve/veya negatif ilişkilerin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

3.1.3 Optimizasyon (3. Aşama)

Bu çalışmada, simülasyon tabanlı optimizasyon yaklaşımı, çoklu performans kriterlerini optimize etmek için kullanılmaktadır. Önerilen karar destek modeliyle bina toplam ısıtma enerjisi tüketim değeri, toplam soğutma enerjisi tüketim değeri ve yapılacak yatırımın başlangıç maliyeti ve geri ödeme süresini kapsayan Net Bugünkü Değer (NBD) amaç kriterleri, optimize edilecek ve bu üç amaç kriterine göre optimum enerji korunum çözümleri belirlenecektir. Bu çalışmada, bina enerji performansının geliştirilmesine odaklanılmıştır. Dolayısıyla, performans kriterleri/amaç kriterleri de bu doğrultuda seçilmiştir. Ancak, önerilen modelle Tahmini Memnuniyetsizlik Yüzdesi (Predicted Percentage of Dissatisfied-PPD) ve Tahmini Ortalama Oy (Predicted Mean Vote-PMV) gibi kullanıcıların termal konforunu değerlendirmede kullanılan göstergeler/kriterler, karbondioksit konsantrasyon indeksi) gibi iç ortam hava kalitesine ilişkin kriterler ya da küresel ısınma potansiyelini ölçmede kullanılan karbon emisyonu oranı, maliyete ilişkin yaşam döngüsü maliyeti (Life Cycle Cost-LCC) gibi farklı performans kriterleri de optimize edilebilir.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, önerilen karar destek modelinin üçüncü aşamasını oluşturan simülasyon tabanlı optimizasyon uygulaması beş ana adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmaktadır:

1. İlk olarak modelin ikinci aşamasında uygulanan hassasiyet analizi sonuçlarına göre optimizasyon sürecinde ele alınacak ya da optimizasyon için kullanılacak girdi parametrelerinin seçilmesi gerekmektedir. Burada parametreler için seçim kriterleri; en etkin ilk k sayıda parametrenin alınması ya da ağırlık katsayısı $+X$ sayısından büyük ve $-X$ sayısından küçük şeklinde olabilir.
2. Seçilen k sayıda girdi parametresinin her biri için istenen sayıda çözüm alternatifleri (enerji korunum önlemleri) geliştirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada geliştirilen alternatiflerin boyutları, termofiziksel hesap değerleri, birim maliyetlerinin vb. özelliklerinin de tanımlanması gerekmektedir.
3. Proje kapsamında ne hedefleniyor, binanın hangi performans kriterleri geliştirilmek isteniyor, bunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada belirlenen performans kriteri sayısı, optimizasyonun tek ya da çok amaçlı optimizasyon problemi olmasını belirlemektedir. Belirlenen kriterler doğrultusunda “amaç fonksiyon (objective function)” tanımlanması ve ağırlık katsayılarının atanması gerekmektedir. Ağırlık katsayıları da kullanıcı istek ve önceliklerine göre belirlenebilir.
4. Optimizasyon için gerekli veriler elde edikten sonra, 3. adımın sonunda elde edilenler, optimizasyon programı için gerekli girdi dosyalarına işlenerek optimizasyon programı çalıştırılır.
5. Optimizasyon programı tanımlanan amaç fonksiyona göre optimum çözümü bulduğunda sonlanır. Programın verdiği çözüm kümesi ve optimum çözüm önerisinin dışında kullanıcı tarafından bir başka çözüm optimum olarak önerilebilir.

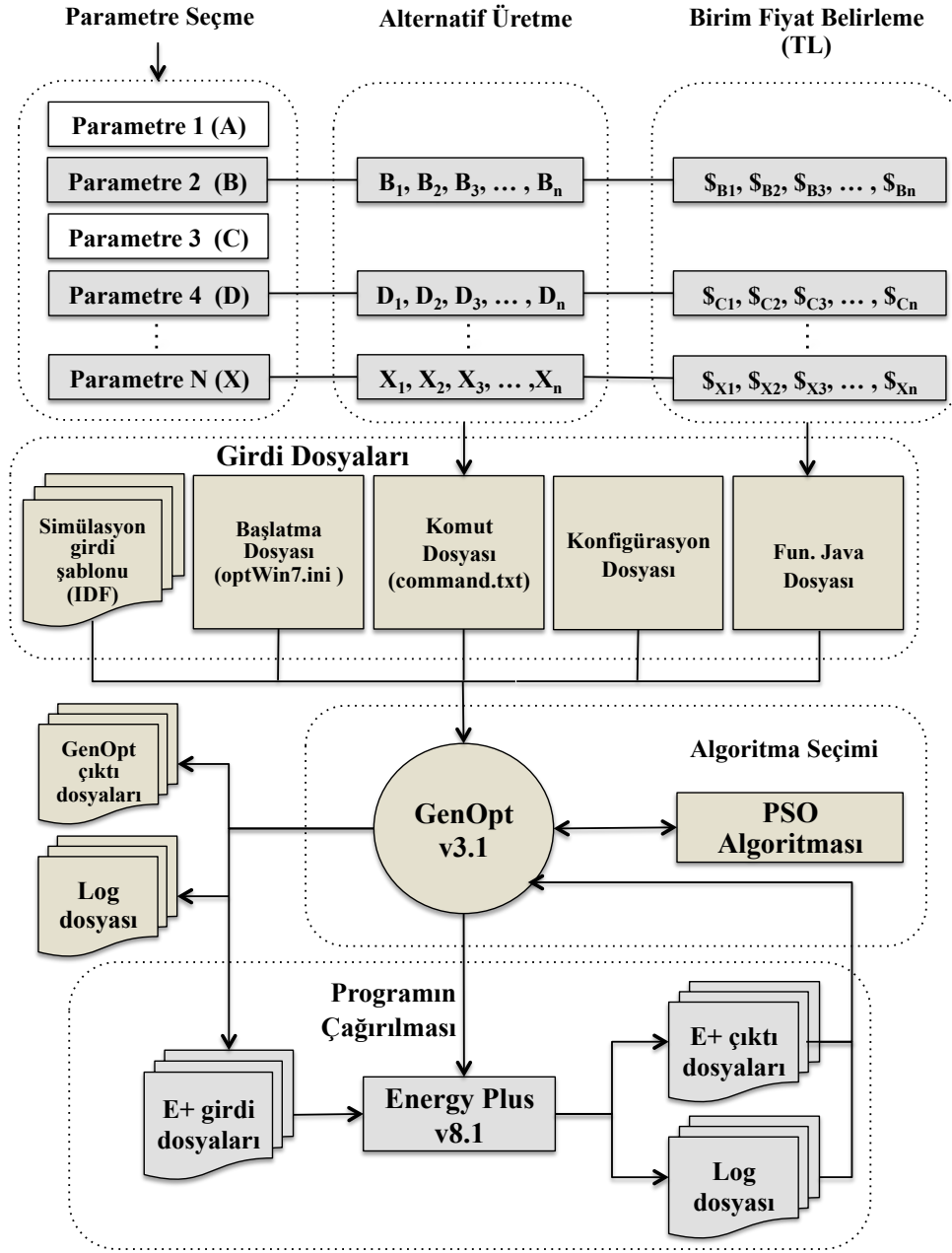
Önceki bölümlerde değinildiği gibi çalışmada, EnergyPlus 8.1 dinamik enerji simülasyon programı kullanılmıştır. EnergyPlus programı doğrudan GenOpt

optimizasyon programıyla (Wetter, 2011) entegre olarak çalışabilmektedir. EnergyPlus ve GenOpt programları bir arada kullanılarak, program içindeki algoritma kütüphanesinden seçilecek optimizasyon algoritmasıyla kullanıcı tarafından tanımlanan çeşitli amaç fonksiyonlar (objective functions) minimize edilmeye çalışılacaktır.

Modelin üçüncü aşamasına yönelik teknik adımlar ise Şekil 3.3'te izlenebilmektedir. Bu şema esas olarak EnergyPlus simülasyon programı ve GenOpt'un entegrasyonunu göstermektedir. Şema, GenOpt programına ait kullanıcı kılavuzunda (Wetter, 2011) yer alan diyagram baz alınarak oluşturulmuştur.

Şekil 3.3'te akışı açıklanan modelin üçüncü aşamasında temel amaç, çözüm kümesi (enerji korunum önlemleri) içinden amaç fonksiyonu oluşturan amaç performans kriterlerine göre optimum enerji korunum önlem(ler)inin belirlenmesidir. Şemayı özetlersek, GenOpt programı, kullanıcı tarafından hazırlanan .IDF uzantılı dosyayı (EnergyPlus girdi dosyası) alır ve yine kullanıcı tarafından tanımlanan ve değiştirilmesi planlanan girdi parametrelerinin (hassasiyet analizi sonucunda seçilen parametreler) değiştirilmesini sağlar ve yinelemeli olarak gerçekleştirilen enerji simülasyonları sonucunda optimum enerji korunum önlemleri kombinasyonunu verir.

Bu aşamaya kadar, önerilen karar destek modelinin üçüncü aşamasındaki temel amaç ve adımlar açıklanmıştır. Bu aşamadaki teknik detaylar ve programların entegrasyonu ise Şekil 3.3 üzerinden detaylı bir şekilde açıklanacaktır.



Şekil 3.3 Çalışma kapsamında simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yönteminin uygulanmasına ve EnergyPlus simülasyon programıyla GenOpt optimizasyon programının entegrasyonuna yönelik şema

Şekil 3.3'e bakıldığında, ilk adım daha önce de değinildiği gibi hassasiyet analizi sonuçlarına göre optimizasyonda kullanılacak girdi parametrelerinin seçilmesidir. Hassasiyet analizinden elde edilen sonuçlara göre seçilen girdi parametrelerinin gri renkle gösterilenler (Parametre 2, Parametre 4 ve Parametre k) olduğu varsayılırsa, bu aşamada seçilen bu parametrelerin her biri için istenen sayıda enerji korunum

önlemi ya da çözüm alternatifi ($B_1, B_2, \dots, B_n, D_1, D_2, \dots, D_n, \dots$) üretilmesi gerekmektedir. Üretilen her bir alternatif için gerekli veri girişlerinin (malzeme özellikleri, malzemelerin birim fiyatları vb.) de yapılması gerekmektedir. Bu noktada alternatifler için özellikli bir değer mi, yoksa değer aralığı mı tanımlanması gerektiği sorusu ortaya çıkmaktadır. Önerilecek çözüm alternatifinin piyasada bulunan bir yapı malzemesi olmasına dikkat edilmiştir. Bu nedenle her bir girdi parametresi için değer aralığı (minimum-maksimum değerler) (continuous variables) yerine, ayrık (discrete) (piyasada bulunan bir yapı malzemesini tanımlayacak şekilde) değerler atanmasına karar verilmiştir.

Binanın performans optimizasyonu için çözüm alternatifleri tanımlanıp gerekli veriler belirlendikten sonra, tüm veriler GenOpt v3.1 paket programına ait girdi dosyalarına girilecek ve tanımlanan performans kriterleri optimize edilecektir. Burada GenOpt programının çalıştırılabilmesi için kullanıcı tarafından programın girdi dosyalarının (simülasyon girdi şablonu olan IDF uzantılı dosya, başlatma dosyası, komut dosyası, konfigürasyon dosyası ve Fun.java dosyası) hazırlanması gerekmektedir. Bu aşamada, sürecin daha iyi anlaşılabilmesi için GenOpt v3.1 programıyla, program içinde yer alan algoritmalara ve çalışma kapsamında seçilen algoritmaya yönelik genel bilgilendirme yapılması ihtiyacı doğmuştur.

3.1.3.1 GenOpt Optimizasyon Programı

GenOpt optimizasyon programı, ABD Enerji Bakanlığı bünyesindeki Lawrence Berkeley National Laboratory'de 1998 yılında geliştirilmeye başlanmış ve geliştirilmesine devam edilen bir programdır. GenOpt programının amacı dışsal simülasyon programları tarafından hesaplanan amaç fonksiyonunu minimize etmektir. GenOpt, text dosyası (.txt) tabanlı çalışan her simülasyon programına entegre edilerek kullanılabilir. Diğer bir ifadeyle, eğer kullanılan enerji simülasyon programı txt tabanlı bir çıktı dosyası (output file) üretebiliyorsa, GenOpt v3.1.0 programıyla bu dosya okunabilir, program tarafından kullanılabilir, ayrıca enerji simülasyon programı kontrol edilebilir. GenOpt v3.1.0 programının çalıştırılmasına

yönelik tüm bilgiler programa ait kullanım kılavuzundan (Wetter, 2004, 2011) edinilmiştir.

Daha önce de belirtildiği gibi, GenOpt programının çalıştırılabilmesi için kullanıcı tarafından programın girdi dosyalarının hazırlanması gerekmektedir. GenOpt programına ait girdi dosyaları ve içerikleri şu şekildedir (Wetter, 2000, 2011):

- Simülasyon Girdi Şablonu (Simulation Input Template) (IDF): Simülasyondaki girdi dosyalarına taban oluşturan temel dosyadır. Bu dosyaya her girdi %input% (yüzde işaretiyle) şeklinde girilir ve GenOpt bu sözcüğün değişken bir parametreye ait olduğunu anlar.
- Başlatma Dosyası (Initialization File - optWin7.ini): Girdi dosyalarının, çıktı dosyalarının, log dosyalarının, konfigürasyon dosyalarının, iklim dosyasının yerlerinin tanımlandığı dosyadır. Amaç fonksiyonu (objective function) da yine bu dosya içinde matematiksel olarak tanımlanır.
- Komut Dosyası (Command File - command.txt): Optimizasyonda kullanılacak tüm parametrelerin isimlerinin tanımlanması, başlangıç değerleri, min-max sınır değer aralıklarının tanımlanması ya da spesifik olarak alacağı değerlerin tanımlanması, optimizasyon algoritmasının tanımlanması ve optimizasyon ayarları bu dosya içinde yapılır.
- Konfigürasyon dosyası (Configuration File): GenOpt programı içinden EnergyPlus simülasyon programının çağırılması için gerekli başlangıç komutları ve hata bildirimlerini içerir.
- Fun.Java dosyası: Üretilen çözüm alternatiflerinin birim fiyatları ve NBD hesaplaması bu dosya içindedir. Güncellendikten sonra yeniden derlenmelidir.

Özet olarak, GenOpt v3.1.0'a girdi parametreleri komut dosyasını (command.txt) yenilenerek girilebilmektedir. Her bir girdi parametresi için üretilen çözüm alternatiflerine ait sayısal veriler (U-değeri, birim fiyat vb.) ise Fun.java dosyasına

girilir. Amaç fonksiyon (objective function) ise başlatma dosyası içinde (optWin7.ini) matematiksel olarak tanımlanır.

3.1.3.2 GenOpt Optimizasyon Programı İçinden Algoritma Seçimi

GenOpt paket programı, içine bir çok algoritmanın entegre edildiği bir çekirdek olarak tanımlanmaktadır. Bu noktada çok sayıda algoritma içinden hangi algoritmanın seçileceği sorusu ortaya çıkmaktadır. GenOpt programı içinde girdi parametrelerinin alacağı değerler ayrık (discrete), sürekli (continuous) ve hibrit (hybrid) olarak üç gruba ayrılmaktadır (Wetter, 2011). Önceki bölümlerde açıklandığı gibi bu çalışmada, girdi parametreleri için bir değer aralığı (continuous) tanımlamak yerine, ayrık değerler (discrete) tanımlanmaktadır. Ayrık değerlere sahip parametreler için GenOpt programı içinde gömülü popülasyon tabanlı meta-hüristik algoritma olan ‘Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (Particle Swarm Optimization Algorithm-PSO)’ ya da kısaca PSO algoritması seçilmesi önerilmektedir (Wetter ve Polak, 2003; Wetter ve Wright, 2004; Karagüzel ve Lam, 2012). PSO algoritması, değerlendirme testlerinde diğer evrimsel tabanlı optimizasyon algoritmalarına (evolutionary-based algorithms) göre daha iyi performans göstermiştir (Elbeltagi, 2005). Ayrıca çok amaçlı optimizasyon problemlerine uygulanmıştır (Coello Coello ve Lechuga, 2002).

PSO algoritması ilk olarak Eberhart ve Kennedy (1995) tarafından ayrık parametrelili problemler için önerilmiştir. Bu algoritmalar, genetik algoritmalara benzer şekilde jenerasyonlar ve jenerasyonların içinde organizmaların ya da sürü zekalarının sosyal alışkanlıklarının taklit edilmesiyle oluşturulan ‘parçacıklardan (particles)’ oluşturulur. Her bir parçacık potansiyel çözüm olmakta ve her yineleme (iterasyon) ile çözümün içinde olduğu jenerasyona daha da yaklaşılmaktadır. İlk jenerasyon genelde rastgele sayı üreticisi kullanılarak oluşturulur. Parçacıklar araştırma uzayında hareket ederler ve optimizasyonun ilerleyen aşamalarında en iyi konuma doğru bir ağ oluştururlar. Parçacıkların konum ($\vec{x}_i^k$) ve hız vektörleri ($\vec{v}_i^k$), parçacığın o ana kadar sürü içinde elde ettiği en iyi çözümler (pbest) ve tüm parçacıklar (global) içindeki en iyi çözümler (gbest) kullanılarak güncellenir. Bu

durumda parçacık konumu, amaç fonksiyonunun en düşük olduğu değere doğru ilerler. Yani bir sonraki jenerasyondaki parçacıkların yeri, kuş veya balık sürülerindeki üyelerin sosyal davranışlarının ardından modellenen parçacık, güncelleme denklemi tarafından belirlenir:

$$\begin{aligned}\vec{v}_i^{k+1} &= \omega \vec{v}_i^k + c_1 rand_1^k (\vec{p}_{i,best}^k - \vec{x}_i^k) + c_2 rand_2^k (\vec{g}_{i,best}^k - \vec{x}_i^k) \\ \vec{x}_i^{k+1} &= \vec{x}_i^k + \vec{v}_i^{k+1}\end{aligned}\quad (3.5)$$

Hız güncelleme denkleminin ilk kısmı ($\omega \vec{v}_i^k$) atalet ağırlığını içerir ve parçacığın hızını güncellerken ataletini korumasını sağlar. İkinci kısımda Pbest çözümü sürü içerisinde olduğu için parçacığın sosyal davranışını (Social Acceleration), ve üçüncü kısımda Gbest çözümü daha önceki deneyimlerden elde edildiği için bilişsel davranışını (Cognitive Acceleration) etkiler. İkinci ve üçüncü kısımlar parçacık hızını ve dolayısıyla bir sonraki yinelemedeki konumunu belirler.

GenOpt içinde PSO algoritmasının nasıl işleyeceğine dair bazı ayarlar da yapılabilir. Bu ayarlardan bazıları şöyledir: bir jenerasyondaki parçacık sayısı (NumberOfParticle); yineleme (iterasyon)/jenerasyon sayısı (NumberOfGeneration); parçacık maksimum hızı (MaxVelocityDiscrete); oluşturulan ağda parçacıkların minimuma ulaşmak için ne kadarlık bir alanda hareket edebileceklerini belirleyen komşuluk topolojisi (Neighborhood Topology); parçacıkların hızlarının ayarlanması için kısıtlama kazancı (ConstrictionGain); ve Atalet ağırlıkları (InitialInertiaWeight ve InitialInertiaWeight). Atalet ağırlıkları ve kısıtlama kazancına yönelik ayarlar, ayrık (discrete) değişkenler için dikkate alınmaz. PSO ayarları, optimizasyonun ne kadar hızlı ve hassas olacağına karar vermekte ve problemin büyüklüğüne göre değiştirilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında önerilen modelin uygulaması için hazırlanan GenOpt dosyalarında PSO algoritması ayarları komut dosyasına (command.txt) girilmiştir.

3.1.3.3 Amaç Fonksiyon

Optimizasyon sürecinin başarısında amaç fonksiyon olarak adlandırılan fonksiyonun tanımlanması önemlidir. Önceki bölümlerde de değinildiği gibi, GenOpt optimizasyon programı, global optimum değere yakınsaması ve kaba-kuvvet yaklaşımıyla (brute-force approach) elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar verebilmesi nedeniyle seçilmiştir (Hasan, Vuolle ve Siren, 2008). GenOpt programı, dışarıdan entegre edilen EnergyPlus simülasyon programı tarafından hesaplanan amaç fonksiyonunu minimize etmeye çalışmaktadır. Amaç fonksiyon ise GenOpt programının girdi dosyalarından, başlatma dosyası (initialization file - optWin7.ini) içinde tanımlanmaktadır.

Amaç fonksiyonu oluşturan amaç kriter(ler)in sayısına göre optimizasyon problemi tek amaçlı (single objective) ya da çok amaçlı (multi-objective) optimizasyon problemi olarak ikiye ayrılmaktadır.

Bu çalışmada önerilen karar destek modeli, binaların enerji performansını geliştirmeye yönelik genel bir yaklaşımı göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, model tasarım sürecinde kullanılabileceği gibi mevcut binalar üzerinde de kullanılabilecektir. Bu bakış açısıyla, temel olarak çok amaçlı optimizasyon problemlerine uygulanan bir model olsa da istenen durumlarda tek amaçlı optimizasyon problemlerine de uygulanabilir. Ancak bu çalışma kapsamında ele alınan problem olan, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyon aynı anda birbiriyle çatışan birden çok amacı optimize etmeye çalışacağından, optimizasyon süreci karmaşıklaşmakta ve çözümü zor hale gelmektedir. Modelin bir bina projesi kapsamında uygulaması sürecinde de çok amaçlı optimizasyon problemi ele alınacaktır. Bu nedenle bu bölümde kısaca, çok amaçlı optimizasyon probleminin GenOpt ile çözümlenmesine yönelik kısa açıklama yapılması ihtiyacı hissedilmektedir.

GenOpt programı içinde amaç fonksiyonun başlatma dosyasında tanımlanması gerektiği belirtilmişti. Ancak, GenOpt programı çok amaçlı optimizasyon

problemlerindense tek amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Bu nedenle GenOpt ile çok amaçlı bir optimizasyon problemi çözülmek istendiğinde tek bir amaç fonksiyonuna tüm amaç kriterlerinin yerleştirilmesi gerekmektedir. GenOpt programıyla çok amaçlı optimizasyon probleminin çözülebilmesi için çok amaçlı optimizasyon problemi “ağırlıklı toplam metot (weighted-sum method)” ile tek amaçlı bir optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Ağırlık toplam metot, çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinden biri olarak daha önce kullanılmıştır (Kim ve Weck, 2006; Marler ve Arora, 2010). Bu metot aynı zamanda skalerleştirme (scalarization) olarak da adlandırılmaktadır, çünkü bu metotla amaç fonksiyondaki her bir amaç kriterine ağırlık katsayıları (skaler) atanmaktadır (Nguyen, 2014).

Basitleştirilmiş ve tek bir değişkene bağlı toplam amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde matematiksel olarak ifade edilebilir:

$$f(x) = A_1 \cdot f_1(x) + A_2 \cdot f_2(x) + \dots + A_n \cdot f_n(x) \quad (3.6)$$

Burada temel amaç EnergyPlus tarafından hesaplanan $f(x)$ fonksiyonunun minimize edilmesidir. $f_i(x)$ her bir amaç kriteri, A_i ise o amaç kriter için atanan skaler veya ağırlık katsayısını belirtmektedir. Ağırlıklı toplam metotta her bir amaç kriter için atanan katsayıların işlevini yapabilmesi için her bir amaç kriterin biriminin aynı olması gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, amaç kriterler taban (referans) bir modelle karşılaştırılarak yüzde (%) cinsinden hesaplanmış ve böylece aynı birime çevrilmeleri sağlanmıştır. Bütün amaç kriterler aynı oranda optimize edilmek istendiğinde, bu katsayılar birbirine yakın seçilebilir. Ancak bazı amaç kriterlere daha fazla odaklanmak veya optimizasyon sonucunda bu amaç kriterlerden daha yüksek oranda kazanım sağlanması istendiğinde, bu amaç kriterlere daha yüksek değerlerde katsayılar atanmalıdır.

Amaç fonksiyonun tanımlanmasına yönelik detaylar, modelin uygulanması bölümünde (Bölüm 4) açıklanacaktır.

BÖLÜM DÖRT

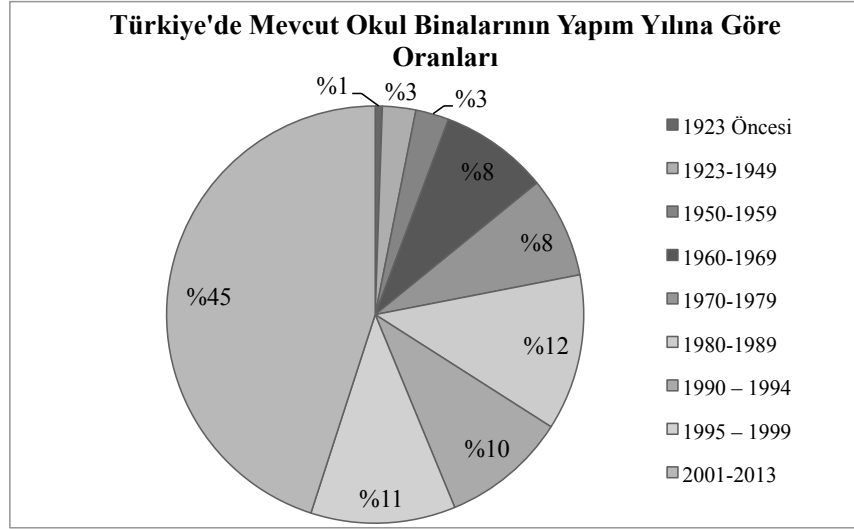
ÖNERİLEN MODELİN MEVCUT BİR BİNANIN ENERJİ PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİNDE UYGULANMASI

Bu bölümde, çalışma kapsamında bina enerji performansının geliştirilmesinde optimum çözümlerin belirlenmesine yönelik geliştirilen simülasyon ve çok amaçlı optimizasyon tabanlı karar destek modelinin uygulanabilirliği test edilecektir. Önerilen modelin tüm aşamaları Bölüm 3'te açıklanmıştır.

Önerilen model yeni bina projelerinin erken tasarım aşamasında ve mevcut binaların enerji performanslarının iyileştirilmesinde kullanılabilecek şekilde geliştirilmiştir. Modelin uygulanabilirliğini daha gerçek verilerle test edebilmek amacıyla örnek uygulamanın mevcut bir binada yapılmasına karar verilmiştir. Modelin uygulaması Bölüm 3'teki adımlara göre aşağıda detaylı bir biçimde açıklanmaktadır.

4.1 Önerilen Modelin Uygulanacağı Mevcut Binanın Belirlenmesi

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Ulusal Enerji Tasarruf Merkezi tarafından hazırlanan 2001 yılına ait araştırma raporunda sadece TS 825'e göre bölgesel ısıtma enerji değerleri ele alındığında okulların %40'lara varan enerji tasarruf potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir (Öztürk, 2001). Yine aynı rapordan ve Milli Eğitim İstatistikleri Örgün Eğitim 2006-2007 ve 2012-2013 yılları raporlarından elde edilen verilere göre Türkiye'de mevcut okul binalarının yapım yıllarına göre oranları belirlenmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Türkiye’de mevcut okul binalarının yapım yıllarına göre oranları (Öztürk, 2001 ve Milli Eğitim Bakanlığı [MEB] (2007, 2013) yayınlarından derlenmiştir).

Şekil 4.1 incelendiğinde; Türkiye’de Milli Eğitim Bakanlığına bağlı aktif olan okulların (ilköğretim ve lise dengi okullar) bugünkü toplam sayısı 75,324 olup, bu binaların yaklaşık % 55’i 2000 yılından itibaren zorunlu hale gelen TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” isimli standarttan önce inşa edilmiştir. Kamu yapıları olan devlet okul binalarının mevcut stok yüzdesi ve enerji performanslarındaki yetersizlikler dikkate alınarak önerilen modelin mevcut bir devlet okul binasında uygulanmasına karar verilmiştir. Ayrıca, okul binalarının alan çalışması yapmaya elverişli olması, gerekli bina verilerine ve belgelerine erişim kolaylığı gibi konular da bu kararın verilmesinde etkili olmuştur.

Modelin uygulanacağı bina İzmir ilindeki mevcut devlet okul binaları araştırılarak tespit edilmiştir. “İzmir İl Milli Eğitim Müdürlüğü” verilerine göre 30 ilçede toplam 2942 tane devlet okul binası mevcuttur (Milli Eğitim Bakanlığı [MEB], 2014). Kapsamı daraltmak amacıyla fiziki erişim kolaylığı da düşünülerek Konak, Karabağlar, Bornova, Çiğli ve Buca ilçelerindeki okullara öncelik verilmiştir. Sonrasında, ilçelerdeki okul binalarının yapım yılları da dikkate alınarak TS 825 standardının yürürlüğe giriş tarihi olan 1999 yılı ve öncesinde inşa edilen binalar incelenmiştir. Bu doğrultuda 1933-1999 yılları arasında inşa edilen 30 adet okul binası arasından modelin uygulanacağı okul binasına karar verilmiştir.

Modelin uygulanacağı okul binasının seçiminde şu kriterler dikkate alınmıştır:

- Binada günümüze kadar enerji performansını geliştirmeye yönelik herhangi bir iyileştirme uygulamasının yapıp yapılmadığı,
- Binanın mevcut projelerinin (mimari-mekanik-sıhhi tesisat vb.) bulunup bulunmadığı,
- Binanın enerji tüketim verilerine erişimin olup olmadığı.

Yukarıda tanımlanan kriterleri sağlayan 1992 yılında inşa edilen İzmir'in Çiğli ilçesindeki Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi, modelin uygulanması için örnek bina olarak seçilmiştir.

4.1.1 Önerilen Modelin Uygulanacağı Binaya İlişkin Bilgiler

4.1.1.1 Binaya İlişkin Genel Bilgiler

İzmir'in Çiğli İlçesinde bulunan Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi, 1992 yılında Bayındırlık Bakanlığı tarafından hazırlanan 24 derslikli tip projeye göre inşa edilmiştir.

İzmir ili tipik Akdeniz iklimi olan sıcak ve nemli iklim özelliğine sahiptir. Yıllık ortalama minimum sıcaklık Ocak ayı içerisinde oluşur ve 5,8°C dir. Yıllık ortalama maksimum sıcaklık Haziran ayı içerisinde 33,2°C olmaktadır. Yıllık ortalama sıcaklık ise yaklaşık 17,9°C iken, yıllık ortalama bağıl nem ise yaklaşık %65 tir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2014a).

Bina betonarme malzemeli iskelet taşıyıcı sisteme sahiptir ve duvar dolgu malzemesi tuğladır. Binanın kütsel olarak yönelimi güneyden 6° açı ile güneybatı yönüne doğrudur (Şekil 4.2). Okulun giriş cephesi ve ön bahçesi güneybatı yönündedir (Şekil 4.3). Binadaki dersliklerin tamamına yakını ise kuzeydoğu-güneybatı yönlerinde konumlandırılmıştır (Şekil 4.3-Şekil 4.4).

Bundan sonraki bölümlerde binanın yönleri kuzey-güney-doğu-batı (6° lik açı göz ardı edilerek) şeklinde ifade edilecektir. Bu durum sadece yazımda geçerli olup binanın enerji simülasyonunda ise binanın mevcut yönelimi kullanılacaktır.



Şekil 4.2 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi uydu görüntüsü (Google Maps, 2014)



Şekil 4.3 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi giriş cephesi (Şenel Solmaz Arşivi, 2013)



Şekil 4.4 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi Kuzey cephesi (Şenel Solmaz Arşivi, 2013)

Okul binasına ilişkin bilgiler Tablo 4.1'de özetlenmektedir. Binanın genel karakteristikleri incelendiğinde, kuzey ve güney yönlerine bakan cephelerin yüzey

alanlarının doğu ve batı yönlerindeki cephelerin yüzey alanlarından fazla olduğu görülmektedir. Yine kuzey ve güney yönlerindeki cephelerde pencere-duvar oranları (sırasıyla %36,25 ve %44,37) diğer yönlere bakan cephelerden fazladır ve TS 825'te izin verilen üst sınır değerinin (%12) oldukça üstündedir (Tablo 4.1). Bu nedenle, binanın kuzey ve güney cephelerinde ısı kazanç ve kayıp potansiyellerinin diğer cephelere göre daha fazla olabileceği saptanmıştır.

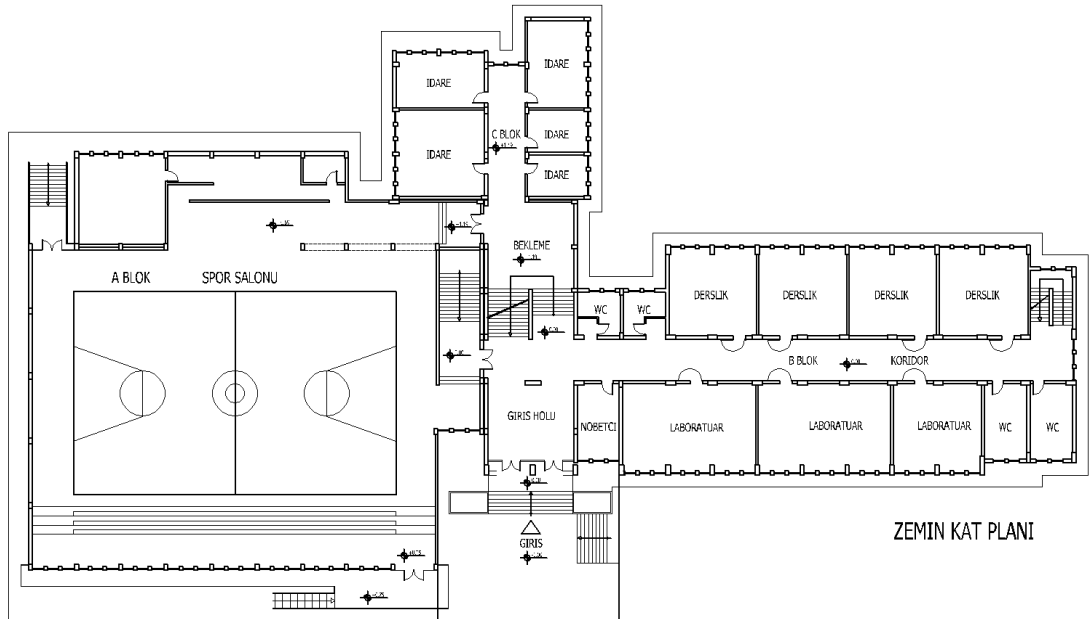
Tablo 4.1 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu lisesi binasına ait genel bilgiler

Yerleşim		Enlem	38,50
		Boylam	27,02
Yönlenme		Güney Cephesi	6° saat yönünde güneybatı
Genel Özellikler	Kat Adedi	A blok	Bodrum+1 Kat
		B blok	Bodrum+4 Kat
		C blok	Bodrum+3 Kat
	Alan	Taban alanı (m ²)	960,038
		Çatı alanı (m ²)	998,38
	Yükseklik	Kat yüksekliği (m)	3,40
		Toplam yükseklik (m)	13,60
	Yüzey Alanı	Kuzey cephesi yüzey alanı (m ²)	791,474
		Güney cephesi yüzey alanı (m ²)	712,98
		Doğu cephesi yüzey alanı (m ²)	400,7
		Batı cephesi yüzey alanı (m ²)	278,34
		Bina toplam yüzey alanı (m ²)	2183,5
	Cephe Boşluk Alanı	Kuzey cephesi boşluk alanı (m ²)	210,6
		Güney cephesi boşluk alanı (m ²)	219,13
		Doğu cephesi boşluk alanı (m ²)	96,66
		Batı cephesi boşluk alanı (m ²)	21,6
		Bina toplam boşluk alanı (m ²)	547,99
	Pencere-Duvar Oranı	Kuzey cephesi pencere-duvar oranı (%)	36,25
		Güney cephesi pencere-duvar oranı (%)	44,37
		Doğu cephesi pencere-duvar oranı (%)	24,12
		Batı cephesi pencere-duvar oranı (%)	7,76
		Bina toplam pencere-duvar oranı (%)	25,09

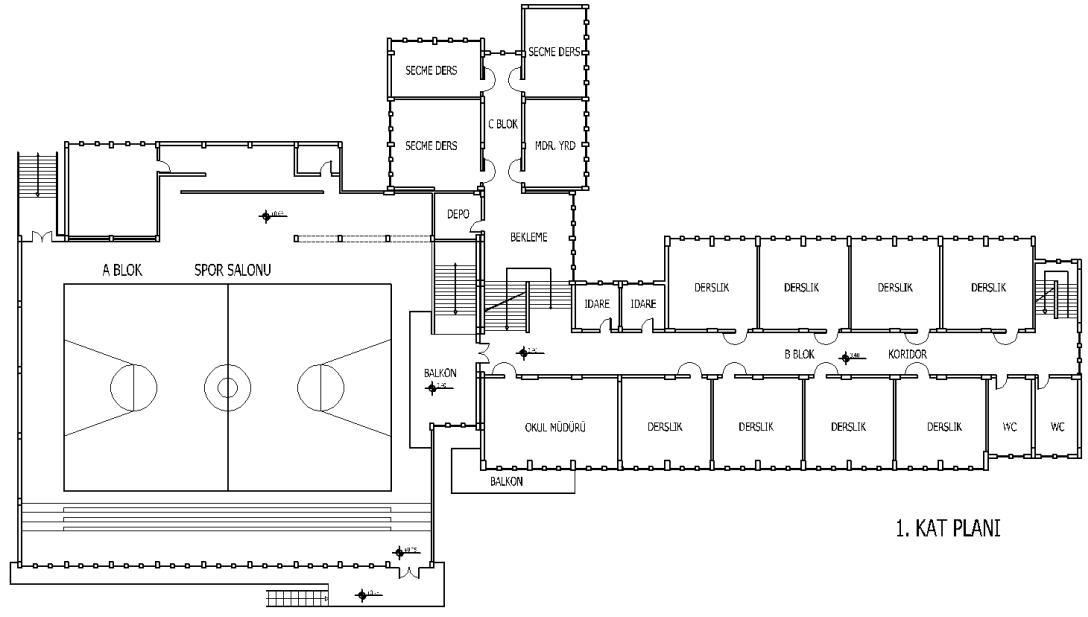
Binanın mimari plan, kesit ve cepheleri Şekil 4.5'ten Şekil 4.11'e kadar gösterilmektedir. Bina ortogonal plan şemasına sahiptir. A, B ve C olarak adlandırılan ve birbirine entegre olmuş üç bloktan oluşmaktadır. A blok kapalı spor salonunun olduğu birim, B blok dersliklerin büyük bölümünün yer aldığı yatay birim, C blok ise daha çok idari birimlerin toplandığı daha küçük alana sahip birimdir (Şekil 4.5).

Binanın plan şemalarına bakıldığında B bloğun (dersliklerin yer aldığı blok), iki yönde hizmet veren koridor üzerine sıralanmış birimlerden (derslikler) oluştuğu ve kuzey ve güney yöneliminde olduğu görülmektedir. B blok bodrum ve 4 kat, C blok ise bodrum ve 2 kattan oluşmaktadır. Eğimli çatıya sahip spor salonunun kat yüksekliği ise 12,2 m'ye çıkmaktadır.

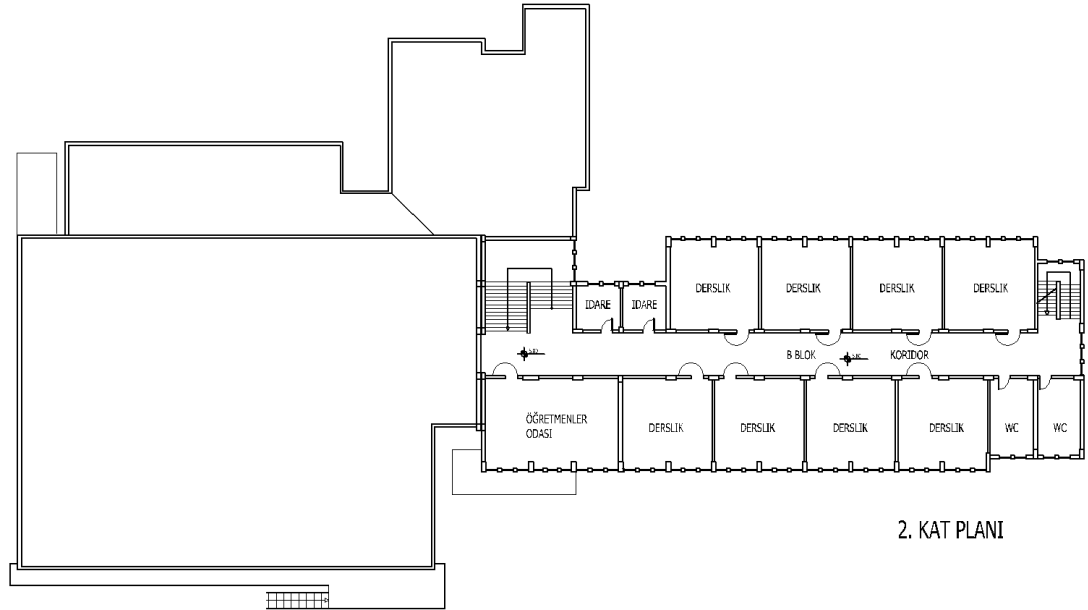
Yukarıda belirtildiği gibi, bina Bayındırlık Bakanlığının 24 derslikli tip projesine göre inşa edilmiştir ancak zaman içerisinde derslik ihtiyacının artması nedeniyle bazı mekânsal değişiklikler yapılmıştır. Örneğin, projeye göre laboratuvar olarak tasarlanan iki mekan günümüzde derslik olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.5 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi zemin kat planı



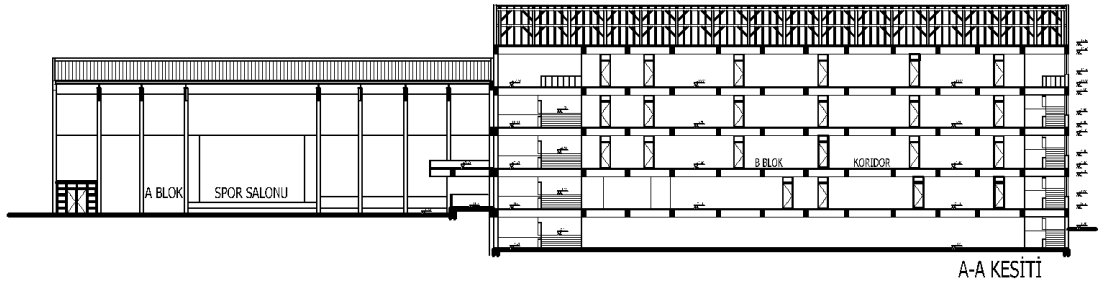
Şekil 4.6 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi birinci kat planı



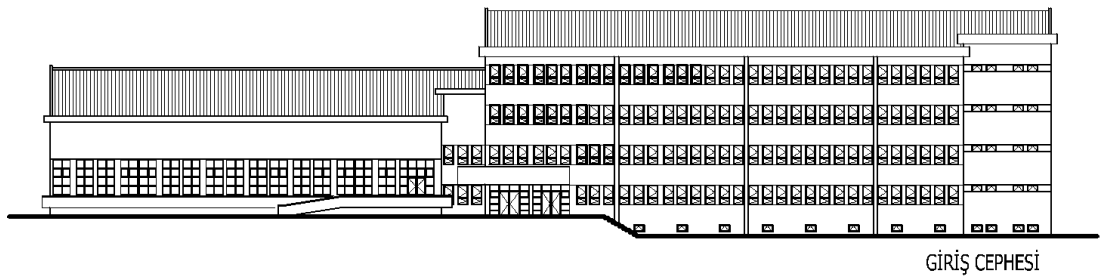
Şekil 4.7 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi ikinci kat planı



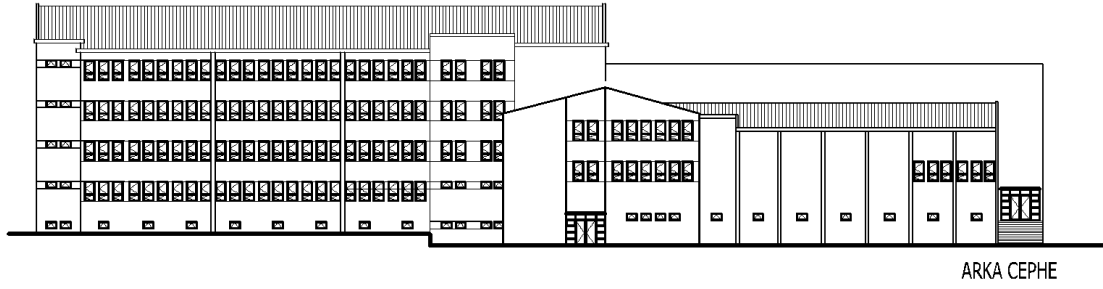
Şekil 4.8 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi üçüncü kat planı



Şekil 4.9 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi A-A kesiti



Şekil 4.10 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu lisesi Güney cephesi



Şekil 4.11 Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi Kuzey cephesi

Şekil 4.5-4.6'da görüldüğü gibi binanın zemin ve birinci katlarından kapalı spor salonuna bağlantı vardır. Ayrıca, kapalı spor salonunun dış mekan bağlantısı da vardır.

