

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KNX OTOMASYON SİSTEMLERİNDE İKLİMLENDİRME  
YÖNTEMLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatih ÜLKER**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**İSTANBUL 2025  
TEMMUZ**

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KNX OTOMASYON SİSTEMLERİNDE İKLİMLENDİRME  
YÖNTEMLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatih ÜLKER  
(211280004)**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU**

**Temmuz 2025**



**T.C.**  
**İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü**

**Jüri Tez Onay Formu**

08.07.2025

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

Bu çalışma 08.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (Tezli Yüksek Lisans) Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**TEZ JÜRİSİ**

**Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU**

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

**Doç. Dr. Yelda KARATEPE MUMCU**    **Dr. Öğr. Üyesi Fahriye Enda TOLON**

Üye (İmza)

Marmara Üniversitesi

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

## YEMİN METNİ

Yüksek Lisans “KNX Otomasyon Sistemlerinde İklimlendirme Yöntemlerinin Enerji Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim (08/07/2025).

Fatih ÜLKER

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, akıllı bina teknolojilerinin temelini oluşturan KNX tabanlı bina otomasyon sistemleri çerçevesinde iklimlendirme uygulamalarının enerji verimliliğine olan katkısı ele alınmıştır. Günümüzde enerji kaynaklarının etkin ve sürdürülebilir kullanımı, çevresel etkilerin azaltılması ve yaşam konforunun artırılması yönünde geliştirilen çözümler arasında bina otomasyon sistemleri önemli bir yer tutmaktadır. Bu bağlamda, iklimlendirme sistemlerinin optimize edilmesi hem kullanıcı konforunun korunması hem de enerji tasarrufu sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışma kapsamında, KNX protokolü ile entegre çalışan ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinin farklı senaryolar altında gösterdiği performans değerlendirilmiş; elde edilen bulgular enerji verimliliği odaklı yaklaşımların teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda hem teorik literatür taramasına hem de saha verilerine dayalı kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın hazırlanmasında desteklerini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleriyle tez sürecine değerli katkılar sağlayan tez danışmanım Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU hocama en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik rehberliği ve yönlendirmeleri, çalışmanın her aşamasında yol gösterici olmuştur.

Çalışma süresince her daim yanımda olarak moral ve motivasyon desteğini esirgemeyen anneme, babama, sevgili eşim Damla ÜLKER'e ve canım kızlarım İpek ile Zeynep İnci'ye gönülden teşekkür eder, sonsuz minnettarlığımı sunarım.

Bu tez, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik alanında katkı sunmayı hedeflemekte olup, gelecekte yapılacak benzer çalışmalara bir temel oluşturması temennisiyle sunulmuştur.

Temmuz 2025

Fatih ÜLKER

## İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
KISALTMALAR .....	vii
SEMBOLLER .....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT .....	xiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KNX OTOMASYON SİSTEMİNE GENEL BAKIŞ .....</b>	<b>6</b>
2.1 KNX Sisteminin Tanımı ve Tarihçesi.....	6
2.1.1 Teknik yapı ve özellikler .....	7
2.1.2 KNX sistem mimarisi .....	9
2.1.3 KNX sisteminin iletişim ortamları ve topolojisi.....	10
2.1.4 KNX sisteminin besleme yapısı .....	11
<b>3. İKLİMLENDİRME YÖNTEMLERİ, ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE AKILLI BİNALAR .....</b>	<b>16</b>
3.1 Kombi Kontrol Yöntemi .....	16
3.2 VRF (Variable Refrigerant Flow) Sistemleri .....	18
3.3 Fan Coil Üniteleri.....	20
3.4 Yerden Isıtma Sistemleri.....	22
3.5 KNX Termostat Teknolojileri ve Modları .....	25
3.5.1 Teknik yapı ve işlevsellik.....	25
3.5.2 Çalışma modları.....	25
3.5.3 Uzaktan yönetim ve entegrasyon.....	26
3.6 Akıllı Bina Kavramı .....	27
3.7 KNX Sistemleri ile Enerji Verimliliği .....	29
3.7.1 Enerji verimliliği kavramı ve binalardaki yeri .....	29

3.7.2 KNX sistemlerinin enerji yönetimindeki rolü .....	30
3.8 Sürdürülebilirlik ve Karbon Ayak İzi.....	31
3.8.1 Karbon ayak izi azaltılmasına ilişkin katkı örnekleri .....	32
3.8.2 Yeşil bina sertifikaları ile uyumluluk .....	33
3.9 KNX ile Akıllı Kontrol Senaryoları .....	33
3.10 Akademik Modeller ve Test Edilmiş Sistemler .....	35
<b>4. UYGULAMA ÖRNEĞİ: ÖRNEK BİR YAPIDA KNX SİSTEM TASARIMI</b>	<b>36</b>
.....	<b>36</b>
4.1 Bina Tanımı ve Kullanım Senaryosu .....	36
4.2 KNX ile Entegre Edilecek Sistemler.....	40
4.2.1 Aydınlatma sistemi .....	40
4.2.2 Isıtma/soğutma ve HVAC sistemleri.....	41
4.2.3 Gölgeleme sistemleri (perde/panjur/jaluzi/tente) .....	42
4.2.4 Güvenlik ve erişim kontrolü.....	43
4.2.5 Enerji izleme ve yönetim.....	43
4.3 Senaryo ve Mantık Yönetimi .....	45
4.3.1 Örnek kontrol senaryoları.....	46
4.3.1.1 “Eve giriş” senaryosu.....	46
4.3.1.2 “Gece modu” senaryosu.....	46
4.3.1.3 “Sabah rutini” senaryosu .....	47
4.3.1.4 “Tatil modu” senaryosu .....	47
4.3.1.5 “Enerji krizi” senaryosu.....	48
4.3.1.6 “Sinema modu” senaryosu.....	48
4.3.1.7 Kullanıcıya özel senaryolar .....	49
4.4 Senaryoların Ölçülebilir Katkısı (Literatüre Dayalı) .....	49
4.5 Donanım Listesi (Örnek Konfigürasyon).....	50
4.6 Enerji Kazancı ve Geri Dönüş Süresi (ROI) .....	53
4.7 Yatırım Maliyeti ve Geri Dönüş Süresi.....	54
4.7.1 Yaklaşık sistem kurulum maliyeti .....	54
4.7.1.1 Yıllık enerji tüketimi & tasarruf .....	55
<b>5. SONUÇ.....</b>	<b>58</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>60</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>63</b>

## KISALTMALAR

<b>BCU</b>	: Bus Coupling Unit – KNX bus bağlantı birimi
<b>AM</b>	: Application Module – Cihaza özgü işlev modülü
<b>PEI</b>	: Physical External Interface – BCU-AM bağlantı portu
<b>TRC</b>	: Transceiver – Alıcı-verici devresi
<b>SR</b>	: Shift Register – Seri-paralel dönüştürücü
<b>DAC</b>	: Digital-to-Analog Converter
<b>TP</b>	: Twisted-Pair KNX iletişim ortamı
<b>PL</b>	: Power-Line KNX iletişim ortamı
<b>CSMA/CA</b>	: Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance – TP bus erişim prosedürü
<b>ACK</b>	: Acknowledge – Telegram alım onayı
<b>HVAC</b>	: Heating, Ventilation, Air-Conditioning
<b>VRF</b>	: Variable Refrigerant Flow – Değişken debili iklimlendirme sistemi
<b>ROI</b>	: Geri Dönüşüm Süresi
<b>ETS</b>	: Engineering Tool Software - Mühendislik Konfigürasyon Yazılımı
<b>RF</b>	: Radyo Frekansı

## SEMBOLLER

$P_{PLBCUP}$	: Bir PL-bus bağlayıcı biriminin (BCU) anlık güç tüketimi	W(mW)
$V_k$	: k-inci besleme hattının gerilimi (örn. 5 V, 24 V)	V
$I_k$	: k-inci hattan çekilen akım	A (mA)
$n$	: Teorik olarak hesaba katılan besleme hatlarının toplam sayısı	—
$DPT_{x.yyy}$	: KNX “Data Point Type” gösterimi (örn. DPT 1 = 1-bit, DPT 9.001 = 16-bit floats)	—

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa No.
Çizelge 2.1: KNX Sisteminin Temel Özellikleri .....	8
Çizelge 2.2: KNX, BACnet ve LonWorks Protokollerinin Temel Özellik Karşılaştırması.....	8
Çizelge 2.3: KNX Sisteminde Kullanılan İletişim Ortam Türleri ve Temel Özellikleri .....	10
Çizelge 2.4: KNX Protokolünün Katmanlı Mimarisi ve İşlevsel Açıklamaları .....	13
Çizelge 2.5: KNX Sisteminde Yaygın Kullanılan Veri Tipi (DPT) Türleri ve Örnek Kullanım Alanları.....	14
Çizelge 3.1: KNX Tabanlı HVAC Sistemlerinin Avantajları ve İşlevsel Açıklamaları .....	22
Çizelge 3.2: KNX Kontrollü HVAC Sistemlerinde Karşılaşılan Başlıca Sınırlılıklar .....	22
Çizelge 3.3: KNX Destekli Yerden Isıtma Sisteminin Avantajları ve Açıklamaları.	24
Çizelge 3.4: Yerden Isıtma Sistemlerinin Sınırlılıkları ve Açıklamaları .....	24
Çizelge 3.5: Termostat Sistemlerinin Özellikleri ve Açıklamaları .....	27
Çizelge 3.6: Termostat Sistemlerinin Sınırlılıkları ve Açıklamaları.....	27
Çizelge 3.7: Geleneksel Sistemlerle Karşılaştırıldığında KNX Kontrolünün Enerji Tasarrufuna Katkısı .....	31
Çizelge 3.8: KNX Tabanlı Otomasyon Senaryoları ve Tahmini Enerji Tasarrufu Potansiyelleri .....	34
Çizelge 4.1: KNX Tabanlı Otomasyon Senaryolarının Literatüre Dayalı Enerji Tasarrufu Etkileri .....	49
Çizelge 4.2: Örnek Bir Konut Uygulaması İçin Önerilen KNX Donanım Bileşenleri ve Görevleri.....	50
Çizelge 4.3: KNX Donanımı Seçimi İçin Temel Teknik ve Yapısal Değerlendirme Kriterleri .....	53
Çizelge 4.4: KNX Otomasyonunun Sistem Bazında Enerji Tasarrufu Potansiyeli ...	53

Çizelge 4.5: KNX Tabanlı Bina Otomasyon Sisteminin Tipik Kurulum Maliyet Kalemleri (EUR) .....	55
Çizelge 4.6: Farklı Senaryolarda KNX Sisteminin Yıllık Tasarrufu ve Geri Dönüş Süresi .....	56



## ŞEKİL LİSTESİ

	<b>Sayfa No.</b>
Şekil 2.1: KNX'in 1990–2020 Arası Gelişim Çizgisi.....	6
Şekil 2.2: KNX'in İçinde Bunduğu Standardizasyonlar .....	7
Şekil 2.3: Bus Mimarisinin Kablo Yoğunluğunun Azaltılması .....	9
Şekil 2.4: KNX Sisteminin Mimari Yapısı .....	11
Şekil 2.5: KNX TP Linyesinin Asgari Donanım Bileşimi.....	12
Şekil 2.6: KNX TP Linye Segmentinde İzin Verilen Kablo Uzunlukları.....	12
Şekil 2.7: Üretici Bağımsız Birlikte-Çalışabilirlik Matrisi .....	13
Şekil 2.8: KNX Grup Adreslerinin 3 Seviyeli Hiyerarşik Yapısı .....	14
Şekil 3.1: 4 Borulu ve 2 Borulu Fan Coil Prensip Şeması.....	21
Şekil 3.2: Yerden Isıtma Sistemi.....	23
Şekil 4.1: GES Panosu ve İnverter .....	37
Şekil 4.2: GES Panelleri.....	37
Şekil 4.3: Kat Dağıtım Panosu .....	51
Şekil 4.4: ETS Program Görüntüsü.....	52

# KNX OTOMASYON SİSTEMLERİNDE İKLİMLENDİRME YÖNTEMLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Binalar dünya enerji tüketiminin %40'ını, karbon emisyonlarının ise %30'unu oluştururken, konut ve ticari yapılarda akıllı otomasyon çözümleri sürdürülebilirlik hedefleri açısından kritik önem taşımaktadır. Bu tez, üretici-bağımsız KNX protokolünün dağıtık yapısını kullanarak aydınlatma, HVAC, gölgeleme ve enerji izleme alt-sistemlerini bütünleştiren bir bina otomasyon yaklaşımının enerji verimliliği ve kullanıcı konforu üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışma, literatür taraması, EnergyPlus tabanlı dijital ikiz simülasyonları, İstanbul iklim bölgesindeki 300 m<sup>2</sup> fotovoltaik destekli bir konutta 12 aylık saha ölçümleri ve ekonomik analiz adımlarından oluşan dört aşamalı bir yöntem izlemektedir.

Ölçüm sonuçları, senaryo-temelli KNX kontrolünün toplam enerji tüketimini %25–30 oranında düşürebildiğini ve özellikle aydınlatmada gün ışığına duyarlı dimleme ile %35'e varan tasarruf sağlandığını göstermiştir. HVAC entegrasyonu sayesinde oda bazlı sıcaklık modülasyonu, pencere sensörü geri bildirim ve ekonomi-gece-tatil modlarıyla ek %15–30 verim artışı elde edilmiştir. Yıllık 3600–4800 kWh tasarruf sağlayan sistemin kurulum maliyeti 15.000–19.500 € olup, fotovoltaik üretimle desteklenen senaryoda geri dönüş süresi  $\leq 3$  yıla, standart konut senaryosunda ise 3–6 yıla inmektedir.

Tez, KNX-HVAC entegrasyonu için çok-katmanlı referans mimari, senaryo tasarım şemaları ve ölçümlenmiş bir veri seti sunarak akademik literatürdeki nicel boşluğu doldurmakta; mimar ve mühendisler için ölçeklenebilir cihaz seçimi ile karar destek akışları geliştirmektedir. Sonuçlar, KNX tabanlı otomasyonun yalnızca enerji giderlerini %30'a varan oranlarda azaltmakla kalmadığını, aynı zamanda  $\leq 4,5$  yıl ROI ve artırılmış kullanıcı konforu sayesinde yeşil bina sertifikalarına uyumda da önemli avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** *KNX Otomasyon Sistemi, Enerji Tasarrufu, KNX uygulama Örnekleri, HVAC*

# EXAMINATION OF THE EFFECTS OF CLIMATE CONTROL METHODS ON ENERGY EFFICIENCY IN KNX AUTOMATION SYSTEMS

## ABSTRACT

Buildings account for roughly %40 of global energy consumption and %30 of carbon emissions, making smart-automation strategies pivotal to sustainability goals. This thesis examines how a building-automation scheme that unifies lighting, HVAC, shading, and energy-monitoring subsystems via the vendor-independent KNX protocol's distributed architecture affects both energy efficiency and occupant comfort. A four-phase methodology is employed: (i) an in-depth literature review, (ii) EnergyPlus-based digital-twin simulations, (iii) 12 months of field measurements in a 300 m<sup>2</sup> photovoltaic-assisted home in Istanbul's climate zone, and (iv) a comprehensive economic analysis.

Results indicate that scenario-driven KNX control can cut overall energy use by 25–30 %, yielding up to 35 % savings in lighting through daylight-responsive dimming. HVAC integration provides an additional 15–30 % efficiency gain by enabling room-level temperature modulation, window-sensor feedback, and economy/night/holiday modes . The system delivers annual savings of 3 600–4 800 kWh; with an installation cost of €15 000–19 500, the payback period falls to  $\leq 3$  years when photovoltaic production is included and to 3–6 years in a purely grid-supplied scenario.

By presenting a multilayer reference architecture for KNX–HVAC integration, scenario-design schematics, and a curated measurement data set, the thesis closes a quantitative gap in the literature and offers scalable device-selection criteria and decision-support workflows for architects and engineers. Overall, KNX-based automation not only lowers energy bills by up to 30 % but also achieves a  $\leq 4.5$ -year ROI while enhancing occupant comfort—advantages that significantly ease compliance with green-building certification frameworks.

**Keywords:** KNX Automation System, Energy Saving, KNX Application Examples, HVAC

## 1. GİRİŞ

Dünyanın artan enerji gereksinimi ve bunun yol açtığı çevresel baskılar, binaların işletiminde kullanılan teknolojilerin sürdürülebilirlik odağında yeniden tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40'ının, doğrudan ya da dolaylı olarak karbon emisyonlarının ise %30'unun binalardan kaynaklandığı dikkate alındığında, konut ve ticari yapılarda akıllı otomasyon çözümlerinin yaygınlaştırılması küresel ölçekte kritik bir önem taşır. Bu bağlamda, KNX protokolü dağıtık mimarisi, üretici bağımsızlığı ve geriye dönük uyumluluğu sayesinde aydınlatma, HVAC, gölgeleme ve enerji izleme alt-sistemlerini tek çatı altında bütünleştirerek hem enerji verimliliğini artırmak hem de kullanıcı konforunu iyileştirmek için güçlü bir altyapı sunar. Ancak Türkiye'de KNX tabanlı uygulamaların tasarım-uygulama-değerlendirme döngüsüne dair sistematik yaklaşımların ve nicel performans verilerinin sınırlı olması, bu potansiyelin pratiğe yansıtılmasını güçleştirmektedir. Bu tez çalışması, ev otomasyon uygulamasına yönelik üzere KNX Sisteminin enerji verimliliğine katkısını disiplinler arası bir perspektifle incelemeyi, yöntemsel bir çerçeve sunmayı ve saha verileriyle doğrulanmış bulgular ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Dünyada toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40'ı binalarda gerçekleşmekte ve buna bağlı karbon emisyonları küresel emisyonların %30'una ulaşmaktadır[1]. Gün ışığına, iklim koşullarına ve kullanıcı davranışlarına duyarlı otomasyon sistemleri, söz konusu enerji talebini düşürmenin en etkin yollarından biridir. KNX protokolü, dağıtık zekâ, çok-üreticili ekosistem ve geriye dönük uyumluluk özellikleriyle bu ihtiyaçlara yanıt veren önde gelen uluslararası standarttır. Ancak Türkiye'de ve yakın coğrafyada, KNX tabanlı sistemlerin HVAC, aydınlatma, gölgeleme ve enerji izleme alt sistemleriyle tümleşik olarak tasarlanmasına dair bütüncül bir çerçeve eksiktir. Senaryo temelli kontrol stratejilerinin (**gece, tatil, enerji krizi vb**) enerji verimliliğine nicel katkısı çoğu projede ölçümlenememektedir. Yatırımcı ve mühendislerin karar sürecini besleyecek geri dönüş süresi (ROI) analizleri sınırlı örneklerle kısıtlı kalmaktadır.

Bu araştırmanın amacı ve hedefleri, KNX tabanlı bina otomasyonu ile enerji verimliliği ve kullanıcı konforu arasındaki etkileşimi, disiplinler arası bir bakış açısıyla incelemeyi; tasarım, uygulama ve değerlendirme adımlarını tek bir çalışma içinde bütünleştirmeyi amaçlamaktadır. Özel hedefler şunlardır:

1. KNX protokolünün mimari yapısını ve güvenlik eklentilerini (KNX Secure) özetleyerek mevcut literatürdeki boşlukları ortaya koymak.
2. İklimlendirme yöntemleri (VRF, fan-coil, yerden ısıtma vb.) ile KNX entegrasyon modellerini teknik, ekonomik ve çevresel boyutlarıyla karşılaştırmak.
3. 300 m<sup>2</sup>'lik tipik bir konut üzerinde senaryo-tabanlı KNX tasarımını uygulayarak yıllık enerji tasarrufu ve ROI'yi ölçmek ve doğrulamak.
4. Elde edilen bulgular ışığında mimar, makine-elektrik mühendisi ve yatırımcılar için pratik tasarım ilkeleri ve karar destek şemaları geliştirmek.

Yöntem ve kapsam bakımından incelendiğinde, bu çalışmanın KNX, BACnet ve diğer protokollerin karşılaştırmalı analizi KNX'in binaya dair enerji performansına etkisini raporlayan güncel literatür çalışması detaylı şekilde sunulmaktadır.

KNX protokolü gibi bina otomasyon sistemleri, bina içerisindeki sistemlerin daha verimli çalışmasına katkı sağlamaktadır[2]. Bu verimlilik, kullanıcı konforunun artmasına neden olurken, aynı zamanda enerji tüketiminde %20'ye varan tasarruf elde edilmesine de imkân tanımaktadır.

Günümüzde hızla gelişen bilişim ve teknoloji pazarıyla birlikte, yaşamı kolaylaştıran yeni teknolojiler sürekli olarak hayatımıza entegre edilmektedir[3]. Bu kapsamda otomasyon sistemleri, özellikle iş gücünü azaltarak verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bina otomasyonu, bu teknolojilerin önemli bir alt dalı olup, enerji tasarrufu, konfor ve güvenlik sağlamasıyla özellikle rezidans, otel ve iş yerlerinde tercih edilmektedir. KNX protokolü, ev ve bina otomasyonu için dünya çapında standart haline gelmiş, ülkemizde de yaygın olarak kullanılan bir sistemdir. Bu çalışma kapsamında, Daikin marka VRV & Sky tipi klimaların KNX altyapısıyla kontrolünü sağlayacak bir ara yüz tasarlanmış; prototipleme, donanım ve yazılım geliştirme aşamalarıyla birlikte, cihaz ETS ortamında uyum sağlayacak şekilde tamamlanmıştır. Mevcut pazardaki

çözümler sadece tek bir fiziksel katmanı desteklerken, geliştirilen cihaz birden fazla fiziksel katmanı aynı yapı altında birleştirerek sektöre yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

Ev/bina otomasyonu uygulamaları için kablosuz algılayıcı ağlarının KNX standardı ile entegrasyonu ilgili çalışmada gerçekleştirilmiştir[4]. Kablosuz algılayıcı ağı tasarımında NXP firmasının düşük güç tüketimine sahip Jennic isimli modülleri kullanılmıştır. Geliştirilen sistemle yapılan testler neticesinde kablosuz algılayıcı ağının pille çalışan düğümlerinin beş yıl çalışabileceği gösterilmiştir [5]. Akıllı binalar, özellikle ticari yapılar, orta ölçekli sanayi kuruluşları kadar enerji tüketebildiğinden, enerji krizleri sonrası bu tüketimin etkin şekilde kontrolü büyük önem kazanmıştır. Bu çalışmada, akıllı binalarda kullanılan teknik sistemlerin enerji tüketimindeki payları, bu sistemlerin kontrolü için bina otomasyonunun önemi ve merkezi enerji izleme sistemlerinin katkıları ele alınmıştır. Farklı ülkelerin akıllı bina tanımları, kullanıcı beklentileri, ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma sistemlerinin enerji verimliliği detaylandırılmış, örnek uygulamalarla merkezi aydınlatma kontrolü incelenmiştir. Ayrıca bina otomasyon sistemlerinin ve açık haberleşme protokollerinin gelişimi ile sağladığı avantajlar aktarılmış; otel, spor kompleksi ve ofis binası gibi örnek yapılar üzerinden enerji tüketim verileri ve enerji kalitesi parametreleri analiz edilerek merkezi enerji izleme sistemlerinin önemi vurgulanmıştır.

Mainetti ve arkadaşları[6] tarafından geliştirilen modelde, bir konutun KNX sistemiyle entegre edildiği Android kontrollü senaryo yapısı test edilmiştir. Çalışmada, yapay sinir ağları (ANN) ile kullanıcı davranışı öngörülüş ve KNX tabanlı sistemin HVAC tepkileri buna göre optimize edilmiştir. %18 oranında enerji tasarrufu sağlanmış ve sistem, senaryo değişikliklerine 0.7 saniye içinde yanıt verebilmiştir.

Dweik ve arkadaşları[7] tarafından yürütülen çalışmada, KNX tabanlı bir ofis ortamı oluşturularak sesli komut sistemi üzerinden ışık, ısıtma ve perde kontrolü yapılmıştır. Gerçekleştirilen sistem, Arduino tabanlı sesli komut sistemine entegre edilmiştir. Enerji tüketiminde %22'lik azalma, kullanıcı geri bildirimlerinde ise %35 daha yüksek konfor bildirimini alınmıştır.

Mevenkamp ve arkadaşları [8] tarafından yapılan saha çalışmasında, bir üniversite binasında KNX ile ısıtma ve aydınlatma kontrol sistemleri uygulanmıştır. Sistem, sensör tabanlı çalışma ve zamanlama programları içeriyordu. Geleneksel sistemlere göre %25 enerji tasarrufu sağlandığı, özellikle ışık/mekân kullanımını eşlemesi sayesinde aydınlatma yükünün ciddi oranda azaltıldığı görülmüştür.

Piironen [9], Finlandiya’da akıllı apartmanlar için, simülasyon tabanlı KNX kontrol senaryoları geliştirmiştir. Çalışma, maliyet etkinliği ve konfor skorları üzerinden değerlendirilmiştir. Simülasyonlar, yatırım maliyetine rağmen KNX’in 3 yıl içinde kendini amorti ettiğini ve sistemin yılda 500–800 kg CO<sub>2</sub> azalımı sağladığını göstermiştir.

Sutrich[10] tarafından geliştirilen sistemde, yalnızca KNX uyumlu donanımlar kullanılarak oluşturulan modüler bir enerji yönetimi platformu test edilmiştir. Yapılandırma, hem elektrikli cihazları hem de HVAC sistemlerini kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Sistemin, klasik modbus altyapılı sistemlere göre %20 daha düşük enerji tüketimi gösterdiği ve veri toplama sürelerinde %35 daha hızlı olduğu rapor edilmiştir.

Bu tez çalışmasının modelleme ve simülasyon kısmında, DPT ve grup adresleme mantığıyla dijital ikiz oluşturularak farklı kontrol senaryolarının (örn. **Gün Işığı Dengeleme**) EnergyPlus tabanlı simülasyonu bu aşamada gerçekleştirilmektedir.