Binada 3 laboratuvar, 28 derslik, 3 seçme ders dersliği, 7 idari personel ofisi, 1 öğretmenler odası, 1 kütüphane, 10 ıslak mekan, 1 kantin, 1 kapalı spor salonu ve 1 tesisat birimi bulunmaktadır. Dersliklerden 12 tanesi güney yönünde, 16 tanesi ise kuzey yönündedir. Doğu ve Batı yönlerine ise sadece seçme derslerin yapıldığı küçük metrekare alanına sahip derslikler vardır (Şekil 4.5-4.8). Kapalı spor salonu olan A blokta ısıtma veya soğutmaya yönelik bir sistem yoktur.

Bina enerji modeli ya da taban modelin oluşturulabilmesi için bina kabuğunu oluşturan yapı malzemeleri ve termofiziksel özelliklerine ilişkin verilerin de elde edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bina kabuğuna ait toplanan veriler aşağıda sunulmaktadır.

4.1.1.2 Bina Kabuğunun Özelliklerine İlişkin Bilgiler

İç ve dış ortamı ayıran bina kabuğunun kullanıcıların ısı, görsel ve akustik konfor koşullarını sağlaması beklenir. Bina ana kabuk elemanları dış duvar, döşemeler, çatı ve boşluklardır. Binadaki ısı kazanç ve kayıpları büyük oranda bina kabuğundan kaynaklandığı için, kabuğu oluşturan elamanların termofiziksel özellikleri binanın enerji performansını belirlemede gerekli olan parametrelerdir.

Bina projesinin mahal listesine erişilerek bina kabuğunu oluşturan mevcut yapı malzemeleri belirlenmiş ve kabuk elemanlarının toplam ısı geçirgenlik katsayıları (U değeri) hesaplanmıştır (Tablo 4.2). İç ve dış duvarların dolgu malzemesi tuğladır. Toprağa oturan zemin döşemesi (bodrum kat döşemesi) grobeton, ara kat ve çatı döşemeleri ise betonarme plaktır. Binanın çatısı ahşap kırma çatı ve örtü malzemesi kiremittir. Bina kabuğunun saydam dış yüzey elemanları olan pencereler ise PVC doğrama ve tek camdır. Binada hiçbir yalıtım uygulaması yoktur.

Tablo 4.2 Örnek okul binasının kabuk bileşenleri ve bileşenleri oluşturan mevcut yapı malzemelerinin termofiziksel özellikleri

Bina Kabuk Bileşenleri	Mevcut Yapı Malzemeleri	Kalınlık (mm)	Isı İletkenlik Hesap Değeri (λ) (W/mK)	Yoğunluk (kg/m^3)	Özgül Isı (J/kgK)	U Değeri ($\text{W/m}^2\text{K}$)
Dış Duvar	Plastik Boya	1	999,00	0,001	0,00	1,355
	Alçı sıva	20	0,7	2000	1008	
	Yatay delikli tuğla	190	0,36	600	820	
	Çimento bazlı sıva	30	1,4	2000	1008	
	Plastik boya	1	999,00	0,001	0,00	
Zemin Döşemesi	Yerinde dökme mozaik	25	1,20	2000	900	2,17
	Tesviye betonu	30	1,65	2000	1000	
	Grobeton	100	1,65	2400	950	
	Zemin dolgusu	100	0,52	2000	1800	
Çatı Döşemesi	Tavan sıvası	20	0,7	2000	1008	3,04
	Betonarme döşeme	100	2,5	2400	950	
	Mertek	100	-	-	-	
	Kiremit altı tahtası	20	0,13	-	-	
	Kiremit	15	0,5	1120	1460	
İç Duvar	Plastik Boya	1	999,00	0,001	0,00	1,19
	Alçı sıva	20	0,7	2000	1008	
	Yatay delikli tuğla	190	0,36	600	820	
	Alçı sıva	20	0,7	2000	1008	
	Plastik Boya	1	999,00	0,001	0,00	
Ara kat ve Zemin Döşemesi	Plastik Boya	1	999,00	0,001	0,00	2,73
	Tavan sıvası	20	0,7	2000	1008	
	Betonarme döşeme	100	2,5	2400	950	
	Tesviye betonu	30	1,65	2000	1000	
	Yerinde dökme mozaik	25	1,20	2000	900	
Kapı	Ahşap iç kapı	25	0,15	608	1630	2.34
Pencere	PVC doğrama + Cam (Tek cam)	4	0.18	2500	750	5.2

Tablo 4.2’de binanın enerji simülasyon modelinin oluşturulabilmesi için gerekli olan ve bina kabuğunu oluşturan yapı malzemelerinin termofiziksel özellikleri

gösterilmektedir. Yapı malzemelerine ait ısı iletkenlik hesap değerleri, yoğunluk ve özgül ısı değerleri İZODER TS 825'ten (TSE, 2008) alınmıştır ve U değerleri hesaplanmıştır.

Örnek bina seçilirken TS 825 standardının yürürlüğe girmesinden önce inşa edilmiş binalar üzerinde odaklanılmıştır. Bu tür standartlardaki sınır değerler referans alınarak, bir binanın enerji performansının yeterli olup olmadığına ilişkin genel bir fikir edinilebilir. Örnek binanın yapım yılı TS 825'in yürürlüğe girdiği tarihten çok öncedir ve dolayısıyla TS 825'e göre inşa edilmemiştir. Ancak, yine de binanın mevcut kabuk elemanlarına ait değerlerin standarttaki sınır değerlerle karşılaştırması yapılarak, binanın enerji performansının yetersiz olduğu gösterilmek istenmiştir.

TS 825'te İzmir ilinin de içinde bulunduğu iklim bölgesi için önerilen minimum dış duvar U değeri $0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$, ısıtılmayan iç mekana bakan iç duvarlar için önerilen maksimum R değeri $0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ ($1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$), zemin döşemeleri için önerilen maksimum U değeri $0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve çatılar için önerilen minimum U değeri ise $0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$ dir (TSE, 2008). Tablo 4.2'de örnek bina için hesaplanan kabuk elemanlarının U değerleri incelendiğinde, dış duvar U değeri $1,355 \text{ W/m}^2\text{K}$ dir ve bu değer TS 825'te önerilen limit değer (0,70 $\text{W/m}^2\text{K}$) çok üzerindedir. Benzer şekilde binanın zemin döşemesi U değeri $2,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ de TS 825'te üst limit değer olan $1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ nin üzerindedir.

4.1.1.3 Binanın Isıtma ve Soğutma Sistemlerine, Kullanıcı Yoğunluğu ve Kullanım Zamanlarına İlişkin Bilgiler

Binanın mimari projeleri ve kabuk elemanları ile ilgili verilerin yanı sıra binanın ısıtma ve soğutma sistemlerine, kullanıcı yoğunluğu ve kullanım zamanlarına yönelik bilgiler de simülasyon modelinin oluşturulabilmesi için gereklidir.

Bina 12.12.2011 tarihinden itibaren likit yakıt tipinden doğalgaza geçmiştir. Binadaki sıcak su kazanı yoğuşmasız ve % 80 verimlidir. Bina yerinde yapılan incelemelerle her hacimdeki radyatör sayısı, tipi ve boyutları elde edilmiştir. Binada

ısıtma sistemi 07.00-17.00 saatleri arasında çalıştırılmaktadır. Hafta sonları ise büyük oranda ısıtma sistemi çalıştırılmamaktadır. Binada soğutma sistemi olarak split klima kullanılmaktadır ve klima üniteleri sadece idari birimlerde ve öğretmenler odasında bulunmaktadır. Dersliklerde ve diğer birimlerde ise soğutma sistemi yoktur.

Binada derslik, laboratuvar, idari birim, kütüphane, yatay ve düşey sirkülasyon alanları, ıslak hacim, kantin ve tesisat birimleri olmak üzere 8 tip termal zon bulunmaktadır. Okulun açık olduğu günlerde bina kullanıcılarının büyük bölümü binayı 08.00-16.00 saatleri arasında kullanmaktadır. Binanın toplam kullanıcı sayısı 660 öğrenci ve 49 öğretmen-personel olmak üzere 709 dur.

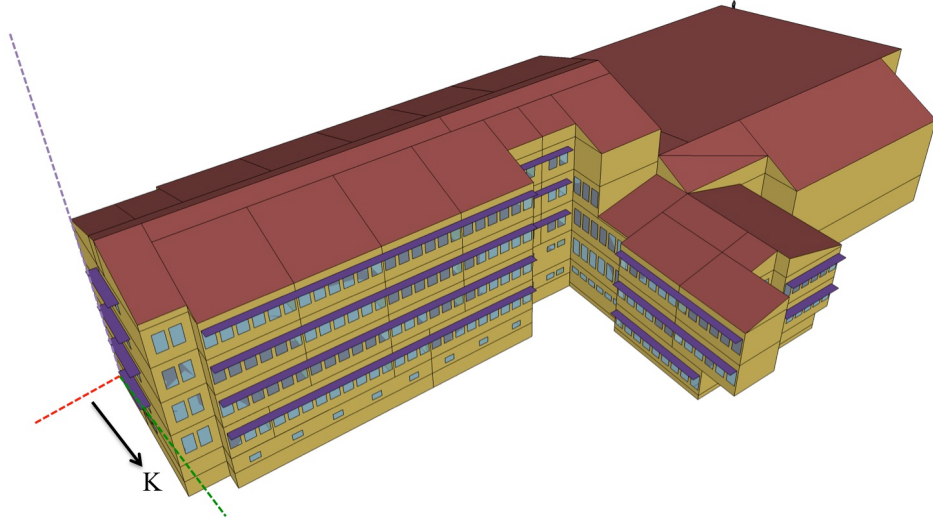
4.2 Önerilen Modelin Belirlenen Mevcut Binada Uygulanması

4.2.1 Bina Enerji Modeli (Taban Model) Oluşturma

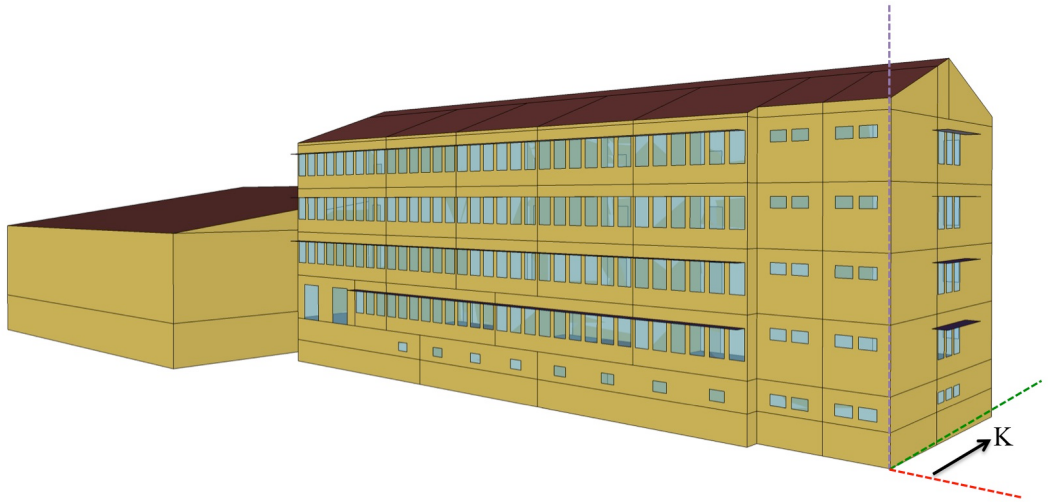
Bu çalışmada, Bölüm 3'te belirtildiği gibi, yaygın kullanılan, geçerliği kabul edilmiş ve sonuçları güvenilir olan EnergyPlus 8.1.0 (DOE, 2014) dinamik simülasyon programı kullanılmıştır. Mevcut binanın modellemesi için ise EnergyPlus simülasyon motorunu kullanan Sketch-up programı içinde gömülü OpenStudio (NREL, 2014) eklentisi kullanılmıştır.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, bina modellemesi için iki yaklaşım olduğu görülmektedir. İlk yaklaşım basitleştirilmiş model yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, tüm binayı temsil eden tek bir termal (ısı) zonun modellenmesidir. Bu yaklaşımda amaç, modelin basitleştirilmesiyle simülasyon süresinin azaltılmasıdır. İkinci yaklaşım, binanın tamamının üç boyutlu modeli ile simülasyon modelinin oluşturulmasıdır. Bu yaklaşım sonucu oluşturulan termal model ilk yaklaşıma göre daha karmaşıktır ve modelin simülasyon süresi daha uzundur. Ancak, modelin doğruluk düzeyi söz konusu olduğunda, özellikle de mevcut verilerle model verileri karşılaştırılacak ise ikinci yaklaşımın kullanılması önerilmektedir (Hensen, 2011). Bu çalışmada, okul binasının mimari planlarına uygun olarak her hacim bir termal

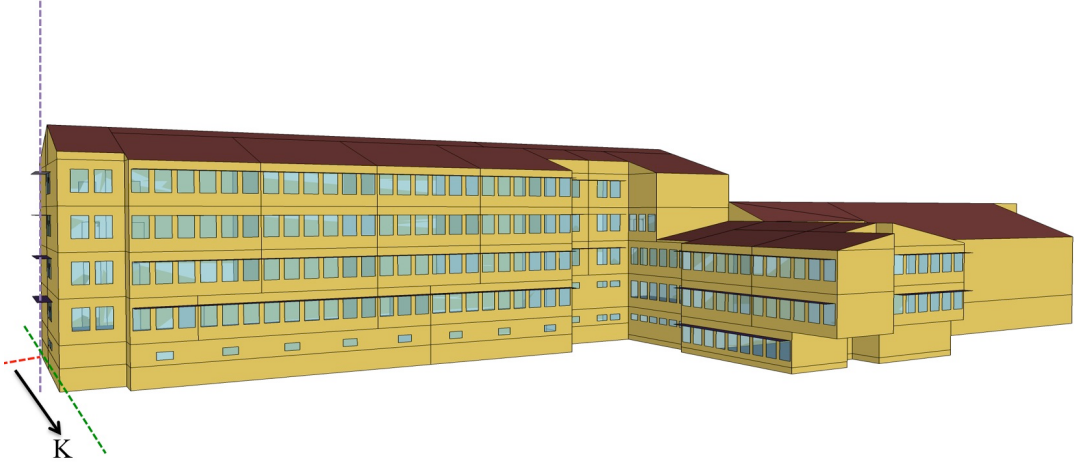
zon olarak modellenmiştir. Diğer bir ifadeyle, ikinci yaklaşım uygulanarak tüm binanın üç boyutlu termal modellemesi yapılmıştır (Şekil 4.12-4.15).



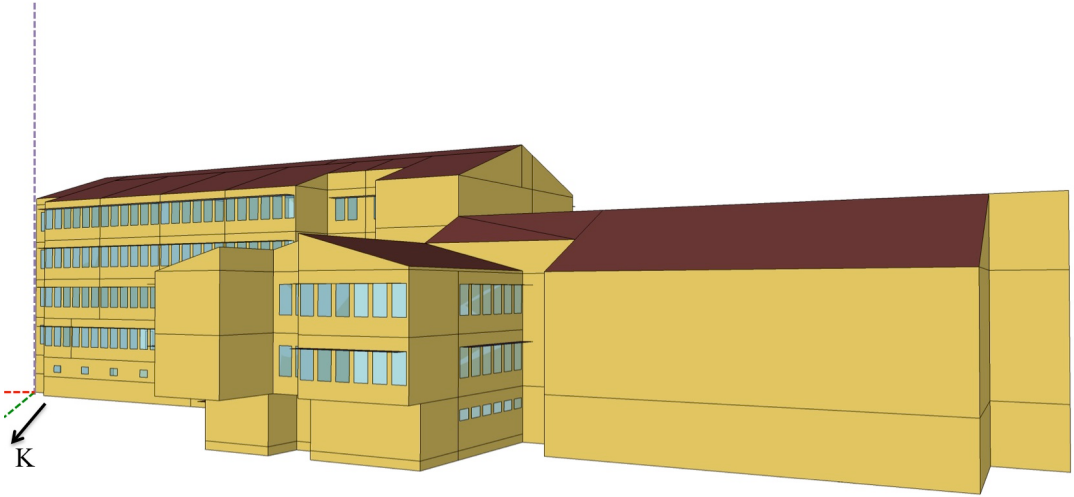
Şekil 4.12 Sketch-up Open Studio programıyla oluşturulan okul binasının 3D enerji simülasyon modeli



Şekil 4.13 Sketch-up Open Studio programıyla oluşturulan okul binasının 3D enerji simülasyon modeli



Şekil 4.14 Sketch-up Open Studio programıyla oluşturulan okul binasının 3D enerji simülasyon modeli



Şekil 4.15 Sketch-up Open Studio programıyla oluşturulan okul binasının 3D enerji simülasyon modeli

Sketch-up Open Studio ile yapılan modellemenin adımları aşağıda detaylı bir biçimde açıklanmaktadır:

- İlk adımda, Sketch-up programıyla binanın mimari planlarındaki ölçülere uygun olarak, bodrum kattan son kata kadar sırasıyla termal zonlar

oluşturulmuş ve bina üç boyutlu olarak modellenmiştir. Binada 8 tip termal zon (derslikler, idari birimleri, kütüphane, laboratuvar, kantin, ıslak hacimler, sirkülasyon alanları ve tesisat birimi) ve 2 adet ısıtma sistemi bulunmayan (spor salonu ve çatı arası), yani termal olmayan zon vardır. Sonuç olarak, binada toplam 72 adet termal zon tespit edilmiştir.

- İkinci adımda, Sketch-up programıyla bina geometrisi modellendikten sonra, bina kabuğunu oluşturan malzemeler ve termofiziksel özelliklerine ait veriler (bkz. Tablo 4.2) Open Studio eklentisi içinde her bir zon için ayrı ayrı atanmıştır.
- Üçüncü adımda, oluşturulacak taban modelin doğrulanması sırasında gerekli olacak binanın gerçek tüketim verileri 2012 yılına ait olduğu için, binanın enerji simülasyonu 2012 yılı için yapılmıştır. Bu nedenle, 2012 yılı eğitim-öğretim takvimi Milli Eğitim Bakanlığı (MEB) internet sitesinden elde edilerek hafta sonu ve tatil günleri belirlenmiştir. Bu doğrultuda bina için zaman çizelgesi hazırlanmıştır.
- Dördüncü adımda, bina için hazırlanan zaman çizelgesi temel alınarak 5 ayrı zaman çizelgesi oluşturulmuştur. Bu çizelgeler: ısıtma sistemi çizelgesi, soğutma sistemi çizelgesi, aydınlatma sistemi çizelgesi, elektrik ekipmanları çizelgesi ve kullanıcıların bina kullanım zamanı çizelgesidir. Örneğin, eğitim-öğretimin olduğu günlerde bina kullanıcıları binayı 08.00-16.00 saatleri arasında kullanmaktadır. Bu saatler arasında bina içerisinde aydınlatma ve elektrik ekipmanları da çalışmakta olduğundan bu sistemler için de zaman çizelgesi bu saatler arasındadır. Binanın ısıtma ve soğutma sistemlerinin çalışma saatleri ise, 07.00-17.00 arasındadır. Çizelgeler OpenStudio eklentisi içinde tanımlanmıştır.
- Beşinci adımda, oluşturulan zaman çizelgelerine göre her bir termal zondaki kullanıcı yoğunluğu, aydınlatma ve elektrikli ekipmanların tür ve sayılarına yönelik veriler girilmektedir. Binadaki iç ısı kazanç değerlerinin hesaplanabilmesi için gerekli olan veriler şu şekildedir:

- Binanın kullanıcı yoğunluğu (her termal zon tipi için metrekare başına düşen insan miktarı-kişi/m²): derslikler (0,8), idari birimler (0,05), kütüphane ve laboratuvarlar (0,23), kantin (0,72), ıslak hacim (0,1), koridorlar (0,1), tesisat birimi (0,01).
- Binada aydınlatma için floresan lamba kullanılmaktadır. Binanın aydınlatması (her termal zon tipi için metrekare başına düşen aydınlatma gücü-W/m²): derslikler (13,56), idari birimler (10,66), kütüphane ve laboratuvarlar (12,6), kantin (13,56), ıslak hacim (8,72), koridorlar (4,84), tesisat birimi (14,53).
- Binanın elektrikli ekipmanları (her termal zon tipi için metrekare başına düşen elektrik gücü-W/m²): derslikler (7,32), idari birimler (7,86), kütüphane ve laboratuvarlar (7,32), kantin (14), ıslak hacim (2,91), koridorlar (2,91), tesisat birimi (2,9).
- Altıncı adımda, hava değişim oranı (infiltration rate) bina eski bir bina olduğundan her zon için 0,5 ACH olarak atanmıştır. Ayrıca her zonun temiz hava gereksinimi için, minimum doğal havalandırma değeri (ASHRAE, 2004b) atanmıştır.
- Yedinci adımda, binadaki ısıtma ve soğutma sistemlerinin modellenmesi gerekmektedir. Toplanan veriler doğrultusunda (bkz. Bölüm 4.1.1.3) tanımlanan ısıtma ve soğutma sistemi şu şekildedir:
 - Binanın 2011 senesinin sonuna doğru doğalgaza geçtiği Bölüm 4.1.1.3'te belirtilmişti. Binadaki sıcak su kazanı yoğuşmasız kazan tipindedir, kapasitesi 300000 kcal/h (348900W) ve verimlilik değeri %80 dir. 90 derecedeki sıcak su, pompa ve kalorifer tesisatı vasıtasıyla bina içine dağıtılmaktadır. Termal zonlardaki radyatör tipi, döküm radyatördür ve boyutları 10/160/500 (10 dilimli) ve 12/160/500 (12 dilimli) olmak üzere iki çeşittir. Isıl güçleri dilim başına 120 Watt olarak kabul edilmiştir. Binada hacimlerin taban alanlarına bağlı olarak radyatör sayısı tekli, ikili ve üçlü olarak değişmektedir. Termal

zonlardaki ısıtma ayar sıcaklığı ise 22 derecedir. Bu veriler OpenStudio içinde girilerek, binanın ısıtma sistemi modellenmiştir.

- Binanın soğutması için sadece idari birimlerde ve öğretmenler odasında split klima kullanıldığı Bölüm 4.1.1.3'te belirtilmişti. Tüm binayı temsil eden bir soğutma yükü elde edebilmek için bina kullanıcılarının yoğun olduğu derslikler, kütüphane, laboratuvar ve kantinde de soğutma sisteminin olduğu varsayılmıştır. Soğutma enerjisi, merkezi sistem yerine split klima sistemiyle (PTAC-packaged thermal air conditioner) sağlanmaktadır ve zonlardaki soğutma için ayar sıcaklığı 26 derecedir. Klima sistemlerinin performans katsayısı (COP) ise 3 olarak alınmıştır.
- Sekizinci adımda, SketchUp'ın OpenStudio eklentisi içinde belirtilen tüm veriler atandıktan sonra, termal model EnergyPlus girdi dosyası olan IDF uzantılı dosya olarak kaydedilmiştir. Sonra kaydedilen ve dışa aktarılan IDF dosyası, EnergyPlus IDF Editor ile tekrar açılmıştır ve girilen veriler kontrol edilmiştir. OpenStudio henüz geliştirme aşamasında olduğu için IDF Editor'ün sahip olduğu bazı özelliklere sahip değildir. Bu nedenle, IDF dosyasında hesaplanması gereken çıktıların (yıllık ısıtma ve soğutma enerjileri tüketimi) eklenmesi gibi bazı düzeltmeler yapılmıştır.
- Dokuzuncu adımda, İzmir ilinin iklim veri dosyası olarak, EnergyPlus programının internet sitesinden elde edilen ve ASHRAE tarafından hazırlanan IWECC (International Weather for Energy Calculations) dosyası ("TUR_Izmir.172180_IWECC.epw") kullanılmıştır. Ek olarak, binanın bulunduğu enlem ve boylam bilgileri ve binanın yönelimi de EnergyPlus IDF Editor içinde tanımlanmıştır.

Bu aşamaya kadar toplanan veriler simülasyon programına işlenmiş ve temel bir model oluşturulmuştur. Son olarak, EnergyPlus simülasyon motoru çalıştırılarak binanın toplam ısıtma ve soğutma enerjileri tüketim değerleri 2012 yılı için

hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler, bir sonraki aşama olan Bina Enerji Modelini Doğrulamada kullanılacaktır.

4.2.1.1 Bina Enerji Modelini Doğrulama

Bina enerji modeli oluşturulduktan sonra uygulanması gereken adım, modelin doğruluğunu belirlemektir. Bu süreçte uygulanan işlem ise, modelin kalibre edilmesidir. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bina ya da zonun modellenmesiyle oluşturulan enerji simülasyon modelinden elde edilen verileri binanın gerçek tüketim verileriyle karşılaştırarak bina modelini kalibre etmek kullanılan en yaygın doğrulama yöntemidir (Lam, Wan ve Yang, 2008).

2002 yılında yayımlanan ASHRAE Yönetmelik 14 (ASHRAE Guideline 14) (ASHRAE, 2002), bina performans simülasyon programlarına ait çıktıların nasıl kalibre edileceğine yönelik standartları tanımlamaktadır. Yönetmeliğe göre, yapılan tüm bina enerji simülasyonu ve binaya ait gerçek veriler karşılaştırılırken gösterge olarak iki tane katsayı kullanılabilir: (1) Hataların ortalama karekökü değişkeni katsayısı (Coefficient of Variation of The Root Mean Square Error- CV_RMSE) ve (2) Normalize ortalama yanlılık hatası (Normalized Mean Bias Error- NMBE) katsayısıdır. Bu katsayıların formülü şu şekildedir:

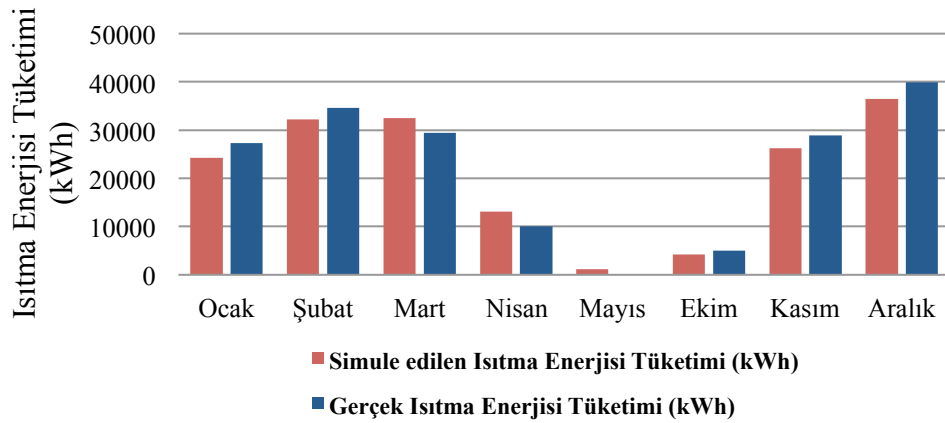
$$CV_RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - y_i)^2}{(n-1)}} \cdot \frac{100}{\bar{y}} \quad (4.1)$$

$$NMBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (y - y_i)}{(n-1)} \cdot \frac{100}{\bar{y}} \quad (4.2)$$

Burada y binanın gerçek enerji tüketim değerini (ölçülen değer), y_i simülasyon programı çıktısını, n elde olan veri sayısını ve $\bar{y}$ ölçülen değerlerin ortalamasını temsil etmektedir. Ölçülen değerler (y) binanın aylık tüketim değerleri ise, ASHRAE

Yönetmelik 14'e göre CV_RMSE değerinin %15'in altında olması önerilirken, NMBE değerinin ise %5'in altında olması gerekmektedir.

Bu uygulamada, örnek bina enerji modelinin kalibrasyonu için binaya ait yıllık ısıtma enerjisi gerçek tüketim verileri kullanılmıştır. Okul yönetiminden elde edilen binanın 2012 yılına ait toplam doğalgaz tüketim değerlerine ilişkin verilere göre, binada toplam 16901 m³ doğalgaz tüketildiği tespit edilmiştir. 16462 m³ doğalgazın verdiği ısı enerjisinin kWh biriminden değeri 175155,68'dür (İzmirGaz, b.t). EnergyPlus simülasyon programıyla yapılan simülasyon sonucunda elde edilen verilere göre ise okul binasının yıllık radyatörle ısıtma enerjisi (Baseboard Heating Energy - BHE) tüketim değeri 136125,2 kWh dur. Kazanın % 80 verimle çalıştığı kabul edildiğinden, kazanın harcadığı toplam ısı enerjisi tüketimi 170156,5 kWh olarak hesaplanmıştır. Binaya ait ısıtma enerjisi gerçek tüketim verileri (aylık) ve simülasyon sonucunda elde edilen ısıtma enerjisi tüketim verileri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Binanın soğutması için harcanan enerji tüketimine ilişkin gerçek verilere ise ulaşılammıştır. EnergyPlus simülasyon programıyla yapılan simülasyon sonucunda elde edilen verilere göre ise okul binasının yıllık soğutma enerjisi (Packaged Thermal Air Conditioner Electric Energy - PTACEE) tüketim değeri 36812,22 kWh dur.



Şekil 4.16 Bina enerji modeline ait gerçek ısıtma enerjisi tüketim verileri ile simülasyon sonucunda elde edilen ısıtma enerjisi tüketim verilerinin karşılaştırılması

Son olarak, modelin doğrulanması için binanın soğutma enerjisine ilişkin gerçek tüketim verileri elde edilemediğinden dolayı sadece ısıtma enerjisi tüketimi verileri kullanılmıştır. Binaya ait ısıtma enerjisi gerçek tüketim değeri ve simülasyon sonucunda elde edilen ısıtma enerjisi tüketim değeri kullanılarak CV_RMSE ve NMBE değerleri yukarıda verilen formüllere göre hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, CV_RMSE ve NMBE değerleri sırasıyla % 12,81 ve % 3,26 olarak bulunmuştur. Bina modeline ait her iki değerin de ASHRAE yönetmelik 14'te tavsiye edilen üst sınır değerlerin altında olduğu görülmektedir. Bu nedenle, bina enerji modelindeki hata payları kabul edilebilir sınırlar içerisinde ve kalibrasyon işlemi tamamlanmıştır. Bu sonuç, oluşturulan bina modelinin doğruluğunu diğer bir ifadeyle, gerçek binayı temsil edebileceğini göstermiştir.

4.2.1.2 Projenin Hedef ve Kısıtlarını Belirleme

Önerilen modelin ilk ana aşamasının son uygulama adımı, projenin hedef ve kısıtlarının tanımlanmasını kapsamaktadır. Bu adımın amacı, modelin ikinci ana aşaması olan “Hassasiyet Analizi” nde girdi olarak kullanılacak tasarım (girdi) parametrelerinin belirlenebilmesi için gerekli bilgileri elde etmektir. Bu nedenle, okul binasının enerji performansını geliştirmeye yönelik projenin hedef ve kısıtlarının daha doğru ve gerçeğe uygun olarak belirlenebilmesi için aşağıda belirtilenlerin yapılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

- Kullanıcı konforunu etkileyen bina enerji performansına yönelik yetersizliklerin belirlenmesi ve bunların nedenlerinin tespit edilmesi amacıyla bir anket çalışmasının yapılması,
- Bina kullanıcılarının öncelik ve beklentilerinin belirlenmesi amacıyla okul yönetimi ile yüz-yüze görüşmenin yapılması.

Anket Çalışmasının Sonuçları:

Bina kullanıcılarının konforunu etkileyen bina enerji performansına yönelik yetersizliklerin belirlenmesi ve bunların nedenlerinin tespit edilmesi amacıyla anket

formu düzenlenmiştir. Öğrenci ve öğretmenlere (müdür ve müdür yardımcıları da dahildir) uygulanan anket formları sırasıyla Ek-1.1 ve Ek-1.2’de verilmektedir. Öğrencilere uygulanan anket toplam beş sorudan oluşmaktadır. Öğretmenlere uygulanan anket ise, toplam 4 sorudan oluşmaktadır.

Anket çalışmasının sonuçları aşağıda sunulmaktadır.

Ankete katılan 100 öğrenciden 98’inin anketi geçerli sayılmıştır. Öğrencilerin %16.9’u lise 2. sınıf, %8.47’si lise 3. sınıf, %74.5’i lise 4. sınıfta eğitim görmektedir.

Öğretmenlerden ise, 34 kişinin katıldığı ankette 33’ünün anketi geçerli sayılmıştır. Bunların, %12’si 0-1 yıl, %27’si 2-4 yıl, %39’u 5-7 yıl, %12’si 8-10 yıl ve %9’u 11 yıl ve üzeri süreden bu yana okulda çalışmaktadır.

Anketi geçerli sayılan 98 öğrenciden, % 35’ü Kuzey yönüne, % 37’si Güney yönüne ve % 28’i Batı yönüne bakan dersliklerde öğrenim görmektedir. Ankete katılan öğrenciler arasında Doğu yönüne bakan sınıflarda öğrenim gören olmamıştır.

Bir ya da birden fazla dersliği kullanabilen öğretmenler değerlendirmelerini girdikleri tüm derslikler için ayrı ayrı yapmıştır. Öğretmenler % 44 Kuzey yönüne, % 38 Güney yönüne, % 12 Batı yönüne ve % 0,4 Doğu yönüne bakan dersliklere yönelik değerlendirmede bulunmuştur.

Katılımcılardan niceliksel veri alabilmek için, derslik kullanıcılarından (öğrenci ve öğretmenler) kullandıkları dersliklerin iç ortam ısı konforunu Yaz ve Kış mevsimlerine göre ayrı ayrı değerlendirmeleri istenmiştir. Değerlendirmedeki seçenekler ASHRAE 55-2004 standardında (ASHRAE, 2004c) yer alan 7 puanlı termal konfor ölçeği (ASHRAE 7-point thermal sensation scale) baz alınarak -3 ve +3 puanları arasında sunulmuştur (Tablo 4.3). Katılımcılardan belirtilen puanlar arasında tanımlanan iç ortam ısı konfor özelliklerine göre dersliklerini değerlendirmeleri istenmiştir.

Tablo 4.3 ASHRAE 55-2004 standardına göre 7 puanlı termal konfor ölçeği (ASHRAE, 2004c)

-3	-2	-1	0	1	2	3
Çok soğuk	Soğuk	Serin	Rahat	Ilık	Sıcak	Çok sıcak

Anket formumun bu bölümünden elde edilen değerlendirme sonuçları Tablo 4.4'te izlenebilmektedir.

Tablo 4.4 Katılımcıların Yaz ve Kış mevsimlerinde dersliklerdeki ısı konforu ASHRAE 55-2004 standardına göre değerlendirme sonucu

Derslikler	Yaz Mevsimi	Kış Mevsimi
Kuzey Cephesinde Yer Alan Derslikler	+1,30	-1,55
Güney Cephesinde Yer Alan Derslikler	+2,55	0,15
Batı Cephesinde Yer Alan Derslikler	+1,91	-0,45
Doğu Cephesinde Yer Alan Derslikler	+1,50	-1,50

Tablo 4.4'e göre, Kuzey yönündeki dersliklerin kış ayları için hesaplanan ısı konfor puanı -1,55 (Soğuk'a yakın) dir. Bu sonuçtan yola çıkarak, kış aylarında Kuzey yönüne bakan dersliklerde ısı konfor probleminin olduğu söylenebilir. Yaz ayları için yapılan değerlendirmede ise, bu dersliklerin puanı +1,30 (Sıcak'a yakın) olarak belirlenmiştir. Buna göre, bu yöndeki dersliklerde, kış aylarına oranla daha az olmakla birlikte, ısı konforsuzluğun olduğu sonucuna varılabilir (Tablo 4.4).

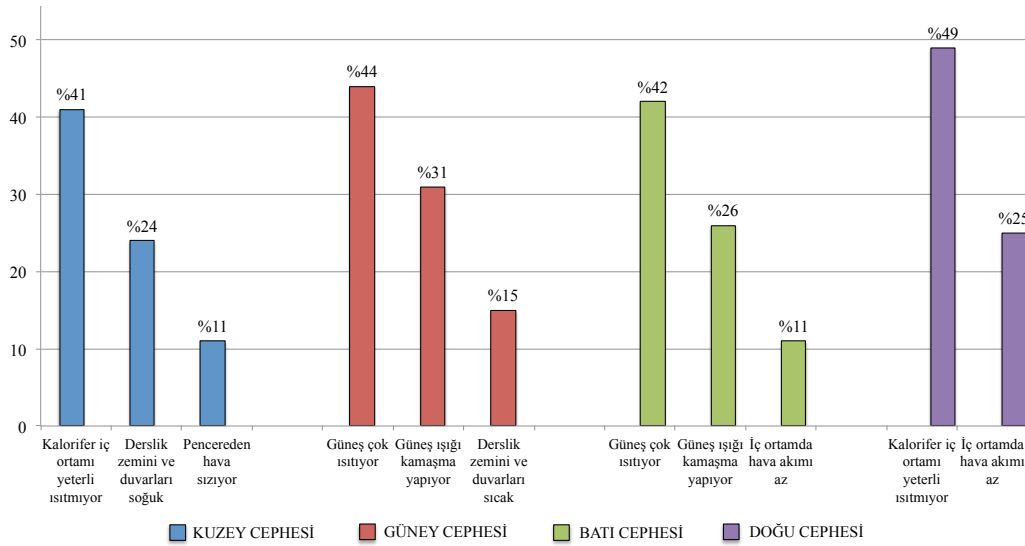
Güney yönündeki dersliklerin yaz ayları için ısı konfor puanı +2,55 (Çok Sıcak'a yakın) olarak hesaplanmıştır. Derslik kullanıcılarının kış ayları için puanı ise, +0,15 (Rahat'a yakın) olarak belirlenmiştir (Tablo 4.4). Bu sonuçlara göre, yaz ayları boyunca Güney cephesinde yer alan dersliklerde aşırı ısınmaya bağlı olarak konforsuzluk probleminin meydana geldiği, kış aylarında ise, iç ortam sıcaklık koşullarının iyi düzeyde olduğu söylenebilir.

Batı yönündeki dersliklerin iç ortam sıcaklığına ilişkin yaz ve kış ayları için yapılan kullanıcı değerlendirilmeleri sonucunda elde edilen puanlar sırasıyla, +1,91 (Sıcak'a yakın) ve -0,45 (Rahat'a yakın) (Tablo 4.4) dir. Bu verilere göre, Batı

cephesinde konumlandırılan dersliklerde, yaz ayları süresinde fazla ısınma nedeniyle konforsuzluk koşullarının oluşabildiği, kış aylarında da iç ortam sıcaklığının iyi düzeyde olduğu çıkarımları yapılabilir.

Doğu yönündeki dersliklerin iç ortam sıcaklığına yönelik yapılan değerlendirmeler sonucunda, yaz ve kış ayları için hesaplanan ısı konfor puanları sırasıyla, +1,50 (Sıcak'a yakın) ve -1,50 (Soğuk'a yakın) (Tablo 4.4) dir. Bu sonuçlara göre, Doğu cephesindeki dersliklerde, yaz ayları boyunca fazla ısınmanın yol açtığı konforsuzluk probleminin, kış aylarında ise, iç ortamın ısınmasındaki yetersizliklerden kaynaklanan ısı konfor probleminin olduğu söylenebilir.

Anket çalışmasında konforsuzluk koşullarının nedenlerini belirlemeye yönelik sorulara alınan cevaplar ise Şekil 4.17'de izlenebilmektedir.



Şekil 4.17 Katılımcıların dersliklerdeki iç ortam konforsuzluk koşullarının öncelikli nedenlerine ilişkin görüşleri

Şekil 4.17 incelendiğinde, Kuzey yönüne bakan dersliklerdeki kullanıcıların verdikleri cevaplara göre, konforsuzluk koşullarının nedenleri arasında ilk sırada % 41 oranında “kaloriferler iç ortamı yeterli ısıtmıyor” nedeni yer almaktadır. İkinci ve üçüncü sırada ise, sırasıyla % 24 ve % 11 oranlarıyla “derslik zemini ve duvarları soğuk” ve “pencerelerden hava sızıyor” nedenleri yer almaktadır. Bu cevaplar

kullanıcılara yöneltilen daha önceki sorulara alınan cevaplarla benzerlik göstermektedir. Bu sonuçlar, okul binasının özellikle kuzey cephesinde yer alan dersliklerde ısı konfor yetersizliğinin olduğuna işaret etmektedir.

Binanın Güney yönüne bakan dersliklerde öncelikli neden olarak % 44 oranıyla kullanıcıların “güneş çok ısıtıyor” şeklinde tanımladıkları nedenin olduğu tespit edilmiştir. İkinci sırada, % 31 oranında kullanıcıların iç ortamdaki aşırı güneş ışığından kaynaklanan rahatsızlıklarını ifade eden cevaplarına göre “güneş ışığı kamaşma yapıyor” şeklinde belirlenmiştir. Üçüncü neden olarak ise, % 15 oranında kullanıcı “derslik zemini ve duvarları sıcak” şeklinde cevap vermişlerdir. Bu cevaplar da Güney yönüne bakan dersliklerde aşırı ısınma probleminin olduğunu göstermektedir.

Batı yönündeki derslikler için yapılan değerlendirme sonucuna göre, kullanıcılar öncelikli nedeni % 42 oranıyla “güneş çok ısıtıyor” şeklinde ifade etmişlerdir. İkinci ve üçüncü sıradaki nedenleri ise sırasıyla, % 26 oranında “güneş ışığı kamaşma yapıyor” ve % 11 oranında kullanıcıların “iç ortamda hava akımı az” olarak değerlendirdikleri iç ortamdaki doğal havalandırmanın yetersizliğidir.