İstanbul iklim bölgesinde konumlanan, PV destekli 3 katlı konut için KNX IP-router, termostat, sensör ve aktüatörlerden oluşan sistemin tasarımı ve devreye alınmasına ilişkin bir vaka çalışması sunulmaktadır. Ayrıca, gerçek-zamanlı tüketim verisinin 12 ay boyunca toplanması, senaryolar arası karşılaştırmalı istatistiksel analiz ve ekonomik geri dönüş hesaplaması ölçüm ve değerlendirme kısmında yer almaktadır.

Bu çalışma ile KNX-HVAC entegrasyonu için çok-katmanlı referans mimari ve veri akış diyagramları (Fiziksel → Uygulama katmanı), konut ölçeğinde uygulanan senaryo-temelli enerji yönetiminin %30’a varan tasarruf potansiyelini kanıtlayan ölçümlenmiş bir veri seti, PV-destekli konutlarda KNX otomasyonunun ≤ 3 yıl ROI sağlayabileceğini gösteren detaylı maliyet modeli ile tasarımcılar için

ölçeklenebilir cihaz/seçim matrisi ve karar akış şemalarına ilişkin özgün katkıları sunmaktadır.

Bu tez çalışması, toplam beş bölümden oluşmaktadır, öncelikle KNX protokolünün tarihçesi, mimarisi ve iletişim katmanları ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. İklimlendirme yöntemleri, akıllı bina kavramı ve sürdürülebilirlik ölçütleri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. 300 m<sup>2</sup> örnek bir konut üzerinde geliştirilen KNX tasarımı, donanım listesi ve kontrol senaryoları adım adım sunulmuştur. Elde edilen ölçüm sonuçları, enerji tasarrufu ve ekonomik analizler özetlenmiş olup, gelecekteki araştırma fırsatları tartışılmıştır.



## 2. KNX OTOMASYON SİSTEMİNE GENEL BAKIŞ

Bina otomasyonu alanında enerji verimliliğini ve kullanıcı konforunu arttırmaya yönelik çözümler giderek önem kazanmaktadır. Bu noktada, farklı üreticilere ait cihazların ortak bir platformda çalışmasını mümkün kılan standartlara olan ihtiyaç da artmıştır. Bu bölümde, uluslararası kabul görmüş bir bina otomasyon protokolü olan KNX sistemlerinin temel prensipleri, mimarisi, iletişim yapısı ve HVAC sistemleri ile entegrasyonu ele alınacaktır.

KNX, modern akıllı binalarda kullanılan çok yönlü ve esnek bir otomasyon protokolüdür. Geniş uygulama alanına sahip olması ve üretici bağımsız yapısıyla öne çıkan bu sistem, farklı cihazların birbiriyle güvenli ve senkronize biçimde iletişim kurmasını sağlar. KNX sistemini daha iyi anlayabilmek için öncelikle bu teknolojinin tarihsel gelişimi ve temel tanımı üzerinde durmak gerekmektedir.

### 2.1 KNX Sisteminin Tanımı ve Tarihçesi

KNX (Konnex), akıllı bina otomasyon sistemlerinde farklı cihazlar ve sistemler arasında iletişimi standartlaştıran ve çoklu üretici desteği sunan açık kaynaklı bir bina otomasyon protokolüdür. 1990'lı yıllarda geliştirilen EIB (European Installation Bus), BatiBUS ve EHS protokollerinin birleşmesiyle 1999 yılında KNX Association tarafından geliştirilmiş ve daha sonra 2006 yılında ISO/IEC 14543-3 standardı olarak kabul edilmiştir. KNX teknolojisinin ev tipi uygulamalardaki pratiğe dönüşümünü ele alan çalışmalar, bu protokolün ölçeklenebilirliğini ve farklı kullanıcı ihtiyaçlarına uyum sağlama yeteneğini ortaya koymuştur[11]. Şekil 2.1 KNX'in gelişim çizelgesi paylaşılmıştır.



Şekil 2.1: KNX'in 1990–2020 Arası Gelişim Çizgisi

KNX protokolü, 2008 yılında CENELEC(EN 50090), CEN(EN 13321-1) ve ANSI/ASHRAE(135) gibi uluslararası standart kuruluşları tarafından resmi olarak tanınmış ve bu sayede küresel geçerliliğe sahip bir bina otomasyon standardı hâline gelmiştir. Bu uluslararası tanınırlık, KNX'in diğer bina otomasyon protokollerine kıyasla önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir[12]. Şekil 2.2 KNX içinde bulunduğu standardizasyonlar gösterilmiştir.



**Şekil 2.2: KNX'in İçinde Bunduğu Standardizasyonlar**

### **2.1.1 Teknik yapı ve özellikler**

KNX protokolü, bina otomasyonu alanında yaygın olarak kullanılan, açık standartlara dayalı, nesne tabanlı ve merkezi olmayan bir iletişim yapısı sunmaktadır. Bu protokol, farklı üreticilere ait cihazların birlikte çalışabilirliğini sağlayarak sistem entegrasyonunu kolaylaştırır. KNX'in en temel teknik özelliği, her cihazın kendi başına işlem yapabilen yerel bir zekaya sahip olmasıdır. Bu sayede sistem, herhangi bir merkezi kontrol ünitesine ya da sunucuya bağlı kalmaksızın, dağıtık mimaride çalışabilir. Yani bir cihazın arızalanması durumunda diğer cihazların işlevi etkilenmeden devam edebilir; bu da sistemin güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırır. Ayrıca KNX protokolü, hem kablolu (TP, IP) hem de kablosuz (RF) iletim ortamlarını destekleyerek farklı yapı türleri ve uygulama senaryoları için esnek çözümler sunar. Çizelge 2.1 KNX Sisteminin temel özellikleri sunulmuştur.

**Çizelge 2.1: KNX Sisteminin Temel Özellikleri**

Özellik	Açıklama
Standart	ISO/IEC 14543-3
İletişim Ortamı	TP (Twisted Pair), RF (Radyo Frekansı), PL (Powerline), IP/Ethernet
Cihaz Adresleme	Grup adresleme ve bireysel adresleme
Enerji Tüketimi	Düşük; 29-30V DC besleme ile çalışır
Yapılandırma Yazılımı	ETS (Engineering Tool Software)
Senaryo Yeteneği	Günlük, haftalık, mantıksal koşullu programlama destekli

Her cihaz, bir bireysel adres ile tanımlanır ve grup adresleri sayesinde birden fazla cihaz bir arada kontrol edilebilir. Bu yapı, özellikle aydınlatma, iklimlendirme ve perde/panjur kontrolü gibi senaryolar için esneklik sağlar.

KNX ile diğer sistemler arasındaki farkları içeren Çizelge 2.2’de belirtildiği gibi standartlaşma, yapılandırma, merkezi kontrol, enerji profili ve iletişim ortamı gibi özellikler yer almaktadır.

**Çizelge 2.2: KNX, BACnet ve LonWorks Protokollerinin Temel Özellik Karşılaştırması**

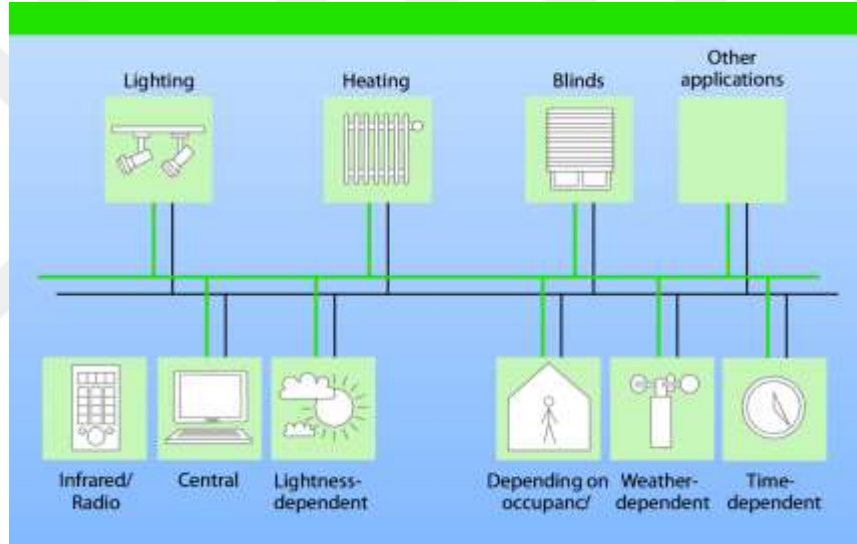
Özellik	KNX	BACnet	LonWorks
Standartlaşma	ISO/IEC 14543-3	ASHRAE Standard 135	ANSI/EIA-709
Yapılandırma	ETS (tek yazılım)	Farklı vendor araçları	LonMaker, diğerleri
Merkezi Kontrol	Gerektirmez (dağıtık)	Genellikle merkezi	Dağıtık
Enerji Profili	Düşük tüketim (29-30V DC)	Değişken	Orta düzey
İletişim Ortamı	TP, RF, IP, PL	Ethernet, MS/TP	TP/FT, Ethernet

KNX Sisteminin güçlü yanları, 500’den fazla üretici tarafından desteklendiğinden markadan bağımsızdır. Kısıtlayıcı lisans bulunmadığından sistem açık ve geliştirilebilir. Termostatlar, sensörler, aktüatörler, ekranlar gibi daha geniş cihaz yelpazesi sahiptir. 20 yıldan fazla geriye uyumlu alt yapısı bulunduğu için uzun ömürlü sistemdir. Gerçek zamanlı veri kontrolü ile optimize çalıştığından enerji verimliliği yüksektir. Ayrıca, MQTT, OPC-UA gibi protokollerle entegre çalışabildiği için nesnelerin interneti ile (IoT) uyumludur.

### 2.1.2 KNX sistem mimarisi

KNX protokolünü diğer otomasyon çözümlerinden ayıran en temel unsurlardan biri, sahip olduğu dağınk ve modüler mimaridir. Bu yapı, sistemin ölçeklenebilirliğini ve esnekliğini artırmaktadır. Farklı büyüklükteki binalara, farklı senaryo ve ihtiyaçlara kolayca uyum sağlmasına imkân tanımaktadır. Bu bölümde, KNX sisteminin katmanlı yapısı detaylandırılarak, cihazlar arası etkileşimden genel haberleşme altyapısına kadar tüm mimari bileşenler açıklanacaktır.

KNX otomasyon sistemleri, merkezi olmayan (decentralized) yapısıyla öne çıkar. Bu sistemde her cihaz kendi içinde “akıllıdır” ve diğer cihazlarla bağımsız şekilde haberleşebilir. Bu yaklaşım, merkezi kontrolörlere olan ihtiyacı ortadan kaldırarak modülerlik, ölçeklenebilirlik ve güvenilirlik sağlar.



**Şekil 2.3: Bus Mimarisinin Kablo Yoğunluğunun Azaltılması**

KNX sistemi temel olarak, alan seviyesi (Field Level), otomasyon seviyesi (Automation Level), yönetim seviyesi (Management Level) gibi mimari bileşenlerden oluşur. Bu yapı, endüstriyel otomasyon sistemlerindeki klasik SCADA mimarisine benzer, ancak bina otomasyonuna özel olarak optimize edilmiştir[13].

**Alan Seviyesi (Field Level):** Bu seviyede sensörler (örneğin sıcaklık, hareket, nem sensörleri) ve aktüatörler (ışık anahtarı, vana kontrolörü, fan kontrol modülü) bulunur. Cihazlar doğrudan birbirine veri göndererek merkezi birime ihtiyaç duymadan çalışabilirler. Grup adresleme sistemi kullanılarak bir sensör birden fazla cihazı kontrol edebilir. Örnek vermek gerekirse, bir hareket sensörü hem ışığı hem de klimayı tetikleyebilir.

Otomasyon Seviyesi (Automation Level) : Bu seviyede, mantıksal karar verme işlevleri gerçekleştirilir. Zaman programlayıcılar, mantık modülleri ve kontrol senaryoları bu katmanda yer alır. Örneğin, “eğer dış sıcaklık 30°C üzerindeyse ve içeri girildiğinde hareket algılanıyorsa, VRF sistemi devreye girsin” gibi senaryolar burada yürütülür. Bu seviye, KNX sistemlerinin akıllı davranışlar sergilemesini sağlar.

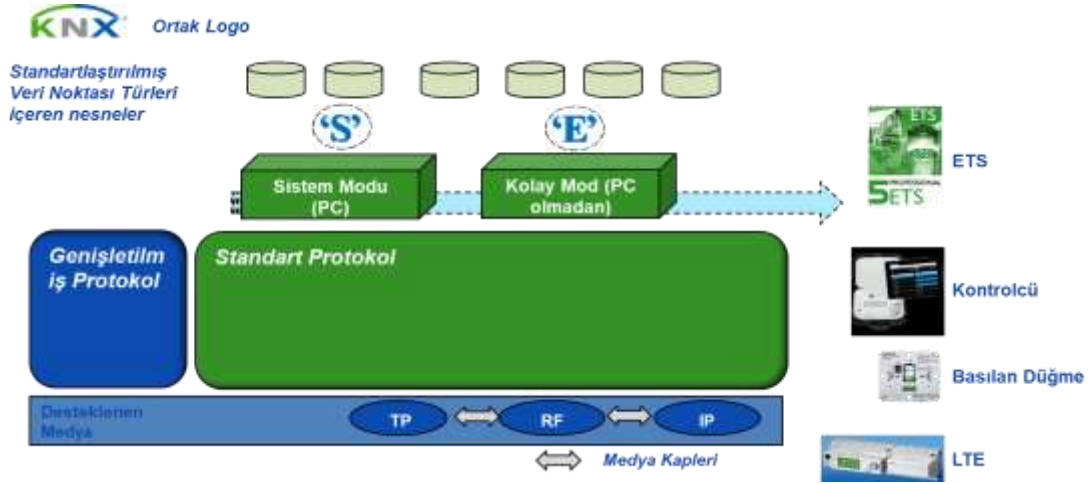
Yönetim Seviyesi (Management Level): Bu seviyede ETS yazılımı (Engineering Tool Software) kullanılarak cihaz adreslemeleri, parametre ayarları ve mantıksal ilişkiler yapılır. Gelişmiş KNX sistemlerinde bina yönetim sistemleri (BMS) veya SCADA yazılımları üzerinden uzaktan izleme ve müdahale mümkündür. Ayrıca IP üzerinden haberleşen KNX cihazları, merkezi sunuculara entegre edilebilir.

### 2.1.3 KNX sisteminin iletişim ortamları ve topolojisi

KNX sistemleri birden fazla fiziksel taşıyıcı üzerinden haberleşebilir. Bu taşıyıcı ortamlar. Bu taşıyıcı ortamların temel özellikleri Çizelge 2.3'te sunulmaktadır. KNX sistem mimarisi ağ topolojisi açısından hat (line), yıldız (star), ağaç (tree) ve bus (veri yolu) yapılarını destekler. Her bir segment 64 cihaza kadar destek verir ve tekrarlayıcılarla genişletilebilir.

**Çizelge 2.3: KNX Sisteminde Kullanılan İletişim Ortam Türleri ve Temel Özellikleri**

Ortam Türü	Açıklama
<b>TP (Twisted Pair)</b>	En yaygın kullanılanıdır. 9600 bit/s ile veri taşır.
<b>(RF)Radio Frequency)</b>	Kablosuz iletişim sağlar. Özellikle retrofit projelerde kullanılır.
<b>PL (Power Line)</b>	Elektrik hattı üzerinden veri taşır. Gürültüye duyarlıdır.
<b>IP/Ethernet</b>	IP üzerinden yüksek hızlı veri aktarımı sağlar. Merkezi sistemlerle entegrasyon için kullanılır.



**Şekil 2.4: KNX Sisteminin Mimari Yapısı**

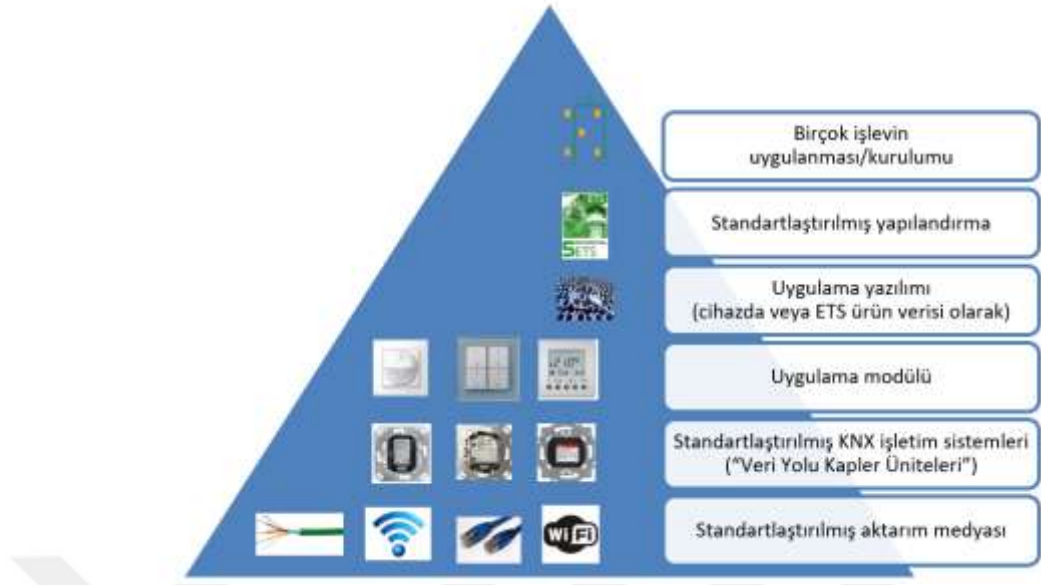
KNX sistemlerinde konfigürasyon, uygulamanın ölçeğine göre E-Mod ve Sistem Modu (S-Mod) olmak üzere iki temel yöntemle gerçekleştirilir. E-Mod, bilgisayar gerektirmeden merkezi kontrol cihazları veya butonlar aracılığıyla yapılandırma sağlar ve genellikle küçük ve orta ölçekli projelere yönelik sınırlı işlevsellik sunar. Bu mod, temel KNX bilgisine sahip elektrik tesisatçıları için uygundur. S-Mod ise, tüm konfigürasyon işlemlerinin ETS yazılımı üzerinden yapıldığı, üretici bağımsız ve kapsamlı bir yapılandırma yaklaşımıdır. KNX sertifikalı uzmanlar tarafından kullanılan bu mod, büyük ve karmaşık bina otomasyon projeleri için geliştirilmiştir. Bazı cihazlar ise LTE gibi mekanizmalarla her iki moda da uyumlu çalışabilir. Şekil 2.4 KNX sistem mimarisinde gösterilmiştir.

#### **2.1.4 KNX sisteminin besleme yapısı**

KNX sistemleri besleme değerleri genellikle 29V-30V DC gerilim ile çalışırlar. Bu düşük gerilim seviyesi sayesinde cihazlar güvenli ve düşük enerji tüketimiyle uzun süreli çalışabilir. KNX hatlarında bir güç kaynağı, genellikle veri iletim hattıyla (TP) birlikte entegre şekilde görev yapar. Bu hatlar ayrıca datalogger, programlama arabirimi, şok devresi ve gerilim dengeleyici gibi bileşenleri de içerebilir.

Şekil 2.5’de bir KNX linyesinin en küçük bileşenlerini tanımlar. KNX güç kaynağı, sensör ve sürücü sistemini içermektedir. Şekil 2.6’da ise, KNX TP linyesindeki izin verilen kablo uzunluklarını göstermektedir.





**Şekil 2.7: Üretici Bağımsız Birlikte-Çalışabilirlik Matrisi**

**KNX Protokolü ve iletişim yapısında** nesne tabanlı bir protokol mimarisi kullanır ve cihazlar arası haberleşmede **grup adresleme**, **veri tipleri (DPT)** ve **katmanlı yapı** prensiplerine dayanır. İletişim modeli, OSI modelinin sadeleştirilmiş bir versiyonu üzerine kuruludur ve aşağıda gösterilen Çizelge 2.4.'deki gibi temel katmanlardan oluşur.

**Çizelge 2.4: KNX Protokolünün Katmanlı Mimarisi ve İşlevsel Açıklamaları**

Katman	Açıklama
<b>Fiziksel Katman</b>	TP, PL, RF veya IP üzerinden fiziksel veri iletimi sağlar.
<b>Bağlantı (Data Link)</b>	Cihazlar arası bağlantı yönetimini, çerçeveleme ve hata kontrolünü yürütür.
<b>Ağ / Taşıma Katmanı</b>	Veri paketlerinin yönlendirilmesini sağlar. (Routing, broadcasting vs.)
<b>Uygulama Katmanı</b>	Sensör ve aktüatörlerin işlevselliğini tanımlar. Fonksiyonel bloklar burada yer alır.

KNX sisteminin en ayırt edici yönlerinden biri grup adresleme mantığıdır. Bu sistemde, Bir sensör birden fazla aktüatöre sinyal gönderebilir. Örneğin bir sıcaklık sensörü aynı anda hem VRF sistemine hem perde sistemine komut iletebilir. Bu, çok noktaya yayın (multicast) mantığıyla çalışır ve sistemin verimliliğini artırır. ETS yazılımı üzerinden yapılandırılır ve üç seviyeli (örnek: 1/2/3) bir yapı kullanılır. Şekil 2.8'de grup adreslerinin üç seviyeli hiyerarşik yapısı gösterilmiştir.



**Şekil 2.8: KNX Grup Adreslerinin 3 Seviyeli Hiyerarşik Yapısı**

Ana grup / Orta grup / Alt grup yapıları, cihazlar arası yönlendirme, filtreleme, mantıksal ilişkilendirme gibi işlemleri oldukça kolaylaştırır.

KNX Veri Yapısı ve Tipleri KNX protokolü, cihazların ortak bir dil konuşabilmesi için veri tiplerini standartlaştırmıştır. Bu veri tipleri DPT (Data Point Type) olarak adlandırılır. Bu veri tipleri olarak adlandırılır ve Çizelge 2.5 de örnek kullanım alanları verilmektedir.

**Çizelge 2.5: KNX Sisteminde Yaygın Kullanılan Veri Tipi (DPT) Türleri ve Örnek Kullanım Alanları**

DPT Türü	Açıklama	Örnek
DPT 1	1-bit (boolean)	Aç/Kapa, ON/OFF
DPT 5	8-bit unsigned integer	% dimmer, sıcaklık ayarı
DPT 9	16-bit float	Sıcaklık, nem, basınç
DPT 14	32-bit float	Enerji tüketimi, analog veri

Bu yapı sayesinde farklı üreticilerin cihazları ortak veri yapısını kullanarak sorunsuz iletişim kurabilir. Örneğin, bir DPT 9.001 tipi sıcaklık sensörü 22.5°C'lik değeri 2 baytlık float veriyle gönderir[13].

KNX'te dört ana haberleşme yöntemi vardır. Bunlar; bir cihaza özel veri gönderme unicast, grup adresine veri gönderme (en yaygın yöntem) multicast, tüm cihazlara mesaj gönderme broadcast ve cihazın mesajı aldığını onaylaması acknowledge (ACK) olarak tanımlanır. Bu mekanizmalar, sistemde gerçek zamanlı kontrol, güvenli mesajlaşma ve ağ yükü azaltır.

KNX sistemi üzerinden çalışan bir ortamda, KNX termostat elemanı ortam sıcaklığını ölçer (DPT 9.001 – sıcaklık değeri: 23.5°C). Bu değer, KNX üzerinden VRF sistemini kontrol eden aktüatöre grup adresiyle gönderilir. Aktüatör, gelen değere göre fan seviyesini ayarlar (DPT 5.010 – %50). Bu işlem milisaniyeler içinde gerçekleşir. Bu tür sensör → kontrol → eylem döngüsü, KNX'in temel çalışma prensibidir.

Yeni nesil KNX sistemleri artık “KNX Secure” özelliği ile veri şifreleme, kimlik doğrulama ve yetki kontrolü gibi mekanizmalar da sunmaktadır. Bu, özellikle IP üzerinden çalışan sistemlerde siber güvenlik ihtiyacını karşılamaktadır[14].

KNX protokolünün en önemli uygulama alanlarından birisi de ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri (HVAC) ile entegrasyonudur. Binalarda enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturan HVAC sistemlerinin akıllı kontrolü, hem enerji verimliliği hem de kullanıcı konforu açısından kritik öneme sahiptir.

Binalarda enerji tüketiminin büyük kısmı, ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinden kaynaklanır. KNX otomasyon sistemleri, bu cihazların daha verimli, optimize ve senaryo tabanlı kontrolünü sağlayarak hem enerji tüketimini hem de işletme maliyetlerini azaltabilir. Özellikle çok modlu kontrol stratejileri, kullanıcı konforunu bozmadan enerji tasarrufu sağlar [15].

KNX, HVAC sistemleri ile doğrudan veya gateway üzerinden haberleşerek analog/dijital çıkışlar, sıcaklık sensörleri, modbus-BACnet çeviriciler ve hatta IR modülleri aracılığıyla kontrol olanağı sunar.

### **3. İKLİMLENDİRME YÖNTEMLERİ, ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE AKILLI BİNALAR**

Akıllı bina sistemlerinde enerji tüketiminin büyük kısmı iklimlendirme süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, farklı iklimlendirme yöntemlerinin teknik açıdan değerlendirilmesi ve otomasyon sistemleriyle olan uyumu, enerji verimliliği açısından büyük önem taşır. Bu bölümde, KNX sistemi ile entegre edilebilen başlıca iklimlendirme yöntemleri sistematik olarak, her yöntemin teknik yapısı, kontrol biçimi, avantajları ve sınırlılıkları ayrıntılı biçimde bu bölümde değerlendirilecektir.