Doğu yönüne konumlandırılmış dersliklere ilişkin yapılan değerlendirmede ise kullanıcılar konforsuzluk koşullarının öncelikli nedenlerini sırasıyla, % 50 ve % 25 oranlarıyla “kaloriferler iç ortamı yeterli ısıtmıyor” ve “iç ortamda hava akımı az” olarak belirtilmiştir.

Kullanıcı konforunu etkileyen bina enerji performansına yönelik yetersizliklerin belirlenmesi ve bunların nedenlerinin tespit edilmesi amacıyla uygulanan anket çalışmasının sonuçlarına göre, projenin hedef ve kısıtlarının belirlenmesinde etkili olabilecek bulgular şunlardır:

- Bina enerji performansının iyileştirilmesinde kullanıcı gereksinimlerindeki öncelikler dikkate alınmalı ve bu doğrultuda çözüm alternatifleri geliştirilmelidir.

- Bina enerji performansını iyileştirmeye yönelik çözümlerde her bir cephe ayrı ayrı ele alınmalıdır.
- Binada güneş kontrolünün sağlanmasına yönelik çözümler geliştirilmelidir.

Okul Yönetimi İle Yüz-Yüze Görüşmenin Sonuçları:

Öğrenciler ve öğretmenlerin dışında okul binasının diğer kullanıcıları olan okul yönetimiyle mevcut problemlerin çözümüne yönelik beklenti ve sınırlamaların neler olabileceği konusunda bilgi alabilmek için yüz-yüze görüşme yöntemi uygulanmıştır.

Bu görüşmeler sonucunda elde edilen bulgular şunlardır:

- Binadaki problemlerin çözümüne yönelik en önemli kısıtlamalar başlangıç maliyeti ve yapılacak yatırımın geri ödeme süresidir. Önerilecek bina enerji performansını iyileştirmeye yönelik uygulama çözümleri için yapılacak yatırımın başlangıç maliyetinin kısa geri ödeme süresi olması beklenmektedir.
- Önerilecek bina enerji performansını iyileştirmeye yönelik uygulama çözümleriyle elde edilecek kazanımların anlaşılır olması beklenmektedir. Örneğin, uygulama çözümü alternatifleri ile binanın enerji tüketimindeki yıllık tasarrufunun yüzde (%) cinsinden ifade edilmesi ve yatırım maliyeti ile geri ödeme süresinin açıklanması beklenmektedir.

Projenin Hedefleri:

Bu aşamaya kadar elde edilen bulgular ışığında proje hedefleri şunlardır:

- Mevcut bina kabuğunun binanın enerji performansını geliştirecek şekilde yeniden tasarlanması,

- Uygun başlangıç maliyeti ve kısa geri ödeme süresine sahip enerji tasarrufunun sağlanabileceği öncelikli bina iyileştirme uygulamalarının belirlenmesi,
- Binanın iç ortam ısıtma ve soğutma enerjilerinden sağlanacak tasarruf oranları ve maliyet kriterlerine göre uygulama alternatiflerinin geliştirilmesi,
- Bina içerisinde farklı mekanlarda farklı konforsuzluk koşullarının olduğu kullanıcı değerlendirmeleri doğrultusunda saptanmıştır. Bu saptama, bina performansına ilişkin kullanıcı gereksinimlerindeki önceliğin değişebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, bina enerji performansını iyileştirmeye yönelik çözüm alternatifleri geliştirilmesinde kullanıcı gereksinimlerindeki önceliklerin de dikkate alınması gerekmektedir.

Genel Tasarım Kararları ve Projenin Kısıtları:

Projenin hedefleri doğrultusunda alınan genel tasarım kararları ve projenin belirlenen kısıtları şu şekildedir:

- Binanın yapı elemanlarında herhangi bir değiştirme işlemi yapılmayacaktır. Örneğin, iç ve/veya dış duvarlar yıkılarak yeni bir duvar sistemiyle değiştirme yapılması yerine sadece mevcut bileşenlere gerekli durumlarda malzeme katmanları eklenecektir. Mevcut pencere sisteminin boyutları değiştirilmeden sadece enerji etkin yeni bir pencere sistemi kullanılacaktır.
- Binanın mevcut plan şeması üzerinde mekanların yeniden tasarımına, organizasyonuna ve/veya işlevlendirmesine yönelik herhangi bir değişiklik yapılması proje kapsamı dışındadır.
- Bina kabuğunda yapılacak değişiklik minimum düzeyde olacaktır.
- Bina enerji performansını geliştirme önerileri sadece bina kabuğuna yönelik pasif sistemler ile sınırlı olacaktır.

- Binanın mevcut durumuna göre ısıtma ve soğutma enerjileri için tasarruf sağlanmasına çalışılacaktır.
- Bina enerji performansını geliştirmede uygun başlangıç maliyeti ve kısa geri ödeme süresine sahip çözümler üretilmeye çalışılacaktır.

4.2.2 Hassasiyet Analizi Yöntemi Uygulaması

Bölüm 4.2.1’de alınan kararlar ve elde edilen veriler doğrultusunda örnek okul binası üzerinde önerilen modelin ikinci ana aşaması olan hassasiyet analizi yöntemi uygulanacaktır. Hassasiyet analizi yönteminin uygulanmasına yönelik detaylar Bölüm 3.2’de açıklanmıştır. Modelin bu aşaması aşağıdaki dört adımın uygulanmasını gerektirmektedir (bkz. Şekil 3.1):

- Girdi parametrelerini belirleme ve girdiler için örneklem oluşturma,
- Girdi dosyalarını oluşturma,
- Simülasyon ile çıktı dosyalarını elde etme,
- Hassasiyet analizi katsayısı seçme ve girdi parametrelerini önem düzeylerine göre sıralama.

4.2.2.1 Girdi Parametrelerini Belirleme ve Girdiler İçin Örneklem Oluşturma

Bölüm 4.2.1.2 ‘Projenin Hedef ve Kısıtlarını Belirleme’ bölümünde çalışma kapsamında ele alınacak girdi parametrelerinin bina kabuğu bileşenleri ile sınırlandırıldığı belirtilerek gerekçeleri açıklanmıştır. Ayrıca, yine aynı bölümde (Bölüm 4.2.1.2) anket uygulaması sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda tasarım parametrelerinin, binanın farklı yönlere bakan cepheleri için ayrı şekilde ele alınması gerektiği de belirtilmiştir.

Bu çalışmada projenin hedef ve kısıtları doğrultusunda hassasiyetleri incelenecek bina kabuğuna ilişkin enerji performansını geliştirme odaklı tasarım (girdi) parametreleri, kabuk ana bileşenleri bazında belirlenmiştir (Tablo 4.5).

Tablo 4.5 Çalışma kapsamında hassasiyetleri incelenecek olan bina kabuğuna ilişkin tasarım (girdi) parametreleri

Bina Kabuk Bileşeni	Tasarım (Girdi) Parametreleri
Dış Duvar	– Dış duvarlarda kullanılacak ısı yalıtım malzemesi kalınlığı, – Dış duvarlarda kullanılacak ısı yalıtım malzemesi özgül ısı (ısıl kütle kapasitesi) değeri, – Dış duvarlarda kullanılacak ısı yalıtım malzemesi ısı iletkenlik hesap değeri.
Saydam Yüzey (Pencere)	– Saydam yüzey (pencere) U değeri (Isı geçirgenlik katsayısı), – Saydam yüzey (pencere) güneş ısı kazanım katsayısı (Solar Heat Gain Coefficient- SHGC).
Gölgeleme Elemanı	– Pencere gölgeleme elemanı derinliği, – Pencere gölgeleme elemanı açısı.
Zemine (Toprağa) Oturan Döşeme	– Zemin döşemesinde kullanılacak ısı yalıtım malzemesi kalınlığı, – Zemin döşemesinde kullanılacak ısı yalıtım malzemesi özgül ısı değeri, – Zemin döşemesinde kullanılacak ısı yalıtım malzemesi ısı iletkenlik hesap değeri.
Çatı Döşemesi	– Çatı döşemesinde kullanılacak ısı yalıtım malzemesi kalınlığı, – Çatı döşemesinde kullanılacak ısı yalıtım malzemesi özgül ısı değeri, – Çatı döşemesinde kullanılacak ısı yalıtım malzemesi ısı iletkenlik hesap değeri.

Tablo 4.5’te görüldüğü gibi, hassasiyetleri incelenecek olan bina kabuğuna ilişkin beş grupta toplam on üç adet tasarım (girdi) parametresi belirlenmiştir. Daha önce de değinildiği gibi, belirlenen bu parametreler binanın her bir cephesi (kuzey-güney-doğu-batı) için ayrı ayrı ele alınacaktır.

Girdi parametrelerine yönelik örneklem oluşturulabilmesi için her bir parametrenin alabileceği maksimum ve minimum değerlerin ve örneklem sayısının da belirlenmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında ele alınan girdi parametreleri, maksimum ve minimum değer aralıkları Tablo 4.6’da gösterilmektedir.

Tablo 4.6 Örnek okul binasına ilişkin girdi parametreleri ve parametrelerin alabileceği maksimum ve minimum değer aralıkları (değer aralıklarının belirlenmesinde TSE, 2008'den yararlanılmıştır)

Girdi Parametreleri			Parametre Kısaltması	Birim	Min. Değer	Maks. Değer
Dış Duvar	Isı Yalıtım Malzemesi Kalınlığı	Kuzey Cephesi	Duvar-YalıtK-Kuzey	m	0,0	0,1
		Güney Cephesi	Duvar-YalıtK-Güney	m	0,0	0,1
		Doğu Cephesi	Duvar-YalıtK-Doğu	m	0,0	0,1
		Batı Cephesi	Duvar-YalıtK-Batı	m	0,0	0,1
	Isı Yalıtım Malzemesi Özgül Isı Değeri	Kuzey Cephesi	Duvar-YalıtÖzgIsı-Kuzey	J/kg-K	600	2000
		Güney Cephesi	Duvar-YalıtÖzgIsı-Güney	J/kg-K	600	2000
		Doğu Cephesi	Duvar-YalıtÖzgIsı-Doğu	J/kg-K	600	2000
		Batı Cephesi	Duvar-YalıtÖzgIsı-Batı	J/kg-K	600	2000
	Isı Yalıtım Malzemesi Isı İletkenlik Hesap Değeri	Kuzey Cephesi	Duvar-Yalıt-λ-Kuzey	W/mK	0,03	0,04
		Güney Cephesi	Duvar-Yalıt-λ-Güney	W/mK	0,03	0,04
		Doğu Cephesi	Duvar-Yalıt-λ-Doğu	W/mK	0,03	0,04
		Batı Cephesi	Duvar-Yalıt-λ-Batı	W/mK	0,03	0,04
Kabuk Saydam Yüzey (Pencere)	U Değeri	Kuzey Cephesi	Pencere-U-Kuzey	W/m ² K	1,1	5,0
		Güney Cephesi	Pencere-U-Güney	W/m ² K	1,1	5,0
		Doğu Cephesi	Pencere-U-Doğu	W/m ² K	1,1	5,0
		Batı Cephesi	Pencere-U-Batı	W/m ² K	1,1	5,0
	Güneş Isısı Kazanç Katsayısı	Kuzey Cephesi	Pencere-GIKK-Kuzey	-	0,5	0,85
		Güney Cephesi	Pencere-GIKK-Güney	-	0,5	0,85
		Doğu Cephesi	Pencere-GIKK-Doğu	-	0,5	0,85
		Batı Cephesi	Pencere-GIKK-Batı	-	0,5	0,85
Kabuk Saydam Yüzey Gölgeleme Elemanı	Gölgeleme Elemanı Derinliği	Kuzey Cephesi	Gölgeleme-Derinlik-Kuzey	m	0,0	0,85
		Güney Cephesi	Gölgeleme-Derinlik-Güney	m	0,0	0,85
		Doğu Cephesi	Gölgeleme-Derinlik-Doğu	m	0,0	0,85
		Batı Cephesi	Gölgeleme-Derinlik-Batı	m	0,0	0,85
	Gölgeleme Elemanı Açısı	Kuzey Cephesi	Gölgeleme-Açı-Kuzey	Derece (°)	45	90
		Güney Cephesi	Gölgeleme-Açı-Güney	Derece (°)	45	90
		Doğu Cephesi	Gölgeleme-Açı-Doğu	Derece (°)	45	90
		Batı Cephesi	Gölgeleme-Açı-Batı	Derece (°)	45	90
Zemin Döşemesi	Isı Yalıtım Malzemesi Kalınlığı		Zemin-YalıtK	m	0,0	0,1
	Isı Yalıtım Malzemesi Özgül Isı Değeri		Zemin-YalıtÖzgIsı	J/kg-K	600	2000
	Isı Yalıtım Malzemesi Isı İletkenlik Hesap Değeri		Zemin-Yalıt-λ	W/mK	0,03	0,04
Çatı Döşemesi	Isı Yalıtım Malzemesi Kalınlığı		Çatı-YalıtK	m	0,0	0,2
	Isı Yalıtım Malzemesi Özgül Isı Değeri		Çatı-YalıtÖzgIsı	J/kg-K	600	2000
	Isı Yalıtım Malzemesi Isı İletkenlik Hesap Değeri		Çatı-Yalıt-λ	W/mK	0,03	0,04

Tablo 4.6’da görüldüğü gibi bina kabuğuna yönelik toplam otuz dört adet girdi parametresi bulunmaktadır. Her bir parametreye ait maksimum ve minimum değer aralıkları belirlenirken inşaat sektöründe yaygın kullanılan yapı malzemelerine ait sınır değerler dikkate alınmıştır. Örneğin, dış duvar ısı yalıtım malzemesine ait ısı iletkenlik hesap değeri parametresi için yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemelerine ait sınır değerler araştırılmış ve bu değerler kullanılmıştır.

Hassasiyetleri incelenecek toplam otuz dört adet girdi parametresi ve her bir parametreye ait değer aralığı belirlendikten sonra, örneklem matrisinin oluşturulması için tüm bilgiler Simlab programının ilgili bölümlerine girilmiştir. Girdi parametrelerinin birinci dereceden Sobol hassasiyet katsayılarının hesaplanabilmesi için gerekli olan örneklem sayısına ilişkin formül daha önce Bölüm 3.1.2’de (bkz. Bölüm 3.1.2 s.79) verilmiştir. Bu formüle göre, incelenecek toplam otuz dört adet girdi parametresinin her birinin birinci dereceden Sobol hassasiyet katsayısını hesaplamak için toplam 576 ($16 \times (34+2)$) tane örneklem oluşturulması gerekmektedir. Simlab programı kullanılarak her bir girdi parametresi için 576 tane örneklem oluşturulmuştur ve örneklem matrisinin büyüklüğü 576x34 dür. Oluşturulan örneklem matrisi bir sonraki adım olan girdi dosyalarının oluşturulmasında kullanılmak üzere Excel dosyasına kaydedilmiştir.

4.2.2.2 Girdi Dosyalarını Oluşturma

Örneklem matrisi oluşturulduktan ve Excel dosyasına kaydedildikten sonra, üretilen örneklemlemlerle EnergyPlus girdi dosyaları oluşturulacaktır. Excel dosyasındaki örneklem matrisindeki her satırdaki değer (toplam 576 satır, 34 kolon), Matlab programı ile yazılan bilgisayar koduyla, taban modele ait IDF dosyasındaki (EnergyPlus girdi dosyası) ilgili girdi parametresine atanarak yeni bir IDF dosyası olarak kaydedilmektedir. Bu işlem otomatik olarak devam etmekte ve sonuç olarak 576 adet örneklem için 576 adet EnergyPlus girdi dosyası olan IDF dosyası üretilmektedir. Sonuç olarak, oluşturulan örneklem matrisindeki değerler, text tabanlı IDF dosyasına atanarak, yeni bir IDF dosyası oluşturulmuştur ve yinelemeli devam eden bu işlem sonucunda gerekli IDF dosyaları üretilmiştir.

4.2.2.3 Simülasyon ve Çıktı Dosyalarını Elde Etme

Bu uygulamada, örnek binanın radyatörle yıllık ısıtma enerjisi tüketimi (BHE) ve yıllık split klimayla soğutma enerjisi tüketimi (PTACEE) performans göstergeleri çıktı parametreleri olarak seçilmiştir ve simülasyonlar bu değerlerin hesaplanması için yapılacaktır. Diğer bir ifadeyle, belirlenen toplam 34 adet girdi parametresi her bir çıktı parametresi üzerindeki etki değerlerine göre sıralanacaktır.

Bu aşamada oluşturulan 576 adet EnergyPlus simülasyon programı girdi dosyasının (IDF) simülasyonu yapılarak çıktı dosyaları elde edilecektir. Bunun için EnergyPlus programının EP-Launch.exe ara yüzü açılarak, gerekli iklim veri dosyası atandıktan sonra (bkz. Bölüm 4.2.1), 576 adet IDF dosyası toplu şekilde seçilerek simülasyon programı çalıştırılmaktadır. Bu işlemten sonra, program sırasıyla her bir girdi dosyanın simülasyonunu otomatik olarak yapmakta ve sonuçları EnergyPlus çıktı dosyası olan CSV dosyası olarak vermektedir. Yinelemeli gerçekleşen bu işlem “grup enerji simülasyonu” olarak tanımlanmaktadır.

Simülasyonlar tamamlandıktan sonra 576 adet girdi dosyasına karşılık 576 adet çıktı dosyası elde edilmiştir. Simülasyon değerleri ise, çıktı dosyalarının içinde yer almaktadır. Matlab programı ile yazılan başka bir bilgisayar koduyla, her bir çıktı dosyası içindeki ilgili çıktı değerleri okunarak otomatik olarak seçilen Excel dosyasına kaydedilmektedir.

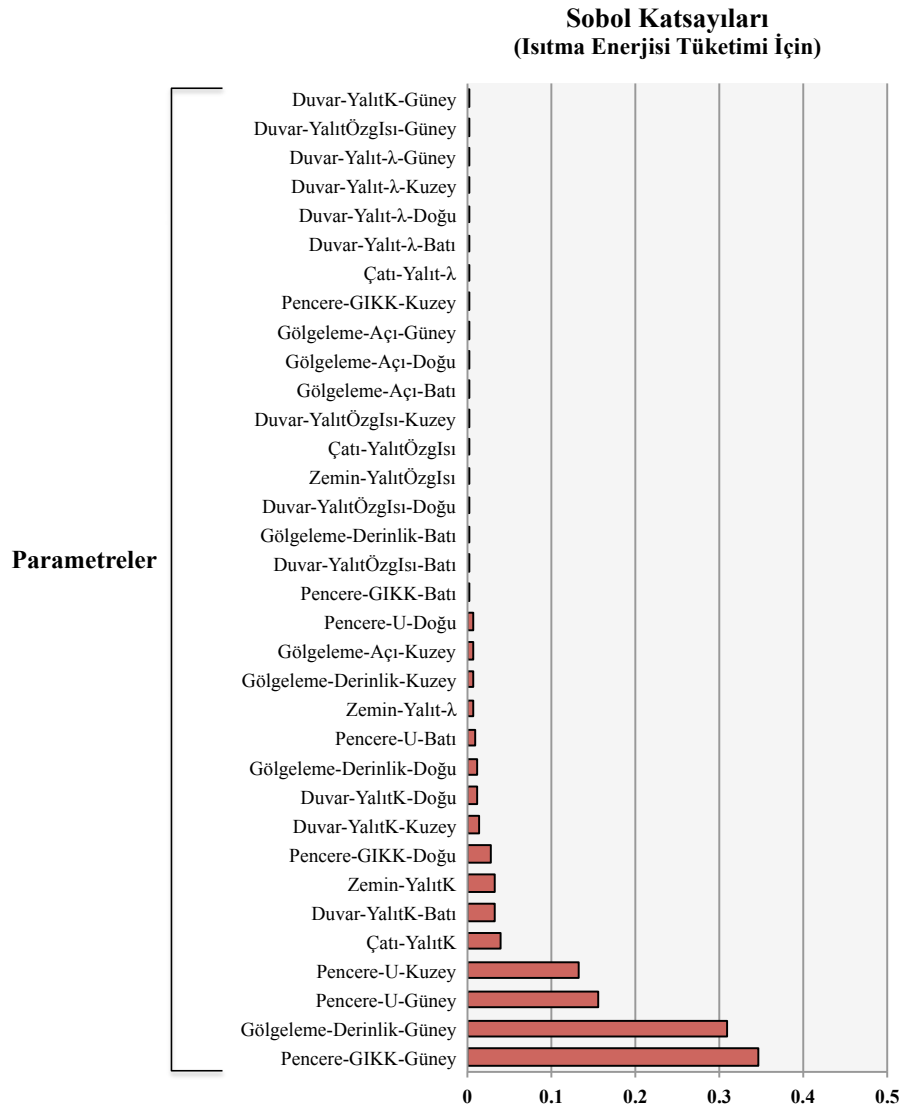
Bu aşamaya kadar girdi örneklem değerleri ve bu değerlere göre hesaplanmış simülasyon değerleri elde edilmiştir. Bir sonraki aşama ise, elde edilen girdi ve çıktı değerleri arasındaki matematiksel ilişkilerin belirlenmesidir.

4.2.2.4 Hassasiyet Analizi Katsayısı Seçme ve Girdi Parametrelerini Önem Düzeylerine Göre Sıralama

Bu aşamada Bölüm 4.2.2.1’de belirlenen girdi parametreleri ile Bölüm 4.2.2.3’te elde edilen çıktı parametreleri arasındaki ilişkiler belirlenecektir.

Girdi ve çıktılara ait değerler Simlab programına girilmiştir ve Sobol katsayıları hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 4.18 ve 4.19’da gösterilmektedir. Sobol metoda göre varyans değeri sıfır veya negatif olamamaktadır. Bu nedenle, çok küçük negatif değerlere sahip girdi parametrelerinin mutlak değerleri alınarak sıralama yapılmıştır.

Çalışma kapsamında ele alınan girdi parametrelerinin binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etki düzeylerine göre hesaplanan Sobol katsayıları doğrultusunda gerçekleştirilen önem sıralaması Şekil 4.18’de sunulmaktadır.



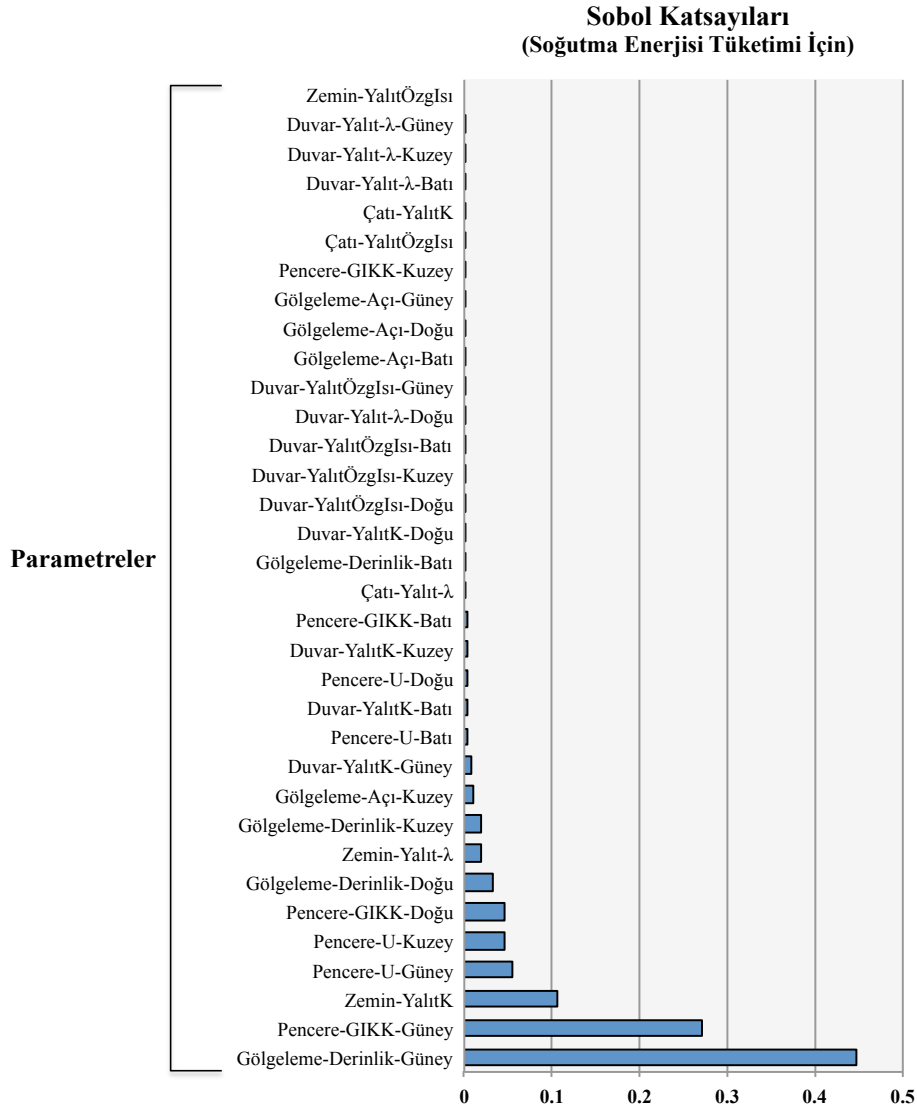
Şekil 4.18 Girdi parametrelerinin binanın ısıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etki düzeylerine göre hesaplanan Sobol katsayıları ve parametrelerin Sobol katsayıları doğrultusunda önem düzeylerine göre sıralanması

Şekil 4.18’de aşağıdan yukarıya doğru en etkiliden daha az etkiliye doğru sıralanan parametreler arasında önem ve öncelik sırasına göre en önemli ilk beş parametrenin; 1) Binanın güney cephesindeki camların güneş ısı kazanç katsayısı (Pencere-GİKK-Güney), 2) Binanın güney cephesindeki pencerelerde kullanılacak gölgeleme elemanının derinliği (Gölgeleme-Derinlik-Güney), 3) Binanın güney cephesindeki pencerelerin U değeri (Pencere-U-Güney), 4) Binanın kuzey cephesindeki pencerelerin U değeri (Pencere-U-Kuzey), 5) Çatı döşemesi üzerinde uygulanacak ısı yalıtım malzemesi kalınlığı (Çatı-YalıtK) olduğu görülmektedir (Şekil 4.18).

Şekil 4.18’de dikkat çeken önemli bir nokta, binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi üzerinde en etkili/önemli ilk dört sıradaki parametrenin de kabuk saydam yüzey elemanları olan pencerelere ilişkin olmasıdır. Dikkat çekici diğer bir nokta ise, en etkili ilk beş parametre arasında binanın herhangi bir yöndeki dış duvarına uygulanacak ısı yalıtım malzemesine ilişkin bir parametrenin yer almamasıdır. Oysa, binalarda enerji etkinliği uygulamalarında dış cephede yapılacak yalıtım uygulaması ilk akla gelen uygulamalar arasındadır.

Hesaplanan Sobol katsayılarına göre, binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimini azaltmaya yönelik uygulamalarda, binanın kuzey ve güney yönlerine bakan cephelerinin diğer cephelere göre çok daha fazla önem taşıdığı sonucu ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.19’da, girdi parametrelerinin binanın yıllık soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki etki düzeylerine göre hesaplanan Sobol katsayıları doğrultusunda gerçekleştirilen önem sıralaması gösterilmektedir.



Şekil 4.19 Girdi parametrelerinin binanın soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki etki düzeylerine göre hesaplanan Sobol katsayıları ve parametrelerin Sobol katsayıları doğrultusunda önem düzeylerine göre sıralanması

Şekil 4.19’da girdi parametrelerinin önem ve öncelik sıralamasına göre en önemli ilk beş parametrenin; 1) Binanın güney cephesindeki pencerelerde kullanılacak gölgeleme elemanının derinliği (Gölgeleme-Derinlik-Güney), 2) Binanın güney cephesindeki camların güneş ısı kazanç katsayısı (Pencere-GIKK-Güney), 3) Binanın toprakla temas eden yüzeyi olan zemin döşemesi üzerinde uygulanacak ısı yalıtım malzemesi kalınlığı (Zemin-YalıtK), 4) Binanın güney cephesindeki pencerelerin U değeri (Pencere-U-Güney) ve 5) Binanın kuzey cephesindeki pencerelerin U değeri (Pencere-U-Kuzey) olduğu görülmektedir.

Şekil 4.19 incelendiğinde, binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi üzerinde en etkili parametrelerin aksine (bkz. Şekil 4.18), soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki öncelikli parametrelerin çoğunun bina kabuğu saydam yüzey elemanı olan pencerelere ilişkin olması önemli bir nokta olarak öne çıkmaktadır.

Varyans tabanlı global hassasiyet analizi yöntemi olan Sobol metodu, daha önce Bölüm 3.1.2’de belirtildiği gibi, modelden bağımsız ve özellikle lineer olmayan ve monotonik olmayan karakteristiklere sahip modeller için uygundur. Sobol metodun uygulanması ile parametrelerin önem düzeylerine ilişkin elde edilen sıralama, lokal hassasiyet analizi veya regresyon tabanlı global hassasiyet analizi ile elde edilen sıralamalara göre daha güvenilir ya da daha kararlıdır. Bu özellik Sobol metodun en güçlü yanıdır. Buna karşılık regresyon tabanlı hassasiyet analizinde SRC, SRRC, PEAR gibi seçilen katsayıya bağlı olarak parametrelerin öncelik sıralaması değişebilmektedir. Dolayısıyla, parametrelerin önem ve önceliklerine göre yapılan sıralamanın doğruluğunun/güvenilirliğinin önemli olduğu durumlarda Sobol metot etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak, Sobol katsayıları SRC, SRRC katsayıları gibi girdi(ler) ve çıktı(lar) arasındaki pozitif ve/veya negatif ilişkilerle ilgilenmez. Sobol katsayıları sonucunda parametrelerin önem sıraları çok net anlaşılmakla birlikte bir girdi parametresinin bir çıktı parametresi üzerindeki pozitif veya negatif etkisine yönelik bir bilgi bulunmamaktadır.

Tez çalışması kapsamında önerilen modelin ikinci ana aşamasında hassasiyet analizi uygulamasındaki temel sebep girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkileri doğrultusunda önem düzeylerine göre en doğru şekilde sıralanmasıdır. Çünkü elde edilecek bu sıralama modelin üçüncü ana aşaması olan optimizasyon uygulamasını yönlendirmektedir. Ancak, girdiler ve çıktılar arasındaki pozitif ve/veya negatif ilişkilerin bilinmesinin de özellikle optimizasyon sonuçlarının ortaya çıkış sebeplerini kavramada diğer bir ifadeyle, sebep-sonuç ilişkisi kurabilmede bilgi desteği sağlayacağı düşünülmüştür. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında belirtilen bu durumun örneklenmesi istenmiştir. Bu doğrultuda, Sobol metoda ek olarak, regresyon tabanlı global hassasiyet analizi yöntemi uygulanarak girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkileri doğrultusunda SRRC

katsayıları da hesaplanmıştır. Latin Hypercube örneklem (Latin Hypercube Sampling) yöntemi kullanılarak, Simlab programında aynı girdi parametrelerinin (34 adet girdi parametresi için bkz. Bölüm 4.2.2.1) her biri için 100 adet örneklem oluşturulmuştur. Bu durumda, örneklem matrisinin boyutu 100x34 dır. Sonrasında girdi dosyaları (IDF) oluşturulmuş ve EnergyPlus simülasyon programı ile 100 adet IDF dosyası yinelenmeli şekilde simüle edilerek 100 adet çıktı dosyası elde edilmiştir. Girdi ve çıktılarına ait değerler tekrar Simlab programına girilerek, SRRC katsayıları hesaplanmıştır (Ek-2.1 ve Ek-2.2). **Sonuç olarak, Sobol metotla sıralamaları belirlenen girdi parametrelerinin çıktı parametreleri olarak tanımlanan ısıtma enerjisi tüketimi ve soğutma enerjisi tüketimi performans kriterleriyle pozitif veya negatif ilişkileri SRRC katsayılarıyla belirlenmiştir.**

SRRC katsayılarının hesaplanmasında, ilk olarak örnek bina enerji simülasyon modeli ile simülasyonlar yapılmış ve binanın ısıtma ve soğutma enerjileri tüketimi ile girdi parametreleri arasındaki korelasyonlar belirlenmiştir (bkz. Ek-2.1). Pozitif (+) işaretli SRRC katsayıları, girdi ve çıktı parametreleri arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu; Negatif (-) işaretli katsayılar ise, ters orantılı bir ilişki olduğunu belirtmektedir. Girdi parametrelerinin SRRC katsayıları incelendiğinde, pencerelerin U değerleriyle binanın yıllık soğutma enerjisi tüketimi arasında beklenenin aksine ters orantılı bir ilişki, benzer şekilde dış duvar yalıtım malzemesinin kalınlık parametresiyle soğutma enerjisi tüketimi arasında da beklenenin aksine doğru orantılı bir ilişki olduğu ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu sonucun mevcut okul binasında yaz ayları (15 Haziran-15 Eylül) süresince dersliklerde soğutma sisteminin kapalı olmasından kaynaklanabileceği düşünülerek yaz aylarını da kapsayacak şekilde bina enerji simülasyon modeli yeniden düzenlenerek simülasyonlar tekrarlanmış ve SRRC katsayıları yeniden hesaplanmıştır (bkz. Ek-2.2). Elde edilen bu sonuçlar incelendiğinde, tüm sonuçların beklendiği gibi olduğu görülmüştür. Ek-2.1'deki SRRC katsayıları incelendiğinde, ısıtma enerjisi tüketimi ile zemin döşemesine ait ısı yalıtım malzemesi arasında ters orantılı (negatif işaretli) bir ilişki olduğu görülmektedir. Benzer şekilde soğutma enerjisi tüketimi ile de çatı döşemesine ait ısı yalıtım malzemesi arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Ayrıca, güney ve kuzey cephelerindeki pencereler ve güney cephesindeki gölgeleme elemanları için ısıtma

enerjisi tüketimi ve soğutma enerjisi tüketimi kriterleri arasında ödünleşim (trade-off) meydana gelmektedir. Örneğin, binanın güney cephesindeki gölgeleme elemanı derinliği ile binanın soğutma enerjisi tüketimi arasında ters orantı, binanın ısıtma enerjisi tüketimi ile doğru orantı söz konusudur. Bu durumda, binanın soğutma yükünün azaltılabilmesi için pencere gölgeleme elemanı derinliği artırılması gerekmektedir. Pencere gölgeleme elemanın derinliğinin artırılması ise binanın ısıtma enerji tüketiminin artmasına neden olacaktır.

Hassasiyet analizi sonuçlarına genel olarak bakıldığında, bina kabuğu saydam yüzey elemanları olan camların termofiziksel özellikleri, İzmir gibi sıcak ve nemli iklim bölgelerinde yer alan binaların yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki en etkili girdi parametreleridir. Sobol katsayılarıyla önem sıralarına göre, en etkili parametreleri belirlemenin yanı sıra, SRRC katsayılarıyla girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkilerin bilinmesi de önemli olmuştur. Elde edilen sonuçlar, girdi ve çıktı parametreleri arasında birçok pozitif veya negatif ilişkinin olduğunu göstermiştir, camların güneş ısısı kazanç katsayısı parametresinin, binanın ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleriyle ilişkisi bunun en açık örneğidir (bkz. Ek-2.1 ve Ek-2.2). Dış duvarlarda ısı yalıtımı uygulamasının, beklenilen aksine binanın ısı enerjisi tüketiminin azaltılmasında, camlar kadar etkili olmadığı saptanmıştır. Daha soğuk bir iklimde bu sonucun tam tersinin çıkabileceği düşünülmektedir. Gerek kütsel form gerekse fiziksel özellikler açısından farklı özellikteki bir binaya ait enerji simülasyon modeliyle, farklı bir iklim tipinde yapılacak bir uygulamayla farklı sonuçlar alınacağı kesindir. Bu durum, hassasiyet analizi sonuçlarının, binanın özellikleriyle ve içinde yer aldığı bölgenin iklim tipiyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

Girdi parametrelerinin ısıtma ve soğutma enerjileri tüketimi üzerindeki etki düzeyleri doğrultusunda hesaplanan Sobol katsayılarına göre gerçekleştirilen önem sıralaması ile modelin ikinci ana aşaması tamamlanmıştır. Elde edilen bu sıralamalar modelin üçüncü ana aşaması olan çok amaçlı optimizasyonda girdi olarak kullanılacaktır.

4.2.3 Çok Amaçlı Optimizasyon Yöntemi Uygulaması

Bu bölümde, Bölüm 4.2.1’de açıklanan proje hedefleri ve Bölüm 4.2.2’de Hassasiyet analizi yönteminin uygulanması sonucunda elde edilen sonuçlar doğrultusunda örnek okul binası üzerinde önerilen modelin üçüncü ana aşaması olan simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yöntemi uygulanacaktır. Modelin bu aşaması aşağıdaki üç adımın uygulanmasını gerektirmektedir:

- Optimizasyonda kullanılacak girdi parametrelerini ve ilgili kabuk bileşenlerini seçme,
- Alternatif üretme,
- Amaç fonksiyonu tanımlama (ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimi ve Net Bugünkü Değer kriterleri ile) ve ağırlıklandırma.

4.2.3.1 Optimizasyonda Kullanılacak Girdi Parametrelerini ve İlgili Kabuk Bileşenlerini Seçme

Örnek okul binasının enerji performansının geliştirilmesinin hedeflendiği proje kapsamında bina kullanıcılarının görüşlerine başvurulmuş ve bu doğrultuda yerine getirilmesi amaçlanan hedefler Bölüm 4.2.1.2’de ‘Projenin Hedefleri’ bölümünde açıklanmıştır. Tanımlanan proje hedefleri için çözüm önerilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu doğrultuda, binanın ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimine etki eden bina kabuğu bileşenlerinin önem ve önceliklerine göre sıralanması gerekmektedir. Bu noktada, girdi (tasarım) parametrelerine ait sıralamadan yola çıkarak, bu parametrelerin ait oldukları bina kabuğu bileşenlerinin önceliklerine göre sıralanması gerekmektedir. Bu sıralamanın yapılabilmesi için, Şekil 4.18 ve 4.19’da yer alan girdi parametrelerinin binanın ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri üzerindeki etkilerine göre hesaplanan Sobol katsayıları doğrultusundaki sıralaması dikkate alınarak, bina kabuk bileşenleri de önem ve önceliklerine göre sıralanmıştır. Örneğin,

pencere bileşenine ait bir girdi parametresi, dış duvar bileşenine ait başka bir girdi parametresinden daha önemliyse ya da sıralamada daha önce ise, bina kabuğu bileşenlerinin sıralanmasında da bu pencere bileşeni, duvar bileşeninden daha önce gelecektir. Bu noktadan hareketle Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'daki 34 adet girdi parametresinin önem sıralamasından yola çıkarak binanın ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri üzerindeki önem derecelerine göre toplam 14 adet bina kabuk bileşeni sıralanmıştır. Bina kabuk bileşenlerine ilişkin sıralama Tablo 4.7'de izlenebilmektedir.

Tablo 4.7 Isıtma ve soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki etki düzeylerine göre bina kabuk bileşenlerinin önem sıralaması

Önem Sırası	Isıtma Enerjisi Tüketimi Üzerinde Etkili Olan Bina Kabuk Bileşeni	Soğutma Enerjisi Tüketimi Üzerinde Etkili Olan Bina Kabuk Bileşeni
1.	Pencere-Güney Cephesi	Gölgeleme-Güney Cephesi
2.	Gölgeleme-Güney Cephesi	Pencere-Güney Cephesi
3.	Pencere-Kuzey Cephesi	Zemin Döşemesi
4.	Çatı Döşemesi	Pencere-Kuzey Cephesi
5.	Dış Duvar-Batı Cephesi	Pencere-Doğu Cephesi
6.	Zemin Döşemesi	Gölgeleme-Doğu Cephesi
7.	Pencere-Doğu Cephesi	Gölgeleme-Kuzey Cephesi
8.	Dış Duvar-Kuzey Cephesi	Dış Duvar-Güney Cephesi
9.	Dış Duvar-Doğu Cephesi	Pencere-Batı Cephesi
10.	Gölgeleme-Doğu Cephesi	Dış Duvar-Batı Cephesi
11.	Pencere-Batı Cephesi	Dış Duvar-Kuzey Cephesi
12.	Gölgeleme-Kuzey Cephesi	Çatı Döşemesi
13.	Gölgeleme-Batı Cephesi	Gölgeleme-Batı Cephesi
14.	Dış Duvar-Güney Cephesi	Dış Duvar-Doğu Cephesi

Tablo 4.7 incelendiğinde, ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimlerine etki eden bina kabuk bileşenlerinin önem sıralamasının birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Örneğin, binanın kuzey cephesindeki pencereleri tanımlayan “Pencere-Kuzey Cephesi” bileşeni, ısıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkisine göre üçüncü sıradayken, soğutma enerjisi üzerindeki etkisine göre dördüncü sırada yer almaktadır.

Bu noktada, hangi performans kriterindeki önem sıralaması baz alınarak kabuk bileşenlerin seçileceğın kararının verilmesi gerekmektedir. Bunun için ülkemiz 1. derece gün bölgesinde bulunan İzmir ilinin ısıtma ve soğutma gün dereceleri incelenmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2014b). Elde edilen veriler Tablo 4.8’te sunulmaktadır.

Tablo 4.8 İzmir iline ait 2008-2014 yılları arasındaki ortalama ısıtma ve soğutma gün derece değeri (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2014b)

	Isıtma Gün Derece Değeri	Soğutma Gün Derece Değeri
İzmir	953,7	649,71

Tablo 4.8 incelendiğinde, ısıtma ve soğutma gün derece değeri arasında çok büyük bir fark olmamasına rağmen ısıtma gün derece değeri daha yüksektir. Bunun yanı sıra, örnek okul binasında 15 Haziran-15 Eylül tarihleri arasında olmak üzere yaz aylarının önemli bir bölümünde dersliklerde soğutma sisteminin çalıştırılmadığı göz önüne alındığında ısıtma döneminin soğutma döneminden daha uzun olduğu ortaya çıkmıştır. **Bu doğrultuda, ısıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkilerine göre yapılan bina kabuk bileşen sıralamasının optimizasyon uygulamasında baz alınmasına karar verilmiştir.**

Tanımlanan proje hedefleri doğrultusunda çalışma kapsamında önerilen modelden beklenen çözümler Senaryo I, II ve III olmak üzere üç ayrı grupta geliştirilecektir. Her bir senaryo kapsamında geliştirilmesi hedeflenen çözümlerin içeriğı aşağıda belirtilmektedir:

1. **Senaryo I:** Isıtma ve soğutma enerjisi tasarrufu ve uygun maliyet koşullarını sağlayan bina için yapılması gereken “öncelikli” uygulama çözümlerinin belirlenmesi,
2. **Senaryo II:** Bina için önerilecek uygulama çözümlerinin kapsamının genişletilmesi ile enerji tasarrufları ve maliyetin ne şekilde değişeceğinin gösterilmesi,

3. **Senaryo III:** Kullanıcıların çözüme yönelik önceliklerinin farklı olması durumu karşısında, tanımlanan performans kriterlerinin/hedeflerinin önem sıralarındaki değişimin uygulama çözümlerini ne şekilde etkileyeceğinin gösterilmesi.

Yukarıda belirtilenler doğrultusunda her bir senaryo kapsamında seçilecek kabuk bileşenlerin sayısı değişecektir. Tablo 4.9'daki ısıtma enerjisi tüketimine göre bina kabuk bileşenlerinin önem sıralaması dikkate alınarak Senaryo I, II ve III kapsamında hangi bileşenlerin seçileceği ilerleyen bölümlerde açıklanacaktır.

4.2.3.2 Alternatif Üretme

Bu aşamada, optimizasyon için seçilecek olan her bir kabuk bileşeni için malzeme alternatiflerinin üretilmesi gerekmektedir. Her bir malzeme alternatifi aynı zamanda bir enerji korunum önlemidir.

Bölüm 4.2.3.1'de Senaryo I, II ve III olarak üç ayrı başlık altında optimizasyon işleminde kullanılacak kabuk bileşenlerinin kapsamı tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, Senaryo I, II ve III'ü kapsayacak şekilde bina kabuk bileşenlerinin tümüne yönelik malzeme alternatifleri geliştirilecektir.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi (bkz. Bölüm 3.1.3), bina kabuğu bileşenlerine yönelik malzeme alternatifleri üretilirken, alternatif malzemenin mevcut bir yapı malzemesini tanımlamasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda, optimizasyon uygulamasında bina kabuğu bileşenleri olan girdi parametreleri için bir değer aralığı tanımlamak yerine, parametrenin alabileceği ayırık değerler (discrete values) tanımlanacaktır.

Senaryo I, II ve III kapsamında ele alınan her bir bina kabuk bileşenine yönelik olarak geliştirilen malzeme alternatifleri ve alternatiflere ilişkin optimizasyon için gerekli olan değerler Tablo 4.9'da gösterilmektedir.

Tablo 4.9'a göre, çatı döşemesi üzerine uygulanacak ısı yalıtım malzemesi için ekstrüde polistiren köpük (XPS) ve cam yünü ısı yalıtım malzemelerine ait farklı kalınlıklarda toplam 17 adet malzeme alternatifi geliştirilmiştir. Her bir alternatif için gerekli olan ısı iletkenlik hesap değeri, özgül ısı ve yoğunluk değerleri de tabloya eklenmiştir.

Dış duvar kabuk bileşenine uygulanacak ısı yalıtım malzemesi için taş yünü, expande polistiren köpük (EPS) ve ekstrüde polistiren köpük (XPS) ısı yalıtım malzemelerine ait farklı kalınlıklarda toplam 24 adet alternatif üretilmiştir (Tablo 4.9).

Zemin döşemesi üzerine uygulanacak ısı yalıtım malzemesi için geliştirilen malzeme alternatiflerine bakıldığında, ekstrüde polistiren köpük (XPS) ısı yalıtım malzemesine ait farklı kalınlıklarda toplam 10 adet alternatif geliştirildiği görülmektedir (Tablo 4.9).

Pencereler için toplam 18 adet farklı alternatif geliştirilmiştir (Tablo 4.9). Tüm pencere doğramalarının PVC malzemedan üretildiği varsayılmıştır. Alternatifler, pencerenin saydam bileşenine (cam) göre üretilmiştir ve camın U değeri, güneş ısısı kazanç katsayısı ve ışık geçirgenlik değerine göre çeşitlenmektedir.

Son olarak pencere bileşenlerinde kullanılmak üzere seçilen sabit ve metal malzemeli gölgeleme elemanları için farklı derinlikte boyutlara sahip toplam 9 farklı alternatif üretilmiştir. Gölgeleme elemanları pencerelerin tam üstüne ve yatay düzlemde monte edilecektir.

Daha önce de belirtildiği gibi, alternatifler geliştirilirken piyasada bulunan çeşitli yapı malzemeleri ve onlara ilişkin değerler ve boyutlar referans alınmıştır. Bunun yanı sıra, optimizasyon sürecine maliyet kriteri de dahil olacağından, geliştirilen her bir alternatife ait birim maliyetler (işçilik dahil) de belirlenerek Tablo 4.9'a eklenmiştir.

Tablo 4.9 Bina kabuk bileşenlerine yönelik olarak geliştirilen malzeme alternatifleri ve özellikleri

Bina Kabuk Bileşeni	Malzeme Adı	Kod	Kalınlık (mm)	Isı İletkenlik Hesap Değeri (W/mK)	Özgül Isı (J/kgK)	Yoğunluk (kg/m³)	Maliyet (TL/m²)
ÇATI DÖŞEMESİ (A-B)	Extrüde Polistiren Köpük (XPS) (A)	A1	20	0.035	1500	30	4,64
		A2	25	0.035	1500	30	5,80
		A3	30	0.035	1500	30	6,84
		A4	40	0.035	1500	30	9,12
		A5	50	0.035	1500	30	11,00
		A6	60	0.035	1500	30	13,20
		A7	70	0.035	1500	30	15,40
		A8	80	0.035	1500	30	18,24
		A9	90	0.035	1500	30	22,32
		A10	100	0.035	1500	30	25,60
	Cam Yünü (Glass Wool) (B)	B1	80	0.040	840	14	3,32
		B2	100	0.040	840	14	4,16
		B3	120	0.040	840	14	4,96
		B4	140	0.040	840	14	5,92
		B5	160	0.040	840	14	6,72
		B6	180	0.040	840	14	7,60
		B7	200	0.040	840	14	8,40
DIŞ DUVAR (E-F-G)	Taş Yünü (Rock Wool) (E)	E1	30	0,037	840	150	6,15
		E2	40	0,037	840	150	8,18
		E3	50	0,037	840	150	10,25
		E4	60	0,037	840	150	12,25
		E5	80	0,037	840	150	16,35
		E6	100	0,037	840	150	20,45
		E7	120	0,037	840	150	24,53
	Expande Polistiren Köpük (EPS) (F)	F1	30	0,039	1500	16	2,65
		F2	40	0,039	1500	16	3,5
		F3	50	0,039	1500	16	4,4
		F4	60	0,039	1500	16	5,25
		F5	70	0,039	1500	16	6,1
		F6	80	0,039	1500	16	7,0
		F7	100	0,039	1500	16	8,75
		F8	120	0,039	1500	16	10,5
		F9	140	0,039	1500	16	12,25
	Extrude Polistiren Köpük (XPS) (G)	G1	30	0,035	1500	30	5,0
		G2	40	0,035	1500	30	6,25
		G3	50	0,035	1500	30	7,6
		G4	60	0,035	1500	30	9,0
		G5	70	0,035	1500	30	10,75
		G6	80	0,035	1500	30	12,6
		G7	100	0,035	1500	30	17,0
		G8	120	0,035	1500	30	23,0
ZEMİN DÖŞEMESİ (H)	Extrude Polistiren Köpük (XPS) (H)	H1	20	0.035	1500	30	4,64
		H2	25	0.035	1500	30	5,80
		H3	30	0.035	1500	30	6,84
		H4	40	0.035	1500	30	9,12
		H5	50	0.035	1500	30	11,00
		H6	60	0.035	1500	30	13,20
		H7	70	0.035	1500	30	15,40
		H8	80	0.035	1500	30	18,24
		H9	90	0.035	1500	30	22,32
		H10	100	0.035	1500	30	25,60
Bina Kabuk Bileşeni	Malzeme Adı		Kod	U Değeri	Güneş Isısı Kazanç Katsayısı	Işık Geçirgenlik Değeri	Maliyet (TL/m²)
PENCERE (C)	Tek Cam, 4mm		C1	5.2	0.87	0.9	23,5
	Low-e tek cam, 4mm		C2	4.2	0.65	0.79	26,5
	Renkli tek cam, 4mm		C3	5.2	0.54	0.71	25,5
	Renkli low-e tek cam, 4mm		C4	4.2	0.54	0.71	28,0
	Çift cam, hava dolgulu, 4-12-4mm		C5	2.9	0.75	0.8	36,0
	Çift cam, hava dolgulu, 4-16-4mm		C6	2.7	0.75	0.8	36,5
	Çift cam, argon gazı dolgulu, 4-12-4mm		C7	2.7	0.75	0.8	37,5
	Çift cam, argon gazı dolgulu, 4-16-4mm		C8	2.6	0.75	0.8	38,0
	Low-e çift cam, hava dolgulu, 4-12-4mm		C9	1.6	0.56	0.79	38,0
	Low-e çift cam, hava dolgulu, 4-16-4mm		C10	1.3	0.56	0.79	38,5
	Low-e çift cam, argon gazı dolgulu, 4-12-4mm		C11	1.3	0.56	0.79	39,5
	Low-e çift cam, argon gazı dolgulu, 4-16-4mm		C12	1.1	0.56	0.79	40,0
	Renkli low-e çift cam, hava dolgulu, 4-12-4mm		C13	1.6	0.44	0.71	40,0
	Renkli low-e çift cam, hava dolgulu, 4-16-4mm		C14	1.3	0.44	0.71	40,5
	Renkli low-e çift cam, argon gazı dolgulu, 4-12-4mm		C15	1.3	0.44	0.71	41,5
	Renkli low-e çift cam, argon gazı dolgulu, 4-16-4mm		C16	1.1	0.44	0.71	42,0
	Üçlü cam, hava dolgulu, 4-12-4-12-4mm		C17	1.1	0.73	0.78	43,0
	Üçlü cam, hava dolgulu, 4-16-4-16-4mm		C18	1	0.73	0.78	44,0
Bina Kabuk Bileşeni	Malzeme Adı		Kod	Derinlik (m)			Maliyet (TL/m2)
GÖLGELEME (D)	Yatay gölgeleme elemanı (Sabit)		D1	0.2			30
			D2	0.3			
			D3	0.4			
			D4	0.5			
			D5	0.6			
			D6	0.7			
			D7	0.8			
			D8	0.9			
		D9	0				

4.2.3.3 Amaç Fonksiyonu Tanımlama (Isıtma ve Soğutma Enerjisi Tüketimi ve Net Bugünkü Değer Amaç Kriterleri İle) ve Ağırlıklandırma

Önerilen modelin uygulaması aşamasında çok amaçlı bir optimizasyon problemi ele alınmaktadır. Amaç fonksiyonu oluşturan amaç kriterler ise şu şekildedir:

- **Binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi** (EnergyPlus simülasyon programındaki tanımı: Radyatör ile sağlanan ısıtma enerjisi – BHE)
- **Binanın yıllık soğutma enerjisi tüketimi** (EnergyPlus simülasyon programındaki tanımı: Split klima ile sağlanan soğutma enerjisi – PTACEE)
- **Net Bugünkü Değer-NBD**

Daha önce Bölüm 3.1.3.3’de belirtildiği gibi, GenOpt optimizasyon programı, tek amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. GenOpt programı ile çok amaçlı bir optimizasyon problemi çözülmek istendiğinde ise tek bir amaç fonksiyona tüm amaç kriterlerinin yerleştirilmesi gerekmektedir.

Yukarıda belirtildiği gibi, bu çalışmada üç tane amaç kriter ele alınarak aynı anda optimize edilecektir. GenOpt programı ile bu üç amaç kriterin tek bir amaç fonksiyona yerleştirilerek çözülebilmesi için; **Ağırlıklı toplam metot (weighted-sum method)** kullanılmış ve bu doğrultuda amaç fonksiyon tanımlanmıştır.

Ağırlıklı toplam metotta temel amaç; ayırık olan amaç kriterlere katsayılar atayarak çok değişkenli toplam amaç fonksiyonunu ($F(x_1, x_2, \dots, x_k)$) minimize etmektir. Üç tane amaç kriteri olan genel bir amaç fonksiyonunun formülü şu şekildedir:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_k) = a \cdot f_1(x_1, x_2, \dots, x_k) + b \cdot f_2(x_1, x_2, \dots, x_k) + c \cdot f_3(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (4.3)$$

Burada, a, b ve c sayıları ağırlıklı toplam metoda göre her bir amaç kriterine atanan ağırlık katsayılarıdır. $f_1(x_1, x_2, \dots, x_k)$, $f_2(x_1, x_2, \dots, x_k)$, ve $f_3(x_1, x_2, \dots, x_k)$ ise sırasıyla bu çalışmada ele alınan amaç kriterler olan; binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi, yıllık soğutma enerjisi tüketimi ve NBD'yi temsil etmektedir.

Çalışmada ele alınan her bir amaç kriterinin hesaplanması ise şu şekildedir:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_k) = (BHE - BHE_{bc}) / BHE_{bc} \times 100 \quad (4.4)$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_k) = (PTACEE - PTACEE_{bc}) / PTACEE_{bc} \times 100 \quad (4.5)$$

Üçüncü ve son amaç kriter olan **Net Bugünkü Değer-NBD**, bir projenin ekonomik açıdan faydasının olup olmadığının belirlenebilmesi için kullanılan bir tekniktir (Remer ve Nieto, 1995). NBD binaların enerji performansına yönelik çalışmalarda da kullanılmıştır (Verbeeck ve Hens, 2005; Guçyeter ve Gunaydin, 2012; Gerber ve diğer., 2012). Amaç fonksiyondaki ilk iki kriter binanın ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri, amaç fonksiyona yüzde (%) cinsinden eklendiği için NBD hesaplamasının da yine yüzde (%) cinsinden eklenmesi gerekmektedir. NBD'nin genel formülü ise şu şekildedir:

$$NBD = \sum_{t=1}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} - IniInv \quad (4.6)$$

NBD formülünde, i faiz oranını, t paranın dönem numarasını/sayısını (örneğin yıllık), R_t o dönemde gerçekleşen ve enerji fiyatlarının artışına neden olan enflasyon oranını da içeren net para akışını, N ise dönem sayısını göstermektedir. Örneğin, NBD beş senelik bir dönemde hesaplanmak isteniyorsa, $N=5$, t ise ilk seneden beşinci seneye kadar olan her yılı ifade etmektedir. Amaç fonksiyondaki üçüncü kriter olan $f_3(x_1, x_2, \dots, x_k)$ başlangıç maliyetini ($IniInv$) ve NBD'yi içermektedir ve formülü aşağıda belirtilmektedir:

$$f_3(x_1, x_2, \dots, x_k) = (NBD + IniInv) / IniInv \times 100 \quad (4.7)$$

Ağırlıklı toplam metot yaklaşımıyla fonksiyondaki her bir amaç kriterine ağırlık katsayıları atanmakta ve her bir amaç kriter yüzde (%) cinsinden hesaplanmaktadır. Atanan katsayıların büyüklüğü ile bir amaç kriterin diğerlerine göre daha öncelikli konuma getirilmesi sağlanabilmektedir.

Her ne kadar amaç fonksiyonunda bir amaç kriter olarak yer almasa da, NBD hesaplamasının bir sonucu olarak yapılacak yatırımın Geri Ödeme Süresi hesaplanabilir. Geri ödeme süresi; yapılan bir yatırımdan sağlanacak yıllık net kazanç girdilerinin toplamının, kaç sene sonra bu yatırımın başlangıç maliyetine (ilk yatırım maliyeti) eşit olacağını gösteren süreyi belirtmektedir. Bu süre yatırımcı tarafından projenin başlangıcında belirlenir.

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Başlangıç Maliyeti}}{\text{Yıllık Net Kazanç Girdisi}} \quad (4.8)$$

Sonuç olarak, GenOpt programı üç amaç kriterinden oluşan tek bir amaç fonksiyonunu minimize etmeye çalışmaktadır. GenOpt programı, tanımlanan amaç fonksiyona ve bu çalışma kapsamında seçilen PSO algoritmasının ayarlarına göre optimum çözümü bulduğunda sonlanmaktadır.

4.2.4 Bina Enerji Performansını Geliştirmeye Yönelik Optimum Çözümler

4.2.4.1 Senaryo I

Bina Kabuk Bileşenlerini Seçme:

Senaryo I kapsamında enerji tasarrufları ve uygun maliyet koşullarının bir arada sağlanabildiği binanın enerji performansını geliştirmeye yönelik yapılması gereken öncelikli ya da ilk uygulama çözümlerinin tanımlanması beklenmektedir. Bu hedef doğrultusunda, Senaryo I kapsamında Tablo 4.7’de ısıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkilerine göre yapılan bina kabuk bileşen sıralamasındaki ilk dört

sıradaki bina kabuğu bileşeni seçilmiştir. Seçilen kabuk bileşenleri ve ilgili parametreleri aşağıda belirtilmektedir (Tablo 4.7):

- 1) **“Pencere-Güney Cephesi”** (GIKK ve U değerine göre); *Güney cephesindeki pencereler*
- 2) **“Gölgeleme-Güney Cephesi”** (Gölgeleme-Derinlik-Güney); *Güney cephesindeki pencerelere ait gölgeleme elemanları*
- 3) **“Pencere-Kuzey Cephesi”** (GIKK ve U değerine göre); *Kuzey cephesindeki pencereler*
- 4) **“Çatı Döşemesi”** (Çatı-YalıtK); *Çatı döşemesi üzerine yapılacak ısı yalıtımı.*

Malzeme Alternatifleri Sayısı:

Senaryo I kapsamında yukarıda belirtilen ilk dört sıradaki kabuk bileşen için optimizasyonda kullanılacak toplam malzeme alternatifi sayısı Tablo 4.9’da sunulmaktadır. Bu doğrultuda optimizasyon algoritmasının araştırma yapacağı kümenin toplam eleman sayısı ve optimizasyon sürelerine ilişkin bilgiler aşağıda Tablo 4.10’da belirtilmektedir.

Tablo 4.10 Senaryo I kapsamında gerçekleştirilecek optimizasyon için toplam malzeme alternatifi sayısı ve çözüm kümesinin büyüklüğü ve simülasyon sürelerine ilişkin bilgiler

Bina Kabuk Bileşeni	Toplam Malzeme Alternatifi Sayısı *
Pencere-Güney Cephesi	18
Gölgeleme-Güney Cephesi	9
Pencere-Kuzey Cephesi	18
Çatı Döşemesi	17
Çözüm Kümesi Toplam Eleman Sayısı (Toplam Kombinasyon Sayısı)	49572 (18²x17x9)
Kaba Kuvvet Yöntemiyle (Algoritma Olmadan) Olası Optimizasyon Süresi	2065 saat (86 gün)
Önerilen Modelde GenOpt İle Gerçekleştirilen Optimizasyon Süresi	13,5 saat

* Malzeme alternatifleri için Tablo 4.9’a bakınız.

Örnek okul binasının enerji modelinin bir adet simülasyonu yaklaşık 5 (beş) dakika sürmektedir. Ancak, Energy Plus 8.1.0 simülasyon programı ve GenOpt v3.1 optimizasyon programının paralel hesaplama özelliği sayesinde iki adet simülasyon eş zamanlı olarak yapılabilir. Bu doğrultuda, gerek kaba kuvvet yöntemiyle gerekse optimizasyon programıyla bir adet simülasyon için gerekli olan süre yarıya inmiş ve toplam 2,5 dakika sürmüştür. Çalışmada kullanılan bilgisayar; Intel Core i7 Quad Core CPU 2.4 GHz, 8 GB Ram özelliklerinde bir laptopdur.

Tablo 4.10’da belirtildiği gibi, her bir kabuk bileşeni için üretilen malzeme alternatifleri sayıları dikkate alındığında, araştırma yapılacak çözüm kümesinin toplam eleman sayısı 49572 ($18^2 \times 17 \times 9$) olarak hesaplanmıştır. Her bir simülasyon 2,5 dakika sürdüğünden, herhangi bir algoritma kullanılmadan kaba-kuvvet yöntemiyle (brute-force approach) tek tek simülasyon yapılarak çözüm kümesindeki her bir alternatif çözümün denenmesi için 2065 saat veya yaklaşık 3 ay gibi bir süre gerekecektir. Buna karşılık, önerilen modelin üçüncü aşamasında GenOpt ile Senaryo I kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon toplam 13,5 saat sürmüştür (Tablo 4.10). Bu aşamada, optimizasyon algoritmasının kullanılmasının en önemli avantajı daha az hesaplama süresiyle optimum çözümün bulunabilmesidir.

Amaç Kriterlere Ağırlık Katsayıları Atama:

Optimizasyon sürecini başlatmadan önce tanımlanan amaç fonksiyondaki amaç kriterlere ağırlık katsayılarının atanması gerekmektedir. Bu katsayıların belirlenmesi aşamasında, her bir amaç kriterinden eşit ağırlıklı ve dengeli kazanımlar elde edilebilmesi için, GenOpt programı başlangıçta birkaç defa deneme amaçlı çalıştırılmıştır. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi, kWh cinsinden binanın soğutması için harcanan elektrik enerjisinin yaklaşık olarak beş katıdır (bkz. Bölüm 4.2.1.1). Dolayısıyla, ısıtma enerjisinden sağlanacak %1’lik bir kazanç değeri, soğutma enerjisinden sağlanacak %5’lik bir değere eşit olacaktır. Binanın yıllık ısıtma ve soğutma enerjilerinden yakın oranlarda tasarruf sağlamak ve aynı zamanda NBD’den de bu tasarruf yüzdesine yakın bir kazanç elde edebilmek için yapılan bazı denemeler

sonrasında amaç fonksiyonu oluşturan amaç kriterlerine aşağıda belirtilen katsayıların atanmasına karar verilmiştir:

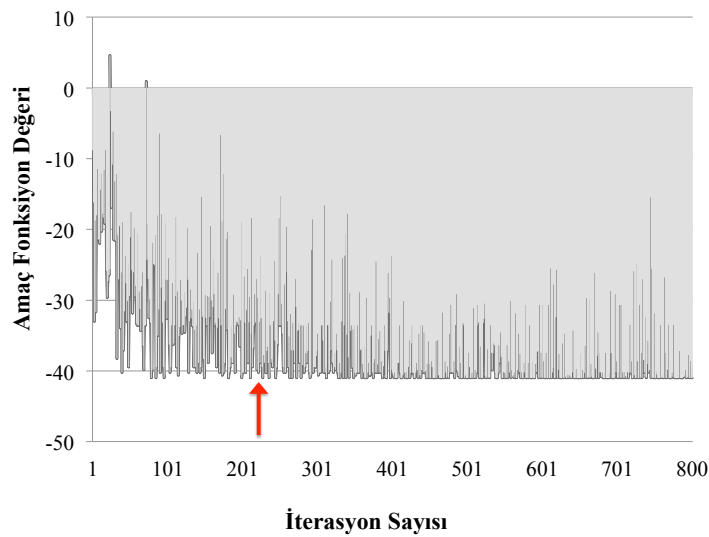
- Binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi ($f_1(x_1, x_2, \dots, x_k)$) için $a=5$
- Binanın yıllık soğutma enerjisi tüketimi, ($f_2(x_1, x_2, \dots, x_k)$) için $b=1$
- NBD, ($f_3(x_1, x_2, \dots, x_k)$) için $c=-0,05$

Uygulamada, NBD'nin hesaplanması 10 senelik bir dönem için yapılmıştır. Faiz oranı %4,5 ve enflasyon oranı %10 alınmıştır.

Optimizasyon Sonuçları:

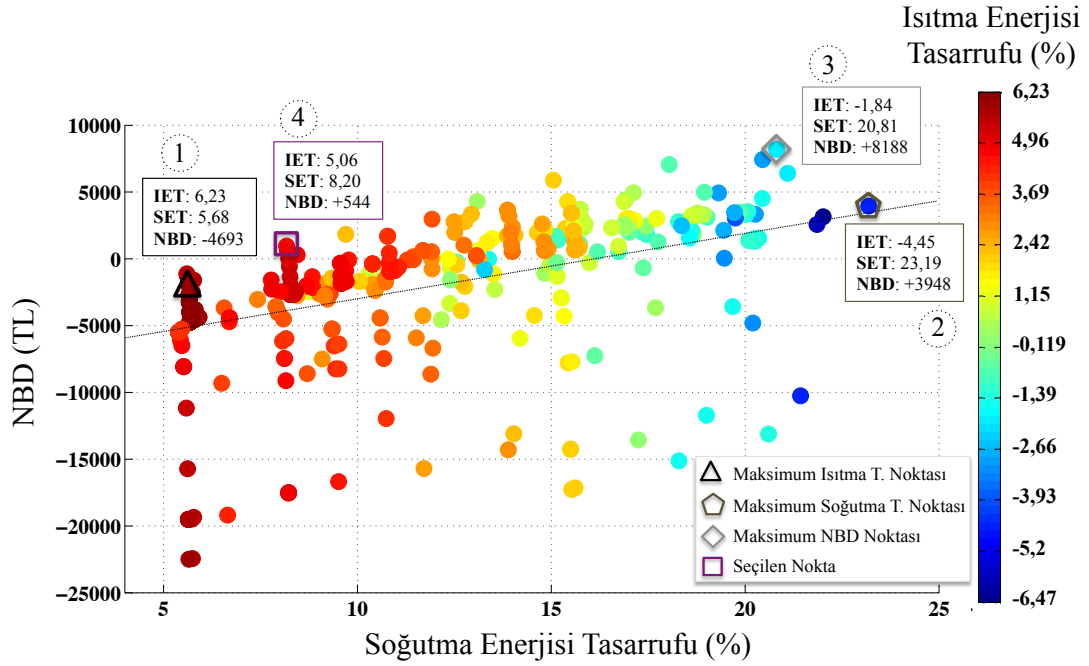
GenOpt içindeki PSO algoritmasına yönelik yapılan ayarlamalar doğrultusunda jenerasyon sayısı 25 ile sınırlandırılmıştır ve popülasyonun boyutu 32 olarak atanmıştır. Toplam optimizasyon süresi daha önce de belirtildiği gibi 13,5 saat dir.

GenOpt programı ile optimizasyon algoritması, tanımlanan bu amaç fonksiyon için çalıştırıldığında, 8-10. jenerasyonda sonuçların yakınsama yaptığı görülmektedir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 Amaç fonksiyonunun GenOpt ile hesaplanmasıyla ortaya çıkan değeri. 8 ile 10. jenerasyonlar sırasında fonksiyon yakınsamaya başlamıştır

Senaryo I kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gösterilmektedir.



Şekil 4.21 Senaryo I kapsamında gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen verilerin doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte NBD sol dikey eksen üzerinde; Soğutma Enerjisi Tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; Isıtma Enerjisi Tasarrufu (IET) ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Siyah renkteki eğim çizgisi NBD’nin soğutma enerjisinden sağlanacak yıllık tasarruf miktarıyla ilişkisini göstermektedir.

Şekil 4.21 incelendiğinde, y ekseninde 10 senelik bir dönem için hesaplanan NBD değerleri gösterilmektedir. Yatay eksen olan x ekseninde, binanın soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf gösterilirken, binanın ısıtma enerjisinden sağlanacak tasarruf yüzdeleri ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir.

Elde edilen optimizasyon sonuçları arasından dört farklı çözüm alternatifini işaret eden 1, 2, 3 ve 4 olmak üzere dört ayrı nokta seçilerek şekil üzerinde işaretlenmiştir. Bu noktalar sırasıyla; 1) En yüksek ısıtma enerjisi tasarrufu; 2) En yüksek soğutma enerjisi tasarrufu; 3) En yüksek NBD ve 4) Çalışmada Senaryo I kapsamında optimum çözüm olarak önerilen sonucu göstermektedir (Şekil 4.21).

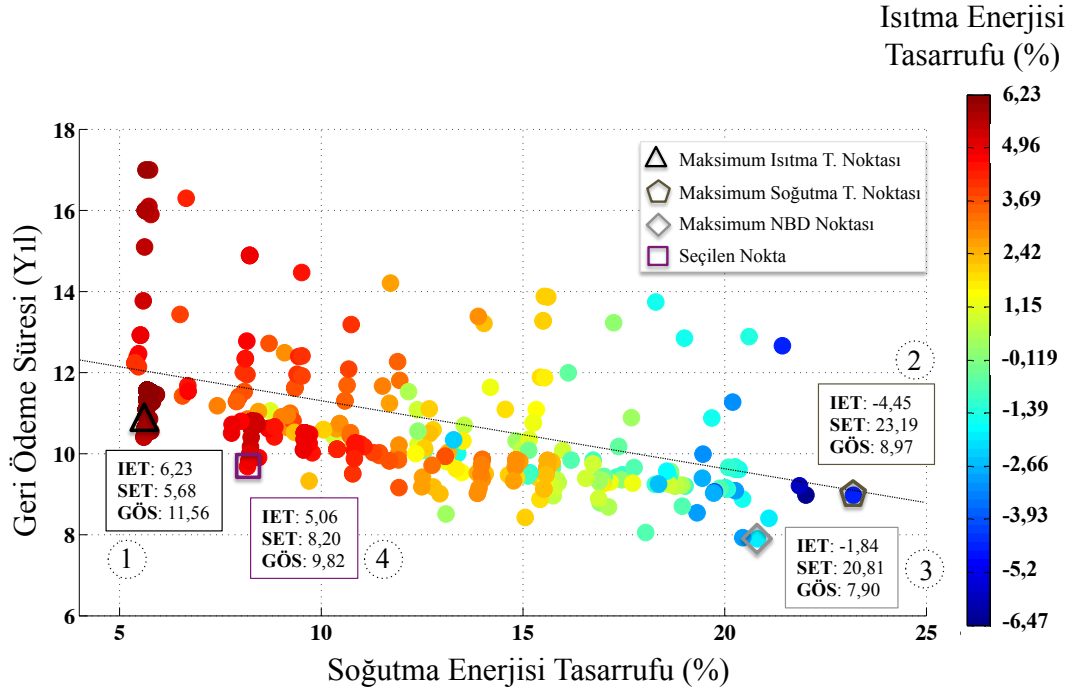
Elde edilen sonuçlara göre taban modeldeki değere kıyasla maksimum ısıtma enerjisi kazancı % 6,23 (1 numaralı nokta) iken o noktadaki soğutma enerjisi kazancı %5,68 dir. Aynı noktada 10 senelik periyotta NBD değerinde ise -4693 TL'dir ve kayıp söz konusudur (Şekil 4.21).

İki numaralı noktaya bakıldığında; %23,19 değeriyle maksimum soğutma enerjisi kazancının olduğu görülmektedir. Aynı noktada %4,45 ısıtma enerjisi kaybı (ısıtma enerjisi tüketiminde artış) söz konusu iken, 10 senelik periyotta NBD ise 3948 TL kazanç söz konusudur.

Üç numaralı noktaya bakıldığında; 10 senelik periyotta maksimum NBD değerinin ya da kazancının 8188 TL olduğu görülmektedir. Bu noktada ısıtma enerjisi tüketimi ise taban değere göre %1,84 artmakta yani kazanç değil kayıp söz konusu olmaktadır. Aynı noktada soğutma enerjisi kazancı ya da diğer bir ifadeyle soğutma enerjisi tüketimindeki azalma ise %20,81 dir.

Her bir amaç kriterinin maksimum değerleri aldıkları bu üç noktanın dışında, her bir amaç kriterinin pozitif olacağı bir nokta seçilmiştir (4 numaralı nokta). Bu noktada ısıtma enerjisi kazancı % 5,06 ve soğutma enerjisi kazancı % 8,20 dir. Bu noktada 10 yıllık periyot sonucunda NBD değeri ise 544 TL dir.

Binanın enerji etkinliğine yönelik çözüm alternatifleri önerilirken, bakılması gereken diğer bir önemli kriter geri ödeme süreleridir. Çalışmada, NBD değeri 10 senelik bir periyotta optimize edilmiş olsa da NBD değerleri eksi olan, yani geri ödeme süresi 10 senenin üzerinde olan sonuçlar için 20 seneye kadar olan zaman diliminde her yıl için sağlanacak enerji tasarruf miktarları belirlenerek bu sonuçların geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Dolayısıyla, NBD değeri 10 senelik bir periyotta hesaplanmış olsa da, optimizasyon ile elde edilen tüm sonuçların geri ödeme süreleri de hesaplanmıştır. Geri ödeme sürelerinin ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruflarıyla ilişkisi Şekil 4.22'de gösterilmektedir.



Şekil 4.22 Senaryo I kapsamında gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümlerin geri ödeme sürelerinin ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruflarıyla gösterilmesi. Grafikte Geri Ödeme Süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; Soğutma Enerjisi Tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; Isıtma Enerjisi Tasarrufu (IET) ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Siyah renkteki eğim çizgisi geri ödeme sürelerinin soğutma enerjisinden sağlanacak yıllık tasarruf miktarıyla ilişkisini göstermektedir.

Şekil 4.22 incelendiğinde, PSO algoritması NBD kriterini 10 senelik periyotta optimize etmeye çalıştığı için, elde edilen sonuçlardaki pek çok noktada geri ödeme süresinin yaklaşık 10 sene olduğu görülmektedir. Tüm noktaların geri ödeme süreleri ise 5 yıldan fazladır. Uzun geri ödeme sürelerinin istenmediği durumlarda (örneğin beş yıldan daha az), Senaryo I kapsamında elde edilen tüm çözümlerin yetersiz olduğu söylenebilir. Ancak, geri ödeme süreleri için maksimum 15 yıllık bir periyodun uygun olduğu belirtilmektedir (Giuliano ve Sarto, 2013). Bu doğrultuda, en fazla 15 yıllık bir geri ödeme süresi koşulu olduğunda, hemen hemen tüm çözüm alternatiflerinin uygun ya da kabul edilebilir olduğu söylenebilir.

Optimizasyon sonuçlarının sadece nümerik değerler vermediği, aynı zamanda amaç kriterler arasındaki ilişkileri de gösterdiği söylenebilir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'ye tekrar bakıldığında, soğutma enerjisinden sağlanan kazanç ile NBD kriteri

arasında pozitif, geri ödeme süreleriyle ise negatif bir korelasyonun olduğu açıkça görülmektedir. Isıtma enerjisinden sağlanan kazanç durumunun ise soğutma enerjisinden sağlanan kazanca göre farklılık gösterdiği izlenebilmektedir. Bu farklılık, ısıtma enerjisinden sağlanan kazanç arttıkça NBD değerlerinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu yaklaşımla, soğutma enerjisinden maksimum kazancın sağlandığı noktada, ısıtma enerjisinden tam tersine bir durumla tasarruf sağlanamadığı, bu nedenle o nokta NBD için en yüksek nokta olmasa bile ona yakın bir sonucun elde edildiği görülmektedir. Kısacası, ısıtma enerjisinden sağlanan kazanç değeri arttıkça NBD değeri azalmakta ve soğutma enerjisi tüketimi artmaktadır. Ayrıca binanın ısıtma enerjisi tüketimi ile soğutma enerjisi tüketimi arasında ters (negatif) bir ilişkinin olduğu x eksenini doğrultusunda meydana gelen veri noktalarındaki renk değişimlerinden açıkça izlenebilmektedir.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 üzerinde seçilen dört farklı çözüm noktası ve bu noktalara yönelik bilgiler Tablo 4.11’de özetlenmektedir.

Tablo 4.11 incelendiğinde, 1 numaralı veri noktası, amaç fonksiyondaki amaç kriterler için atanan ağırlık katsayılarına göre optimizasyon algoritmasının optimum sonuç olarak önerdiği ve en yüksek ısıtma enerjisi kazanç değerine sahip olan noktadır. Bu alternatifte B7 kodlu 200 mm kalınlığında ve $\lambda=0,040$ değerindeki cam yünü ısı yalıtım malzemesinin çatı döşemesine uygulanması seçilmiştir. Kuzey ve güney yönlerine bakan pencerelere U değeri=1 ve güneş ısı kazanç katsayısı=0,73 olan C18 kodlu üçlü camlı pencereler atanmıştır. Ayrıca, güney yönüne bakan pencerelere gölgeleme elemanı ise eklenmemiştir (bkz. Tablo 4.9 D9 kodlu alternatif). Bu sonuçlara göre tüm alternatifler arasında ısıtma enerjisinden sağlanan en yüksek kazanç (%6,23) bu çözüm alternatifiyle sağlanmaktadır. Bu alternatifin uygulanmasıyla elde edilecek soğutma yükü kazancı %5,68 iken 10 senelik NBD değerinde ise kazanç söz konusu değildir (NBD= -4693 TL). Diğer bir ifadeyle, bu alternatifin geri ödeme süresi 10 seneden fazladır. NBD’nin pozitif olması, 10 sene sonra kazançların başlangıç maliyetinden büyük, negatif olmasıysa bu maliyeti karşılayamamış olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.11 Senaryo I kapsamında elde edilen optimizasyon sonuçları arasından Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 üzerinde işaretlenen veri noktaları ve noktalara ilişkin sonuçlar

Veri Noktaları *	Açıklama	Yıllık Isıtma Enerjisi Kazancı (%)	Yıllık Soğutma Enerjisi Kazancı (%)	NBD (TL) **	Geri Ödeme Süresi (Yıl)	Bina Kabuğu Bileşeninde Kullanılabilecek Malzemelerin Kodları ***			
						Çatı	Pencere (Kuzey Yönü)	Pencere (Güney Yönü)	Gölgeleme (Güney yönü)
1	Maksimum Isıtma Enerjisi Kazancı	6,23	5,68	-4693	11,56	B7	C18	C18	D9
2	Maksimum Soğutma Enerjisi Kazancı	-4,45	23,19	+3948	8,97	B7	C15	C3	D8
3	Maksimum NBD	-1,84	20,81	+8188	7,90	B2	C16	C15	D4
4	Seçilen Çözüm	5,06	8,20	+544	9,82	B2	C18	C18	D1

* Seçilen 4 veri noktası Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 üzerinde belirtilmiştir.

** NBD hesaplaması 10 sene için yapılmıştır. Faiz oranı %4,5 ve Enflasyon Oranı %10 alınmıştır.

*** Malzeme alternatif kodlarının özellikleri için Tablo 4.9'a bakınız.

Tablo 4.11’de 2 numaralı veri noktası, elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre en yüksek soğutma enerjisi kazanç değerine sahiptir. Bu sonuca göre çatı döşemesi için 200 mm kalınlığında ve $\lambda=0,040$ değerindeki B7 kodlu cam yünü ısı yalıtım malzemesi seçilmiştir. Kuzey yönüne bakan pencerelere U değeri=2,6 ve güneş ısısı kazanç katsayısı=0,73 olan C15 kodlu, güney yönüne bakan pencerelere ise U değeri=1,5 ve güneş ısısı kazanç katsayısı=0,73 olan C3 kodlu renkli tek camlı pencereler atanmıştır. Ayrıca güneye bakan pencerelere 0,9m derinliğinde gölgeleme elemanı (D8 kodlu) atanmıştır. Bu çözüm alternatifleri uygulandığında, binanın soğutma yükü yıllık %23,19 azalmakta, yıllık ısıtma enerjisi yükü ise ters orantılı olarak artmaktadır (-%4,45). Bu sonucun oluşmasının temel nedeni Şekil 4.21 ve 4.22’de açıkça görülen binanın ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri arasındaki belirgin ters ilişkidir. Yani bir kriterden kazanmak diğer bir kriterden kaybetmeye, diğer bir ifadeyle amaç kriterler arasında ödünleşime (trade-off) sebep olmaktadır. Bu alternatifte 10 senelik NBD değeri ise pozitifdir (3948 TL) ve geri ödeme süresi 8,97 senedir.

Tablo 4.11’de 3 numaralı veri noktası ise maksimum NBD değerinin olduğu noktadır. Bu sonuca göre çatı döşemesi için 100 mm kalınlığında ve $\lambda=0,040$ değerindeki B2 kodlu cam yünü ısı yalıtım malzemesi seçilmiştir. Kuzey yönüne bakan pencerelere U değeri=1,1 ve güneş ısısı kazanç katsayısı=0,44 olan C16 kodlu renkli low-e çift camlı, güney yönüne bakan pencerelere ise U değeri=1,3 ve güneş ısısı kazanç katsayısı=0,44 olan C15 kodlu renkli argon dolgulu low-e çift camlı pencereler atanmıştır. Güneye bakan pencerelere ise 0,5m derinliğinde D4 kodlu gölgeleme elemanı atanmıştır. Bu çözüm önerisi ile 10 senelik NBD değeri 8188 TL dir. Bu durumda yıllık soğutma enerjisinden sağlanan kazanç %20,81 iken yıllık ısıtma enerjisi tüketimi de %1,84 artmaktadır, yani ısıtma enerjisinden kazanç söz konusu değildir.

Daha önce de belirtildiği gibi, Senaryo I kapsamında uygun maliyet, geri ödeme süresi ve enerji kazançlarının bir arada sağlanabildiği öncelikli uygulamaların tanımlanması hedeflenmişti. Bu hedef doğrultusunda tüm bu kriteri karşılayan en iyi çözümün Tablo 4.11’deki 4 numaralı nokta olduğu saptanmıştır. Diğer bir ifadeyle, 4

numaralı nokta, Senaryo I kapsamında, optimum çözüm olarak önerilmektedir. Bu nokta her bir amaç kriteri için dengeli bir dağılımı içermektedir. Bu noktadaki sonuca göre, çatı döşemesi için B2 kodlu 100 mm kalınlığında ve $\lambda=0,040$ değerindeki cam yünü ısı yalıtım malzemesi seçilmiştir. Kuzey ve güney yönlerine bakan pencerelere U değeri=1 ve güneş ısı kazanç katsayısı=0,73 olan C18 kodlu üçlü camlı pencereler atanmıştır. Güneye bakan pencerelere ise 0,2m derinliğinde D1 kodlu gölgeleme elemanı atanmıştır. Bu çözüm önerisi ile 10 senelik NBD değeri 544 TL dir. Bu durumda yıllık soğutma enerjisi kazancı %8,20 ve yıllık ısıtma enerjisi kazancı ise %5,06 dır (Tablo 4.11).

Senaryo I kapsamında, sadece 4 adet bina kabuk bileşeni ile gerçekleştirilen optimizasyonda makul görülen NBD değeri 10 senedir. Optimizasyon sonuçlarına göre NBD değeri pozitif olan çözümlerin, tüm çözüm kümesinin sadece küçük bir kısmını oluşturduğu görülmektedir. Uygulamaların kapsamı genişletilerek daha fazla bina kabuğu bileşeni ile gerçekleştirilecek bundan sonraki optimizasyonlarda, 10 senelik NBD'yi sağlayacak çözümlerin daha da azalacağı öngörüldüğünden bu aşamadan sonra elde edilecek çözüm alternatifleri için optimizasyon sonuçlarında NBD yerine geri ödeme süresi maliyeti tanımlayan kriter olarak kullanılacaktır.

Senaryo I'de en az uygulamayla, tasarım aşamasında ya da mevcut olan bir binada maksimum düzeyde enerji tasarrufu nasıl sağlanabilir sorusuna yanıt aranmıştır. Simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yöntemi Senaryo I'de sadece ilk dört bina kabuğu bileşeninin girdi parametresi olarak kullanılması ile uygulanmıştır ve kısa sürede yakınsama sağlanmıştır. Optimizasyon uygulaması ayrıca, amaç kriterler arasındaki ödünleşimleri (trade-off) tanımlamada ve optimum çözüm noktalarını bulmada başarılı olmuştur.

Binanın dikdörtgen geometrisi, kuzey ve güney cephelerinin yüzey alanlarının diğer cephelere oranla daha büyük olması ve bu cephelerdeki bina kabuk bileşenlerinin en etkin parametreler olması nedeniyle, başlangıç ya da ilk yatırım maliyeti yüksek çıkmıştır. Ancak bina geometrisinin, ısıtma ve soğutma enerjilerinden sağlanan kazanç değerlerinin de daha yüksek olmasına olanak

sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca sadece ilk dört bina kabuk bileşeninin optimizasyon sürecinde kullanılmasının en önemli dezavantajı, sağlanan enerji tasarrufu özellikle ısıtma enerjisi yüzde değerlerinin çok yüksek olmamasıdır. Dolayısıyla, enerji etkin iyileştirme uygulaması sayısı arttıkça hem ısıtma hem de soğutma enerjileri tasarruf yüzde değerleri de artacaktır.