#### **3.1 Kombi Kontrol Yöntemi**

Kombi sistemleri, özellikle bireysel konutlarda yaygın olarak kullanılan ve doğalgaz yakıtlı çalışan ısıtma çözümleridir. Kompakt yapıları ve doğrudan sıcak su temini sağlamaları sayesinde, kullanım kolaylığı açısından tercih edilirler. Bu başlık altında, kombi sistemlerinin KNX otomasyon altyapısı ile nasıl entegre edilebildiği, hangi kontrol stratejilerinin uygulanabildiği ve bu entegrasyonun enerji verimliliğine katkısı ele alınacaktır. Kombi sistemlerinin teknik yapısı, özellikle konut tipi binalarda kullanılan, doğalgaz yakarak ısı enerjisi üreten ve bu enerjiyi radyatör, yerden ısıtma ya da kullanım sıcak suyu temini için kullanan kompakt cihazlardır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yoğunmalı kombiler, baca gazındaki ısının da geri kazanımıyla daha yüksek verimlilik sağlayan sistemlerdir.

Modern kombi cihazlarında genellikle modülasyon teknolojisi yer almaktadır. Bu teknoloji sayesinde cihaz, iç ortam sıcaklığı ile set sıcaklığı arasındaki farkı dikkate alarak alev gücünü oransal olarak ayarlayabilir. Bu, enerji tüketiminin düşürülmesinde ve kullanıcı konforunun korunmasında önemli avantaj sağlar[15].

KNX bina otomasyon sistemi ile kombi cihazları arasında entegrasyon, farklı yöntemlerle sağlanabilmektedir. En yaygın yöntemlerden biri, KNX dijital çıkış modülleri aracılığıyla kombinin on/off (aç/kapa) kontrol edilmesidir. Bu yöntemde

KNX termostat, ortam sıcaklığına göre kombiyi doğrudan başlatabilir veya durdurabilir.

Daha gelişmiş sistemlerde, kombi cihazı ile KNX sistemi arasına Modbus veya BACnet protokol dönüştürücüsü (gateway) eklenerek, kombinin modülasyon kapasitesi de kontrol edilebilmektedir. Böylece yalnızca aç/kapa değil, aynı zamanda ısıtma gücünün kademeli olarak kontrolü de mümkün olur.

Bazı üretici modellerinde kombilerden geri bildirim verileri (örneğin: kazanın su sıcaklığı, alev durumu, arıza kodu) alınarak, KNX arayüzü üzerinden izleme ve hata yönetimi yapılabilir[16]

Bu entegrasyon yapısı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **KNX → Kombi:** Aç/kapa komutu, modülasyon seviyesi
- **Kombi → KNX:** Su sıcaklığı, arıza durumu (isteğe bağlı)
- **Gereçler:** Dijital aktüatör, Modbus gateway, sıcaklık sensörleri, KNX termostat

Kombi sistemlerinin KNX üzerinden kontrol edilmesinin bazı önemli avantajları bulunmaktadır. Özellikle tek dairesel yapılarda ekonomik bir çözümdür. Bu da ilk yatırım maliyetini düşürür. Konut tipi binalarda yüksek kullanım oranına sahiptir. Bu da yaygın bir kullanım uygulama alanına sahip olduğunu gösterir. KNX termostatlar sayesinde her odada bağımsız sıcaklık ayarı yapılabilir, bu da oda bazlı kontrol olanağı sağlar. Senaryo Entegrasyonu, tatil modu, gece modu gibi KNX senaryoları ile birlikte çalışabilir.

Bu sistem her ne kadar yaygın kullanılsa da, bazı sınırlayıcı durumları bulunmaktadır. Bu sınırlayıcı etkenlerin başında doğal gaz bağımlılığı gelir. Fosil yakıt kullanımını sürdürülebilirlik açısından olumsuz bir etkidir. Tek kazanlı yapı nedeniyle çok bölgeli yapılarda genişletme zordur. Diğer sistemlere kıyasla enerji tüketimi göreceli olarak yüksektir. Bazı kombi modelleri KNX ile çift yönlü veri alışverişine olanak tanımayabilir.

Kombi sistemleri, KNX tabanlı bina otomasyon sistemleriyle birlikte çalıştırıldığında, küçük ve orta ölçekli konutlarda düşük maliyetli ve yönetilebilir bir çözüm sunmaktadır. Ancak bu sistemlerin, enerji verimliliği odaklı akıllı bina stratejilerine tam anlamıyla entegre edilebilmesi için gelişmiş haberleşme

protokolleri (örneğin Modbus RTU) üzerinden çift yönlü iletişim altyapısı sağlanmalıdır.

### 3.2 VRF (Variable Refrigerant Flow) Sistemleri

Enerji verimliliği ve bölgesel iklim kontrolü ihtiyaçları doğrultusunda geliştirilen VRF sistemleri, özellikle büyük ve çok bölgeli yapılarda sıkça tercih edilen ileri seviye iklimlendirme çözümlerindedir. Yüksek kontrol hassasiyeti, çok sayıda iç üniteyle çalışma yeteneği ve esnek uygulama imkânı sayesinde VRF sistemleri, akıllı bina otomasyonları ile yüksek uyum gösterir. Bu başlık altında, VRF sistemlerinin genel prensipleri ve KNX ile entegrasyon potansiyelleri ele alınacaktır.

VRF (Değişken Soğutucu Akışkan Debili) sistemler, tek bir dış üniteye bağlı olarak çalışan çok sayıda iç ünitenin bağımsız kontrolüne olanak tanıyan, gelişmiş bir iklimlendirme teknolojisidir. Bu sistemlerde dış ünite, ortamın soğutma/ısıtma ihtiyacına göre soğutucu akışkanın debisini inverter teknolojisi sayesinde ayarlayarak iç üniteler arasında verimli bir dağıtım yapar[17].

VRF sistemlerinin başlıca özellikleri, çok bölgeli kontrol imkânı (multi-zone), ısıtma ve soğutmanın aynı anda farklı alanlarda çalışabilmesi (heat recovery tipi VRF'lerde), yüksek kısmi yük verimi ile enerji tasarrufu ve iç ünitelerin duvar tipi, kaset tipi, kanal tipi gibi çok çeşitli varyasyonlarla seçilebilmesidir. Bu özellikler sayesinde VRF sistemleri; oteller, ofisler, hastaneler ve akıllı konut projelerinde yoğun şekilde tercih edilmektedir.

KNX sistemleri ile VRF üniteleri arasında doğrudan ya da dolaylı iletişim kurulabilir. Entegrasyon genellikle üç temel yöntemle gerçekleştirilir:

- **IR (Kızılötesi) Gateway ile:** VRF iç ünitesine bağlı kızılötesi alıcı, KNX-IR dönüştürücü ile kontrol edilir.
- **VRF Gateway ile:** Üreticiye ait özel gateway'ler üzerinden doğrudan iletişim sağlanır.
- **Röleli kontrol ile:** İç ünitenin aç/kapa, işlevleri KNX dijital çıkış modülleri ile tetiklenir.

En gelişmiş sistemlerde, termostat verisi ve kullanıcı hareketi gibi veriler kullanılarak, zamanlama bazlı otomasyon, pencere sensörüyle enerji kaybı önleme, oda bazlı ısıtma/soğutma yönetimi ve yüksek dış hava sıcaklığı durumunda performans düşürme gibi senaryolar oluşturulabilir[17].

KNX temelli VRF entegrasyonunun özellikleri, her odada farklı sıcaklık ve fan seviyesinin ayarlanabilir olması, bu da bölgesel bazlı kontrol olanağı sağlar. Kısmi yükte bile yüksek COP/EER değerleri yüksek enerji verimliliğine olanak tanır. Kompakt iç üniteler ve sessiz dış ünite teknolojisi sistemin estetik ve sessiz çalışmasını sağlar. Modbus, BACnet veya klimaya özel bir haberleşme protokolleri üzerinden akıllı bina sistemlerine dijital kontrol altyapısı entegre olabilir. Konum boş olduğunda otomatik kapanma gibi akıllı senaryosu uygulanarak konfor tasarruf dengesi sağlanabilir.

KNX Gateway'ler kendi protokolü üzerinden haberleşip kontrol edilen VRF sistemlerinde iki farklı yöntem kullanılır. Bunlar iç ünite üzerinden kontrol ve dış ünite üzerinden kontrol şeklinde ikiye ayrılır. İç ünite kontrol yöntemi ile, tüm veriler sağlıklı şekilde iletilir. VRF sisteminin kendi kumandasında yapılabilen tüm fonksiyonlar gerçekleştirilebilir. Dış ünite kontrolü üzerinden sağlanan kontrollerde ise, termostatın kendi ölçtüğü ortam sıcaklığına göre çalışmamaktadır. VRF emiş sistemi üzerinde bulunan sensöre göre ölçüm yapıp bu sensörü referans alarak çalışmaktadır. Bu durumun çözümü de gönderilen set değerinde kaydırma yapılarak çözümlenebilir.

Dış üniteyle KNX kontrolünde VRF, oda yerine emiş sensörünü referans alır; örneğin sensör oda sıcaklığından 2 °C düşük okursa cihaz erken durur. Çözüm: Kullanıcı 24 °C isterse, KNX'e 26 °C gönder ( +2 °C offset ) ve sistem oda sıcaklığını gerçek 24 °C'de dengeler.

Bu yöntemin dezavantajları ise, özellikle büyük projelerde yüksek ekipman ve altyapı maliyeti oluşabilir. Soğutucu borulama, drenaj altyapısı ve cihaz yerleşimi özel planlama gerektirir. Dış ünite arızaları gibi problemler sistemin tamamını etkileyebilir. Entegrasyonlar çoğu zaman üreticiye özel gateway'ler gerektirebilir. Dış ünite kontrollü yapılarda, sistem bağlantı noktası dışarda olduğu için müdahalelere açık olma riski taşır ve bu durum uygun protokollerle güçlendirilmelidir[14].

VRF sistemleri, bina içi iklim kontrolünde enerji verimliliğini artıran yüksek performanslı bir çözümdür. VRF sistemleri, özellikle akıllı binalarda enerji yönetiminin etkin biçimde sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemlerin yapı performansına olan katkısı birçok çalışmada vurgulanmaktadır[18]. KNX protokolü ile sağlanan entegrasyon, sistemin daha hassas kontrol edilmesini ve bireysel kullanıcı alışkanlıklarına göre otomatik senaryo oluşturulmasını mümkün kılar. Bu yapı, özellikle konfor ve tasarruf dengesinin öncelikli olduğu ticari projelerde büyük avantaj sağlar[19]. Yapılan çalışmalar, KNX üzerinden kontrol edilen VRF sistemlerinin, geleneksel termostat tabanlı sistemlere kıyasla %15-25 arasında enerji tasarrufu sağlayabildiğini göstermektedir[16].

### 3.3 Fan Coil Üniteleri

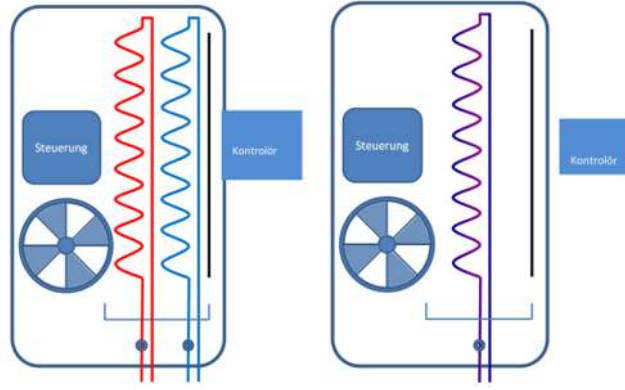
Fan coil sistemleri, merkezi bir ısıtma/soğutma kaynağından aldığı sıcaklık değişkenini iç mekâna aktaran kompakt ve esnek yapılarıyla, özellikle oteller, ofis binaları ve eğitim kurumlarında sıklıkla kullanılan iklimlendirme çözümlerindedir. Bu sistemler, bölgesel kontrol imkânı sunmaları ve KNX gibi bina otomasyon sistemleriyle rahatlıkla entegre edilebilmeleri nedeniyle modern bina teknolojilerinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu başlık altında, fan coil sistemlerinin teknik detayları ve otomasyon uyumu mercek altına alınacaktır.

Fan coil üniteleri (FCU – *Fan Coil Unit*), merkezi bir sıcak/soğuk su kaynağına bağlı çalışan ve iç mekânlarda hava sirkülasyonu yoluyla ısıtma ya da soğutma sağlayan sistemlerdir. Cihazın temel bileşenleri; bir ısı eşanjörü (coil), bir fan, ve bir kontrol panelidir. Su devresi üzerinden gelen ısıtılmış veya soğutulmuş su, fan yardımıyla iç ortama iletilen havayı istenen sıcaklığa getirir [20].

Sistem yapısı genellikle iki tipte sunulur:

- **2 borulu sistem:** Ya ısıtma ya da soğutma yapılabilir. Seçim merkezi kontrolle yapılır.
- **4 borulu sistem:** Aynı anda bazı bölgelerde ısıtma, bazı bölgelerde soğutma yapılabilir.

Bu sistemler, özellikle oteller, ofis binaları ve eğitim kurumları gibi bölgesel iklim kontrolünün önemli olduğu yapılarda tercih edilmektedir. Şekil 3.1, 4 Borulu ve 2 borulu fan coil prensip şeması sunulmuştur.



**Şekil 3.1: 4 Borulu ve 2 Borulu Fan Coil Prensi Şeması**

Fan coil sistemlerinin KNX ile entegrasyonu oldukça yaygındır ve genellikle aşağıdaki yöntemlerle gerçekleştirilir. KNX aktüatör modülü üzerinden fan kademeleri (düşük, orta, yüksek) KNX modülleri tarafından aç/kapa şeklinde kontrol edilir. 0—10V oransal sürücüler ile fan hızı veya vana açılımı oransal olarak ayarlanabilir. KNX oda termostatları üzerinden de oda sıcaklığına göre modülasyon yaparak fan ve vana kontrolünü optimize eder. Ek olarak, pencere kontakları, hareket sensörleri ve nem sensörleri ile sistem kapsamlı senaryo tabanlı kontrol altına alınabilir.

Fan coil üniteleri, özellikle bireysel iklim kontrolü gerektiren binalarda KNX otomasyonu ile entegre edildiğinde esnek kontrol olanakları sunar[15].

KNX tabanlı HVAC sistemleri, enerji verimliliği, esnek kontrol yapıları ve kullanıcı odaklı iklimlendirme olanakları sunarak geleneksel sistemlere kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle sensör tabanlı izleme ve senaryo kontrollü çalıştırma özellikleri, hem konfor seviyesini artırmakta hem de enerji tüketimini optimize etmektedir. Bu avantajlar ve işlevsel açıklamalar Çizelge 3.1’de özetlenmiştir. Bununla birlikte, KNX kontrollü HVAC sistemlerinde uygulama karmaşıklığı, ilk yatırım maliyeti ve teknik entegrasyon gibi bazı sınırlılıklar da söz konusudur. Bu sınırlamalar ise

Çizelge 3.2’de detaylı şekilde sunulmaktadır.

Fan coil sistemleri, bölgesel sıcaklık kontrolü gereken yapılarda düşük maliyetli ve esnek bir çözüm sunar. KNX otomasyon altyapısı ile entegre edildiğinde, yalnızca sıcaklık kontrolü değil; aynı zamanda fan kademeleri, senaryo yönetimi ve tüketim optimizasyonu gibi işlevler de sağlanabilir. Ayrıca, 0-10V

çıkışlı kontrol cihazları ile fan hızının modülasyonu sağlanarak konfor ve enerji tasarrufu birlikte elde edilir.

**Çizelge 3.1: KNX Tabanlı HVAC Sistemlerinin Avantajları ve İşlevsel Açıklamaları**

Avantaj	Açıklama
<b>Yüksek Bölgesel Kontrol</b>	Oda bazlı sıcaklık ve fan kontrolü mümkündür.
<b>KNX ile Esnek Entegrasyon</b>	Röle, analog veya dijital kontrol senaryoları uygulanabilir.
<b>Enerji Tasarrufu</b>	Hareket veya pencere sensörleri ile gereksiz çalışmanın önüne geçilir.
<b>Modüler Yapı</b>	Her bir ünitenin bağımsız kontrol edilebilmesi sayesinde geniş ölçekli yapılara uygundur.

**Çizelge 3.2: KNX Kontrollü HVAC Sistemlerinde Karşılaşılan Başlıca Sınırlılıklar**

Sınırlılık	Açıklama
<b>Fan Gürültüsü</b>	Özellikle yüksek fan kademelerinde ses seviyesi artabilir.
<b>Düzenli Bakım İhtiyacı</b>	Filtre ve serpantin temizlikleri düzenli yapılmalıdır.
<b>Yetersiz Dış Hava Sirkülasyonu</b>	Taze hava ihtiyacı için ayrıca VAV veya AHU sistemleri gerekir.
<b>Sabit Yönlendirme</b>	Havanın sabit doğrultuda üflenmesi, bazı kullanıcılar için konforsuzluk yaratabilir.

Yapılan araştırmalar, KNX sistemine entegre edilmiş fan coil ünitelerinin geleneksel mekanik termostatlara göre %10 ila %18 arasında enerji verimliliği sağladığını göstermektedir[16].

### 3.4 Yerden Isıtma Sistemleri

Yerden ısıtma sistemleri, klasik radyatör veya fan coil sistemlerine alternatif olarak, iç mekânlarda daha homojen ve konforlu bir sıcaklık dağılımı sunan modern iklimlendirme çözümlerindedir. Ayrıca, yerden ısıtma sistemleri radyatif ısı transferi sağladığı için yalnızca homojen bir iç ortam sıcaklığı yaratmakla kalmaz, aynı zamanda düşük sıcaklıkta çalışarak enerji tüketimini %30'a kadar azaltabilir[21]. Özellikle düşük sıcaklıkta çalışma prensibi sayesinde enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sunar. Bu sistemler, KNX otomasyon protokolü ile entegre edildiğinde hem verimli çalışabilir, hem de kullanıcı alışkanlıklarına göre optimize edilmiş senaryolarla kontrol edilebilir. Bu bölümde,



programlanabilir yapısıyla hem konfor hem de sürdürülebilirlik açısından katkı sunmaktadır. Bu avantajlar ve işlevsel açıklamalar Çizelge 3.3 **Hata! Başvuru aynağı bulunamadı.**'te sunulmaktadır. Öte yandan, yerden ısıtma sistemleri yapısal müdahale gerektirmesi, yavaş tepki süresi ve ilk yatırım maliyeti gibi bazı sınırlılıkları da beraberinde getirmektedir. Bu sınırlılıklar ve açıklamaları ise Çizelge 3.4 **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'te detaylı olarak verilmiştir.

**Çizelge 3.3: KNX Destekli Yerden Isıtma Sisteminin Avantajları ve Açıklamaları**

Avantaj	Açıklama
<b>Enerji Verimliliği</b>	Düşük sıcaklıkta çalışması sayesinde %15–30 tasarruf sağlar.
<b>Homojen Isı Dağılımı</b>	Zemin genelinde eşit ısı yayılımı konfor düzeyini artırır.
<b>Görsel Estetik</b>	Radyatör ya da iç ünite gibi ekipmanlar olmadığı için daha sade iç mimari sağlar.
<b>KNX ile Bölge Bazlı Kontrol</b>	Her odanın sıcaklığı ayrı ayrı ve otomatik olarak yönetilebilir.

**Çizelge 3.4: Yerden Isıtma Sistemlerinin Sınırlılıkları ve Açıklamaları**

Sınırlılık	Açıklama
<b>Geç Tepki Süresi</b>	Sistem zemini ısıttığı için sıcaklık değişimlerine tepki süresi uzundur.
<b>Kurulum Zorluğu</b>	İnşaat sonrası değişiklik neredeyse imkânsızdır.
<b>Nem Yönetimi Gerekir</b>	Yüksek zemin sıcaklığı nem dengesini olumsuz etkileyebilir.
<b>Yatırım Maliyeti</b>	İlk kurulum ve malzeme maliyeti klasik sistemlere göre daha yüksektir.

Yerden ısıtma sistemleri, özellikle yüksek konfor beklentisi ve düşük enerji tüketimi hedefi olan yapılarda oldukça avantajlı bir çözümdür. KNX entegrasyonu, bu sistemlerin doğrudan kontrolünü kolaylaştırarak, zamana ve kullanıcıya göre uyarlanabilen dinamik ısıtma senaryoları oluşturulmasını mümkün kılar.

Yapılan çalışmalarda, KNX kontrollü yerden ısıtma sistemlerinin, manuel kontrollere göre %20 ila %30 oranında daha verimli çalıştığı ve kullanıcıların ısı konfor deneyiminin artırıldığı rapor edilmiştir [16].

Ayrıca dış hava sensörü verileriyle desteklenen KNX sistemleri, ısıtma eğrisini dinamik olarak ayarlayarak ısı kayıplarını minimize edebilir [22].

### 3.5 KNX Termostat Teknolojileri ve Modları

Akıllı bina otomasyonunda termostatlar, yalnızca sıcaklık kontrolü sağlayan basit cihazlar olmaktan çıkmış olup, çok fonksiyonlu, çevresel veriye duyarlı ve senaryo tabanlı çalışan akıllı kontrol birimlerine dönüşmüştür. KNX protokolü ile çalışan modern termostatlar, kullanıcı konforunu artırırken enerji verimliliğini maksimize etmeye yönelik bir dizi gelişmiş özellikle donatılmıştır. Bu bölümde, KNX uyumlu termostat teknolojilerinin yapısı, modları ve bu modların enerji yönetimine katkısı ele alınacaktır.

#### 3.5.1 Teknik yapı ve işlevsellik

KNX protokolüne sahip termostatlar, klasik termostatlardan farklı olarak yalnızca ortam sıcaklığını ölçmekle kalmaz; aynı zamanda sistemle entegre şekilde çeşitli kontrol ve izleme işlevlerini yerine getirir. Bu cihazlar, bina otomasyonunun önemli bir parçası olup, kullanıcı davranışlarını ve dış çevre koşullarını dikkate alarak akıllı kontrol algoritmaları uygulayabilir[15].

Modern KNX termostatlarının başlıca özellikleri:

- Dijital veya dokunmatik ekranlı kullanıcı ara yüzü
- Sıcaklık, nem, CO<sub>2</sub> gibi çoklu parametre sensörleri
- Zamanlayıcı ve senaryo desteği
- Konfor, gece, ekonomi gibi programlanabilir modlar
- Uzaktan erişim ve merkezi yönetim desteği (BMS üzerinden)

KNX tabanlı termostatlar, sadece sıcaklık düzenleyicileri değil, aynı zamanda akıllı bina otomasyon sistemleri kapsamında entegre iklim kontrol düğümleri olarak görev yapmaktadır[16].

#### 3.5.2 Çalışma modları

KNX termostatları, farklı yaşam senaryolarına göre önceden tanımlanmış modlarla çalışabilir. Bu modlar hem konfor seviyesini hem de enerji tüketimini etkili biçimde optimize etmeye olanak tanır. Nitekim, yapılan araştırmalar konfor sıcaklığı aralığının birkaç derece genişletilmesiyle VRF sistemlerinde %10'un üzerinde enerji tasarrufu sağlanabileceğini göstermektedir [23].

**Konfor Modu (Comfort Mode):** Kullanıcının tanımladığı ideal sıcaklık değeri hedef alınır. Genellikle gündüz saatlerinde veya kullanıcı iç mekânda iken aktif olur.

**Ekonomi Modu (Standby/Economy Mode):** Konfor moduna göre birkaç derece daha düşük sıcaklık tanımlıdır. Kullanıcı mekânda değilken veya düşük yoğunluklu kullanım zamanlarında devreye girer. Enerji tüketimini düşürmek için ideal bir senaryodur.

**Gece Modu (Night Mode):** Uyku saatleri için tanımlanan düşük sıcaklık aralığıdır. Konfor ve enerji tasarrufunu birlikte sağlar. Genellikle 2–3°C düşürülmüş set değer kullanılır.

**Donma Koruma Modu (Frost Protection):** Uzun süre kullanılmayan alanlarda, donma riskine karşı minimum sıcaklık sağlar (genellikle 5–7°C). Radyatör veya boru donmalarını önler.

**Tatil Modu (Holiday Mode):** Ev veya ofisin uzun süre kullanılmayacağı durumlarda düşük enerji tüketimi sağlar. Dönüş zamanına göre sistem kendini tekrar konfor moduna alabilir (zamanlayıcı destekli).

### 3.5.3 Uzaktan yönetim ve entegrasyon

KNX termostatlar, ETS yazılımı veya bina yönetim sistemleri (BMS) ile entegre çalışarak:

- Zaman programlarına göre sıcaklık kontrolü,
- Merkezi yönetim sisteminden müdahale,
- Kullanıcının cep telefonu üzerinden ayar yapabilme,
- CO<sub>2</sub>, nem gibi çevresel faktörlere göre otomatik kontrol sağlama gibi yetenekler kazanır.

Bunlara ek olarak, bazı KNX tabanlı termostatlar, sesli komut sistemleri (örneğin Amazon Alexa, Google Assistant, Apple Siri) ya da mobil KNX kontrol panelleri ile de entegre bir biçimde çalışabilmektedir. Bu sayede kullanıcılar, iklimlendirme sistemlerini uzaktan ve daha etkileşimli bir şekilde yönetme olanağına kavuşmaktadır. Bununla birlikte, KNX destekli termostat sistemlerinin uygulanmasında bazı sınırlılıklar da mevcuttur. Bu sınırlılıklar ve açıklamaları

Çizelge 3.5 Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı. ve Çizelge 3.6’da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

**Çizelge 3.5: Termostat Sistemlerinin Özellikleri ve Açıklamaları**

Avantaj	Açıklama
<b>Enerji Tasarrufu</b>	Dinamik mod geçişleri ve zamanlama ile gereksiz enerji tüketimi önlenir.
<b>Konfor Esnekliği</b>	Kullanıcı alışkanlıklarına göre sıcaklık modları belirlenebilir.
<b>Gelişmiş Algılayıcılar</b>	Sıcaklık, nem, CO <sub>2</sub> gibi çoklu ölçümler sayesinde adaptif kontrol sağlanır.
<b>Senaryo Uyumluluğu</b>	KNX genel senaryo modlarıyla entegre çalışabilir (örneğin “eve gel” senaryosu).
<b>Uzaktan Erişim</b>	Merkezi kontrol ve mobil yönetim sayesinde her yerden izleme ve müdahale imkânı sağlar.