4.2.4.2 Senaryo II

Bina Kabuk Bileşenlerini Seçme:

Senaryo II kapsamında, binanın enerji performansını geliştirmeye yönelik önerilecek uygulama çözümlerinin kapsamının genişletilmesi ya da daraltılmasıyla elde edilecek maksimum enerji tasarruflarının, NBD ve geri ödeme sürelerinin ne şekilde değişeceğinin proje sahiplerine gösterilmesi amaçlanmaktadır. Maksimum enerji tasarruflarını sağlayan çözümlerin yanı sıra; uygun geri ödeme süresi ve enerji kazançlarının bir arada sağlanabildiği uygulamaların tanımlanması da hedeflenmektedir.

Yukarıda belirtilen hedefler doğrultusunda, proje kapsamının genişletilmesi işleminin, her seferinde iki adet parametre eklenmesiyle kümülatif olarak parametrelerin gruplanması yoluyla gerçekleştirilebileceği düşünülmüştür. Diğer bir ifadeyle, “Senaryo II” kapsamında, Tablo 4.7’deki ısıtma enerjisi tüketimi üzerinde etkili bina kabuk bileşenlerine ait önem sıralaması dikkate alınarak ilk altı, sekiz, on, on iki ve on dört bina kabuk bileşeninin yer aldığı grupların oluşturulması ve optimizasyon sürecinin her bir grup için tekrarlanması düşünülmüştür.

“**Senaryo II**” kapsamında toplam beş ayrı grup (ilk altı, sekiz, on, on iki ve on dört bina kabuğu bileşenlerinin oluşturduğu gruplar ile) altında seçilen bina kabuk bileşenleri Tablo 4.12’de sunulmaktadır. Bu doğrultuda, her grup için ayrı ayrı optimizasyon yapılarak sonuçlar elde edilecektir.

Tablo 4.12 Senaryo II kapsamında beş ayrı grupta seçilen bina kabuk bileşenleri

Önem Sırası	Isıtma Enerjisi Tüketimi Üzerinde Etkili Olan Bina Kabuk Bileşeni	Senaryo II Kapsamında Seçilen Kabuk Bileşenlerini İçeren Gruplar				
1.	Pencere-Güney Cephesi	1. Grup	2. Grup	3. Grup	4. Grup	5. Grup
2.	Gölgeleme-Güney Cephesi					
3.	Pencere-Kuzey Cephesi					
4.	Çatı Döşemesi					
5.	Dış Duvar-Batı Cephesi					
6.	Zemin Döşemesi	1. Grup	2. Grup	3. Grup	4. Grup	5. Grup
7.	Pencere-Doğu Cephesi					
8.	Dış Duvar-Kuzey Cephesi					
9.	Dış Duvar-Doğu Cephesi					
10.	Gölgeleme-Doğu Cephesi					
11.	Pencere-Batı Cephesi	1. Grup	2. Grup	3. Grup	4. Grup	5. Grup
12.	Gölgeleme-Kuzey Cephesi					
13.	Gölgeleme-Batı Cephesi					
14.	Dış Duvar-Güney Cephesi					

Malzeme Alternatifleri Sayısı:

Senaryo II kapsamında yukarıda belirtilen beş farklı gruptaki kabuk bileşenleri için gerçekleştirilecek optimizasyonda, optimizasyon algoritmasının araştırma yapacağı kümenin toplam eleman sayısı aşağıda Tablo 4.13'te belirtilmektedir. Tablo 4.13 incelendiğinde, en fazla eleman sayısına sahip çözüm kümesi, 14 tane bina kabuğu bileşeni ile yapılacak son grubun optimizasyonunda oluşacaktır. Bu optimizasyonda oluşacak çözüm kümesinin eleman sayısı yaklaşık 38 katrilyon ($24^4 \times 18^4 \times 17 \times 10 \times 9^4 = 3,884668342566912 \times 10^{16}$) olarak hesaplanmıştır. Her hangi bir algoritma kullanılmadan kaba-kuvvet yöntemiyle bu büyüklükte bir çözüm kümesindeki her bir alternatifin simülasyonunun yapılması gerekli olan süre açısından yapılabilir olarak görülmemektedir. Önerilen modelde optimizasyon algoritmasının kullanılmış olması tüm çözüm kümesinde çok daha az sürede araştırma yapmayı ve optimum çözümleri bulmayı olanaklı hale getirmiştir.

Tablo 4.13 Senaryo II kapsamında beş ayrı grup için gerçekleştirilecek optimizasyonlardaki toplam malzeme alternatifi sayısı ve optimizasyonların çözüm kümesinin büyüklüğü ve simülasyon sürelerine ilişkin bilgiler

Önem Sırası	Isıtma Enerjisi Tüketimi Üzerinde Etkili Olan Bina Kabuk Bileşeni	Senaryo II Kapsamındaki Beş Ayrı Grupta Ele Alınan Toplam Malzeme Alternatifi Sayısı*				
		1. Grup	2. Grup	3. Grup	4. Grup	5. Grup
1	Pencere-Güney Cephesi	18	18	18	18	18
2	Gölgeleme-Güney Cephesi	9	9	9	9	9
3	Pencere-Kuzey Cephesi	18	18	18	18	18
4	Çatı Döşemesi	17	17	17	17	17
5	Dış Duvar-Batı Cephesi	24	24	24	24	24
6	Zemin Döşemesi	10	10	10	10	10
7	Pencere-Doğu Cephesi	-	18	18	18	18
8	Dış Duvar-Kuzey Cephesi	-	24	24	24	24
9	Dış Duvar-Doğu Cephesi	-	-	24	24	24
10	Gölgeleme-Doğu Cephesi	-	-	9	9	9
11	Pencere-Batı Cephesi	-	-	-	18	18
12	Gölgeleme-Kuzey Cephesi	-	-	-	9	9
13	Gölgeleme-Batı Cephesi	-	-	-	-	9
14	Dış Duvar-Güney Cephesi	-	-	-	-	24
Çözüm Kümesi Toplam Eleman Sayısı (Toplam Kombinasyon Sayısı)		11897280 ($18^2 \times 17 \times 9 \times 24 \times 10$)	5139625000 ($18^3 \times 17 \times 9 \times 24^2 \times 10$)	1110158991360 ($18^3 \times 17 \times 9^2 \times 24^3 \times 10$)	179845756600320 ($18^4 \times 17 \times 9^3 \times 24^3 \times 10$)	3884668342566912x10¹⁶ ($18^4 \times 17 \times 9^4 \times 24^4 \times 10$)
Kaba Kuvvet Yöntemiyle (Algoritma Olmadan) Olası Optimizasyon Süresi		> 50 sene	> 50 sene	> 50 sene	> 50 sene	> 50 sene
Önerilen Model İle Gerçekleştirilen Optimizasyon Süresi		26,5 saat	26,5 saat	33 saat	33,3 saat	41 saat

* Toplam malzeme alternatif sayıları için Tablo 4.9'a bakınız.

Amaç Kriterlere Ağırlık Katsayıları Atama:

Senaryo II kapsamında, amaç fonksiyonu oluşturan amaç kriterlerine aşağıda belirtilen katsayıların atanmasına karar verilmiştir:

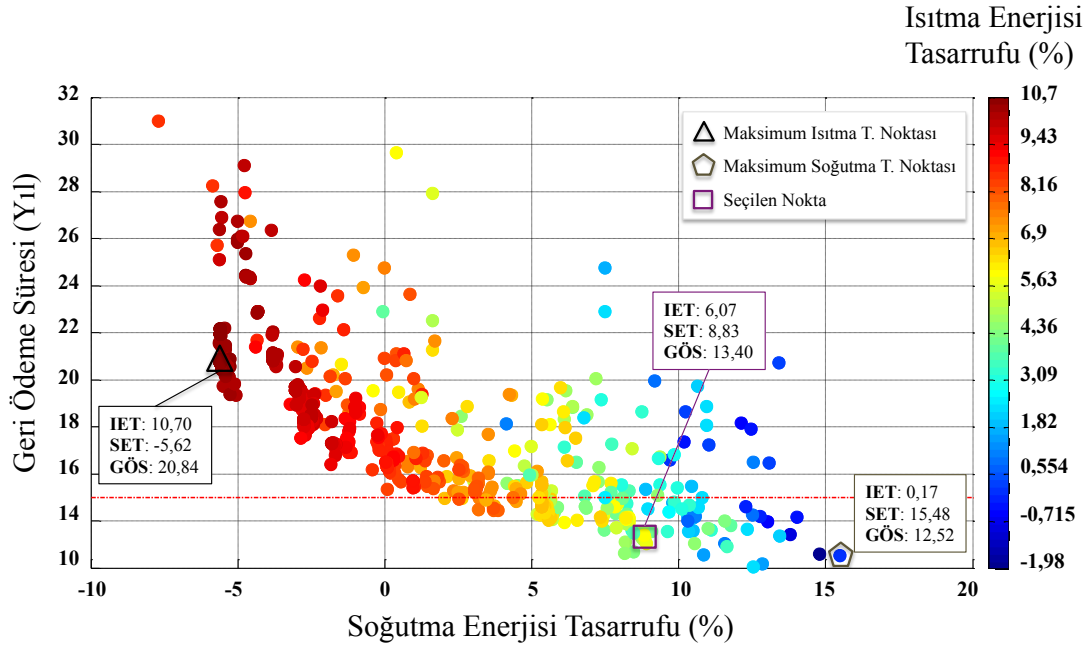
- Binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi ($f_1(x_1, x_2, \dots, x_k)$) için $a=5$
- Binanın yıllık soğutma enerjisi tüketimi, ($f_2(x_1, x_2, \dots, x_k)$) için $b=1$
- NBD, ($f_3(x_1, x_2, \dots, x_k)$) için $c=-0,05$

Uygulamada, NBD'nin hesaplanması 10 senelik bir dönem için yapılmıştır. Faiz oranı %4,5 ve enflasyon oranı %10 alınmıştır.

Optimizasyon Sonuçları:

1.Grup (İlk 6 Kabuk Bileşeni) İle Yapılan Optimizasyon Sonucu

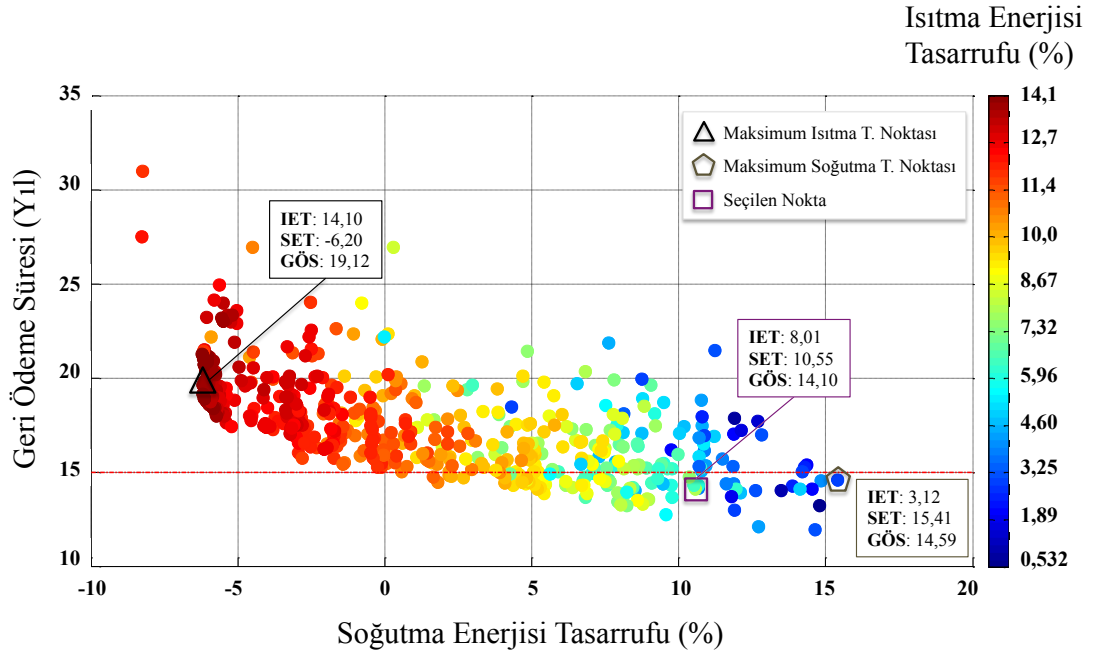
Tablo 4.12'deki 1. Grup için gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen ısıtma ve soğutma enerjisinden sağlanan tasarruf miktarları ve geri ödeme sürelerini kapsayan bir grafik çizilmiştir (Şekil 4.23). Elde edilen sonuçlara göre, maksimum ısıtma enerjisi tasarruf miktarı %10,70; maksimum soğutma enerjisi tasarruf miktarı %15,48; ve elde edilen en düşük geri ödeme süresi ise 12,04 senedir. Isıtma enerjisinden sağlanacak yıllık tasarruf miktarının, soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarıyla; soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarının ise geri ödeme süresiyle olan ters orantısı Şekil 4.23'de açıkça görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, ısıtma enerjisi tasarruflarının hem soğutma enerjisi tasarruflarıyla hem de projenin geri ödeme süresiyle ve dolayısıyla NBD arasında ödünleşimler mevcuttur. Ancak soğutma enerjisi tasarrufuyla geri ödeme süresi arasında böyle bir ödünleşim söz konusu değildir. Şekil 4.23 üzerindeki kırmızı renkteki yatay çizgi ise, 15 senenin altında geri ödeme sürelerine sahip olan çözüm alternatiflerini belirtmektedir.



Şekil 4.23 Senaryo II kapsamında ilk 6 bina kabuk bileşeniyle (1. Grup) gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte Geri Ödeme Süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; Soğutma Enerjisi Tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; Isıtma Enerjisi Tasarrufu (IET) yüzdesi ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Kırmızı renkteki yatay çizgi 15 sene olan geri ödeme süresini göstermektedir.

2. Grup (İlk 8 Kabuk Bileşeni) İle Yapılan Optimizasyon Sonucu

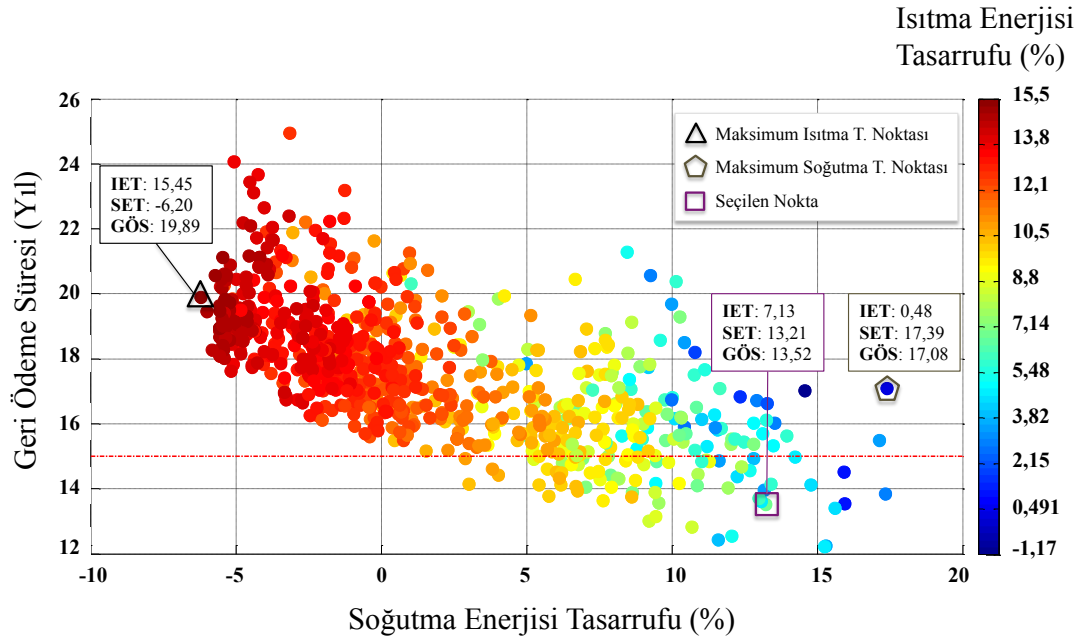
İkinci olarak, ilk sekiz sırada bulunan 2. Grup bina kabuğu bileşenleri kullanılarak optimizasyon yapılacaktır (bkz. Tablo 4.12). Gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda ısıtma ve soğutma enerjisinden sağlanan tasarruf miktarları ve geri ödeme sürelerini gösteren grafik Şekil 4.24'te izlenebilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, maksimum ısıtma enerjisi tasarruf miktarı %14,10; maksimum soğutma enerjisi tasarruf miktarı %15,41; ve elde edilen en düşük geri ödeme süresi ise 11,96 senedir. Isıtma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarının, soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarıyla; soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarının ise geri ödeme süresiyle olan ters orantısı Şekil 4.24'de açıkça görülmektedir. Şekil üzerindeki kırmızı renkteki yatay çizgi 15 senenin altında geri ödeme sürelerine sahip çözüm alternatiflerini belirtmektedir.



Şekil 4.24 Senaryo II kapsamında ilk 8 bina kabuk bileşeniyle (2. Grup) gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte Geri Ödeme Süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; Soğutma Enerjisi Tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; Isıtma Enerjisi Tasarrufu (IET) yüzdesi ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Kırmızı renkteki yatay çizgi 15 sene olan geri ödeme süresini göstermektedir.

3. Grup (İlk 10 Kabuk Bileşeni) İle Yapılan Optimizasyon Sonucu

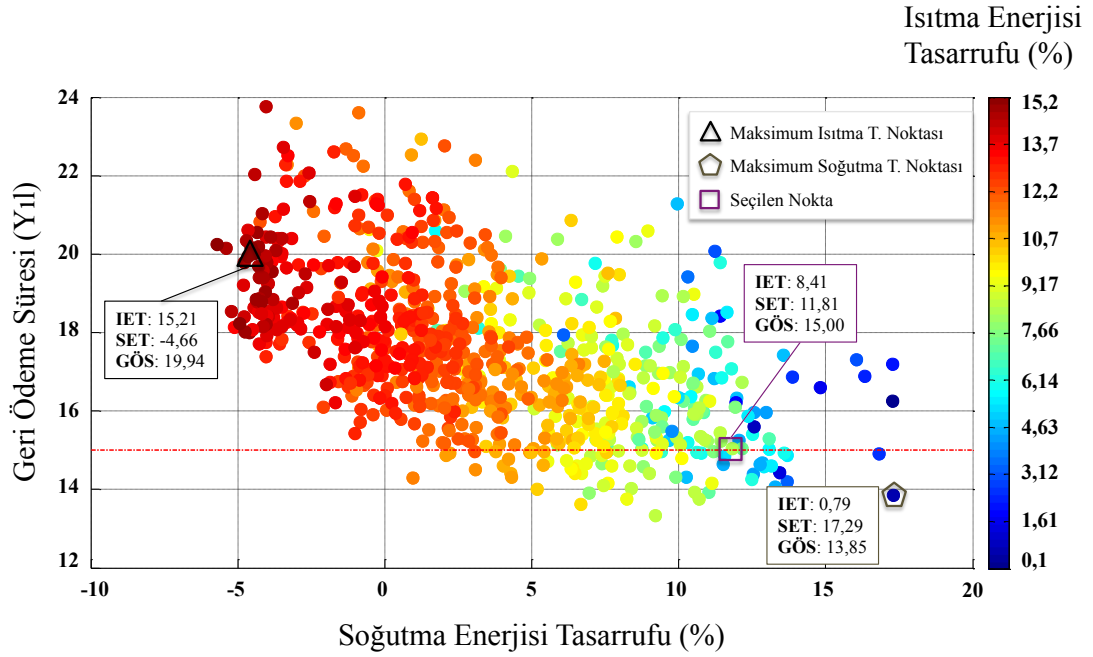
Üçüncü olarak, ilk on sırada bulunan bina kabuğu bileşenleri kullanılarak optimizasyon yapılacaktır (bkz. Tablo 4.12). Gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen ısıtma ve soğutma enerjisinden sağlanan tasarruf miktarları ve geri ödeme sürelerini kapsayan bir grafik çizilmiştir (Şekil 4.25). Elde edilen sonuçlara göre, maksimum ısıtma enerjisi tasarruf miktarı %15,45; maksimum soğutma enerjisi tasarruf miktarı %17,39; ve elde edilen en düşük geri ödeme süresi ise 12,23 senedir. Isıtma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarı ile soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarının; soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarı ile geri ödeme süresi arasında oluşan ters orantılı ilişki Şekil 4.25'te görülmektedir.



Şekil 4.25 Senaryo II kapsamında ilk 10 bina kabuk bileşeniyle (3. Grup) gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte Geri Ödeme Süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; Soğutma Enerjisi Tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; Isıtma Enerjisi Tasarrufu (IET) yüzdesi ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Kırmızı renkteki yatay çizgi 15 sene olan geri ödeme süresini göstermektedir.

4. Grup (İlk 12 Kabuk Bileşeni) İle Yapılan Optimizasyon Sonucu

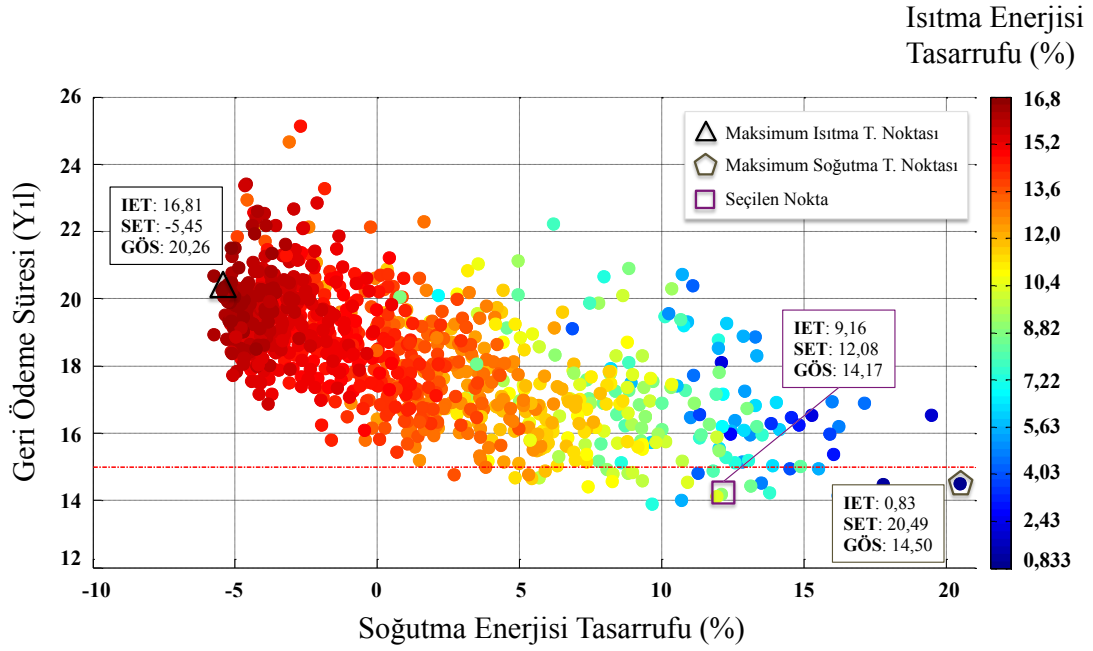
Dördüncü olarak, ilk on iki sırada bulunan bina kabuğu bileşenleri kullanılarak optimizasyon yapılacaktır (bkz. Tablo 4.12). Gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen ısıtma ve soğutma enerjisinden sağlanan tasarruf miktarları ve geri ödeme sürelerini kapsayan bir grafik çizilmiştir (Şekil 4.26). Elde edilen sonuçlara göre maksimum ısıtma enerjisi tasarruf miktarı %15,21; maksimum soğutma enerjisi tasarruf miktarı %17,29; ve elde edilen en düşük geri ödeme süresi ise 12,80 senedir. Isıtma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarının soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarıyla; soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarının ise geri ödeme süresiyle olan ters orantısı Şekil 4.26’da görülmektedir.



Şekil 4.26 Senaryo II kapsamında ilk 12 bina kabuk bileşeniyle (4. Grup) gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte Geri Ödeme Süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; Soğutma Enerjisi Tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; Isıtma Enerjisi Tasarrufu (IET) yüzdesi ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Kırmızı renkteki yatay çizgi 15 sene olan geri ödeme süresini göstermektedir.

5. Grup (14 Kabuk Bileşeni) İle Yapılan Optimizasyon Sonucu

Son olarak, on dört bina kabuğu bileşeninin hepsi kullanılarak optimizasyon yapılacaktır (bkz. Tablo 4.12). Gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen ısıtma ve soğutma enerjisinden sağlanan tasarruf miktarları ve geri ödeme sürelerini kapsayan grafik Şekil 4.27’de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, maksimum ısıtma enerjisi tasarruf miktarı %16,81; maksimum soğutma enerjisi tasarruf miktarı %20,49; ve elde edilen en düşük geri ödeme süresi ise 13,01 senedir. Isıtma enerjisinden sağlanan tasarruf miktarının soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarıyla; soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarının ise geri ödeme süresiyle olan ters orantısı Şekil 4.27’de görülmektedir.



Şekil 4.27 Senaryo II kapsamında 14 bina kabuk bileşeniyle (5. Grup) gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen çözümler doğrultusunda amaç kriterlerinin birbirine göre çizilmesi. Grafikte Geri Ödeme Süresi (GÖS) sol düşey eksen üzerinde; Soğutma Enerjisi Tasarrufu (SET) yatay eksen üzerinde; Isıtma Enerjisi Tasarrufu (IET) yüzdesi ise sağda yer alan renk çubuğu üzerinde gösterilmektedir. Kırmızı renkteki yatay çizgi 15 sene olan geri ödeme süresini göstermektedir.

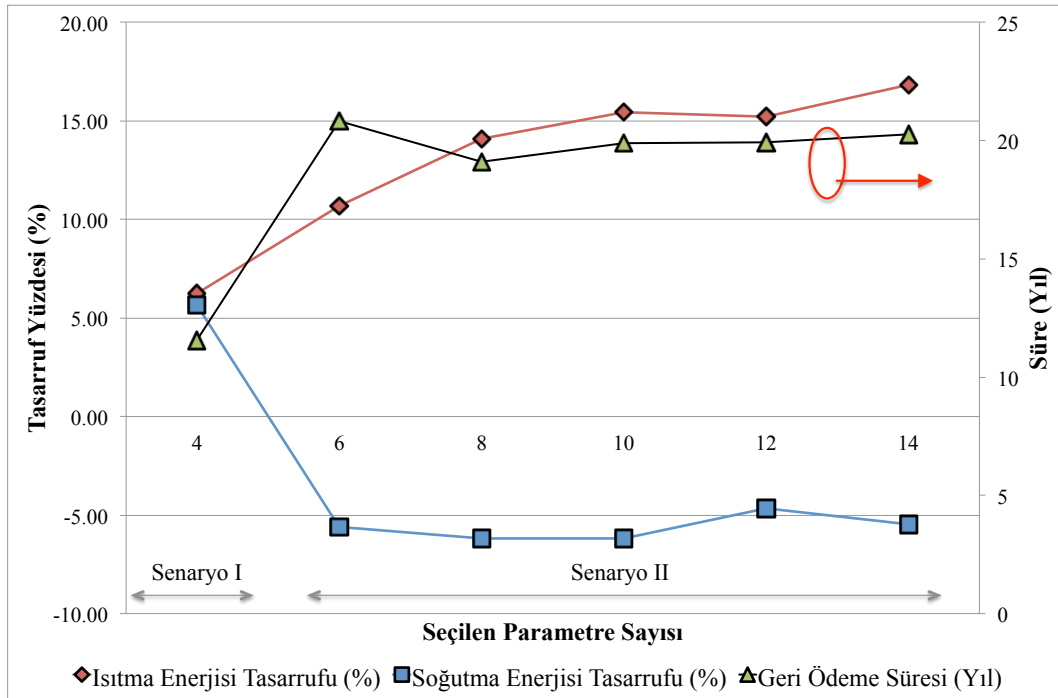
Gruplara Yönelik Genel Değerlendirme

Gruplar için yapılan tüm optimizasyonlarda, amaç fonksiyondaki NBD kriteri 10 senelik zaman diliminde optimize edilmeye, diğer bir ifadeyle iyileştirilmeye çalışılmıştır. Ancak, hiçbir grubun optimizasyon sonucunda, 10 senenin altında bir geri ödeme süresine rastlanmamıştır (Şekil 4.23-4.27). Daha önce de belirtildiği gibi, optimizasyon sonuçlarını gösteren şekiller üzerine kırmızı renkte yatay çizgiler çizilerek, 15 senenin altında geri ödeme sürelerine sahip çözüm alternatifleri işaretlenmiştir. Burada hatırlanacağı gibi, geri ödeme süreleri için maksimum 15 senelik bir periyodun uygun olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti.

Senaryo II kapsamında beş ayrı grup için gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda elde edilen maksimum ısıtma enerjisi tasarrufunu sağlayan noktalar ve bu noktalarda elde edilen soğutma enerjisi tasarrufu miktarları ve yatırımın geri ödeme

süreleri sırasıyla Şekil 4.28’de verilmektedir. Ayrıca, Senaryo I kapsamında (4 parametre ile yapılan optimizasyon) elde edilen ilgili sonuçlar da genel durumu görebilmek adına yine aynı şekil üzerinde gösterilmektedir. Şekil 4.28 incelendiğinde, her iki enerji grubu için sağlanacak tasarruf yüzdesi ilk başta pozitif bir konumda iken, optimizasyon sürecinde kullanılan girdi parametresi, diğer bir ifadeyle bina kabuk bileşeni, sayısı arttıkça soğutma enerjisinden sağlanan tasarruf miktarı azalarak negatif yöne doğru geçiş yapmıştır. Yani optimizasyonda ele alınan bina kabuk bileşeni sayısı arttıkça, ısıtma enerjisinden sağlanacak tasarruf yüzdesi de genel olarak artmıştır. Ancak ısıtma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarı arttıkça, soğutma enerjisi tüketiminde kayıplar (tüketim miktarının artması) başlamıştır.

Maksimum Isıtma Enerjisi Tasarrufunu Sağlayan Çözümler



Şekil 4.28 Çok amaçlı optimizasyonda bina kabuğu bileşen sayısı değiştirilerek elde edilen en yüksek Isıtma Enerjisi Tasarruf yüzdesini sağlayan çözümler ve bu çözümlerdeki Soğutma Enerjisi Tasarruf yüzdeleri ve Geri Ödeme Süreleri.

Yapılacak yatırımları geri ödeme süreleri incelendiğinde, Senaryo I kapsamında dört kabuk bileşeni ile yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen maksimum ısıtma tasarrufu çözümü dışındaki hiç bir çözümün geri ödeme süresi 15 senenin

altında değildir (Şekil 4.28). Diğer bir ifadeyle Senaryo II kapsamında maksimum ısıtma enerjisi tasarrufu sağlayan bütün çözümlerin geri ödeme süreleri 15 senenin üstündedir. Şekil 4.21’den Şekil 4.27’ye kadar olan tüm grafiklerde, genel eğilim olarak ısıtma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarının yüksek olduğu çözümlerde, geri ödeme sürelerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 4.28’deki her bir noktaya ait elde edilen sayısal veriler (ısıtma enerjisi tasarrufu, soğutma enerjisi tasarrufu, toplam tasarruf ve geri ödeme süresi) ve o noktadaki çözümü oluşturan bina kabuk bileşenlerine atanan malzeme kombinasyonları belirlenerek Tablo 4.14 oluşturulmuştur.

Tablo 4.14 incelendiğinde ilk dikkat çeken nokta, tüm çözümlerdeki pencerelere atanan alternatiflere yöneliktir. Tablo 4.14’e göre binanın tüm cephelerindeki pencerelere U değeri=1 ve güneş ısı kazanç katsayısı=0,73 olan C18 (Üçlü cam, hava dolgulu, 4-16-4-16-4mm) kodlu üç camlı pencereler atanmıştır. Binadaki saydam yüzey alanının büyük oranda olması dikkate alındığında, ısı enerjisinden sağlanacak tasarrufların artırılabilmesi için U değerinin en düşük olduğu ve Güneş Isısı Kazanç Katsayısının ise yüksek olduğu böyle bir seçeneğin uygun bir çözüm olduğu düşünülmektedir. Buna paralel olarak güney yönüne bakan pencerelere de gölgeleme elemanı eklenmemiştir (bkz. Tablo 4.9 D9 kodlu alternatif). Güneşten sağlanacak ısı kazancının, ısıtma enerjisi tasarrufuna olumlu yöndeki katkısı düşünüldüğünde optimizasyon çözümünün mantıklı olduğu söylenebilir.

Tablo 4.14’e göre optimizasyon algoritmasının bazı çözümlerde lokal optimumda takıldığını gösteren işaretler olduğu düşünülmektedir. Örneğin, 4. Grup kapsamında on iki kabuk bileşeniyle gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen maksimum ısıtma enerjisi tasarrufunu sağlayan çözümde, doğu yönüne bakan pencerelere derinliği 0,9 metre (D8 kodlu alternatif) olan gölgeleme elemanı eklenmiştir. Aynı çözümde çatı döşemesine uygulanacak ısı yalıtım malzemesi için 180mm kalınlığında taş yünü (B6 kodlu alternatif) malzeme seçilmiştir. Benzer şekilde 5. Grup kapsamında on dört parametreyle gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda da, kuzey yönüne bakan pencerelere derinliği 0,2 metre (D3 kodlu

alternatif) olan gölgeleme elemanı ve güney yönüne bakan dış duvara 100mm EPS ısı yalıtım malzemesi (F7 kodlu alternatif) eklenmiştir.

Tablo 4.14 Isıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkilerine göre 14 bina kabuk bileşeninin önem sıralaması ve kabuk bileşen sayısı değiştirilerek gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon sonucunda Isıtma Enerjisi Tasarrufunun en yüksek olduğu çözümler (bina kabuk bileşeninde kullanılabilecek malzeme alternatifi kodlarına göre belirtilmiştir)

Isıtma Enerjisi Tüketimi Üzerindeki Etkilerine Göre 14 Bina Kabuk Bileşeninin Önem Sıralaması		Senaryo I ve II Kapsamında Bina Kabuk Bileşen Sayısı Değiştirilerek Gerçekleştirilen Çok Amaçlı Optimizasyon Sonucunda Isıtma Enerjisi Tasarrufunun En Yüksek Olduğu Çözümler*					
		Senaryo I	Senaryo II				
			1. Grup	2. Grup	3. Grup	4. Grup	5. Grup
1	Pencere-Güney Cephesi	C18	C18	C18	C18	C18	C18
2	Gölgeleme-Güney Cephesi	D9	D9	D9	D9	D9	D9
3	Pencere-Kuzey Cephesi	C18	C18	C18	C18	C18	C18
4	Çatı Döşemesi	B7	B7	B7	B7	B6	B7
5	Dış Duvar-Batı Cephesi		F9	F9	F9	G8	F9
6	Zemin Döşemesi		H10	H10	H10	H10	H10
7	Pencere-Doğu Cephesi			C18	C18	C18	C18
8	Dış Duvar-Kuzey Cephesi			F8	F9	G8	G8
9	Dış Duvar-Doğu Cephesi				G8	F8	G8
10	Gölgeleme-Doğu Cephesi				D9	D8	D9
11	Pencere-Batı Cephesi					C18	C18
12	Gölgeleme-Kuzey Cephesi					D9	D2
13	Gölgeleme-Batı Cephesi						D9
14	Dış Duvar-Güney Cephesi						F7
Sonuçlar	Toplam Tasarruf Miktarı (%)	11,91	5,09	7,90	9,25	10,56	11,36
	Isıtma Enerjisi Tasarruf Miktarı (%)	6,23	10,70	14,10	15,45	15,21	16,81
	Soğutma Enerjisi Tasarruf Miktarı (%)	5,68	-5,62	-6,20	-6,20	-4,66	-5,45
	Geri Ödeme Süresi (Yıl)	11,56	20,84	19,12	19,89	19,94	20,26

* Malzeme alternatif kodlarının özellikleri için Tablo 4.9'a bakınız.

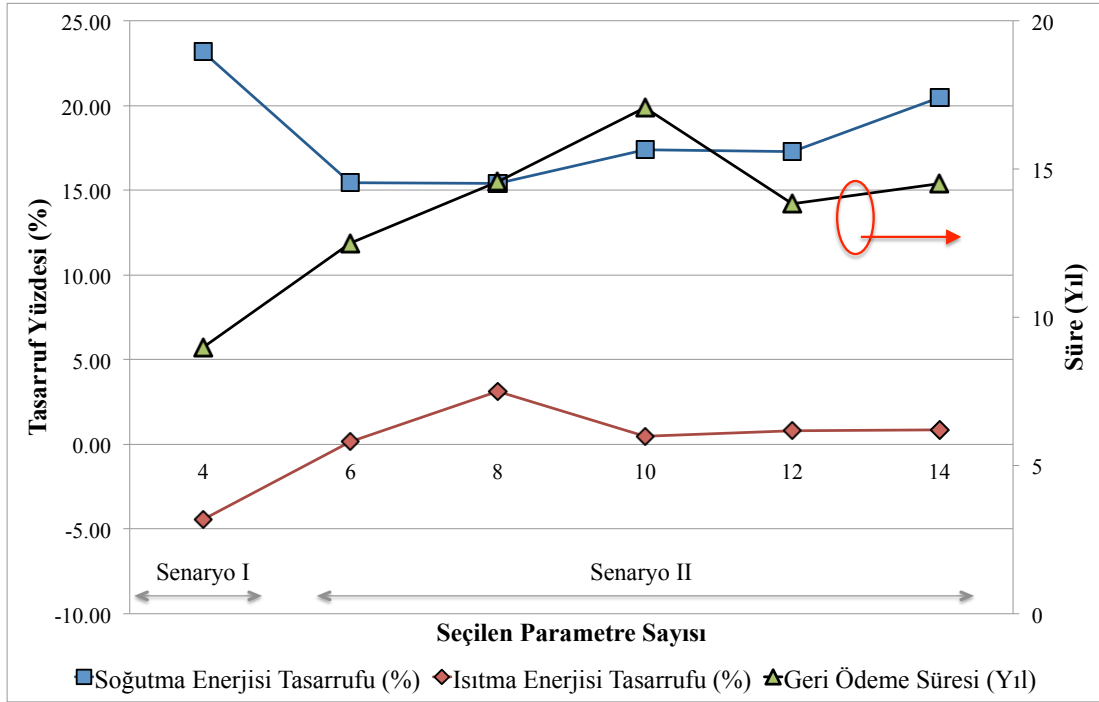
Ayrıca, optimizasyon algoritmasının NBD amaç kriteri doğrultusunda çalıştığı göz önünde bulundurulduğunda seçilen bazı çözümlerin de bu yönde olduğu görülmektedir. Örneğin, dolu duvar yüzey alanının yüksek olduğu batı cephesinde, ısı yalıtım malzemesi olarak 4. Gruba ait çözüm olan 120mm XPS (G8 kodlu alternatif) dışında, tüm gruplara ait sonuçlarda daha düşük birim maliyeti olan 140mm EPS ısı yalıtım malzemesi (F9 kodlu alternatif) seçilmiştir (Tablo 4.14).

Burada yapılan diğer bir önemli saptama ise; maksimum ısıtma enerjisi tasarrufu sağlayan tüm çözümlerde ilk dört sırada yer alan bina kabuk bileşenleri için seçilen alternatiflerden sadece 4. Grubun dördüncü sıradaki parametre için olan sonuç hariç, tüm gruplara ait optimizasyon sonuçlarında aynıdır. Diğer bir ifadeyle optimizasyon algoritması bu parametrelere yönelik sonuçlara erken aşamada yakınsamış ve değiştirme gereği duymamıştır. Bu da, ilk dört parametrenin ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimlerine en çok etki yapan uygulamalar olduğunu göstermekte ve hassasiyet analizi sonuçlarını desteklemektedir.

Senaryo II kapsamında beş ayrı grup için gerçekleştirilen optimizasyon sonuçlarına, Senaryo I kapsamında elde edilen optimizasyon sonucu da eklenerek maksimum soğutma enerjisi tasarrufunu sağlayan noktalar ve bu noktalarda elde edilen ısıtma enerjisi tasarrufu miktarları ve yatırımın geri ödeme süreleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar Şekil 4.29’da izlenebilmektedir.

Şekil 4.29 incelendiğinde, ısıtma enerjisi için sağlanacak tasarruf yüzdesi ilk başta negatif bir konumda iken, optimizasyon sürecinde kullanılan girdi parametresi, diğer bir ifadeyle bina kabuk bileşeni, sayısı arttıkça pozitif yöne doğru geçiş başlamıştır ve soğutma enerjisinden sağlanan tasarruf miktarı azalmıştır. Yani soğutma enerjisi tasarrufu azaldıkça, ısıtma enerjisi tasarrufu artmaya başlamış ve ele alınan bina kabuk bileşeni sayısı 8’e doğru arttıkça, ısıtma enerjisi tasarrufu da artmaya devam etmiştir. 10 parametre ile gerçekleştirilen 3. Gruba ait optimizasyondan sonra, ısıtma enerjisinden sağlanan tasarruf yüzdesi sabit kalmasına rağmen, soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf yüzdesi artış göstermiştir.

Maksimum Soğutma Enerjisi Tasarrufunu Sağlayan Çözümler



Şekil 4.29 Çok amaçlı optimizasyonda bina kabuğu bileşen sayısı değiştirilerek elde edilen en yüksek Soğutma Enerjisi Tasarruf yüzdesini sağlayan çözümler ve bu çözümlerdeki Isıtma Enerjisi Tasarruf yüzdeleri ve Geri Ödeme Süreleri.

Şekil 4.21-4.27'ya bakıldığında, genel eğilimde soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarının yüksek olduğu çözümlerde, geri ödeme sürelerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu eğilim, Şekil 4.28 ile Şekil 4.29 karşılaştırıldığında daha net görülebilmektedir. Ek olarak, sadece ilk 10 kabuk bileşeniyle gerçekleştirilen 3. Gruba ait optimizasyon sonucunda elde edilen geri ödeme süreleri 15 senenin üzerindedir ve bu çözümdeki ısıtma enerjisi tasarrufu diğer çözümlere göre daha yüksektir.

Şekil 4.29'daki her bir noktaya ait optimizasyon sonucunda elde edilen sayısal veriler (ısıtma enerjisi tasarruf miktarı, soğutma enerjisi tasarruf miktarı, toplam tasarruf miktarı ve geri ödeme süresi) ve o noktadaki çözümü oluşturan bina kabuk bileşenlerinin çözüm kombinasyonları belirlenerek Tablo 4.15'e aktarılmıştır.

Tablo 4.15 Isıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkilerine göre 14 bina kabuk bileşeninin önem sıralaması ve kabuk bileşen sayısı değiştirilerek çalıştırılan çok amaçlı optimizasyon sonucunda Soğutma Enerjisi Tasarrufunun en yüksek olduğu çözümler (bina kabuk bileşeninde kullanılabilecek malzeme alternatifi kodlarına göre belirtilmiştir)

Isıtma Enerjisi Tüketimi Üzerindeki Etkilerine Göre 14 Bina Kabuk Bileşeninin Önem Sıralaması		Senaryo I ve II Kapsamında Bina Kabuk Bileşen Sayısı Değiştirilerek Gerçekleştirilen Çok Amaçlı Optimizasyon Sonucunda Soğutma Enerjisi Tasarrufunun En Yüksek Olduğu Çözümler *					
		Senaryo I	Senaryo II				
			1. Grup	2. Grup	3. Grup	4. Grup	5. Grup
1	Pencere-Güney Cephesi	C3	C13	C13	C12	C3	C15
2	Gölgeleme-Güney Cephesi	D8	D5	D5	D8	D8	D8
3	Pencere-Kuzey Cephesi	C15	C13	C13	C3	C5	C3
4	Çatı Döşemesi	B7	B3	B3	A4	B1	B7
5	Dış Duvar-Batı Cephesi		G6	G6	E3	F7	G8
6	Zemin Döşemesi		H2	H2	H2	H1	H2
7	Pencere-Doğu Cephesi			C18	C3	C18	C18
8	Dış Duvar-Kuzey Cephesi			E7	G8	G4	F2
9	Dış Duvar-Doğu Cephesi				G8	G6	F2
10	Gölgeleme-Doğu Cephesi				D8	D5	D8
11	Pencere-Batı Cephesi					C12	C18
12	Gölgeleme-Kuzey Cephesi					D6	D8
13	Gölgeleme-Batı Cephesi						D6
14	Dış Duvar-Güney Cephesi						G5
Sonuçlar	Toplam Tasarruf Miktarı (%)	18,74	15,64	18,54	17,87	18,09	21,33
	Isıtma Enerjisi Tasarruf Miktarı (%)	-4,45	0,17	3,12	0,48	0,79	0,83
	Soğutma Enerjisi Tasarruf Miktarı (%)	23,19	15,48	15,41	17,39	17,29	20,49
	Geri Ödeme Süresi (Yıl)	8,97	12,52	14,59	17,08	13,85	14,5

* Malzeme alternatif kodlarının özellikleri için Tablo 4.9'a bakınız.

Tablo 4.15 incelendiğinde ilk dikkat çeken nokta, pencerelere atanan tüm cam alternatiflerinin Güneş Isısı Kazanç Katsayısı 0,56 veya altında bir değerdir. Her ne kadar kuzey yönüne bakan cephe için doğrudan güneş ışınlımı söz konusu olmasa da

bu yöndeki pencerelere Güneş Isısı Kazanç Katsayısı düşük olan değerlerdeki seçenekler atanmıştır ve dolaylı şekilde güneş ışınlamından sağlanan ısı kazançları minimuma indirilmiştir. 1. Grup (6 parametrelili çözüm) ve 2. Grup (8 parametrelili çözüm) çözümler hariç diğer tüm çözümlerde güney yönüne bakan pencerelere 0,9 metre derinliğinde (bkz. Tablo 4.9 D8 kodlu alternatif) gölgeleme elemanları eklenmiştir. Yine 1. ve 2. Grupların (6 ve 8 kabuk bileşenli gruplar) çözümlerinde ilk altı parametre için atanan alternatiflerin her iki grup için de aynı olduğu görülmektedir. Ayrıca 1. Gruba, Pencere-Doğu ve Duvar-Kuzey parametrelerinin eklenmesiyle oluşan 2. Gruba ait sonuçta; ısıtma enerjisinden sağlanan tasarruf yüzdesinin arttığı, soğutma enerjisinden sağlanan tasarrufun ise az miktarda azalmakla birlikte neredeyse sabit kaldığı izlenebilmektedir. Zemin döşemesine (toprağa temas eden yüzey) yapılacak ısı yalıtımı ile soğutma enerjisi tüketimi arasında pozitif bir ilişki söz konusu olduğundan (bkz. Ek-2.1) optimizasyon algoritması ısı yalıtım kalınlığı az olan alternatifleri seçmiştir.

Tablo 4.15'teki değerler Tablo 4.14'te verilen en yüksek ısıtma enerjisi tasarrufu sağlayan çözümlerdeki değerlerin aksine, ilk dört kabuk bileşeni için seçilen alternatiflerin termofiziksel özellikleri birbirine benzerdir ancak aynı değildir. Bu noktada, amaç kriterlere atanan katsayılarla birlikte optimizasyon algoritmasının yineleme (iterasyon) sayısı arttıkça ağırlıklı olarak ısıtma enerjisi tüketiminin en yüksek olduğu çözümlere doğru yakınsadığı saptanmıştır. Buna karşın soğutma tasarrufunun en yüksek olduğu çözümlere ise; optimizasyonun erken aşamalarında ulaşıldığı görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, optimizasyonda, ilk dört sıradaki kabuk bileşeni için erken evrelerde yakınsama gerçekleşmiş ancak amaç fonksiyonunun diğer amaç kriterleri doğrultusunda algoritma çözümleri değiştirme gereği duymuştur.

Bu aşamaya kadar projedeki uygulamaların kapsamının genişletilmesiyle ısıtma ve soğutma enerjilerinden sağlanabilecek maksimum tasarruf miktarlarına yönelik çözümler belirlenmiştir. Ancak, maksimum ısıtma enerjisinin sağlandığı çözümlerde soğutma enerjisinden kayıpların olduğu, maksimum soğutma enerjisi tasarrufu sağlanan çözümlerde ise ısıtma enerjisinden tasarrufların minimum düzeyde olduğu görülmüştür. Senaryo II kapsamında, uygun maliyet, geri ödeme süresi ve enerji

kazançlarının bir arada sağlanabildiği uygulamaların tanımlanması da hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, enerji kazançları arasında daha dengeli kazanım değerleri elde edilmek istenmiştir. Bu doğrultuda belirlenen seçim kriterleri aşağıda belirtilmektedir:

- Optimizasyon sonuçları arasından, yıllık ısıtma enerjisi tasarruf miktarı minimum %5 olan,
- Yıllık toplam enerji tasarruf miktarı (ısıtma ve soğutma enerjileri toplamı) en yüksek olan,
- Geri ödeme süresi maksimum 15 sene olan çözümler.

Yukarıda belirtilen kriterler doğrultusunda Senaryo II kapsamında elde edilen optimizasyon sonuçları arasında yeni bir araştırma yapılmıştır. Bu üç kriteri aynı anda sağlayan çözümler seçilerek Tablo 4.16'ya aktarılmıştır. Ayrıca, bu kriterlere göre Senaryo I kapsamında da bir araştırma yapılmış ve elde edilen optimizasyon sonucu da Tablo 4.16'ya eklenmiştir.

Tablo 4.16 incelendiğinde, güney cephesindeki pencerelere U değeri=1 ve güneş ısı kazanç katsayısı=0,73 olan C18 (Üçlü cam, hava dolgulu, 4-16-4-16-4mm) ve U değeri=1,1 ve yine güneş ısı kazanç katsayısı=0,73 olan C17 (Üçlü cam, hava dolgulu, 4-12-4-12-4mm) kodlu üç camlı ve hemen hemen aynı özelliklerdeki pencereler atanmıştır. Binadaki saydam yüzey alanının büyük oranda olması dikkate alındığında, ısı enerjisinden sağlanacak tasarrufların artırılabilmesi için U değerinin en düşük olduğu ve Güneş Isı Kazanç Katsayısının ise yüksek olduğu böyle bir seçeneğin uygun bir çözüm olduğu düşünülmektedir (Tablo 4.16).

Tablo 4.16 Isıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkilerine göre 14 bina kabuk bileşeninin önem sıralaması ve kabuk bileşen sayısı değiştirilerek çalıştırılan çok amaçlı optimizasyon sonucunda ısıtma ve soğutma enerjisinden yakın oranda tasarrufun sağlandığı, toplam enerji tasarrufunun en yüksek olduğu ve geri ödeme sürelerinin 15 sene ve altında olduğu çözümler (bina kabuk bileşeninde kullanılabilecek malzeme alternatif kodlarına göre belirtilmiştir)

Isıtma Enerjisi Tüketimi Üzerindeki Etkilerine Göre 14 Bina Kabuk Bileşeninin Önem Sıralaması		Senaryo I ve II Kapsamında Bina Kabuk Bileşen Sayısı Değiştirilerek Gerçekleştirilen Çok Amaçlı Optimizasyon Sonucunda Isıtma ve Soğutma Enerjisinden Yakın Oranda Tasarrufun Sağlandığı, Toplam Enerji Tasarrufunun En Yüksek Olduğu ve Geri Ödeme Sürelerinin 15 Senenin Altında Olduğu Çözümler *					
		Senaryo I	Senaryo II				
			1. Grup	2. Grup	3. Grup	4. Grup	5. Grup
1	Pencere-Güney Cephesi	C18	C18	C17	C18	C17	C18
2	Gölgeleme-Güney Cephesi	D1	D8	D8	D8	D8	D7
3	Pencere-Kuzey Cephesi	C18	C18	C18	C14	C18	C14
4	Çatı Döşemesi	B2	B7	B7	B7	B7	B7
5	Dış Duvar-Batı Cephesi		F9	G8	E5	F6	G5
6	Zemin Döşemesi		H1	H1	H2	H1	H3
7	Pencere-Doğu Cephesi			C13	C18	C4	C18
8	Dış Duvar-Kuzey Cephesi			G6	G3	G8	E3
9	Dış Duvar-Doğu Cephesi				E1	G7	G4
10	Gölgeleme-Doğu Cephesi				D8	D3	D3
11	Pencere-Batı Cephesi					C12	C13
12	Gölgeleme-Kuzey Cephesi					D3	D9
13	Gölgeleme-Batı Cephesi						D6
14	Dış Duvar-Güney Cephesi						F7
Sonuçlar	Toplam Tasarruf Miktarı (%)	13,26	14,9	18,56	20,34	20,22	21,24
	Isıtma Enerjisi Tasarruf Miktarı (%)	5,06	6,07	8,01	7,13	8,41	9,16
	Soğutma Enerjisi Tasarruf Miktarı (%)	8,20	8,83	10,55	13,21	11,81	12,08
	Geri Ödeme Süresi (Yıl)	9,82	13,4	14,10	13,52	15,00	14,17

* Malzeme alternatif kodlarının özellikleri için Tablo 4.9'a bakınız.

Benzer şekilde kuzey yönüne bakan pencerelere de çoğunlukla C18 kodlu pencere atanmış, sadece 3. ve 4. Gruplara ait çözümlerde C14 kodlu (U değeri=1,3 ve güneş ısı kazanç katsayısı=0,44) pencereler seçilmiştir. Çatı döşemesi Tablo 4.14 ve 4.15'teki seçimlerle aynı olarak B7 kodlu 200 mm kalınlığında ve $\lambda=0,040$ değerindeki cam yünü ısı yalıtım malzemesi seçilmiştir. Bu durum çatıda yapılacak yalıtımın hem ısıtma enerjisi hem de soğutma enerjisi tüketimini azaltmasından kaynaklanmaktadır. Güneye bakan pencerelere ise çoğunlukla 0,9m derinliğinde D8 kodlu gölgeleme elemanı atanmıştır. Bu seçim de özellikle soğutma enerjisi tasarruf yüzdesini artırmıştır. Dolu duvar yüzey alanının yüksek olduğu batı cephesinde, ısı yalıtım malzemesi olarak 80mm kalınlığında taş yünü (E5 kodlu alternatif), 80mm ve 140mm kalınlıklarında EPS (F6 ve F9 kodlu alternatifler) ve 120mm kalınlığında XPS (G8 kodlu alternatif) gibi genellikle yüksek kalınlıkta ısı yalıtım malzemeleri seçilmiştir (Tablo 4.16).

4.2.4.3 Senaryo III

Bina Kabuk Bileşenlerini Seçme:

Senaryo III kapsamında, binanın enerji performansını geliştirmeye yönelik uygulama çözümlerinin belirlenmesi sürecinde, kullanıcı gruplarının bina için geliştirilecek çözüme yönelik önceliklerinin farklı olması durumunda enerji tasarruflarının, NBD ve geri ödeme sürelerinin ne şekilde değişeceğinin proje sahiplerine gösterilmesi hedeflenmektedir. Kullanıcı gruplarının çözüme yönelik önceliklerinin farklı olması, projenin performans hedeflerindeki (amaç kriterler) önem ve öncelik sıralamasının değişmesine yol açmaktadır. Örneğin, bir grup kullanıcı için binanın ısıtma enerjisi tüketiminin azaltılması birincil ya da öncelikli hedef iken, diğer bir grup için binanın soğutma enerjisi tüketiminin azaltılması ya da yapılacak yatırımın geri ödeme süresinin kısalığı öncelikli hedef olabilmektedir. Önerilen model ile bu problemin çözümü için; optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu oluşturan amaç kriterlere ağırlık katsayıları atanırken, her defasında bir amaç kriteri diğer kriterlere göre daha önemli ve öncelikli kılacak şekilde katsayılar

atanacaktır. Bu işlem üç amaç kriteri için ayrı ayrı uygulanarak optimizasyon işlemi tekrarlanacaktır.

Bu doğrultuda, **Senaryo III** kapsamında, Senaryo I ve Senaryo II için yapılan optimizasyonlar, amaç fonksiyonun amaç kriterlerine farklı ağırlık katsayıları atanarak tekrarlanacak ve NBD ve enerji tasarrufundaki değişim incelenecektir.

Malzeme Alternatifleri Sayısı:

Senaryo I ve II için gerçekleştirilen optimizasyon farklı katsayı değerleri kullanılarak ağırlıklandırılmış yeni amaç fonksiyonlar ile tekrarlanacağından toplam alternatif sayıları öncekilerle aynıdır (bkz. Tablo 4.10 ve Tablo 4.13).

Amaç Kriterlere Ağırlık Katsayıları Atama:

Senaryo III kapsamında maksimum ısıtma enerjisi tasarrufu, soğutma enerjisi tasarrufu ve NBD'yi bulmaya yönelik olarak amaç fonksiyonu oluşturan yıllık ısıtma enerjisi tüketimi, yıllık soğutma enerjisi tüketimi ve NBD amaç kriterlerinin ağırlık katsayıları sırasıyla a, b ve c için aşağıda belirtilen katsayıların kullanılmasına karar verilmiştir:

- Maksimum yıllık ısıtma enerjisi tasarrufu için: $a=20$, $b=0,1$, $c=-0,01$
- Maksimum yıllık soğutma enerjisi tasarrufu için: $a=1$, $b=10$, $c=-0,01$
- Maksimum NBD için: $a=1$, $b=1$, $c=-1$

Uygulamada, NBD'nin hesaplanması 10 senelik bir dönem için yapılmıştır. Faiz oranı %4,5 ve enflasyon oranı %10 alınmıştır.

Optimizasyon Sonuçları:

Amaç Fonksiyondaki Amaç Kriterlere Farklı Ağırlık Katsayıları Atanarak Senaryo I Kapsamında Yapılan Optimizasyonun Tekrarlanması İle Elde Edilen Sonuçlar

Senaryo III kapsamında, farklı ağırlık katsayıları kullanılarak Senaryo I kapsamında yapılan optimizasyonlar tekrarlanmıştır.

Bu aşamaya kadar elde edilen sonuçlar, amaç fonksiyondaki amaç kriterlere atanan belirli ağırlık katsayılarına ($a=5$, $b=1$, $c=-0,05$) göre ısıtma enerjisi, soğutma enerjisi ve NBD kriterleri için maksimum kazancın sağlandığı noktaları göstermektedir. Ancak seçilen ağırlık katsayıları nedeniyle ortaya çıkan değerlerin “global optimum” olmama olasılığı da vardır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında, her bir amaç kriter için daha iyi tasarruf yüzdeleri sağlanabilir mi diye araştırılmıştır. Bu doğrultuda, Senaryo I'deki gibi ilk dört sıradaki kabuk bileşeni kullanılarak ve amaç kriterlere farklı katsayı değerleri atanarak üç farklı amaç fonksiyon oluşturulmuş ve her bir fonksiyon için optimizasyon işlemi yinelenmiştir. Üç farklı amaç fonksiyonu ve amaç kriterlere atanan ağırlık katsayıları ve de gerçekleştirilen optimizasyonlar ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.17’de izlenebilmektedir.

Tablo 4.17’de amaç fonksiyondaki amaç kriterlere atanan farklı katsayılar sonucunda NBD değeri için ulaşılan global maksimum değer 9209 TL dir. NBD kriteri için global maksimuma ulaşıldığında, binanın soğutma enerjisi tüketimi yıllık %9,36 azalmakta, yıllık ısıtma enerjisi tüketimi ise ters orantılı olarak artmaktadır (-%1,17). Global maksimum NBD için belirlenen çözüm önerileri incelendiğinde; çatı döşemesi için 80mm kalınlığında ve $\lambda=0,040$ değerindeki B1 kodlu cam yünü ısı yalıtım malzemesi seçilmiştir. Kuzey ve güney yönlerine bakan pencerelere U değeri=1,3 ve güneş ısı kazanç katsayısı=0,44 olan C14 kodlu, renkli hava dolgulu low-e çift camlı pencereler atanmıştır. Ayrıca, güney yönüne bakan pencerelere gölgeleme elemanı ise eklenmemiştir (bkz. Tablo 4.9 D9 kodlu alternatif).

Tablo 4.17 Senaryo III kapsamında amaç fonksiyondaki amaç kriterlere farklı ağırlık katsayıları atayarak oluşturulan üç farklı amaç fonksiyon ile Senaryo I (İlk 4 bina kabuk bileşeni ile) için gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyonun tekrarlanması sonucunda Isıtma Enerjisi Tasarrufu, Soğutma Enerjisi Tasarrufu ve NBD'nin en yüksek olduğu çözümler (bina kabuk bileşeninde kullanılabilecek malzeme alternatifi kodlarına göre belirtilmiştir)

Amaç Fonksiyon Ağırlık Katsayıları *	Amaç Fonksiyonun Uyarlanma Sebebi	Yıllık Isıtma Enerjisi Kazancı (%)	Yıllık Soğutma Enerjisi Kazancı (%)	NBD (TL) **	Geri Ödeme Süresi (Yıl)	Bina Kabuğu Bileşeninde Kullanılabilecek Malzemelerin Kodları ***			
						Çatı	Pencere (Kuzey Yönü)	Pencere (Güney Yönü)	Gölgeleme (Güney Yönü)
a=1 b=1 c= -1	Elde Edilen Maksimum NBD Tasarrufu	-1,17	9,36	+9209	7,44	B1	C14	C14	D9
a=1 b=10 c= -0,01	Elde Edilen Maksimum Soğutma Enerjisi Tasarrufu	-5,39	23,9	+3447	9,08	B7	C3	C13	D8
a=20 b=0,1 c= -0,01	Elde Edilen Maksimum Isıtma Enerjisi Tasarrufu	6,23	5,68	-4693	11,56	B7	C18	C18	D9

* a, b ve c amaç fonksiyonu oluşturan amaç kriterlerinin ağırlık katsayılarıdır. a= Isıtma enerjisi tüketimi; b= Soğutma enerjisi tüketimi; c= NBD kriterlerine ait ağırlık katsayısını belirtmektedir.

** NBD hesaplaması 10 sene için yapılmıştır. Faiz oranı %4,5 ve Enflasyon Oranı %10 alınmıştır.

*** Malzeme alternatif kodlarının özellikleri için Tablo 4.9'a bakınız.

Amaç fonksiyonun global maksimum soğutma enerjisi tasarrufu sağlayacak şekilde ağırlıklandırılması ile global maksimum değer olarak %23,9'a ulaşılmıştır. Soğutma enerjisi kazancı kriteri için global maksimuma ulaşıldığında, binanın ısıtma enerjisi tüketimi yıllık %5,39 artmakta, NBD olarak ise kazanç sağlanmaktadır (3447 TL). Global maksimum soğutma enerjisi tasarrufu için belirlenen çözüm önerileri incelendiğinde; çatı döşemesi için 200 mm kalınlığında ve $\lambda=0,040$ değerindeki B7 kodlu cam yünü ısı yalıtım malzemesi seçilmiştir. Kuzey yönüne bakan pencerelere U değeri=5,2 ve güneş ısı kazanç katsayısı=0,54 olan C3 kodlu renkli tek cam, güney yönüne bakan pencerelere ise U değeri=1,6 ve güneş ısı kazanç katsayısı=0,44 olan C13 kodlu renkli hava dolgulu low-e çift camlı pencereler atanmıştır. Güneye bakan pencerelere ise 0,9m derinliğinde D8 kodlu gölgeleme elemanı atanmıştır.

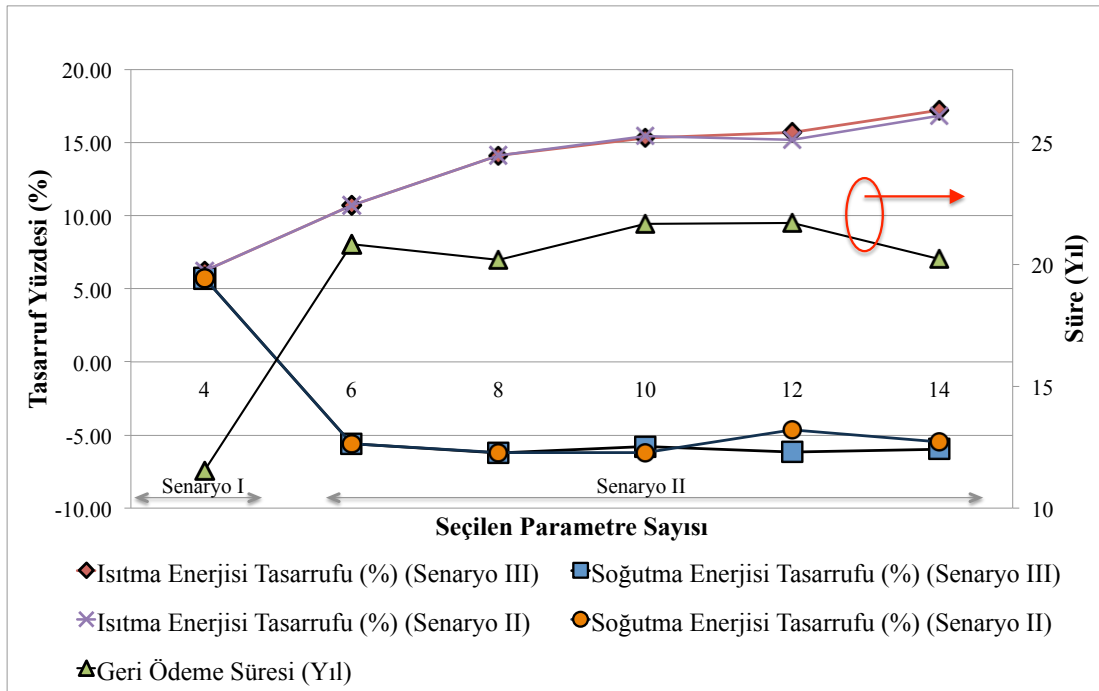
Son olarak, amaç fonksiyonun ısıtma enerjisi tasarrufu için global maksimum değerine ulaşacak şekilde ağırlıklandırılması ile elde edilen değer, bulunan ilk değer ile aynıdır (bkz. Tablo 4.11). Isıtma enerjisinden sağlanan tasarruf ve NBD kriterleri için maksimum değerlere ulaşılabilmesi ancak gölgeleme elemanının kullanılmadığı seçeneklerle mümkün olmaktadır (bkz. Tablo 4.9 ve 4.10).

Amaç Fonksiyondaki Amaç Kriterlere Farklı Ağırlık Katsayıları Atanarak Senaryo II Kapsamında Yapılan Optimizasyonun Tekrarlanması İle Elde Edilen Sonuçlar

Senaryo III kapsamında, yine farklı katsayılar kullanılarak Senaryo II için daha yüksek bir oranda ısıtma enerjisi tasarrufunun elde edilebilirliği araştırılmıştır. Bu sayede, karar vericiler için proje kapsamında ısıtma enerjisinden sağlanacak tasarruf yüzdesinin önceliği olması durumunda, önerilen modelin sağlayabileceği en yüksek ısıtma enerjisi tasarruf yüzdesi değerinin ne olacağı gösterilmek istenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, amaç kriterler için belirlenen ağırlık katsayıları: **binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi için $a=20$; binanın yıllık soğutma enerjisi tüketimi için $b=0,1$; NBD için $c=-0,01$ dir.** Bu noktada Senaryo II kapsamında ilk kullanılan katsayıların: $a=5$; $b=1$; $c=-0,05$ şeklinde olduğu da hatırlanmalıdır.

Senaryo III kapsamında farklı katsayılarla tekrar edilen optimizasyonlar sonucunda elde edilen maksimum Isıtma Enerjisi Tasarrufu noktaları ve bunlara karşılık gelen Soğutma Enerjisi Tasarrufu yüzdeleri ve geri ödeme süreleri, yine Senaryo III kapsamında ilk dört kabuk bileşeniyle gerçekleştirilen optimizasyon ile elde edilen sonuçlar (Bkz. Tablo 4.17’de Elde Edilen Maksimum Isıtma Enerjisi Kazancı) da eklenerek sırasıyla Şekil 4.30’daki grafik elde edilmiştir. Aynı Şekil üzerinde (Şekil 4.30), Senaryo II kapsamında elde edilen maksimum ısıtma enerjisi tasarrufu değerleri ve bunlara karşılık gelen soğutma enerjisi tasarrufu değerleri de karşılaştırma ve sonuçlardaki değişimi izleyebilme amacıyla eklenmiştir.

Maksimum Isıtma Enerjisi Tasarrufunu Sağlayan Çözümler



Şekil 4.30 Çok amaçlı optimizasyonda ağırlık katsayıları ve bina kabuğu bileşen sayısı değiştirilerek elde edilen en yüksek Isıtma Enerjisi Tasarruf yüzdesini sağlayan çözümler ve bu çözümlerdeki Soğutma Enerjisi Tasarruf yüzdeleri ve Geri Ödeme Süreleri.

Şekil 4.30 incelendiğinde, Senaryo III’de elde edilen sonuçlar ile Senaryo II’deki sonuçların birbirine benzer oldukları ve eğilimlerinin de aynı yönde olduğu görülmektedir. Örneğin, her iki çözümdeki ısıtma enerjisi tasarrufu yüzdeleri ilk

başta pozitif bir konumda iken, optimizasyonda kullanılan kabuk bileşen sayısı arttıkça Soğutma Enerjisinden Sağlanan Tasarruf yüzdeleri azalmış ve negatif alana doğru geçiş başlamıştır. Yani ısıtma enerjisinden sağlanan tasarruf yüzdesi arttıkça soğutma enerjisi tüketimi artmaya başlamış ve kabuk bileşen sayısı arttıkça artış göstermiştir. İlk dört kabuk bileşeniyle gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen maksimum ısıtma enerjisi tasarrufu sağlayan çözüm haricinde, tüm çözümlerin geri ödeme süreleri 15 senenin üzerindedir.

Şekil 4.30'daki her bir noktaya ait optimizasyon sonucunda elde edilen sayısal veriler (ısıtma enerjisi tasarruf miktarı, soğutma enerjisi tasarruf miktarı ve geri ödeme süresi) ve o noktadaki çözümü oluşturan bina kabuk bileşenlerinin çözüm kombinasyonları belirlenerek Tablo 4.18'e aktarılmıştır. Senaryo III'de elde edilen ısıtma enerjisi tasarrufu yüzdelerinde, sadece 4. Gruba (ilk 10 sıradaki bina kabuk bileşeni ile yapılan optimizasyon) ait çözümdeki sonuç hariç, Senaryo II kapsamında elde edilen sonuçlara göre bir iyileşme olduğu görülmektedir. 1. ve 2. Gruplara ait (ilk 4 ve 6 kabuk bileşenli gruplar) çözümlerde, Senaryo II ve Senaryo III aynı sonuçları vermektedir. Diğer bir ifadeyle, optimizasyon algoritmasının ulaştığı en iyi çözümler ağırlık katsayılarından bağımsız olarak elde edilebilmiştir. Farklı ağırlık katsayıları kullanılarak gerçekleştirilen Senaryo III kapsamında elde edilen sonuçların daha önceki çözüm önerilerinde elde edilen sonuçlarla ya aynı ya da çok yakın çıkması, ilk çözüm önerilerinde amaç kriterlere atanan ağırlık katsayılarının uygun seçilmiş olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, optimizasyon algoritmasının, her ne kadar amaç fonksiyonun katsayıları değiştirilse de, Senaryo II'de olduğu gibi bazı çözümlerde lokal optimumda takıldığını gösteren işaretler olduğu düşünülmektedir. Senaryo III'de en yüksek ısıtma enerjisi tasarruf yüzdesi değerinin ne olacağı gösterilmek istenmişse de, 4. Gruba ait çözümün daha az çıkması ve 6. Gruba batı yönüne bakan pencerelere derinliği 0,2 metre (D3 kodlu alternatif) olan gölgeleme elemanının eklenmesi bu çözümlerde daha yüksek ısıtma enerjisi tasarrufu elde edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 4.18 Senaryo III kapsamında amaç fonksiyondaki amaç kriterlere farklı ağırlık katsayıları atanarak Senaryo I ve II için gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyonların tekrarlanması sonucunda Isıtma Enerjisi Tasarrufunun en yüksek olduğu çözümler (bina kabuk bileşeninde kullanılabilecek malzeme alternatifi kodlarına göre belirtilmiştir)

Isıtma Enerjisi Tüketimi Üzerindeki Etkilerine Göre 14 Bina Kabuk Bileşeninin Önem Sıralaması		Senaryo III kapsamında Senaryo I ve II İçin Gerçekleştirilen Çok Amaçlı Optimizasyonların Tekrarlanması Sonucunda Isıtma Enerjisi Tasarrufunun En Yüksek Olduğu Çözümler*					
		Senaryo I	Senaryo II				
			1. Grup	2. Grup	3. Grup	4. Grup	5. Grup
1	Pencere-Güney Cephesi	C18	C18	C18	C18	C18	C18
2	Gölgeleme-Güney Cephesi	D9	D9	D9	D9	D9	D9
3	Pencere-Kuzey Cephesi	C18	C18	C18	C18	C18	C18
4	Çatı Döşemesi	B7	B7	B7	B7	B7	B7
5	Dış Duvar-Batı Cephesi		F9	G8	G8	G8	F9
6	Zemin Döşemesi		H10	H10	H10	H10	H10
7	Pencere-Doğu Cephesi			C18	C18	C18	C18
8	Dış Duvar-Kuzey Cephesi			F9	G8	G8	F9
9	Dış Duvar-Doğu Cephesi				G8	G8	G8
10	Gölgeleme-Doğu Cephesi				D3	D9	D9
11	Pencere-Batı Cephesi					C17	C17
12	Gölgeleme-Kuzey Cephesi					D9	D9
13	Gölgeleme-Batı Cephesi						D3
14	Dış Duvar-Güney Cephesi						G8
Sonuçlar	Toplam Tasarruf Miktarı (%)	11,91	5,09	7,88	9,53	9,53	11,24
	Isıtma Enerjisi Tasarruf Miktarı (%)	6,23	10,70	14,12	15,31	15,70	17,20
	Soğutma Enerjisi Tasarruf Miktarı (%)	5,68	-5,62	-6,24	-5,78	-6,17	-5,96
	Geri Ödeme Süresi (Yıl)	11,56	20,84	20,19	21,65	21,70	20,22

* Malzeme alternatif kodlarının özellikleri için Tablo 4.9'a bakınız.

Tablo 4.18 incelendiğinde, Senaryo III kapsamında, tüm çözümlerdeki pencerelere atanan alternatiflere yöneliktir. Tabloya göre binanın batı cephesindeki pencereleri hariç, diğer tüm cephelerindeki pencerelere U değeri=1 ve güneş ısısı kazanç katsayısı=0,73 olan C18 (Üçlü cam, hava dolgulu, 4-16-4-16-4mm) kodlu üç camlı pencereler atanmıştır. Daha önce buna benzer sonuçlarda da değinildiği gibi,

binadaki saydam yüzey alanının büyük oranda olması dikkate alındığında, ısı enerjisinden sağlanacak tasarrufların artırılabilmesi için U değerinin en düşük olduğu ve Güneş Isısı Kazanç Katsayısının ise yüksek olduğu böyle bir seçeneğin uygun bir çözüm olduğu düşünülmektedir. Buna paralel olarak güney yönüne bakan pencerelere de gölgeleme elemanı eklenmemiştir (bkz. Tablo 4.9 D9 kodlu alternatif). Güneşten sağlanacak ısı kazancının, ısıtma enerjisi tasarrufuna olumlu yöndeki katkısı düşünüldüğünde optimizasyon çözümünün mantıklı olduğu söylenebilir. Hatırlanacağı gibi, Senaryo II’de Senaryo III’den farklı olarak binanın her bir cephesindeki pencerelere C18 kodlu pencere alternatifi seçilmişti.

Şekil 4.30’a tekrar bakıldığında, Senaryo III kapsamında ilk 12 sıradaki bina kabuğu bileşenleri ile gerçekleştirilen optimizasyon çözümünde Senaryo II’deki çözüme göre daha yüksek bir ısıtma enerjisi tasarrufu yüzdesi sağlanmıştır. Bunun nedeni, Batı yönüne bakan pencerelerde (Pencere-Batı Cephesi parametresi) C17 kodlu 12mm hava boşluklu üçlü cam kullanılmasına rağmen, Doğu cephesinde gölgeleme elemanı kullanılmaması (bkz. Tablo 4.9 D9 kodlu alternatif) ve Doğu yönüne bakan dış duvarda (Duvar-Doğu parametresi) da 120mm EPS ısı yalıtım malzemesi yerine, 120mm XPS malzemesinin seçilmiş olması olduğu düşünülmektedir. Senaryo III’de ilk 10 sıradaki bina kabuğu bileşeni ile gerçekleştirilen optimizasyon çözümünde, Senaryo II’deki çözüme göre daha düşük yüzdeli ısıtma enerjisi tasarrufu sağlanmasının nedeninin Doğu yönüne bakan pencerelere (Gölgeleme-Doğu Cephesi parametresi) 0,3m derinlikte gölgeleme elemanı atanması olduğu düşünülmektedir.

4.2.4.4 Örnek Bina İçin Önerilen Optimum Çözüm

Sonuç olarak, Senaryo I, II ve II kapsamında belirlenen hedefler doğrultusunda çok sayıda öneri enerji korunum çözümü geliştirilmiş ve bu çözümler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Senaryo I ve Senaryo II’de amaç kriterler için aynı katsayılar kullanılmış ve bu doğrultuda optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu çözümlerde amaç kriterlere katsayılar atanırken her bir kriterden kazanç sağlanması hedeflenmiştir. Senaryo III’de ise her bir amaç kriterden maksimum kazanç sağlanacak şekilde

katsayılar atanmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda tüm bu çözümler arasından Senaryo II kapsamında elde edilen ve Tablo 4.16’da gösterilen çözümlerin modelin uygulandığı mevcut okul binasının enerji performansının geliştirilmesinde uygulanabilecek optimum çözümler olarak önerilmesine karar verilmiştir. Bunun nedeni, bu çözümlerde hem yıllık ısıtma enerjisi hem de yıllık soğutma enerjisinden dengeli kazanımların diğer bir ifadeyle eş zamanlı enerji kazanımlarının sağlanması ve aynı zamanda maksimum toplam enerji kazancı sağlanan çözümler olması ve bu çözümlerin tümünün geri ödeme sürelerinin 15 sene gibi uygun bir sürenin altında olmasıdır.

4.3 Tartışma

Önerilen karar destek modelinin mevcut bir bina üzerinde uygulanmasında, birinci aşamada çok zonlu modelleme yaklaşımı kullanılarak binanın mimari planlarındaki mekanlara uygun şekilde tüm bina enerji modeli oluşturulmuştur. Böylelikle, binanın modelleme aşamasındaki detay düzeyi, binaya ait gerçek tüketim verileriyle simülasyon verilerinin karşılaştırılması sonucunda uygun hata paylarına erişilmesine ve modelin doğrulanmasına yardımcı olmuştur. Ancak çok zonlu modelleme yaklaşımı simülasyon sürelerini ve modelin hassasiyetini artırmıştır. Dolayısıyla, önerilen modelin yeni ya da mevcut bir binada uygulanması ve projenin hedef ve kısıtlarına bağlı olarak benzer zonların gruplanması, binayı temsil edecek tek bir zonun modellenmesi gibi daha basit ve detay düzeyi daha az olan bir modelleme yaklaşımı ile simülasyon süresi azaltılabilir.

Önerilen modelin ikinci aşaması olan hassasiyet analizi uygulamasındaki temel hedef binanın enerji performansını geliştirmede bina kabuğuna yönelik uygulama alanlarının önem düzeylerine göre sıralanmasıdır. Bu aşamada elde edilen sıralama modelin üçüncü aşaması için girdi oluşturmuştur. Belirlenen hedef doğrultusunda çalışmada en uygun yöntemin kullanılması için çeşitli hassasiyet analizi yöntemi çeşitleri incelenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda lokal ve regresyon tabanlı yöntemlerin yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Özellikle regresyon tabanlı yöntemlerin parametreler arası etkileşimi dikkate alması, daha az simülasyon süresi

gerektirmesi ve girdiler ve çıktılar arasındaki pozitif ve/veya negatif korelasyonları göstermesi, girdileri önem düzeylerine göre sıralaması gibi nedenlerle yaygın olarak kullanıldığı saptanmıştır. Ancak regresyon tabanlı global hassasiyet analizi yöntemlerinde seçilen regresyon katsayısına bağlı olarak parametrelerin önem düzeylerine göre sıralamasının değişebildiği görülmüştür. Bu çalışmada, hassasiyet analizi çıktıları olan parametrelerin önem sıralaması optimizasyon için girdi oluşturduğundan parametrelerin önem sıralaması açısından daha güvenilir ve güçlü bir yöntem olan varyans tabanlı global hassasiyet yöntemi olan Sobol yöntemi kullanılmıştır. Sobol yöntemi lokal ve regresyon tabanlı yöntemlere göre daha güçlü olmasına karşın analiz için daha fazla sayıda sümülasyon gerektirmektedir. Ayrıca, Sobol yöntemi girdiler ve çıktılar arasındaki pozitif ve negatif ilişkilerle ilgilenmemektedir. Bu ilişkilerin bilinmesi özellikle optimizasyon sonuçlarının ortaya çıkma sebeplerini anlamada önemli bir bilgi desteği sağlamaktadır. Bu doğrultuda, Sobol yöntemi ek olarak girdi-çıkı ilişkilerini belirleyebilmek için regresyon tabanlı hassasiyet analizi de uygulanmıştır (bkz. Ek-2.1). Sonuç olarak, hangi hassasiyet analizi yönteminin kullanılması gerektiğine çalışmanın hedefleri doğrultusunda karar verilmelidir.

Önerilen modelin üçüncü aşaması olan çok amaçlı optimizasyon yöntemi uygulaması ile bina kabuğuna yönelik binanın ısıtma ve soğutma enerjileri tüketimi ve NBD kriterlerine göre optimum çözümler geliştirilmiştir. Hassasiyet analizi uygulaması sonucunda elde edilen girdi parametrelerinin önem sıralamasından yola çıkılarak bina kabuk bileşenleri önem düzeylerine göre sıralanmıştır. Sonrasında bu sıralama baz alınarak üç farklı senaryo kapsamında farklı sayıda bina kabuk bileşeni ile optimizasyon yapılmıştır. Bu aşamada, optimizasyon algoritmasının global optimum çözüme yakınsama yaptığı ancak tamamen ulaşamadığı görülmüştür. Optimizasyon sürecinde dikkat edilmesi gereken en önemli noktanın amaç fonksiyonun tanımlanması ve ağırlık katsayılarının atanması olduğu tespit edilmiştir. Çünkü tüm süreç tanımlanan bu fonksiyon doğrultusunda ilerlemekte ve bu doğrultuda sonuçlar elde edilmektedir. Özellikle uygun ağırlık katsayılarının atanması işlemi oldukça zordur. Bu çalışmada ağırlık katsayıları atanmadan önce birkaç optimizasyon denemesi yapılmış ve uygun katsayılar böylelikle belirlenmiştir.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

Bu bölümde, çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, çalışmanın sağlayacağı katkılar ve gelecek çalışmalar için öneriler açıklanacaktır.

Bu çalışmada, bina enerji performansını geliştirmeye yönelik karar verme sürecinde ortaya çıkan başlıca üç problemin olduğu tespit edilmiştir. Bunlardan ilki, bu süreçte karar vericiye problemin anlaşılması ve uygun çözümün bulunması yönünde rehberlik edecek sistematik karar destek yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmasıdır. İkinci problem, bina enerji performansına yönelik bilgi desteğinin gerekliliği ve bunun ne şekilde sağlanabileceği üzerinde odaklanırken; üçüncü problem, bina performansının farklı kriterlere göre değerlendirilme ihtiyacı doğrultusunda karar vericinin çok amaçlı optimizasyon problemiyle karşı karşıya olması ve buna çözüm üretmesi gerekmesidir. Bu problemlere çözüm olarak, hassasiyet analizi ve simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin entegrasyonuna dayanan bütünleşik bir yaklaşımı kapsayan bir karar destek modeli önerilmiştir. Bu bağlamda çalışmanın hedefi, binaların enerji performansını geliştirmede/iyileştirmede optimum çözümleri belirlemeye yönelik karar desteği sağlayacak bir model önerilmesi şeklinde belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, ikinci bölümde karar destek süreci ve mevcut karar destek yaklaşımları analiz edilerek sistematik bir karar desteği yaklaşımının gerekliliği ve önemi vurgulanmıştır; üçüncü bölümde üç ana aşamadan oluşan önerilen model açıklanmıştır; dördüncü bölümde ise modelin uygulanabilirliğinin test edilmesi amacıyla mevcut bir okul binasında yapılan uygulama anlatılmış ve uygulama sonucunda elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

Bina enerji performansını geliştirmeye yönelik bir çalışmanın yapılabilmesi için öncelikle “bina enerji performansı olgusunun” açıkça anlaşılması gereği ortaya çıkmış ve bina enerji performansı kavramı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Binalarda performans yaklaşımından binalarda enerji etkinliği, enerji performansı, ısı (termal performans) performans ve çevresel performansa kadar yapılan pek çok

tanımlama irdelenerek bina enerji performansı olgusu geniş bir perspektiften ele alınmıştır.

Bina enerji performansı ile ilgili olarak yapılan tüm irdelemelerin sonucunda, yukarıda belirtilen çeşitli kavramların birbirleriyle örtüşen yanlarının olduğu ve kullanımlarının ise ilgili çalışmanın içeriğine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Ancak, her ne kadar çalışmalarda terminoloji farklılık gösterse de tüm bu kavramların temelinin binaların enerji performansının geliştirilmesine dayandığı ortaya çıkmıştır. Bina enerji performansı alanında yapılan çalışmalardaki ana motivasyonun yeni ve mevcut binaların enerji performansını ölçme ve değerlendirmeyi sağlayacak yolları bulmak; tasarım sürecinde enerji performansını geliştirmenin yollarını bulmak; bina performans simülasyonlarının tasarım sürecine entegrasyonunu araştırmak; bina enerji performansını geliştirmeye yönelik karar vermeye yardımcı destek sistemler geliştirmek; bina enerji performans optimizasyonunu gerçekleştirmek; mevcut bina simülasyon yöntemleriyle yapılan tahminlerin doğruluğunu araştırmak gibi pek çok sebebe dayandığı ve dolayısıyla konunun çok boyutlu olarak ele alındığı sonucuna varılmıştır.