**Çizelge 3.6: Termostat Sistemlerinin Sınırlılıkları ve Açıklamaları**

Sınırlılık	Açıklama
<b>İlk Kurulum Maliyeti</b>	KNX tabanlı termostatlar klasik termostatlara göre daha pahalıdır.
<b>Yazılım Gerekliliği</b>	ETS ile programlanması teknik bilgi gerektirir.
<b>Uyumluluk</b>	KNX dışı sistemlerle doğrudan çalışmaz; gateway ihtiyacı olabilir.

KNX protokolüne sahip termostatlar, sadece sıcaklık kontrolü değil; aynı zamanda akıllı enerji yönetiminin merkezinde yer alan sistem bileşenleri olarak değerlendirilmektedir. Literatürde, KNX termostatlar ile gerçekleştirilen mod kontrollü sistemlerin, manuel sistemlere göre %20–25 oranında enerji tasarrufu sağladığı ve kullanıcıların iklim konforunu artırdığına dair veriler yer almaktadır[16].

Ayrıca mod bazlı programlamaların, ısıtma sistemlerinin daha az devreye girip daha uzun süre çalışmasını sağladığı, bu sayede sistem ömrünü de artırdığı gösterilmiştir.

### **3.6 Akıllı Bina Kavramı**

Günümüzde sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluk kavramları, yapı sektörünün dönüşümünde belirleyici faktörler haline gelmiştir. Bu dönüşümün merkezinde ise enerji verimliliğini esas alan ve teknolojiyle entegre çalışan “akıllı bina” konsepti yer almaktadır. KNX gibi açık protokollere sahip bina otomasyon sistemleri, enerji tüketimini optimize ederken kullanıcı alışkanlıklarına uyum sağlayarak çevreci çözümler sunmaktadır. Bu bölümde, enerji verimliliği kavramı,

akıllı binaların temel özellikleri ve KNX sistemleri ile sağlanan katkılar detaylı biçimde ele alınacaktır.

Akıllı bina (smart building) kavramı, yapıların yalnızca fiziksel fonksiyonlarını değil; aynı zamanda enerji yönetimi, kullanıcı etkileşimi ve otomasyon teknolojilerini entegre eden bir yaklaşımı ifade eder. Geleneksel binalar, çoğu zaman pasif sistemler içerirken, akıllı binalar veriye dayalı dinamik kontrol, gerçek zamanlı geri bildirim ve öngörüye dayalı yönetim özellikleriyle öne çıkar[24].

Bu tür yapılar, mimari tasarımdan başlayarak, bina yaşam döngüsünün her aşamasında enerji verimliliğini, kullanıcı konforunu ve güvenliğini esas alır. İçerdiği teknolojiler sayesinde, aydınlatma, HVAC, güvenlik sistemleri, gölgeleme sistemleri, yangın güvenliği, erişim kontrolü, enerji üretimi ve tüketimi gibi birçok unsur tek bir platformda koordine edilebilir. Akıllı Bina Sistemlerinin Temel Özellikleri:

- Sensör destekli karar mekanizmaları (hareket, sıcaklık, ışık, CO<sub>2</sub> vb.)
- Zamanlama ve senaryo tabanlı kontrol
- Gerçek zamanlı veri toplama (saha durum bilgisi) ve uzaktan erişim
- Kestirimci analiz ve enerji modellemesi
- Kullanıcı alışkanlıklarına göre sistem adaptasyonudur.

Bu özellikler, bina operasyonlarını yalnızca verimli değil, aynı zamanda öğrenen ve optimize olan yapılar haline getirir.

KNX, Avrupa'da uygulanan, ISO/IEC 14543 standardına uygun bir bina otomasyon protokolüdür ve akıllı bina sistemlerinin temel iletişim altyapılarından biri olarak öne çıkar. KNX, farklı üreticilere ait cihazların birbirleriyle uyum içinde çalışmasına olanak tanır. Bu yönüyle, birlikte çalışabilirlik (interoperability) kavramının pratiğe dönüşmesinde kilit rol oynar.

Akıllı binalar, KNX ve oBIX gibi otomasyon sistemlerinin anlamsal (semantik) entegrasyonundan fayda sağlayarak, bağlamsal farkındalığa sahip ve enerji verimliliği odaklı kontrol uygulamaları için gerekli olan birlikte çalışabilirlik ve veri alışverişini mümkün kılmaktadır [25]. Örneğin; bir akıllı binada KNX ile aşağıdaki sistemler tam entegre biçimde yönetilebilir:

- Gün ışığına bağlı aydınlatma dimleme sistemleri

- Dış sıcaklığa bağlı iklimlendirme modülasyonu
- Oda doluluğuna göre otomatik klima VRF ve yerden ısıtma kontrolü
- Gölgeleme (perde/jaluzi) sistemlerinin güneş açısına göre pozisyonlanması
- Tatil/senaryo modları ile enerji optimizasyonu

Akıllı binaların esas motivasyonu, yalnızca yüksek teknolojiye sahip olmak değil; aynı zamanda kaynak kullanımını minimize etmek, karbon salınımını düşürmek ve işletme giderlerini azaltmaktır. Bunun başarılabilmesi için KNX gibi açık protokollerin kullanılması gereklidir. Çünkü kapalı sistemler uzun vadede sistem entegrasyonuna engel olabilir[2].

Jung ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda, KNX protokolü ile donatılmış yapılarda kullanılan semantik modelleme sayesinde sistemlerin enerji talebini önceden tahmin edebildiği ve reaktif değil proaktif davrandığı gösterilmiştir[2].

Akıllı binalar yalnızca enerji tasarrufu değil, aynı zamanda kullanıcı memnuniyeti, bina ömrünün uzaması ve sistem yönetimi kolaylığı açısından da yüksek potansiyele sahiptir[24].

### **3.7 KNX Sistemleri ile Enerji Verimliliği**

Akıllı binaların başarısı büyük ölçüde enerji kaynaklarının etkin ve sürdürülebilir bir biçimde kullanılmasına bağlıdır. Bu noktada, KNX otomasyon protokolü; sensör tabanlı kontrol mekanizmaları, zamanlama senaryoları ve merkezi yönetim özellikleriyle enerji verimliliğini artıran güçlü bir altyapı sunar. Bu bölümde, KNX sistemlerinin enerji tasarrufuna katkısı; aydınlatma, HVAC ve gölgeleme gibi farklı bina bileşenleri üzerinden değerlendirilerek sistemin bütünsel etkisi ortaya konulacaktır.

#### **3.7.1 Enerji verimliliği kavramı ve binalardaki yeri**

Enerji verimliliği; bir hizmetin veya ürünün daha az enerji kullanılarak üretilmesi ya da gerçekleştirilmesidir. Binalarda enerji verimliliği, özellikle ısıtma-soğutma (HVAC), aydınlatma ve cihaz kullanımı gibi temel tüketim alanlarında enerji kayıplarının azaltılmasına odaklanır.

Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, binalar toplam küresel enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını, karbon salınımının ise %30'unu oluşturmaktadır (IEA, 2022). Bu nedenle bina bazlı enerji yönetimi, hem ekonomik hem çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir.

### **3.7.2 KNX sistemlerinin enerji yönetimindeki rolü**

KNX protokolü, dağıtık yapısı ve açık standartlara dayalı yapısıyla enerji verimliliği odaklı bina otomasyonuna olanak tanır. Bu protokol aracılığıyla aşağıdaki işlevler sağlanabilir.

Hareket sensörleri, kullanıcı olmadığı durumda ışıkları ve HVAC sistemlerini kapatır. Hareket algılama ve oda doluluğu takibi ile yapılan KNX senaryo kontrolleri sayesinde, kullanıcı varlığına bağlı cihaz yönetimi enerji israfını önemli ölçüde azaltabilmektedir[26].

Işık sensörleri, gün ışığına göre aydınlatmayı otomatik olarak ayarlar. Yapılan çalışmalar, otomasyon destekli aydınlatma sistemlerinin özellikle gün ışığına duyarlı dimleme senaryolarında %30'a varan enerji tasarrufu sağladığını göstermektedir[27].

Sıcaklık ve CO<sub>2</sub> sensörleri, iç mekân koşullarını izleyerek HVAC sistemlerinin enerji verimli ve konfor odaklı biçimde çalışmasını sağlar. CO<sub>2</sub> seviyeleri, insan varlığı ve hava kalitesi belirlenerek, havalandırma gereksinimleri dinamik şekilde ayarlanabilir.

Belirli saatlerde aydınlatma ve iklimlendirme sistemleri otomatik olarak devreye girip kapanır. Ofislerde çalışma saatlerine özel HVAC ayarları yapılabilir. Tatil modu, gece modu, pencere açıldığında cihaz kapatma gibi bileşik kontrol senaryoları oluşturulabilir.

KNX sistemleri, bina sistemlerinin merkezi olmayan ve sensör tabanlı kontrolünü mümkün kılarak enerji tasarrufuna katkı sağlar; bu sayede enerji kullanımını gerçek zamanlı olarak duruma uyarlanabilir şekilde optimize edilmektedir[16].

KNX ile entegre edilen sistemler, geleneksel kontrol yöntemlerine kıyasla daha yüksek enerji verimliliği sağlamaktadır. Özellikle sensör tabanlı ve duruma duyarlı kontrol mekanizmaları sayesinde, enerji kullanımını optimize edilmektedir. Bu

fark, Çizelge 3.7’de geleneksel sistemlerle KNX sistemlerinin enerji tasarrufu performanslarının karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir.

**Çizelge 3.7: Geleneksel Sistemlerle Karşılaştırıldığında KNX Kontrolünün Enerji Tasarrufuna Katkısı**

<b>Sistem</b>	<b>Geleneksel Kontrol</b>	<b>KNX ile Kontrol</b>	<b>Enerji Tasarrufu</b>
Aydınlatma	Manuel anahtar	Gün ışığı ve hareket sensörlü dimleme	%25–35
HVAC	Standart termostat	Akıllı modülasyon + zamanlama	%20–30
Jaluzi & Perde	Manuel	Güneş açısına göre otomatik pozisyonlama	%15
Kombi & Kazan	Aç/Kapa kontrol	Sıcaklık eğrisi + dış hava sensörü ile modülasyon	%15–20

KNX sistemleri ile bina içindeki cihazların merkezi ve dağıtık biçimde kontrolü, enerji israfını önleyen akıllı yapılar oluşturulmasına katkı sağlar. Özellikle HVAC sistemleri üzerinde yapılan entegrasyonlar, kullanıcı davranışına ve çevresel koşullara göre dinamik ayarlama yapılmasına imkân tanır.

BIM (Building Information Modeling) ve IoT altyapısıyla entegre çalışan KNX gibi sistemler, enerji yönetiminde tepkiye dayalı kontrol yerine bağlamsal farkındalık ve ileri seviye öngörüye dayalı uygulamaları mümkün kılar. Jung ve arkadaşları [2], bu tür sistem entegrasyonlarının servis odaklı mimari üzerinden akıllı şehirler ve bina otomasyonu arasında köprü kurduğunu vurgulamaktadır.

### **3.8 Sürdürülebilirlik ve Karbon Ayak İzi**

Enerji verimliliği kavramı, sadece ekonomik fayda sağlamakla kalmaz; aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılması açısından da büyük bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda geliştirilen bina otomasyon sistemleri, hem doğal kaynakların korunmasına katkı sağlar, hem de karbon salınımının düşürülmesinde etkin rol oynar. KNX protokolü gibi açık, esnek ve üreticiden bağımsız sistemler, enerji tüketiminin optimize edilmesini sağlayarak hem işletme giderlerini düşürmekte hem de sürdürülebilir bina çözümlerine altyapı oluşturmaktadır[28]. Güncel araştırmalar, bina otomasyon sistemlerinin yalnızca enerji tasarrufu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda iç ortam kalitesi, kullanıcı sağlığı ve operasyonel performans üzerinde de bütüncül etkiler yarattığını ortaya koymaktadır [29]. Bu bölümde, KNX sistemlerinin sürdürülebilir yapılaşma

üzerindeki etkisi, karbon ayak izi azalmasına olan katkısı ve yeşil bina standartları ile olan uyumu değerlendirilecektir.

Sürdürülebilirlik, mevcut ihtiyaçların gelecek nesillerin gereksinimlerini tehlikeye atmadan karşılanmasıdır. Bu kavram, enerji kullanımı ve çevresel etki bağlamında kaynakların verimli kullanımı, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu ve karbon salınımının azaltılması gibi hedefleri kapsar.