Binaların enerji performansını geliştirmede optimum çözümlerin belirlenmesine yönelik bir karar destek modelinin geliştirilebilmesi için öncelikle karar verme sürecinin ana bileşenleriyle birlikte irdelenmesi gereği ortaya çıkmıştır. Yapılan tüm irdelemelerin sonucunda, bina enerji performansını geliştirmeye yönelik bir karar verme sürecinin temel bileşenlerinin: projenin hedef(ler)ini tanımlayan bina enerji performans kriter(ler)inin belirlenmesi; projenin hedef ve kısıtları doğrultusunda enerji performansına yönelik değişkenlerin (parametrelerin) tanımlanması ve bunlara yönelik çözüm alternatiflerinin geliştirilmesi; geliştirilen alternatiflerin bina enerji performansı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi ve karar destek sistemleri ile en iyi çözüm alternatifinin seçilmesi olduğu tespit edilmiştir. Bu sürecin, çoğunlukla mimarın/tasarımcının bakış açısı ve biçimlendirme yaklaşımıyla ilerleyen günümüz tasarım sürecine göre belirli bir sistematiği gerektirdiği ortaya çıkmıştır. Tez kapsamında bunun ana sebebinin, performans değerlendirmeye dayanan bir sürecin ve yardımcı araçların gerekliliğinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Çalışmada enerji, kullanıcı konforu ve çevresel etki gibi performans kriterlerini geliştirme odaklı stratejileri ve dolayısıyla kararları gerektiren ve yukarıda genel uygulama adımları belirtilen bir karar destek sürecinin günümüz mimari tasarım süreci içerisindeki yeri ve önemi analiz edilmiştir. Yapılan analizin sonucu, bina enerji performansını geliştirmeye yönelik alınan kararların tanımlanabilir, nicelik olarak ölçülebilir ve performans değerlendirme araçlarıyla test edilebilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bina performansını geliştirme odaklı enerji ve çevresel kriterlere ilişkin kararlar genellikle iyi tanımlanmış bir dizi tasarım alternatifinin karşılaştırılmasını ve belirlenen bir takım proje kısıtları çerçevesinde en iyi alternatifin seçilmesini gerektirmektedir. Seçilen bu alternatifin uygunluğu ise genellikle farklı performans kategorilerindeki ölçümlere dayanarak açıklanmaktadır. Test edilen alternatifin ilgili performans ölçümleri, bu alternatifin tasarım programında ifade edilen gereksinimleri karşılamadaki yeterliğini nicelik olarak belirtmektedir.

Bu noktada saptanan en önemli sorun, tasarımcının enerji etkinlik, çevreye duyarlılık gibi performans hedeflerini gerçekleştirebilmek amacıyla alacağı kararları çoğunlukla sezgilerine, deneyimlerine, genel kabul görmüş kurallara ya da mevcut uygulamaları tekrarlamaya bağlı olarak almasıdır. Bu şekilde alınan kararların bina performansında sınırlı düzeyde bir gelişmeye neden olacağı açıktır. Çünkü enerji ve çevresel performansa yönelik kararlar, tasarımcının birçok parametreyi dikkate alarak karar vermesini gerektirir, bunun tersine bir yaklaşım ise bu kriterler bağlamında düşük performanslı sonuç ürünlere yol açabilir. Bu noktada, mevcut karar verme sürecine alternatif olarak ve mevcut eksiklikleri giderecek şekilde performans değerlendirmeye dayanan sistematik bir karar verme sürecinin ve karar desteği sağlayacak sistemlerin/yaklaşımların gerekli olduğu saptanmıştır. Diğer bir ifadeyle, günümüz tasarım süreci enerji ve çevresel girdilerin sürece entegre olmasını gerektirmekte buna karşın yukarıda belirtilen yaklaşımlar bu girdilerin ele alınmasında ve değerlendirilmesinde yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, erken tasarım aşamasında sistematik karar destek yaklaşımlarına ihtiyaç olduğu ortaya çıkmıştır.

Enerji ve çevresel kriterler bağlamında bina performansının geliştirilmesi/iyileştirilmesinde karar verme sürecini yönlendirecek ve karar vericiyi en uygun çözümün bulunması konusunda destekleyecek sistematik karar destek yaklaşımlarının gerekliliğinin problem olarak ileri sürüldüğü bu çalışmada, karar verme sürecinin temel bileşenlerine ilişkin irdelemeler sonucunda yapılan saptamalar aşağıda açıklanmaktadır.

Bina performansını geliştirmeye yönelik karar verme sürecinin etkin şekilde ilerleyebilmesi için öncelikli adım, projenin hedeflerinin açık şekilde tanımlanmasıdır. Bina performansı konusunda tanımlanan hedefler açık şekilde ve nicel kriterler yoluyla tanımlanarak performans göstergelerine/kriterlerine dönüştürülür. Binanın performansındaki ilerleme ya da gelişme ancak performans değerlendirmesi ve karşılaştırma ile mümkündür. Performans değerlendirmesi ise performans göstergeleri ya da kriterlerine göre yapılmaktadır. Diğer bir ifadeyle, performans göstergeleri, anlaşılır tasarım hedefi oluşturmaya yardım eder ve performans olgusunu tanımlanan bu hedef çevresinde düzenler. Bu nedenle, öncelikle binanın performans gereksinimlerinin nicel yani hesaplanabilir terimler olarak tanımlanması gerekmektedir.

Karar verme sürecinin ikinci bileşeni, projenin performans hedefleri doğrultusunda ilgili performans kriter(ler)ine ilişkin parametrelerin tanımlanması gereğidir. Tasarımcı binanın enerji ve/veya çevresel performansını değerlendirmeye ve geliştirmeye çalışırken binanın formu, yönlenme durumu, bina kütlesi, binanın çevre binalara göre konumu, iç ve dış ortam iklim koşulları, bina kabuğunun ısı özellikleri, pencere tipi ve pencere-duvar oranı, güneş kontrolü ve gölgeleme durumu, ısıtma soğutma ve havalandırma sistemlerinin özellikleri ve kullanıcı davranışları gibi çok sayıda parametreyi dikkate almak zorundadır. Bu parametrelerin geliştirilmesi hedeflenen performans kriteri üzerindeki etkilerinin bilinmesi karar verme sürecinde kararların doğruluğu/uygunluğu açısından çok önemlidir. Ele alınan parametrelerden yola çıkarak performans gereksinimlerini karşılayacak enerji korunum önlemleri/stratejileri olarak da adlandırılan enerji korunum çözümleri geliştirilir. Binadaki bileşen, malzeme, sistem ve kütle

elemanlarına ilişkin her bir enerji korunum çözümü, bina enerji performansına etki eden birden çok parametreyi içerebilir. Örneğin, bina kabuğunda uygulanacak bir gölgeleme sistemine ilişkin derinlik, açı, malzeme, konum gibi enerji performansı üzerinde etkili birden çok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin tek başına yaptığı etki, parametreler arası etkileşim ve aralarında oluşan ilişkiler nedeniyle bir arada yaptıkları etkiye göre değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla, önerilecek enerji korunum çözümü de değişmektedir. Bu nedenle, enerji performansı açısından başarılı bir çözüm geliştirilmesi için ilgili tüm parametrelerin dikkate alınması ve parametrelerin birbirleriyle etkileşimlerinin ve aralarında meydana gelen ilişkilerin anlaşılması gerekmektedir.

Bina enerji performansına yönelik karar verme sürecinin üçüncü bileşeni, bina performans değerlendirmedir. Bu aşamada, binanın enerji etkinliğine yönelik geliştirilen her bir alternatif çözümün, projenin performans hedefleri doğrultusunda tanımlanan performans kriterleri üzerinde yaptığı etkinin nicelik olarak ölçülmesi gerekmektedir. Bina performansını değerlendirme yöntemleri arasında bina enerji performans simülasyonları öne çıkmaktadır. Bina performans simülasyonlarında örnek binayı temsil edecek sanal bir bina üzerinden performans analiz ve değerlendirmesi yapıldığından binanın modellenmesinde gerekli ve yeterli verilerin elde edilebilmesinin, bina modelinin simülasyon sonuçlarının doğruluk düzeyi ve güvenilirliği açısından önemli olduğu belirlenmiştir. Ele alınan problem mevcut bir binanın enerji performansının iyileştirilmesine yönelik ise, önerilecek enerji korunum önlemlerinin doğruluk düzeyi ile oluşturulan simülasyon modelinin arasında kuvvetli bir ilişki olduğu da tespit edilmiştir. Oluşturulan bina simülasyon modelinin gerçek binanın mimari planlarına bağlı kalarak oluşturulması, ısıtma-soğutma, aydınlatma gibi binaya servis veren sistemlerinin gerçek bina verileri doğrultusunda modellenmesi, kullanıcı yoğunlukları, kullanıcı, ısıtma, soğutma gibi sistemlerin zaman çizelgelerinin hazırlanması, yapı kabuğu bileşenlerini oluşturan yapı malzemelerinin ve optik ve termofiziksel özelliklerinin doğru şekilde modellenmesi gibi birçok faktör sonuçta ortaya çıkacak simülasyon modelinin doğruluk düzeyini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, mevcut bina üzerinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler ya da binanın gerçek tüketim veri ile

simülasyon verileri karşılaştırılarak kabul edilebilir hata paylarının bulunması, simülasyon modelinin gerçek binayı temsil düzeyi için önem kazanmaktadır. Simülasyon modelinin gerçek bina davranışlarını yüzde yüz tahmin etmesi mümkün değildir. Bu noktada amaç, en az hata payına ulaşmaktır. Bunun da ancak yapılacak bir dizi belirsizlik analizleri sonucunda gerçekleşebileceği saptanmıştır. Ancak bina simülasyon modelinin detay düzeyi arttıkça simülasyon modeli basitten karmaşığa dönüşmekte ve simülasyon süresi de aynı şekilde uzamaktadır. Performans tahmini ve değerlendirmesi sürecinde gerekli olan bina simülasyon modelinin detay düzeyinin; ele alınan probleme, binanın tasarım aşamasında ya da mevcut bir bina olmasına, projenin hedef ve sınırlarına göre değişebileceği ortaya çıkmıştır.

Karar verme sürecinin dördüncü bileşeni ise; karar destek sistemleri başlığı altında ele alınmıştır. Bu aşama, bina için geliştirilen bir dizi enerji korunum çözümü arasından, hedeflenen performans kriter(ler)ine göre en iyi kombinasyonun ya da çözüm alternatifinin bulunması sürecini kapsamaktadır. Bu aşama karar verme sürecinin bir bileşeni olarak adlandırılrsa da aslında karar verme sürecinin odak noktası olduğu düşünülmektedir. Bu aşama tüm süreç boyunca ele alınan ve detaylandırılan problemin çözümlendiği noktadır. Örneğin, karar verme sürecinin birinci aşamasında belirlenen performans hedefleri arasında ödünleşimlerin bulunması, ikinci adımında ele alınan bina performansını etkileyen çok sayıda parametre olması ve bu parametrelerden hareket ederek çok sayıda enerji korunum teknolojisi bulunması ve bunlar arasında bina için en iyi performansı gösterecek kombinasyonun seçilirken hedefler arasındaki ödünleşimlerin (trade-offs) dikkate alınması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda tasarımcı/mimar veya diğer karar vericiler oldukça karmaşık olan bir problemin çözümüyle karşı karşıya kalmaktadır ve bu durum karar destek sistemlerinin temel çıkış noktasını oluşturmaktadır. Literatürde bu problemlerin çözümüne yönelik geliştirilen yaklaşımlar dört başlık altında gruplanarak irdelenmiştir. Bu yaklaşımlar: simülasyon tabanlı yaklaşımlar, çok kriterli karar verme sistemleri, hassasiyet analizi ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımıdır. Tez çalışmasında, bu yaklaşımların olumlu ve olumsuz yönleri tartışılmış ve sonuç olarak bu yaklaşımların olumlu yönlerinin

kullanıldığı, entegre bir karar desteği yaklaşımının geliştirilmesinin, öne sürülen problemlerin çözümüne önemli bir katkı sağlayabileceği belirlenmiştir.

Bu çalışma, binaların enerji performansını geliştirmeye yönelik sistematik karar desteği yaklaşımlarının gerekliliği probleminin yanısıra, karar verme sürecinde tespit edilen iki ayrı probleme daha yoğunlaşmıştır. Bunlardan ilki bina enerji performansına yönelik bilgi desteğinin gerekliliği ve bunun ne şekilde sağlanabileceği üzerinde odaklanırken diğer bir problem, bina performansının farklı kriterlere göre değerlendirilme ihtiyacı doğrultusunda karar verme sürecinin karmaşıklaşmasına yöneliktir.

Çalışmada, yukarıda açıklanan problemlere çözüm olarak binaların enerji performansını geliştirmede optimum çözüm önerilerinin belirlenebilmesine yönelik başta mimarlar olmak üzere tüm karar vericiler için karar desteği sağlayacak ve rehberlik görevi görecek bir karar destek modeli önerilmiştir. Önerilen model, iki ayrı karar destek sistemi; hassasiyet analizi ve simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin entegrasyonuna dayanan bütünleşik bir yaklaşımı temsil etmektedir. Önerilen model ile, binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi ve yıllık soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki etki düzeylerine/önem derecelerine göre incelenen tasarım parametreleri ve dolayısıyla bina bileşenleri sıralanmaktadır. Bunun yanı sıra, binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi, yıllık soğutma enerjisi tüketimi ve yatırımın ekonomik faydasının olup olmadığını gösteren ve belirli bir dönemde yatırımdan sağlanacak kazancı, başlangıç maliyetini ve geri ödeme süresini kapsayan Net Bugünkü Değer (NBD) kriterleri eş zamanlı optimize edilmekte ve bu doğrultuda bina enerji performansını geliştirmeye yönelik optimum çözümler belirlenmektedir.

Çalışmada önerilen karar destek modeli birbiriyle entegre olan üç ana aşamadan oluşmaktadır:

1. Bina enerji modelini (taban model) oluşturma: Birinci ana aşama; bina performans simülasyon programı ile bina enerji modelini (taban modelin)

oluşturma, taban modelin doğruluk düzeyini belirleme ve projenin hedef ve kısıtlarını belirleme olmak üzere üç alt uygulama adımını içermektedir. Bu aşamada oluşturulan bina enerji modeli bundan sonraki aşamalar için referans bina olarak kullanılmaktadır.

2. Hassasiyet analizi yöntemi uygulaması: İkinci ana aşama; girdi parametrelerini belirleme ve girdiler için örneklem oluşturma, girdi dosyalarını oluşturma, simülasyon ile çıktı dosyalarını elde etme ve hassasiyet analizi katsayısı seçme ve sonuçları elde etme olmak üzere dört alt uygulama adımını içermektedir.
3. Çok amaçlı optimizasyon yöntemi uygulaması: nc ana aşama; optimizasyonda kullanılacak girdi parametrelerini seçme (hassasiyet analizi sonuçlarına göre), malzeme alternatiflerini geliştirme, amaç fonksiyonu tanımlama ve ağırlıklandırma, optimizasyon programını alıştırma ve optimum çözümleri belirleme olmak üzere dört alt uygulama adımı içermektedir.

Binaların enerji performansına yönelik bilgi desteğinin gerekliliği karar verme sürecinde saptanan önemli problemlerden biridir. Bina performansı birden çok parametrenin aynı anda etkileşimine bağlı olarak belirlenmektedir. Bu noktada sorun, her bir parametrenin binanın tanımlı bir performans kriteri üzerinde eşdeğer etkiye sahip olmamasıdır. Aynı zamanda bu parametreler ve bina performansı arasında pozitif ve negatif ilişkiler oluşabilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, parametrelerin bina üzerindeki etki düzeylerinin ve performans kriterleri ile ilişki durumlarının bilinmesi, karar verme sürecinde performansa yönelik bilgi desteği açığını kapatarak mimar/tasarımcı ya da diğer proje katılımcılarının karar verme sürecini kolaylaştıracaağı düşünülmüştür. Tez çalışmasında önerilen modelde, bu problemin çözümüne yönelik olarak global hassasiyet analizi yöntemlerinden biri olan varyans tabanlı global hassasiyet analizi yönteminin karar verme sürecinde uygulanması önerilmiştir. Bu yöntem, yeni bina tasarımı ya da mevcut bir binanın iyileştirilmesi sürecinde çok sayıda tasarım parametresi arasından bina performansını doğrudan etkileyen parametrelerin belirlenmesini, diğer bir ifadeyle en etkili parametrelerin

tanımlanmasını, sağlamaktadır. Bunu ise, parametrelerin belirli sınır değerler arasında aldığı değerlerin sonuç performans üzerinde oluşturduğu sayısal değişiklik (sapmalar) üzerinden yapmaktadır. Önerilen karar destek modelinde hassasiyet analizi uygulamasının yaptığı katkılara yönelik saptamalar şu şekildedir:

- Hassasiyet analizi bina performans simülasyonu sürecinde karar vermeye yardımcı bir rehber olarak önerilmiştir. Bu noktada temel amaç, elde edilen sonuçlarla tasarımcı ya da diğer karar vericilere bilgi desteği sağlamaktır.
- Karar verme sürecinde mimarlar/tasarımcılar gibi karar vericiler çoğunlukla teknik bilgi altyapısı gerektiren simülasyon sonuçlarını anlamakta zorluk yaşarlar. Hassasiyet analizi yöntemi, tasarım aşamasında en etkili parametrelerin tanımlanması yolu ile önemli bir bilgi desteği sağlamaktadır. Böylelikle, tasarımcıya simülasyon sonuçlarını anlamada ve sebep-sonuç ilişkisi kurmada yardımcı olmaktadır.
- Bu tip ilişkiler zincirinin bilinmesi aynı zamanda bina enerji performansına yönelik etkileşimlerin anlaşılmasına ve enerji performansını geliştirmeye yönelik öncelikli uygulamaların tanımlanması ile karar verme sürecinin etkinliğinin artırılmasını sağlamaktadır. Böylelikle, bina performansı üzerinde çok etkili olmayan uygulamaların önerilmesinin de önüne geçilecektir.
- Hassasiyet analizi, bina enerji performansı üzerinde en etkili parametrelerin tanımlanması ile parametrelerin sayılarının indirgenmesini sağlamaktadır. Böylelikle, simülasyon modelinin basitleştirilmesi için yol gösterici olmaktadır (De Wit, 1997).
- Hassasiyet analizi uygulaması sonucunda en etkili parametrelerin belirlenmesi ve seçilmesi ile optimizasyon uygulamasının gerçekleştirilmesi sonucunda daha az parametreyle yapılan optimizasyon sürecinin süresi ve karmaşıklığı azalmaktadır. Böylelikle, önerilen modelin üçüncü ana aşaması olan optimizasyon sürecinin de etkinliği artmaktadır.

- Hassasiyet analizinin optimizasyon uygulamasının öncesinde bir ara basamak olarak önerilmesi, sebep-sonuç ilişkisini (girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkileri ve etkileşimleri) ortaya koyarak karar verme aşamasında bilgi desteği sağlamaktadır. Diğer bir ifadeyle, hassasiyet analizi yapılmaksızın doğrudan optimizasyon uygulaması yapıldığında, ortaya çıkan optimum çözümlerin nedenselliğine yönelik ilişkilerin kurulması güçleşmektedir. Buna karşın, hassasiyet analizi sonuçlarına göre optimizasyon uygulaması sonucunda ortaya çıkan optimum çözümlerin nedenleri kolaylıkla anlaşılmaktadır.

Hassasiyet analizi yönteminin uygulanması; Bu çalışmada varyans tabanlı global hassasiyet analizi (variance based sensitivity analysis) olan Sobol Yöntemi (Sobol's Method), girdi parametrelerinin ilgili çıktı parametreleri üzerindeki etki değerlerine göre sıralanması için kullanılmıştır. Sobol Yönteminin seçilmesinin nedeni; bu örneklem yönteminin ve sonucunda elde edilen hassasiyet katsayılarının modelden bağımsız olması ve parametrelerin önem ve öncelik sıralamalarının diğer yöntemlerle elde edilen sıralamalar göre daha güvenilir olmasıdır. Hassasiyet analizi uygulamasını gerçekleştirebilmek için birçok program bir arada kullanılarak ve entegre edilerek bir sistem geliştirilmiştir. Varyans tabanlı global hassasiyet analizi yönteminin uygulanması sürecinde, EnergyPlus bina performans simülasyon programı, Matlab, Simlab ve Microsoft Excel programları bir arada kullanılmıştır. Geliştirilen bilgisayar kodlarıyla otomasyon sağlanmıştır.

Karar verme sürecinde saptanan diğer bir problem ise, bina performansının farklı kriterlere göre değerlendirilmesi ihtiyacı ve alınan kararların farklı hedef kriterlerine göre birçok ödünleşim içermesidir. Herhangi bir parametredeki değişim bir kriteri olumlu etkilerken diğer bir kriter için tam tersi bir etki gösterebilmektedir. Bu durumda, her iki kritere göre en ideal ya da optimum parametre değerinin atanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu problem, çok amaçlı optimizasyon problemidir. Tez çalışmasında önerilen modelde, bu problemin çözümüne yönelik çok amaçlı optimizasyon yönteminin karar verme sürecinde kullanılması önerilmiştir.

Karar verme sürecinde çok amaçlı optimizasyon yönteminin kullanımının yaptığı katkılara yönelik saptamalar şu şekildedir:

- Birden fazla performans kriterine göre eş zamanlı değerlendirme yapılabilmesinde ve kriterler arasında meydana gelen ödünleşimlerin (trade-offs) ortaya çıkarılmasına etkili bir yöntemdir.
- Enerji korunumuna yönelik çok sayıda çözüm alternatifi arasından optimum çözümlerin belirlenmesinde çok etkilidir.
- Çoklu enerji korunum çözümlerinin önerilecek olması durumunda çözüm alternatifleri geliştirmeye katkı sağlamaktadır.
- Tasarım değişkenleri (parametreleri) bina performansı üzerinde çok karmaşık etkileşimler ve lineer olmayan etkiler sergilemektedir. Tüm değişkenler eş zamanlı değiştiğinde, her bir değişkenin etkisi lineer prensiplerle tahmin edilemeyebilmektedir. Bu nedenle, bina performansının optimizasyonu deneyimli tasarımcılar tarafından bile simülasyon tabanlı yöntemlerle başarılamayabilir. Optimizasyon belirli bir bina tasarımı probleminin çözümü için en iyi ya da en iyiye yakın çözümlerin başarılabilmesi için etkin bir yöntemdir.
- Farklı tasarım alternatiflerinin enerji performans kriterleri bağlamında değerlendirilmesi, analiz edilmesi ve karşılaştırılması için bir zemin oluşturarak karar verme sürecini desteklemekte ve böylelikle tasarım sürecini daha iyi şekilde yönlendirmeyi sağlamaktadır.

Çok amaçlı optimizasyon yönteminin uygulanması; Simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon sürecinde; EnergyPlus simülasyon programı ve GenOpt optimizasyon programı entegre şekilde kullanılmış ve ağırlıklı toplam model yaklaşımıyla tanımlanan amaç fonksiyon minimize edilmeye çalışılmıştır. Tanımlanan amaç fonksiyon binanın ısıtma enerji tüketimi, soğutma enerjisi tüketimi ve yapılacak yatırımın başlangıç maliyeti ve geri ödeme süresini kapsayan Net

Bugünkü Değer (NBD) olmak üzere üç ana performans kriterini içermektedir. Böylelikle, bu üç performans kriteri aynı anda optimize edilmiştir.

Önerilen modelin uygulanabilirliği mevcut bir okul binasında test edilmiştir. Model okul binasının enerji performansının iyileştirilmesinde optimum çözüm önerilerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Modelin uygulandığı örnek okul binası sıcak ve nemli iklim özelliklerini temsil eden İzmir ilinin Çiğli ilçesinde bulunmaktadır. Eğitim ve öğretim işlevli bir kamu binası olan okul, 1993'te Bayındırlık Bakanlığının 24 derslikli tip projesine göre inşa edilmiştir. Modelin uygulanmasına yönelik adımlar ve detayları sırasıyla şu şekildedir:

1. Bina enerji modelinin oluşturulması: Bu aşamada mevcut bina, simülasyon programıyla modellenerek enerji simülasyon modeli oluşturulmuş ve oluşturulan modelin doğrulanması yapılmıştır. Sonrasında, proje hedefleri ve kısıtları belirlenmiştir. Bu aşamada aşağıda belirtilenler yapılmıştır:
 - Binanın mimari projesine uygun olarak çok zonlu modelleme yaklaşımı ile tüm bina enerji performans simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Modelleme ve simülasyon için; EnergyPlus 8.1.0 dinamik simülasyon motorunu kullanan Sketch-up® programının Open Studio® eklentisi kullanılarak bina enerji modeli oluşturulmuştur.
 - Binaya ait gerçek ısıtma enerjisi tüketimi verileriyle, gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen ısıtma enerjisi tüketim verileri karşılaştırılmış ve bina enerji simülasyon modelinin ısıtma enerji tüketimindeki hata payları saptanmış ve doğrulaması yapılmıştır.
 - Projenin hedef ve kısıtlarını belirlemek için bina kullanıcıları ile görüşme yapılmış ve anket uygulanmıştır.
 - Bina kullanıcılarının çözüme yönelik öncelikleri ve istekleri tespit edilmiştir.
 - Proje hedefleri ve kısıtları tanımlanmıştır.

2. Hassasiyet analizi uygulaması: Bu aşamada aşağıda belirtilenler yapılmıştır:

- Projenin hedef ve kısıtları doğrultusunda ele alınacak tasarım parametreleri belirlenmiştir.
- Her bir tasarım parametresi için değer aralığı belirlenmiş, Simlab programı ile Sobol örnekleme yapılmış ve Matlab programıyla geliştirilen kod ile EnergyPlus girdi dosyaları olan IDF uzantılı girdi dosyaları oluşturulmuştur.
- Girdi dosyalarının EnergyPlus (EP Launch ve IDF Editor) ile toplu şekilde simülasyonu yapılarak binanın ısıtma ve soğutma yüklerine ait sonuç verilerin olduğu CSV uzantılı çıktı dosyaları elde edilmiştir.
- Simlab programı kullanılarak her bir parametrenin Sobol katsayıları hesaplanmış ve Excel programı yardımıyla parametreler katsayı değerlerine göre sıralanmıştır.

3. Optimizasyon uygulaması: Bu aşamada yapılanlar şu şekildedir:

- Belirlenen proje hedefleri doğrultusunda Senaryo I, II ve III olmak üzere üç farklı kapsamda çözümler geliştirilmiştir.
- Her bir senaryonun kapsamına göre hassasiyet analizi sonucunda elde edilen tasarım (girdi) parametreleri arasından seçim yapılmıştır.
- Tasarım parametrelerinin ait oldukları bina kabuğu bileşenlerine göre çözüm alternatifleri üretilmiştir.
- GenOpt optimizasyon programında binanın ısıtma enerjisi tüketimi, soğutma enerjisi tüketimi ve Net Bugünkü Değer amaç kriterlerine ilişkin formülleri tanımlanmıştır ve ağırlıklı toplam model yaklaşımıyla formüle edilen amaç fonksiyona geliştirilen senaryoların hedefleri doğrultusunda ağırlık katsayıları atanmıştır.

- GenOpt optimizasyon programı Senaryo I, II ve III için ayrı ayrı çalıştırılarak optimum çözümler tespit edilmiştir.

Önerilen modelin uygulamasını gerçekleştirebilmek için birçok programın belirli bir amaca yönelik entegre edilmesi ve yazılan bilgisayar kodlarıyla otomasyon sağlanması sayesinde özgün bir sistem geliştirilmiştir.

Okul binasında yapılan uygulama sonucunda önerilen modelin uygulanabilirliğine ilişkin elde edilen bulgular şunlardır:

- Bina enerji modelleme yaklaşımlarının detay düzeyinin tüm süreci etkilediği tespit edilmiştir. Örneğin, okul binasının enerji simülasyon modeli oluşturulurken binanın mimari planlarına tamamen uygun olarak çok zonlu modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Böylece, model için kabul edilebilir hata payları elde edilerek, model doğrulanmıştır. Ancak, çok zonlu bu model ile gerçekleştirilen simülasyonun süresi artmıştır. Buna paralel olarak, hassasiyet analizi ve optimizasyon uygulamalarının süreleri de aynı oranda artmıştır. Dolayısıyla, modelin doğruluk düzeyinin daha az önemli olduğu ve daha az simülasyon süresinin istendiği durumlarda benzer zonlar gruplanarak ya da basitleştirilmiş model yaklaşımı kullanılarak bina enerji modeli oluşturulabilir.
- Hassasiyet analizi yönteminin, bina enerji performansının geliştirilmesi için; uygulama çözümlerinin önem ve önceliklerine göre sıralanmasında, performans kriterleri ve tasarım parametreleri arasındaki etkileşim ve ilişkilerin belirlenmesinde yol gösterici bir role sahip olduğu belirlenmiştir. Örneğin, binanın yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimlerinin azaltılabilmesi için bina kabuğuna ilişkin tüm iyileştirme uygulamaları arasından öncelikli yapılması gerekenin binanın güney cephesindeki pencerelerin enerji etkin bir pencere sistemiyle değiştirilmesi olduğu saptanmıştır.
- Hassasiyet analizi uygulaması sonucunda elde edilen bulgular binanın enerji performansını geliştirmeye yönelik mevcut karar verme mekanizmalarının

(mevcut uygulamaların tekrarlanması, genel kabul görmüş kuralların referans alınması vb.) doğru ve etkin çözümlerin geliştirilmesinde her zaman yeterli olmadığını ortaya koymuştur. Dolayısıyla, performans değerlendirmeye dayanan sistematik karar desteği yaklaşımlarının eksikliği olarak tezde ileri sürülen temel problemin çözümünün önemi de vurgulanmıştır. Örneğin, binanın enerji etkinliğine ilişkin mevcut uygulamalar düşünüldüğünde, dış duvarda yapılacak ısı yalıtımı en bilinen ya da yaygın uygulamalar arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, bu yaygın uygulamanın her zaman her bina en etkin uygulama olmadığı saptanmıştır. Örnek okul binası üzerindeki hassasiyet analizi uygulamasının sonuçlarına göre, yapı kabuğu bileşeni olan dış duvarda yapılacak bir ısı yalıtımı uygulaması, binanın ısıtma enerjisi tüketiminin azaltılmasında beşinci sırada yer alırken, soğutma enerjisi tüketiminin azaltılması için ise sekizinci sırada yer almaktadır. Diğer bir ifadeyle, dış duvar ısı yalıtımı uygulaması en etkili uygulama çözümleri arasında yer almamaktadır. Doğrudan binanın sıcak-nemli iklim bölgesinde bulunması, binanın geometrisi ve fiziksel özellikleriyle ilişkili olan bu durum, hassasiyet analizi sonuçlarının, binanın özellikleriyle ve içinde yer aldığı bölgenin iklim özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğunu açık bir şekilde göstermektedir. Dolayısıyla, gerek kütleli form gerekse fiziksel özellikler açısından farklı olan bir binaya ait enerji simülasyon modeliyle, farklı bir iklim tipinde yapılacak bir uygulamayla çok farklı sonuçlar alınacağı kesindir.

- Hassasiyet analizi yönteminin optimizasyon sürecini ne şekilde yönlendirdiği ve desteklediği gösterilmiştir. Örneğin, bina kabuğuna ilişkin belirlenen tasarım (girdi) parametreleri ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimi performans kriterleri üzerindeki etki düzeylerine/önem derecelerine göre sıralanmıştır. Bu sıralamadan yola çıkarak bina kabuğu bileşenleri de önem düzeylerine sıralanmıştır. Sonrasında “Senaryo I” kapsamında binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimine yönelik parametrelerin önem sıralaması dikkate alınarak ilk dört sırada yer alan bina kabuğu bileşeni seçilerek optimizasyon yapılmıştır. Senaryo II’de ise aynı sıralamaya göre ilk altı, sekiz, on, on iki ve on dört bina kabuk bileşenini içeren beş ayrı grup için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, her bir çözüm önerisi için optimum çözümler belirlenmiştir.

Ayrıca, Senaryo I’de sadece ilk dört bina kabuğu bileşeninin girdi parametresi olarak kullanılması ile optimizasyon algoritması kısa sürede yakınsama sağlanmıştır.

- Hassasiyet analizi uygulamasında bina cephelerinin ayrı ayrı ele alınması ve bu doğrultuda optimizasyonun gerçekleştirilmesi ile tüm binaya aynı uygulamanın önerilmesi engellenerek yetersiz ya da gereksiz çözümlerin önerilmesi engellenmiştir. Dolayısıyla, bina enerji performansına yönelik doğru ve etkin uygulama çözümleri geliştirilmiştir. Örneğin, Senaryo II kapsamında, maksimum soğutma enerjisi tasarrufu sağlanabilmesi için binanın tüm cepheleri için farklı özelliklerdeki pencere sistemleri önerilmiştir. Böylelikle, tüm bina cephelerine aynı uygulamanın önerilmesi yerine her cephe özelinde en iyi uygulamanın önerilmesi sağlanmıştır.
- Simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yönteminin, binanın farklı bölümlerine ilişkin çok sayıda çözüm alternatifi arasından tanımlanan amaç fonksiyona göre alternatiflerin bir araya gelerek oluşturdukları kombinasyonları içeren optimum çözümlerin belirlenmesinde etkili bir yöntem olduğu görülmüştür. Örneğin, optimizasyon uygulamasıyla Senaryo I ve II kapsamında bina kabuğuna ilişkin farklı sayıda uygulama çözümlerini içeren ve her birinden elde edilecek ısıtma ve soğutma enerjileri tasarruf yüzdeleri ve NBD değerleri elde edilerek etkili bir karar desteği sağlanmıştır.
- Çok amaçlı optimizasyon uygulamasında amaç kriterler arasında meydana gelen ödünleşimler (trade-offs) belirlenmiştir. Örneğin, optimizasyon sonuçlarına göre binada ısıtma enerjisinden sağlanacak yıllık tasarruf miktarının, soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarıyla; soğutma enerjisinden sağlanacak tasarruf miktarının ise geri ödeme süresiyle olan ters orantısı ortaya çıkmıştır. Diğer bir ifadeyle, ısıtma enerjisi tasarruflarının hem soğutma enerjisi tasarruflarıyla hem de projenin geri ödeme süresiyle ve dolayısıyla NBD kriteri ile arasında ödünleşim (trade-off) meydana gelmiştir.
- Binadaki kullanıcı gruplarının çözüme yönelik önceliklerinin farklı olması durumunun performans hedeflerine dönüştürülerek karar sürecini ne şekilde

yönlendirdiği gösterilmiştir. Örneğin, binadaki bir grup kullanıcı için binanın ısıtma enerjisi tüketiminin azaltılması öncelikli hedef iken, diğer bir grup için binanın soğutma enerjisi tüketiminin azaltılması ya da yapılacak yatırımın geri ödeme süresinin kısalığı öncelikli hedef olduğunda ortaya çıkan bu problemin önerilen model ile ne şekilde çözüleceği belirlenmiştir. Kullanıcı gruplarının çözüme yönelik önceliklerinin farklı olması performans hedeflerindeki (amaç kriterler) önem ve öncelik sıralamasının değişmesine yol açmıştır. Bu doğrultuda, Senaryo III kapsamında optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu oluşturan üç amaç kriterlere ağırlık katsayıları atanırken, her defasında bir amaç kriteri diğer kriterlere göre daha önemli ve öncelikli kılacak şekilde katsayılar atanmış ve optimizasyon işlemi tekrarlanmıştır.

Yukarıdaki bulgular doğrultusunda bina performansının geliştirilmesinde optimum çözümleri belirlemeye yönelik önerilen karar destek modelinin,

- **Hem yeni binaların tasarım sürecinde hem de mevcut binaların enerji etkin iyileştirilmesinde binanın enerji performansını geliştirmeye yönelik kararların alınmasında doğrudan ya da dolaylı olarak karar verme sürecine katılan tüm karar vericilerin sistematik bir şekilde karar vermesinin sağlanmasında,**
- **Bina performansını geliştirmeye yönelik doğru ve etkin enerji korunum çözümlerinin/stratejilerin belirlenebilmesine ilişkin bilgi akışının ve girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiler zincirinin açıklanmasında,**
- **Bina performansını geliştirmeye yönelik optimum çözümlerin belirlenmesinde, binanın yıllık ısıtma enerji tüketimi, yıllık soğutma enerjisi tüketimi ve yapılacak yatırımın başlangıç maliyeti ve geri ödeme süresini kapsayan Net Bugünkü Değer (NBD) kriterlerinin diğer bir ifadeyle birbiriyle çatışan üç amaç kriterin eş zamanlı olarak değerlendirilmesinde,**

- **Binanın enerji performansını geliştirmeye yönelik bina kabuğu bileşenleri, bina sistemleri, kütle elemanları gibi binanın farklı noktalarına ilişkin çeşitli çözüm alternatiflerinin bir aradaki etkilerinin değerlendirilmesinde ve bu alternatifler arasından doğru ve etkin çözümlerin seçilmesinde,**
- **Binanın enerji performansını geliştirmeye yönelik odaklanılması gereken öncelikli uygulama alanlarının belirlenmesinde,**

potansiyel bir güce sahip olduğu saptanmıştır.

Önerilen karar desteği modeli üç farklı adımı bir sistem mantığıyla yönlendirmekte ve her bir adımın kendi içinde analizinin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, önerilen model karar verme süreci akışında etkili olası tüm kriterleri sistematik biçimde ele alarak bina enerji performansının geliştirilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmanın bina enerji performansı alanına sağlayacağı olası katkılar şunlardır:

- Önerilen karar destek modeli, tüm karar vericilerin (tasarımcı/mimar, işveren, mühendis, bina uzmanı vb.) projenin enerji performansına yönelik amaçlarına odaklanmalarına olanak tanıyacak ve proje katılımcıları arasında ortak bir iletişim dili sağlayacaktır.
- Hassasiyet analizi ve çok amaçlı optimizasyon yönteminin bir arada kullanılmasına dayanan ve bu yöntemlerin olumlu yönlerinin bütünleşik olarak kullanılması sonucunda önerilen karar destek modeli, bu yöntemlerin kullanım sırasını, nasıl ve ne amaçla kullanılması gerektiğini göstererek özellikle uygulamadaki/pratikteki çalışmalar için önemli bir uygulama modeli olarak ilgili literatüre katkıda bulunacaktır.
- Hassasiyet analizi yöntemi girdi parametrelerinin sayısını indirgeme ile binanın performans optimizasyonunun süresini azaltması ve böylelikle

optimizasyon sürecinin etkinliğini artırma potansiyeline bugüne kadar yapılan birkaç çalışmada değinilmiştir. Bu çalışmalarda hassasiyet analizi yöntemi çeşitlerine bakıldığında, lokal hassasiyet analizi ve regresyon tabanlı global hassasiyet analizinin uygulandığı belirlenmiştir. Bu çalışmalarda, hassasiyet analizi sadece girdi parametrelerinin sayısının azaltılması için önerildiği, analiz sonuçlarının bir sonraki aşamayı ne şekilde yönlendirebileceğinin ise irdelenmediği saptanmıştır. Ancak, hassasiyet analizi yöntemi ile elde edilen sonuçların, optimizasyon gibi başka bir süreç için girdi olması durumunda girdi parametrelerinin önem ve önceliklerine göre sıralanması büyük önem taşımaktadır. Bu durumda, lokal hassasiyet analizi ve regresyon tabanlı hassasiyet analizi yöntemleri yetersiz kalabilmektedir. Regresyon tabanlı global hassasiyet analizi yönteminin uygulanmasında, SRC, SRRC, PEAR gibi kullanılan hassasiyet katsayısına bağlı olarak parametrelerin önem ve önceliklerinin sıralaması değişmektedir. Bu türden bir değişiklik ise, optimizasyon sürecini ve sonucu olumsuz etkileyebilir. Bu noktada, saptanan bu eksiklik doğrultusunda lokal ve regresyon tabanlı hassasiyet analizi yöntemlerine göre hesaplama yükü daha maliyetli olan ancak parametrelerinin önem ve öncelik sıralaması açısından daha güvenli olan varyans tabanlı global hassasiyet analizi olan Sobol Yöntemi kullanılmıştır. Bu yönüyle model, bina enerji performansının optimizasyonu için hatalı ya da yetersiz çözümlerin minimize edilmesini sağlayacaktır.

- Binaların tasarım ve kullanım/işletim aşamalarında enerji ve çevresel performansını geliştirmeye yönelik destek sistemlerden yararlanma ihtiyacı doğrultusunda farklı alanlarda kullanılan çok kriterli karar verme sistemleri, çok amaçlı optimizasyon, hassasiyet analizi gibi karar destek sistemlerinin bina enerji performansı alanında kullanımı gittikçe artmaktadır. Hassasiyet analizi yöntemi ile yapılan çalışmalar genellikle tasarım sürecinde en etkili tasarım parametrelerinin belirlenmesi ile tasarımcıya yol gösterilmesi ve analizden elde edilen sonuçlarla tasarım rehberlerinin oluşturulması üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalarda yöntem, çoğunlukla belirli bir bina tipine uygulanmış ve performansa yönelik analiz ve değerlendirmeler sonucunda elde edilen sonuçlar tasarımcıya “tasarım rehberi” olarak verilmiştir. Bu

çalışmada, bunların tasarımı ve tasarımcıyı kısıtlayıcı olabileceği düşünülmekte ve geliştirilen yaklaşımların kısıtları olarak görülmektedir. Ayrıca, bu çalışmalarda tasarımcı ya da diğer karar vericilere sağlanan karar desteğinin sadece en etkili parametrelerin bulunması aşamasında kalması da bu çalışmalardaki önemli bir eksikliktir. Çünkü tasarımcı bu aşamada, enerji, maliyet gibi birçok kritere göre hangi uygulama çözümünü, malzemeyi, boyutu vb. seçmesi gerektiği konusunda da karar desteğine ihtiyaç duymaktadır. İşte bu noktada, optimizasyon yöntemi karar desteğini bir adım öteye taşıyabilmekte ve bina enerji performansı alanında önemli bir güç olarak görülmektedir. Optimizasyon ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, optimizasyonun iki şekilde uygulandığı saptanmıştır. Bunlardan ilki, sınırlı sayıda tasarım alternatifi oluşturmak, bina performans simülasyonları yardımıyla bu alternatifleri tek tek denemek ve aralarından en ideal çözümü seçmek şeklindedir. Ancak bu sürecin zaman alıcı olması ve sınırlı sayıda alternatif arasında arama yapılmasına olanak sağlaması bu optimizasyon uygulamasının olumsuz yanlarıdır. Ayrıca, sınırlı sayıda çözüm alternatifi üretildiği için elde edilen sonucun her zaman optimum çözüm olamayacağı ve bu yüzden bu yaklaşımın yetersiz olduğu düşünülmektedir. İkincisi uygulama ise; optimizasyon algoritması yardımıyla tanımlanan amaç fonksiyon doğrultusunda tüm çözüm kümesinde araştırma yaparak, optimum çözümleri elde etmektir. Bu yöntemin uygulanması sonucunda elde edilen sonuçların ortaya çıkış nedenlerine yönelik bilginin bulunmaması, girdi sayısına bağlı olarak optimizasyon sürecinin uzaması ve teknik bilgi gerektirmesi yöntemin zorluklarıdır. Tüm bu açıklamalar doğrultusunda, hassasiyet analizi ve çok amaçlı optimizasyon yönteminin bir arada kullanılmasına dayanan ve bu yöntemlerin olumlu yönlerinin var olan eksiklikleri giderecek şekilde kurgulanarak önerilen bütünleşik karar destek modelinin, binaların enerji performansının geliştirilmesi sürecinde ihtiyaç duyulan sistematik bir karar desteğine temel sağlayacak ve ilgili literatüre katkıda bulunacaktır.

- Ülkemizde bina enerji performansı alanında bina performans simülasyon programları tasarımcılar/mimarlar tarafından yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bunun temel nedeni; programların karmaşık olması ve

yapı fiziğine yönelik bilgi gerektirmesidir. Önerilen karar destek modeli, mimarlar, mühendisler gibi karar verme sürecinde önemli bir rolü olan proje paydaşlarına tasarım parametrelerinin, bina performans simülasyonlarının, bina performans optimizasyonunun ve bina performansına dayalı bir karar verme sürecinin öneminin anlaşılmasında önemli bir farkındalık sağlayacaktır.

- Son yıllarda dünya genelinde bina enerji performansı alanındaki yoğun çalışmalar, ülkemizde de kendini hissettirmektedir. Belirli bina tiplerine ilişkin yüksek performanslı bina tasarımına yönelik tasarım rehberlerinin geliştirilmesi, sınırlı sayıda tasarım alternatifinin ayrı ayrı simülasyonu ile gerçekleştirilen optimizasyon gibi bazı çalışmalar bulunmaktadır. Binaların enerji performansını geliştirmede optimum çözümlerin belirlenmesine yönelik hassasiyet analizi ve simülasyon tabanlı çok amaçlı optimizasyon yöntemini entegre şekilde kullanarak karar desteği sağlayan bu model, ulusal bilimsel literatüre de önemli bir katkıda bulunacaktır.
- Bu tez çalışması, optimizasyon yöntemlerinin bina performans simülasyonları ve tasarım araçlarıyla entegrasyonuna yönelik genel bir çerçeve sunmaktadır. Birbirinden bağımsız olan bu sistemlerin bir araya getirilmesindeki ve bina enerji performansını geliştirme/iyileştirme hedefiyle doğru ve etkin tasarım çözümlerini bulmaya yönelik kararların verilmesi sürecinde destek sistemlerinin kullanımındaki temel mantığı göstermektedir. Bu açıdan çalışma, gelecek araştırmalara temel bir bilgi kaynağı olması açısından da önemli bir katkıda bulunacaktır.

Önerilen model, hem yeni binaların tasarım sürecinde hem de mevcut binaların enerji etkin iyileştirilmesinde kullanılabilecek niteliktedir. Bu model ile istenen sayıda enerji korunum çözümü aynı anda değerlendirilebilir. Ayrıca, çalışmada ele alınan problem her ne kadar çok amaçlı optimizasyon problemi ise de, kullanıcı birden çok kriteri aynı anda optimize etmek yerine, ağırlık katsayılarını ayarlayarak ya da amaç fonksiyonu tek kriter için düzenleyerek tek bir amaç kriterini de optimize edebilir. Örneğin, amaç fonksiyondaki üç amaç kriterden sadece yıllık soğutma enerjisi tüketimine yönelik optimizasyon yapılmak istenirse, diğer iki amaç kriter

olan yıllık ısıtma enerjisi tüketimi ve NBD kriterlerinin ağırlık katsayıları sıfır olarak atanabilir ya da bu iki amaç kriter amaç fonksiyondan çıkarılabilir.

Bunun yanı sıra, daha önce de değinildiği gibi, modelde bina kabuğuna yönelik parametrelerin yanı sıra daha fazla enerji kazancı sağlayabilmek için bina kullanıcı davranışları, aydınlatma, mekanik sistem ve operasyonlara yönelik farklı parametreler de kolaylıkla entegre edilebilir ve farklı parametrelerin hassasiyeti ölçülebilir.

Çalışmada elde edilen tüm sonuçlar, önerilen karar destek modelinin, enerji etkin tasarım alanındaki boşlukları doldurarak karar verme sürecini etkin hale getirebilmede önemli bir potansiyele sahip olduğunu açık bir şekilde göstermektedir.

Gelecekte yapılması önerilen çalışmalar ise şunlardır:

- Önerilen model daha basit ve kullanıcı dostu özelliklerine sahip bir yazılım olarak geliştirilebilir. Diğer bir ifadeyle, yazılım geliştiricileri tarafından mimarlar, mühendisler gibi karar verme sürecinde önemli bir rolü olan proje paydaşları tarafından pratikte uygulanabilirliği daha etkin hale getirilebilir.
- Model kolaylıkla başka performans kriterlerini sağlamak amacıyla kullanıcı tarafından modifiye edilebilir. Örneğin, bu çalışmada ele alınan performans kriterleri; ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri ve NBD yerine, “Tahmini Memnuniyetsizlik Yüzdesi (Predicted Percentage of Dissatisfied-PPD)” ve “Tahmini Ortalama Oy (Predicted Mean Vote-PMV)” gibi kullanıcıların termal konforunu değerlendirmek için kullanılan kriterler, “Karbondiyoksit Konsantrasyon İndeksi” gibi iç ortam hava kalitesine ilişkin kriterler, küresel ısıtma potansiyelini ölçmede kullanılan karbon emisyonu oranı ya da maliyete ilişkin yaşam döngüsü maliyeti (Life Cycle Cost-LCC) gibi farklı performans kriterleri de optimize edilebilir.
- Hassasiyet analizinin tam anlamıyla optimizasyon sürecine entegre olması üzerinde çalışılabilir. Örneğin geliştirilen bir karar destek aracı hem hassasiyet

analizi yapıp hem de optimizasyon algoritmasının araştırma yapması gereken kümeyi ona göre daraltabilir. Böylece optimizasyon kullanıcı tarafından yapılan seçme işlemiyle değil otomatik olarak yönlendirilecek ve toplam süreç kısaltılması mümkün olabilir.

- Önerilen modelin uygulaması yapılırken ele alınan örnek okul binasının koşulları ve sınırlarına uygun olarak binalarda enerji performansının bir boyutu olan bina kabuğunun enerji etkin iyileştirilmesine yönelik çözümler üzerine yoğunlaşmıştır. Bunun dışında bina bütününe yönelik bir yaklaşımla, projenin plan şemasında yapılacak değişiklikler, binanın işlevi ve kullanıcı yoğunluğundaki değişikliklerin de tasarım girdisi olarak bina performansı üzerindeki etkileri ölçülebilir. Ayrıca, pasif enerji korunum stratejilerinin yanı sıra aktif enerji korunum stratejilerinin, yenilenebilir enerji teknolojilerinin de dahil edildiği daha kapsamlı bir proje üzerinde önerilen modelin uygulaması yapılabilir.
- Önerilen modelin uygulanabilirliği mevcut bir bina projesi üzerinde test edilmiştir ancak model bina enerji performansının geliştirilmesi amacıyla yapılan tüm uygulamalar için uygun bir modelidir. Dolayısıyla, modelin yeni bir bina projesi üzerinde uygulaması yapılabilir.
- Çok amaçlı optimizasyon uygulamalarında amaç fonksiyonunun katsayılarından bağımsız olarak bazı çözümlerin lokal optimumda takıldığını gösteren işaretler saptanmıştır. Global optimum çözümü kesin olarak bulabilmek için tüm alternatiflere ait kombinasyonların denendiği parametrik çözüm kümeleri uygulanmalıdır (Nguyen, 2013). Ancak özellikle optimizasyondaki girdi parametresi sayısı arttıkça optimum çözümün bulunması için araştırma yapılacak çözüm kümesinin eleman sayısı da artmakta ve bu durumda parametrik uygulama yöntemiyle çözüme ulaşmak pek mümkün olmamaktadır. Önerilen model ile farklı sayıda girdi içeren Senaryo I, II ve III için ayrı ayrı optimizasyon uygulanarak her biri için optimum çözümler belirlenmiştir. Modelin uygulanması sırasında optimizasyon algoritmasının global optimum çözüme yakınsama yaptığı ancak

tamamen ulaşamadığı görülmüştür. Bu durumda, optimizasyon sürecinden temel beklenti olan enerji performansı iyileştirme çözümlerinin mantıklı sonuçlarla tespit edilmesi sağlanmıştır. Gelecekte PSO algoritmasının içsel ayarlarının değiştirilmesi ile optimizasyon algoritmasının global optimuma daha çok yakınsamasına yönelik bir çalışma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Alanne, K. (2004). Selection of renovation actions using multi-criteria "knapsack" model. *Automation in Construction*, 13(3), 377-391.
- Asadi, E., Da Silva, M. G., Antunes, C. H. ve Dias, L. S. (2012a). Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy and Buildings*, 44(0), 81-87.
- Asadi, E., Da Silva, M. G., Antunes, C. H. ve Dias, L. S. (2012b). A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. *Building and Environment*, 56(0), 370-378.
- Asadi, E., Da Silva, M. G., Antunes, C. H. ve Dias, L. S. (2013). State of the art on retrofit strategies selection using multi-objective optimization and genetic algorithms. F. Pacheco Torgal, M. Mistretta, A. R. Kaklauskas, C. G. Granqvist ve L. F. Cabeza (Ed.), *Nearly Zero Energy Building Refurbishment* (279-297). London: Springer.
- Asadi, E., Da Silva, M. G., Antunes, C. H., Dias, L. S. ve Glicksman, L. (2014). Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application. *Energy and Buildings*, 81(0), 444-456.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (1990). *ANSI/ASHRAE Standard 105-1984, Standard methods of measuring and expressing building energy performance*. Atlanta: ASHRAE.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (1999). *HVAC application handbook*. Atlanta: ASHRAE.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2002). *Guideline 14-2002, Measurement of energy and demand savings*. Atlanta: ASHRAE.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2004a). *ANSI/ASHRAE Standard 140-2004, Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs*. Atlanta, GA: ASHRAE.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2004b). *Standard 62.1-2004, Ventilation for acceptable indoor air quality*. ASHRAE.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2004c). *Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE.

Attia, S., Hensen, J. L., Beltran, L. ve De Herde, A. (2012). Selection criteria for building performance simulation tools: Contrasting architects and engineers needs. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(3), 155-169.

Ayçam, İ. ve Utkuğ, G. S. (1999). Farklı malzemelerle üretilen pencere tiplerinin ısı performanslarının incelenmesi ve enerji etkin pencere seçimi. 4. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi - Binalarda Enerji Performansı Sempozyumu*, 61-73. İzmir.

Baird, G., Donn, M. R., Pool, F., Brander, W. D. S. ve Chan, S. A. (1984). *Energy performance of buildings*. Florida: CRC Press.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2007). *Enerji verimliliği kanunu*. Ankara.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2008a). *Binalarda ısı yalıtımı yönetmeliği*. Ankara.

- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2008b). *Binalarda enerji performansı yönetmeliği*. Ankara.
- Bayram, M. (2011a). *Bina enerji performansı hesaplama yöntemi (BEP-TR)*. 12 Aralık 2014, <http://www.enerjikimlikbelgesi.net/wp-content/themes/ecogreen2/BEPHesaplamaYontemi.pdf>.
- Bayram, M. (2011b). *Enerji verimliliği kanunu kapsamında Bayındırlık ve İskân Bakanlığı tarafından yayınlanan yönetmelikler*. 12 Aralık 2014, http://www.izmimod.org.tr/docs/BINALARDA_ENERJI_VERIMLILIGI.pdf.
- BEMbook. (b.t.). *Solar shading*. 20 Aralık 2014, http://www.bembook.ibpsa.us/index.php?title=Solar_Shading#Tools_to_support_shading_design
- Chantrelle, F. P., Lahmidi, H., Keilholz, W., Mankibi, M. E., ve Michel, P. (2011). Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Applied Energy*, 88(4), 1386-1394.
- Chartered Institution of Building Services Engineers [CIBSE]. (2003). Report: The energy performance of buildings directive. London: CIBSE.
- Clarke, J. A. (2001). *Energy simulation in building design* (2. Baskı). Oxford, Boston: Butterworth-Heinemann.
- Coello Coello, C. A. ve Lechuga, M. S. (2002). MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization. *Congress on Evolutionary Computation 2002 (CEC '02)*, 1051-1056. Honolulu, HI, USA.
- De Wilde, P. (2004). *Computational support for the selection of energy saving building components*. Doktora Tezi, Delft Teknoloji Üniversitesi, Hollanda.

- De Wilde, P. ve Tian, W. (2009). Identification of key factors for uncertainty in the prediction of the thermal performance of an office building under climate change. *Building Simulation*, 2, 157 – 174.
- De Wilde, P. ve Tian, W. (2010). Predicting the performance of an office under climate change: A study of metrics, sensitivity and zonal resolution. *Energy and Buildings*, 42(10), 1674-1684.
- De Wit, M. S. (1997). Identification of the important parameters in thermal building simulation models. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 57 (1–4), 305–320.
- 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.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E., Kabelis, N., Kolokotsa, D., Kalaitzakis, K. ve Stavrakakis, G. (2010). A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings. *Energy*, 35(12), 5483-5496.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E. ve Kolokotsa, D. (2013). Performance study of a multi-objective mathematical programming modelling approach for energy decision-making in buildings. *Energy*, 59(0), 534-542.
- Doyle, M. D. (2008). *Investigation of dynamic and steady state calculation methodologies for determination of building energy performance in the context of the EPBD*. Yüksek Lisans Tezi, Dublin Teknoloji Enstitüsü, İrlanda.
- Eberhart, R. ve Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science 1995 (MHS '95)*, 39-43. Nagoya, Japonya.

- Eisenhower, B., O'Neill, Z., Narayanan, S., Fonoberov, V. A. ve Mezic, I. (2012). A methodology for meta-model based optimization in building energy models. *Energy and Buildings*, 47(0), 292-301.
- Elbeltagi, E., Hegazy, T. ve Grierson, D. (2005). Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 19(1), 43-53.
- European Union [EU]. (2002). Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Communities*, 46.
- European Union [EU]. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*, 53.
- Evins, R., Pointer, P., Vaidyanathan, R. ve Burgess, S. (2012). A case study exploring regulated energy use in domestic buildings using design-of-experiments and multi-objective optimisation. *Building and Environment*, 54(0), 126-136.
- Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22(0), 230-245.
- Ferrara, M., Fabrizio, E., Virgone, J. ve Filippi, M. (2014). A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly zero energy buildings. *Energy and Buildings*, 84(0), 442-457.
- Ferreira, J., Pinheiro, M. D. ve Brito, J. d. (2013). Refurbishment decision support tools review-Energy and life cycle as key aspects to sustainable refurbishment projects. *Energy Policy*, 62(0), 1453-1460.

- Flager, F., Welle, B., Bansal, P., Soremekun, G. ve Haymaker, J. (2009). Multidisciplinary process integration and design optimization of a classroom building. *Information Technology in Construction*, 14(38), 595-612.
- Flourentzou, F. ve Roulet, C. A. (2002). Elaboration of retrofit scenarios. *Energy and Buildings*, 34(2), 185-192.
- Gerber, D. J., Lin, S. E., Pan, B. P., Senel Solmaz, A. (2012). Design optioneering: Multi-disciplinary design optimization through parameterization, domain integration and automation of a genetic algorithm. *Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design (SIMAUD 2012)*, 32-39. Orlando, FL, USA.
- Gero, J. S., D'Cruz, N. ve Radford, A. D. (1983). Energy in context: A multicriteria model for building design. *Building and Environment*, 18(3), 99-107.
- Google Maps. (2014). *Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi uydu görüntüsü*. 25 Kasım 2014, <https://www.google.com/maps/place/Çiğli+Teğmen+Ali+Rıza+Akıncı+Anadolu+Lisesi>
- Gucyeter, B. ve Gunaydin, H. M. (2012). Optimization of an envelope retrofit strategy for an existing office building. *Energy and Buildings*, 55(0), 647-659.
- Hamby, D. M. (1994). A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 32(2), 135-154.
- Hamdy, M., Hasan, A. ve Siren, K. (2011). Applying a multi-objective optimization approach for design of low-emission cost-effective dwellings. *Building and Environment*, 46(1), 109-123.

- Hasan, A., Vuolle, M. ve Siren, K. (2008). Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. *Building and Environment*, 43(12), 2022-2034.
- Heiselberg, P., Brohus, H., Hesselholt, A., Rasmussen, H., Seinre, E. ve Thomas, S. (2009). Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings. *Renewable Energy*, 34(9), 2030-2036.
- Helton, J. C., Johnson, J. D., Sallaberry, C. J. ve Storlie, C. B. (2006). Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(10-11), 1175-1209.
- Hensen J. L. M. (1994). Energy related design decisions deserve simulation approach, *Proceedings of the International Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture & Urban Planning*, 1-9. Vaals, Hollanda.
- Hensen, J. ve Lamberts, R. (Ed.). (2011). *Building performance simulation for design and operation*. USA: Spon Press.
- Holst, J. N. (2003). Using whole building simulation models and optimizing procedures to optimize building envelope design with respect to energy consumption and indoor environment. *8th International IBPSA Conference*, 204-211. Eindhoven, Hollanda.
- Hong, T., Chou, S. K. ve Bong, T. Y. (2000). Building simulation: An overview of developments and information sources. *Building and Environment*, 35(4), 347-361.
- Hopfe, C. J. (2009). *Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization*. Doktora Tezi, Eindhoven Teknoloji Üniversitesi, Eindhoven, Hollanda.

- Hopfe, C. J. ve Hensen, J. L. M. (2011). Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. *Energy and Buildings*, 43(10), 2798-2805.
- Hui, C. M. (1996). *Energy performance of air-conditioned buildings in Hong Kong*. Doktora Tezi, Hong Kong City Üniversitesi, Hong Kong.
- Hunn, B. D. (Ed.). (1996). *Fundamentals of building energy dynamics*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Hygh, J. S. (2011). *Implementing energy simulation as a design tool in conceptual building design with regression analysis*. Yüksek Lisans Tezi, North Carolina State Üniversitesi, Raleigh, North Carolina.
- Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L. ve Acquaye, A. (2014). Integrating economic considerations with operational and embodied emissions into a decision support system for the optimal ranking of building retrofit options. *Building and Environment*, 72(0), 82-101.
- International Council for Research and Innovation in Building and Construction [CIB]. (1982). Working with the performance approach in building, CIB state of the art report no: 64. Rotterdam, Hollanda: CIB.
- International Energy Agency [IEA]. (2014). *Key world energy statistics*. 10 Aralık 2014, <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>.
- International Organization for Standardization [ISO], (2008). ISO 13790:2008 Energy performance of buildings - calculation of energy use for space heating and cooling. ISO.

- Jaffal, I., Inard, C. ve Ghiaus, C. (2009). Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments. *Energy and Buildings*, 41(6), 669-677.
- Jaggs, M. ve Palmer, J. (2000). Energy performance indoor environmental quality retrofit – a European diagnosis and decision making method for building refurbishment. *Energy and Buildings*, 31(2), 97-101.
- Joint Research Centre-European Commission. (2006). *Simlab v.2.2. – Software package for uncertainty and sensitivity analysis*. 12 Mayıs 2013, <http://simlab.jrc.ec.europa.eu/>
- Joint Research Centre-European Commission. (2008). *SimLab v.2.2 reference manual*. 21 Aralık 2014, <http://ipsc.jrc.ec.europa.eu/?id=756>.
- Judkoff, R. D. (1988). Validation of building energy analysis simulation programs at the solar energy research institute. *Energy and Buildings*, 10(3), 221-239.
- Judkoff, R. ve Neymark, J. (1995). *International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and diagnostic method. IEA SHC Task 12 Building Energy Analysis and Design Tools for Solar applications*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Karaguzel, O. T. ve Lam, K. P. (2012). *Simulation-based parametric analysis part III: Optimization of building enclosure for minimizing life cycle costs*. Pittsburgh, PA: Center for Building Performance and Diagnostics, Carnegie Mellon University.
- Kim, I. Y. ve De Weck, O. L. (2006). Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization: A new method for Pareto front generation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 31(2), 105-116.

- Kolokotsa, D., Diakaki, C., Grigoroudis, E., Stavrakakis, G. ve Kalaitzakis, K. (2009). Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings. *Advances in Building Energy Research*, 3(1), 121-146.
- Lam, J. C. ve Hui, S. C. M. (1996). Sensitivity analysis of energy performance of office buildings. *Building and Environment*, 31(1), 27-39.
- Lam, J. C., Wan, K. K. W. ve Yang, L. (2008). Sensitivity analysis and energy conservation measures implications. *Energy Conversion and Management*, 49(11), 3170-3177.
- Levy, S. ve Steinberg, D. (2010). Computer experiments: a review. *AStA Advances in Statistical Analysis*, 94(4), 311-324.
- Lin, S. E. ve Gerber, D. J. (2014). Designing-in performance: A framework for evolutionary energy performance feedback in early stage design. *Automation in Construction*, 38(0), 59-73.
- Loh, E., Crosbie, T., Dawood, N. ve Dean, J. (2010). A framework and decision support system to increase building life cycle energy performance. *ITCon*, 15, 337-353.
- Lomas, K. J. ve Eppel, H. (1992). Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. *Energy and Buildings*, 19(1), 21-44.
- Ma, Z., Cooper, P., Daly, D. ve Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state of the art. *Energy and Buildings*, 55(0), 889-902.
- Macdonald, I. ve Strachan, P. (2001). Practical application of uncertainty analysis. *Energy and Buildings*, 33(3), 219-227.

- Machairas, V., Tsangrassoulis, A. ve Axarli, K. (2014). Algorithms for optimization of building design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31(0), 101-112.
- Magnier, L. ve Haghighat, F. (2010). Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Building and Environment*, 45(3), 739-746.
- Mara, T. ve Tarantola, S. (2008). Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations. *Building Simulation*, 1(4), 290-302.
- Marler, R. T. ve Arora, J. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6), 853-862.
- MathWorks. (2012). *MATLAB program v. 2012b*. 5 Mayıs 2013, <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2014a). *Resmi istatistikler: İzmir*. 11 Eylül, 2014, <http://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=IZMIR>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2014b). *Isıtma ve soğutma gün dereceleri (2008-2014 yılları): İzmir*. 20 Ağustos 2014, <http://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/gun-derece.aspx?g=merkez&m=35-00&y=2015&a=03>
- Milli Eğitim Bakanlığı [MEB]. (2007). *Resmi istatistikler: Milli Eğitim İstatistikleri-örgün eğitim 2006-2007*. 19 Aralık 2014, http://sgb.meb.gov.tr/meb_iys_dosyalar/2012_12/06020711_meb_istatistikleri_orgun_egitim_2006_2007.pdf

- Milli Eğitim Bakanlığı [MEB]. (2013). *Resmi istatistikler: Milli Eğitim İstatistikleri-örgün eğitim 2012-2013*. 19 Aralık 2014, http://sgb.meb.gov.tr/istatistik/meb_istatistikleri_orgun_egitim_2012_2013.pdf
- Milli Eğitim Bakanlığı [MEB]. (2014). *İzmir İl Milli Eğitim Müdürlüğü*. 19 Aralık, 2014, <http://izmir.meb.gov.tr/>
- Morbitzer, C. A. (2003). *Towards the integration of simulation into the building design process*. Doktora Tezi, Strathclyde Üniversitesi, Glasgow, Scotland.
- Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2), 161-174.
- Murray, S. N. ve Sullivan, D. T. J. (2012). An optimization methodology and sensitivity analysis of existing building retrofits. *First Building Simulation and Optimization Conference*, 110-116. Loughborough, UK.
- Murray, S. N., Walsh, B. P., Kelliher, D. ve O'Sullivan, D. T. J. (2014). Multi-variable optimization of thermal energy efficiency retrofitting of buildings using static modelling and genetic algorithms - A case study. *Building and Environment*, 75(0), 98-107.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2014). *OpenStudio v.1.3.0*. 11 Ocak, 2014, <https://www.openstudio.net/>
- Nguyen, A. T. (2013). *Sustainable housing in Vietnam: climate responsive design strategies to optimize thermal comfort*. Doktora Tezi, Liege Üniversitesi, Liege, Belçika.
- Nguyen, A. T., Reiter, S. ve Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113(0), 1043-1058.

- Nossent, J., Elsen, P. ve Bauwens, W. (2011). Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1515-1525.
- Öztürk, S. (2001). Okullarımızın enerji tüketimleri ve enerji tasarrufu potansiyeli. Ankara: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Ulusal Enerji Tasarruf Merkezi.
- Pannell, D. J. (1997). Sensitivity analysis of normative economic models: theoretical framework and practical strategies. *Agricultural Economics*, 16(2), 139-152.
- Remer, D. S. ve Nieto, A. P. (1995). A compendium and comparison of 25 project evaluation techniques. Part 1: Net present value and rate of return methods. *International Journal of Production Economics*, 42(1), 79-96.
- Ren, H., Gao, W. ve Ruan, Y. (2009). Economic optimization and sensitivity analysis of photovoltaic system in residential buildings. *Renewable Energy*, 34(3), 883-889.
- Rey, E. (2004). Office buildings retrofitting strategies: Multicriteria approach of an architectural and technical issue. *Energy and Buildings*, 36(4), 367-372.
- Roulet, C. A., Flourentzou, F., Labben, H. H., Santamouris, M., Koronaki, I., Dascalaki, E. ve Richalet, V. (2002). ORME: A multicriteria rating methodology for buildings. *Building and Environment*, 37(6), 579-586.
- Saltelli, A., Chan, K. ve Scott, E. M. (Ed.). (2000). *Sensitivity analysis*. New York: Wiley.
- Saltelli, A. ve Tarantola, S. (2002). On the relative importance of input factors in mathematical models: Safety assessment for nuclear waste disposal. *Journal of the American Statistical Association*, 97(459), 702-709.

- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F. ve Ratto, M. (2004). *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*. Chichester, England: Wiley.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., ve diğer. (2008). *Global sensitivity analysis: the primer*. Chichester, England: Wiley.
- Saltelli, A., Ratto, M., Tarantola, S. ve Campolongo, F. (2012). Update 1 of: Sensitivity analysis for chemical models. *Chemical Reviews*, 112(5), PR1-PR21.
- Schlueter, A. ve Thesseling, F. (2009). Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Automation in Construction*, 18(2), 153-163.
- Shen, H. ve Tzempelikos, A. (2013). Sensitivity analysis on daylighting and energy performance of perimeter offices with automated shading. *Building and Environment*, 59, 303-314.
- Simon, H. A. (1977). *The new science of management decision* (gözden geçirilmiş baskı). Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.
- Sobol, I. M. (1993). Sensitivity estimates for Non-linear Mathematical Models. *Mathematical Modelling and Computational Experiment (MMCE)*, 1(4), 407-414.
- Sprague, R. H. ve Watson, H. J. (1989). *Decision support systems: Putting theory into practice* (2. Baskı). Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.
- Şenel Solmaz, A. (2013). *Yayımlanmamış fotoğraf arşivi*. Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi, İzmir.

- The Ministry of Environment and Urbanization. (2012). Republic of Turkey climate change action plan 2011-2023. Ankara.
- Tian, W. ve De Wilde, P. (2011). Uncertainty and sensitivity analysis of building performance using probabilistic climate projections: A UK case study. *Automation in Construction*, 20(8), 1096-1109.
- Tian, W. (2013). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20(0), 411-419.
- Tuhus-Dubrow, D. ve Krarti, M. (2010). Genetic algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, 45(7), 1574-1581.
- Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2008). TS 825 - Binalarda ısı yalıtım kuralları (revize). Ankara.
- Ulukavak Harputlugil, G. (2009). *Enerji performansı öncelikli mimari tasarım sürecinin ilk aşamasında kullanılabilecek tasarıma destek değerlendirme modeli*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- US Energy Information Administration. (2011). *2010-2030, Inc. / Architecture 2030*. 5 Ağustos 2011, http://architecture2030.org/the_problem/problem_energy.
- US Department of Energy [DOE]. (2014). *EnergyPlus 8.1*. 10 Ocak 2014, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- Verbeeck, G. ve Hens, H. (2005). Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable? *Energy and Buildings*, 37(7), 747-754.

- Verbeeck, G. ve Hens, H. (2007). Life cycle optimization of extremely low energy dwellings. *Journal of Building Physics*, 31(2), 143-177.
- Wetter, M. (2000). Design optimization with GenOpt. (Vol. 21): Building energy simulation, user news. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Wetter, M. ve Polak, E. (2003). A convergent optimization method using pattern search algorithms with adaptive precision simulation. *8th International IBPSA Conference*, 1393-1400. Eindhoven, Hollanda.
- Wetter, M. ve Wright, J. (2004). A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization. *Building and Environment*, 39(8), 989-999.
- Wetter, M. (2004). *Simulation-based building energy optimization*. Doktora Tezi, Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley, San Francisco.
- Wetter, M. (2011). *GenOpt – Generic optimization program-user manual version 3.1.0*. Berkeley, CA: U.S. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)-Simulation Research Group.
- Wright, J. A., Loosemore, H. A. ve Farmani, R. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 34(9), 959-972.
- Yıldız, Y. (2012). *Sensitivity and uncertainty analysis to reduce cooling requirement of low-rise apartment blocks in the hot-humid climate region of Turkey*. Doktora Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Yılmaz, Z. (2012). Bina performans modelleme ve simülasyonları. *EkoYapı Dergisi*. 20 Kasım 2014, <http://www.ekoyapidergisi.org/53-bina-performans-modelleme-ve-simulasyonlari.html>.

- Yi, Y. K. ve Malkawi, A. M. (2009). Optimizing building form for energy performance based on hierarchical geometry relation. *Automation in Construction*, 18(6), 825-833.
- Zhao, J., Wu, Y. ve Zhu, N. (2009). Check and evaluation system on heat metering and energy efficiency retrofit of existing residential buildings in northern heating areas of china based on multi-index comprehensive evaluation method. *Energy Policy*, 37(6), 2124-2130.
- Znouda, E., Ghrab-Morcos, N. ve Hadj-Alouane, A. (2007). Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms. *Energy and Buildings*, 39(2), 148-153.
- Zorer Gedik, G. (2014). *Yapı Kabuğu Yüksek Lisans Ders 8*. 20 Aralık 2014, www.yarbis.yildiz.edu.tr/ggedik/course/viewCourse/id/3792
- İzmirGaz. (b.t.). *Doğal gaz bedeli: Yıllara göre birim fiyat listesi*. 12 Mayıs 2014, <http://www.izmirgaz.com.tr/trf-konutbedelarsiv.asp?list=all>.

EKLER

Ek-1.1 Derslik Kullanıcılarına (Öğrenci) Uygulanan Anket

Bu Anket Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim dalı Yapı Bilgisi Doktora Programında Yrd.Doç.Dr. Fahriye Hilal Halıcıoğlu danışmanlığında Aslıhan Şenel Solmaz'ın "Okul Binalarının Retrofit Aşamasında Enerji ve Maliyet Performans Kriterlerine Göre Optimum Stratejilerin Belirlenmesinde Karar Desteği Sağlayacak Bir Model Önerisi" başlıklı doktora tezi kapsamında hazırlanmıştır

Hazırlayan: Yüksek Mimar Aslıhan Şenel Solmaz

Kasım 2013

İzmir İlindeki Mevcut Okul Binalarının Enerji Performansını Belirlemeye Yönelik Derslik Kullanıcıları (Öğrenci ve Öğretmen) Anketi

Amaç: Bu anketin amacı örnek olarak seçilen okul binasındaki termal (ısı) konfor düzeyinin bina kullanıcıları tarafından yapılan değerlendirmeye ölçülmesidir.

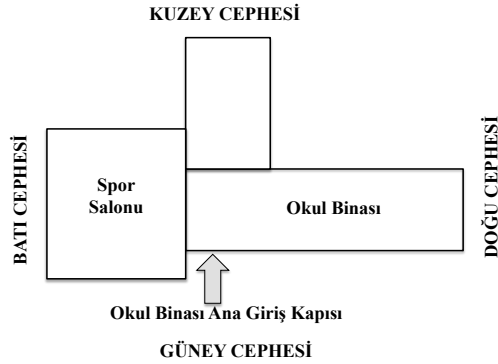
Anketin Yapıldığı Okul: Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi

Anketin doldurulduğu tarih:

1. Kaçınıcı sınıftasınız?

a) 1 b) 2 c) 3 d) 4

2. Aşağıdaki okulunuza ait şemaya göre dersliğiniz hangi yöne bakmaktadır ?



a) Güney Cephesi b) Kuzey Cephesi c) Doğu Cephesi d) Batı Cephesi

3. Dersliğinizin **iç ortam sıcaklığı** (termal konfor) ile ilgili olarak aŗađıdaki 2 adet soruyu cevaplayınız.

3.1 Dersliğinizdeki iç ortam sıcaklığını **YAZ AYLARINDA** değerlendiriniz:

-3	-2	-1	0	1	2	3
Hiç memnun değilim	Memnun değilim	Kısmen memnun değilim	Tarafsız	Kısmen memnunum	Memnunum	çok memnunum

3.2 Dersliğinizdeki iç ortam sıcaklığını **KIŗ AYLARINDA** değerlendiriniz:

-3	-2	-1	0	1	2	3
Hiç memnun değilim	Memnun değilim	Kısmen memnun değilim	Tarafsız	Kısmen memnunum	Memnunum	çok memnunum

4. Dersliğinizde **termal konfor açısından** rahatsızlık hissediyorsanız, aŗađıdakilerden hangisi bu durumun nedenini **en iyi** açıklar?

- ☐ Hava akımı az düzeyde
- ☐ Gneŗ ıŗıđı i ortamı fazla ısıtıyor
- ☐ Pencerelerden hava geiŗi fazla
- ☐ Kaloriferler i ortamı aŗır ısıtıyor
- ☐ Kaloriferler ortamı yeteri kadar ısıtmıyor
- ☐ Derslik duvarları soğuk
- ☐ Derslik duvarları sıcak
- ☐ Diğer (lütfen aŗađıda kısaca açıklayınız)

KATILDIğINIZ İÇİN TEŗEKKR EDERİM...

Ek-1.2 Derslik Kullanıcılarına (Öğretmen) Uygulanan Anket

Bu Anket Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim dalı Yapı Bilgisi Doktora Programında Yrd.Doç.Dr. Fahriye Hilal Halıcıoğlu danışmanlığında Aslıhan Şenel Solmaz'ın “Okul Binalarının Retrofit Aşamasında Enerji ve Maliyet Performans Kriterlerine Göre Optimum Stratejilerin Belirlenmesinde Karar Desteği Sağlayacak Bir Model Önerisi” başlıklı doktora tezi kapsamında hazırlanmıştır

Hazırlayan: Yüksek Mimar Aslıhan Şenel Solmaz

Kasım 2013

İzmir İlindeki Mevcut Okul Binalarının Enerji Performansını Belirlemeye Yönelik Derslik Kullanıcıları (Öğretmen) Anketi

Amaç: Bu anketin amacı örnek olarak seçilen okul binasındaki termal (ısı) konfor düzeyinin bina kullanıcıları tarafından yapılan değerlendirmeye ölçülmesidir.

Anketin Yapıldığı Okul: Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi

Anketin doldurulduğu tarih:

1. Bulunduğumuz okulda kaç yıldır çalışıyorsunuz?

- a. 0-1 b. 2-4 c. 5-7 d. 8-10 e. 11 ve üstü**

2. Okulunuzda hangi yöne bakan derslik ya da dersliklerde öğretim faaliyetleri gerçekleştirmektesiniz ? (Birden fazla şıkkı işaretleyebilirsiniz)

Not: Güney cephesi okulun giriş kapısının olduğu cepheyi, Kuzey cephesi arka bahçeyi, sağ ve sol cephelerse girişin sağında ve solunda yer alan cepheleri tanımlamaktadır.

- a) Güney Cephesi b) Kuzey Cephesi c) Doğu Cephesi d) Batı Cephesi**

3. İkinci soruda işaretlediğiniz cephe ya da cephelerdeki derslik(ler)in iç ortam sıcaklığını (termal konfor) 1) yaz aylarında ve 2) kış aylarında değerlendiriniz.

		-3	-2	-1	0	1	2	3
		Hiç memnun değilim	Memnun değilim	Kısmen memnun değilim	Tarafsız	Kısmen memnunu m	Memnun um	Çok memnunu m
Güney	Yaz							
	Kış							
Kuzey	Yaz							
	Kış							
Doğu	Yaz							
	Kış							
Batı	Yaz							
	Kış							

4. Derslik ya da dersliklerinizde termal konfor açısından rahatsızlık hissediyorsanız, aşağıdakilerden hangisi ya da hangileri bu durumun nedenini en iyi açıklar?

- ☐ Hava akımı az düzeyde
- ☐ Güneş ışığı iç ortamı fazla (aşırı) ısıtıyor
- ☐ Pencerelelerden hava geçişi fazla
- ☐ Kaloriferler ortamı aşırı ısıtıyor
- ☐ Kaloriferler ortamı yeteri kadar ısıtmıyor
- ☐ Zemin ve duvarlar soğuk
- ☐ Zemin ve duvarlar sıcak
- ☐ Diğer (lütfen aşağıda kısaca açıklayınız)

KATILDIĞINIZ İÇİN TEŞEKKÜR EDERİM....

Ek-2.1 Regresyon Tabanlı Global Hassasiyet Analizi İle Elde Edilen Girdi Parametrelerine Ait SRRC Katsayıları (Simülasyona 15 Haziran-15 Eylül Tarihleri Arasındaki Zaman Dilimi Dahil Değildir)

Tasarım (Girdi) Parametreleri	Enerji Performans Kriterleri (Çıktı Parametreleri) İçin Hesaplanan Girdi Parametrelerine Ait SRRC Katsayıları	
	Isıtma Enerjisi Tüketimi	Soğutma Enerjisi Tüketimi
Duvar-YalıtK-Güney	-0.0305	0.0658
Duvar-YalıtK-Kuzey	-0.1685	0.0641
Duvar-YalıtK-Doğu	-0.0506	-0.0509
Duvar-YalıtK-Batı	-0.0776	0.0243
Duvar-YalıtÖzgIsı-Güney	-0.0072	-0.0025
Duvar-YalıtÖzgIsı-Kuzey	0.0363	-0.0277
Duvar-YalıtÖzgIsı-Doğu	0.0176	0.0017
Duvar-YalıtÖzgIsı-Batı	0.0077	-0.0107
Duvar-Yalıt-λ-Güney	-0.0028	-0.0156
Duvar-Yalıt-λ-Kuzey	0.0303	-0.0434
Duvar-Yalıt-λ-Doğu	0.0294	-0.0146
Duvar-Yalıt-λ-Batı	0.0125	-0.0788
Zemin-YalıtK	-0.0536	0.2424
Zemin-YalıtÖzgIsı	0.0534	-0.0194
Zemin-Yalıt-λ	0.031	-0.0838
Çati-YalıtK	-0.1986	-0.0255
Çati-YalıtÖzgIsı	-0.0040	0.0273
Çati-Yalıt-λ	0.0514	0.0157
Pencere-U-Güney	0.3507	-0.0542
Pencere-U-Kuzey	0.3407	-0.1568
Pencere-U-Doğu	0.1037	-0.0049
Pencere-U-Batı	0.0229	-0.0044
Pencere-GİKK-Güney	-0.5949	0.5474
Pencere-GİKK-Kuzey	-0.1523	0.2426
Pencere-GİKK-Doğu	-0.0503	0.0899
Pencere-GİKK-Batı	-0.0356	0.0524
Gölgeleme-Derinlik-Güney	0.4263	-0.6301
Gölgeleme-Derinlik-Kuzey	0.1194	-0.8713
Gölgeleme-Derinlik-Doğu	0.0253	-0.1017
Gölgeleme-Derinlik-Batı	0.0116	-0.0062
Gölgeleme-Açı-Güney	-0.1181	0.0852
Gölgeleme-Açı-Kuzey	0.0087	0.0273
Gölgeleme-Açı-Doğu	-0.0479	0.0407
Gölgeleme-Açı-Batı	-0.0401	0.0129

Ek-2.2 Regresyon Tabanlı Global Hassasiyet Analizi İle Elde Edilen Girdi Parametrelerine Ait SRRC Katsayıları (Simülasyona 15 Haziran-15 Eylül Tarihleri Arasındaki Zaman Dilimi de Dahildir)

Tasarım (Girdi) Parametreleri	Enerji Performans Kriterleri (Çıktı Parametreleri) İçin Hesaplanan Girdi Parametrelerine Ait SRRC Katsayıları	
	Isıtma Enerjisi Tüketimi	Soğutma Enerjisi Tüketimi
Duvar-YalıtK-Güney	-0.0034	-0.0588
Duvar-YalıtK-Kuzey	-0.0106	-0.0257
Duvar-YalıtK-Doğu	-0.0259	-0.0199
Duvar-YalıtK-Batı	-0.0103	-0.0698
Duvar-YalıtÖzgIsı-Güney	-0.0020	0.0194
Duvar-YalıtÖzgIsı-Kuzey	0.0146	0.0088
Duvar-YalıtÖzgIsı-Doğu	0.0155	-0.0119
Duvar-YalıtÖzgIsı-Batı	0.0034	-0.0562
Duvar-Yalıt-λ-Güney	0.0100	-0.0262
Duvar-Yalıt-λ-Kuzey	0.0132	-0.0074
Duvar-Yalıt-λ-Doğu	0.0157	-0.0167
Duvar-Yalıt-λ-Batı	0.0076	-0.0106
Zemin-YalıtK	-0.0383	0.0374
Zemin-YalıtÖzgIsı	0.0557	0.0171
Zemin-Yalıt-λ	0.0083	-0.0664
Çatı-YalıtK	-0.1920	-0.0261
Çatı-YalıtÖzgIsı	0.0058	-0.0163
Çatı-Yalıt-λ	0.0410	0.0319
Pencere-U-Güney	0.4030	0.0603
Pencere-U-Kuzey	0.2988	0.0397
Pencere-U-Doğu	0.1152	0.0221
Pencere-U-Batı	0.0058	0.0084
Pencere-GIKK-Güney	-0.5770	0.4814
Pencere-GIKK-Kuzey	-0.1217	0.2589
Pencere-GIKK-Doğu	-0.0740	0.0489
Pencere-GIKK-Batı	-0.0292	0.0577
Gölgeleme-Derinlik-Güney	0.4280	-0.6687
Gölgeleme-Derinlik-Kuzey	0.1222	-0.0460
Gölgeleme-Derinlik-Doğu	0.0231	-0.1552
Gölgeleme-Derinlik-Batı	0.0153	-0.0272
Gölgeleme-Açı-Güney	-0.1398	0.0442
Gölgeleme-Açı-Kuzey	0.0345	0.0124
Gölgeleme-Açı-Doğu	-0.0600	0.0026
Gölgeleme-Açı-Batı	-0.0491	0.0005

Ek-3 Kısaltmalar

ANN	Artificial Neural Network
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BESTEST	Building Energy Simulation Test
BHE	Baseboard Heating Energy
CIB	International Council for Research and Innovation in Building and Construction
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
CV_RMSE	Coefficient of Variation of The Root Mean Square Error
DOE	US Department of Energy
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EU	European Union
FAST	Fourier Amplitude Sensitivity Test
GA	Genetic Algorithm
HA	Hassasiyet Analizi
IEA	International Energy Agency
ISO	International Organization for Standardization
IWEC	International Weather for Energy Calculations
LCC	Life Cycle Cost
LHS	Latin Hypercube Sampling
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MEB	Milli Eğitim Bakanlığı
MOO	Multi-Objective Optimization

MOP	Multi-Objective Programming
NBD	Net Bugünkü Değer
NMBE	Normalized Mean Bias Error
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OAT	One factor At a Time
PCC	Partial Correlation Coefficients
PEAR	Pearson Product Moment Correlation Coefficient
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Percentage of People Dissatisfied
PRCC	Partial Rank Correlation Coefficient
PSO	Particle Swarm Optimization Algorithm-
PTACEE	Packaged Thermal Air Conditioner Electric Energy
SA	Sensitivity Analysis
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient
SRC	Standardized Regression Coefficients
SRRC	Standardized Rank Regression Coefficient
SVM	Support Vector Machine
TSE	Türk Standartları Enstitüsü