Binalar, enerji tüketiminde en büyük paya sahip sektörlerden biridir. Küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %30'u bina operasyonlarından kaynaklanmaktadır (IEA, 2022). Bu nedenle bina bazlı sürdürülebilirlik uygulamaları, iklim kriziyle mücadelede öncelikli alanlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

KNX bina otomasyon sistemleri, enerji yönetimini yalnızca ekonomik bir unsur olarak değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğin bir parçası olarak ele alır. KNX ile çalışan binalar, aşağıdaki yollarla karbon ayak izini azaltma potansiyeline sahiptir.

KNX tabanlı otomasyon sistemleri, enerji tüketimini azaltarak dolaylı karbon salınımının düşürülmesine katkı sağlar. Entegre sensörler sayesinde, gereksiz cihaz çalışmaları önlenir ve yalnızca ihtiyaç anında enerji kullanımı sağlanır. Ayrıca zamanlama ve senaryo tabanlı kontrol mekanizmaları aracılığıyla yük yönetimi gerçekleştirilerek talep tarafı dengelemesini mümkün hâle getirir. KNX sistemleri, fotovoltaik paneller veya ısı pompaları gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla da uyumlu çalışabilmekte ve bu sayede sürdürülebilir bina işletimi desteklenmektedir. Geri bildirim temelli adaptif kontrol yapıları ise, anlık tüketim verilerine göre sistem davranışını ayarlayarak gereksiz enerji kullanımını önlemektedir.

KNX tabanlı binalar, gereksiz ısıtma ve aydınlatmayı azaltarak karbon salınımının düşürülmesine katkı sağlamakta ve akıllı şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemektedir [30].

### **3.8.1 Karbon ayak izi azaltılmasına ilişkin katkı örnekleri**

Karbon ayak izi, bir yapının, sistemin veya bireyin doğrudan ya da dolaylı olarak atmosfere saldığı sera gazı miktarını ifade eder. Bina otomasyon sistemleri, özellikle KNX gibi açık ve esnek protokoller kullanılarak entegre edildiğinde, bu emisyonların önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlar. Bu başlık altında, KNX

tabanlı çözümlerle karbon salımının azaltılabileceği uygulama alanları örneklerle ele alınacak ve sistemlerin çevresel etkileri somut biçimde ortaya konacaktır.

KNX sistemine entegre edilmiş VRF veya kazan sistemleri, yalnızca ortam sıcaklığına değil; dış hava, hareket ve pencere sensörlerine göre de çalışarak enerji tüketimini %20-30 azaltabilir. Bu da yıllık karbon salımında ciddi bir düşüş sağlar[31].

Gün ışığı sensörü ve varlık algılama modülleriyle, ofis aydınlatmasında %30–50 arasında enerji tasarrufu sağlanarak karbon salımı önemli ölçüde azaltılabilir.

KNX destekli jaluzi kontrolü, güneş ısısının içeri girmesini engelleyerek yaz aylarında soğutma ihtiyacını azaltır. Bu da HVAC sistemlerinin daha az çalışmasını sağlar.

### **3.8.2 Yeşil bina sertifikaları ile uyumluluk**

KNX sistemleri, sürdürülebilirlik temelli LEED, BREEAM, WELL gibi yeşil bina sertifikalarının puanlama kriterleriyle de örtüşür. Bu sistemler:

- Enerji & Atmosfer
- İç Mekân Kalitesi
- Akıllı Kontrol Sistemleri
- Talep Yönetimi gibi başlıklarda olumlu katkı sağlar.

Örneğin LEED v4.1 sisteminde “Advanced Energy Metering” ve “Thermal Comfort Control” puanları, KNX sistemleri ile entegre çözümler sayesinde kolayca karşılanabilmektedir.

### **3.9 KNX ile Akıllı Kontrol Senaryoları**

KNX otomasyon sistemlerinin en güçlü yönlerinden biri, kullanıcı davranışlarına, çevresel koşullara ve zamana duyarlı olarak şekillendirilebilen dinamik kontrol senaryolarını desteklemesidir. Bu senaryolar, enerji tasarrufu sağlamanın ötesinde; konfor, güvenlik ve kullanım kolaylığı açısından da önemli avantajlar sunar. Bu bölümde, akıllı bina ortamlarında yaygın olarak kullanılan senaryo türleri, KNX ile uygulanabilirliği ve senaryo mantığının enerji verimliliği üzerindeki etkisi örneklerle açıklanacaktır.

Akıllı kontrol senaryoları, bir binadaki çevresel koşullara (ışık, sıcaklık, nem, hareket vb.), kullanıcı davranışına ve zamana bağlı olarak otomatik olarak devreye giren, enerji tüketimini ve konfor seviyesini dengeleyen programlı eylem kümeleridir. KNX sistemi bu senaryoları hem ETS yazılımı üzerinden programlamaya hem de gerçek zamanlı olarak farklı veri kaynaklarıyla yönetmeye imkân tanır. Bu senaryolar; konut, ticari ofis, hastane ve otel gibi yapılarda hem enerji tasarrufu sağlar hem de kullanıcıların günlük rutinlerine konfor katar.

KNX tabanlı otomasyon sistemleri, farklı yapı türlerine uyarlanabilen esnek senaryo yapılarına sahiptir. Bu senaryolar; konutlar, ticari ofisler, hastaneler ve oteller gibi yapılarda hem enerji tasarrufu sağlamakta hem de kullanıcı konforunu artırmaktadır. Aydınlatma, HVAC, perde/gölgeleme kontrolü ve erişim sistemleri gibi bileşenlerin entegre çalıştığı bu senaryolar, kullanıcıların günlük rutinlerine göre otomatikleşmiş süreçler sunar. Çizelge 3.8’de, KNX ile uygulanabilen temel otomasyon senaryoları ve her birinin tahmini enerji tasarrufu potansiyelleri detaylı şekilde sunulmaktadır.

**Çizelge 3.8: KNX Tabanlı Otomasyon Senaryoları ve Tahmini Enerji Tasarrufu Potansiyelleri**

Senaryo Adı	Açıklama	Enerji Tasarrufu Potansiyeli
<b>Gün Işığı Dengeleme</b>	Işık sensörüyle doğal ışık yeterliyse yapay ışık %50 azaltılır.	%25–40
<b>Oda Boşken Cihaz Kapatma</b>	5 dakikadır hareket algılanmayan odada aydınlatma ve HVAC devre dışı kalır.	%10–15
<b>Pencere Açıldığında HVAC Kapatma</b>	Açık pencere algılandığında kombi veya klima kapatılır.	%8–12
<b>Gece Modu Otomasyonu</b>	Belirli saatlerde sistem düşük sıcaklık ve loş ışık moduna geçer.	%5–10
<b>Tatildeyim Senaryosu</b>	Tüm sistemler asgari çalışmaya alınır, güvenlik devrede kalır.	%15–20
<b>Isı Zonlama</b>	Her odaya özel sıcaklık kontrolü yapılır, ortak alanlar optimize edilir.	%12–20
<b>Dış Hava Sıcaklığına Göre Ayar</b>	Kombi/VRF çıkış gücü dış sıcaklıkla orantılı ayarlanır.	%10–25
<b>Güneş Takipli Gölgeleme</b>	Jaluzi açısı güneşin pozisyonuna göre otomatik değişir.	%10 (soğutma yükünden)

KNX aracılığıyla senaryo tabanlı enerji kontrolü, akıllı binalarda işletme verimliliğine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Kullanıcı alışkanlıklarına, zaman dilimlerine veya çevresel koşullara göre önceden tanımlanmış senaryolar sayesinde,

enerji kaynakları daha etkin bir şekilde yönetilmekte ve gereksiz tüketim en aza indirilmektedir[16].

KNX sisteminde senaryolar; mantık modülleri, zamanlayıcılar ve sensör-veri akışıyla yönetilir. Bu amaçla kullanılan bazı bileşenler aşağıda belirtilmektedir.

- **KNX Logic Module** – IF/THEN yapılarıyla koşullu senaryo tanımı
- **KNX Presence Detector** – Alan kullanımına göre enerji ayarlaması
- **KNX Weather Station** – Rüzgar, güneş ve dış sıcaklık bilgisiyle entegre kontrol
- **Multifunction Touch Panel** – Kullanıcı kontrollü senaryo çağırma

Bu tür çok bileşenli senaryo kontrolünde, farklı politikaların çakışmasını önleyecek mantıksal yapıların dikkatle tasarlanması gerektiği, KNX sistemleriyle yapılan deneysel çalışmalarda açıkça ortaya konmuştur[32]. Bu kombinasyonlarla bir bina tamamen otonom ve enerji-adaptif hale getirilebilir.

### 3.10 Akademik Modeller ve Test Edilmiş Sistemler

KNX otomasyon sistemlerinin enerji verimliliği, entegrasyon yeteneği ve sürdürülebilirlik katkısı yalnızca teorik düzeyde değil; aynı zamanda akademik çalışmalar ve saha uygulamalarıyla da desteklenmektedir. Farklı senaryo kurguları, kontrol algoritmaları ve entegrasyon stratejileri üzerine yapılan deneysel ve simülasyon tabanlı araştırmalar, KNX sistemlerinin performansını somut verilerle ortaya koymaktadır.

KNX otomasyon sistemlerinin bina enerji performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için hem simülasyon ortamlarında hem de gerçek uygulama senaryolarında çok sayıda akademik model geliştirilmiştir. Bu çalışmalar, yalnızca enerji tüketimi değil aynı zamanda kullanıcı konforu, senaryo yönetimi ve davranışsal etkiyi de incelemektedir.

## 4. UYGULAMA ÖRNEĞİ: ÖRNEK BİR YAPIDA KNX SİSTEM TASARIMI

Bu tez çalışmasının önceki bölümlerinde, KNX protokolünün mimarisi, HVAC sistemleriyle entegrasyonu ve enerji verimliliği üzerindeki etkileri detaylı biçimde ele alınmıştır. Bu bölümde ise, kuramsal bilgilerden yola çıkılarak gerçek bir yapı üzerinden KNX sistem tasarımı yapılacaktır. Hazırlanan uygulama senaryosu ile hem teorik altyapının uygulanabilirliği test edilecek hem de KNX ile donatılmış bir binanın işlevselliği bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilecektir.

### 4.1 Bina Tanımı ve Kullanım Senaryosu

KNX sistem tasarımı yapılacak olan yapının fiziksel ve işlevsel özellikleri, uygulanacak otomasyon altyapısının gereksinimlerini belirleyecek temel faktörlerdendir. Bu başlık altında, örnek bir bina senaryosu tanımlanacak; bina tipi, kullanıcı profili, enerji tüketim alışkanlıkları ve otomasyon ihtiyaçları gibi parametreler netleştirilecektir. Böylece, sistem tasarımları bu senaryo çerçevesinde anlam kazanacaktır.

Proje kapsamında değerlendirilen yapı, akıllı konut uygulamaları kapsamında ele alınan müstakil bir villa tipidir. Akıllı konut sistemleri, konfor, güvenlik ve enerji verimliliğini bir arada sunmayı amaçlayan, KNX gibi açık protokol sistemleri ile donatılmış yaşam alanlarıdır.

- **Bina Tipi:** Müstakil villa (akıllı ev konsepti)
- **Kat Sayısı:** 3 kat (bodrum+ zemin + birinci kat)
- **Toplam Kapalı Alan:** 300 m<sup>2</sup>
  - Bodrum Kat: Teknik odalar, yardımcı odası ve misafir odası
  - Zemin Kat: Giriş holü, salon, mutfak, banyo, ofis odası
  - Üst Kat: 3 yatak odası, 2 banyo, balkon
- **Açık Alanlar:** Teras, arka bahçe, araç otoparkı

- **Yapım Malzemesi:** Betonarme karkas, yalıtımlı dış cephe
- **İç Donanım:** Modern iklimlendirme cihazları, LED aydınlatma altyapısı, motorlu perdeler yer almaktadır.

Bu yapı, hibrit bir enerji altyapısına sahiptir. Ana enerji kaynağı elektrik şebekesi olmakla birlikte, çatı üzeri PV (fotovoltaik) panel sistemi ile desteklenmektedir.

- **Elektrik Şebekesi:** Ana enerji kaynağı (220V, 50Hz)
- **PV Panel:** 8 kWp gücünde sistem
- **Enerji Yönetimi:** KNX ile izlenebilir, kontrol edilebilir sayaç sistemleri
- **Isıtma/Soğutma:** Kombi destekli yerden ısıtma, split klimalar (inverter)
- **Sıcak Su:** Kombi + güneş enerjisi kolektörü (mevsimsel destekli)



Şekil 4.1: GES Panosu ve İnverter



Şekil 4.2: GES Panelleri

KNX sistemi, tüketim profiline göre PV üretimi ile şebeke bağlantılı enerjinin dengelenmesini sağlayacak otomasyon yapılarına açıktır.

Yapı, bir aile konutu olarak planlanmıştır. Kullanıcı ihtiyaçları yalnızca konfor değil; aynı zamanda enerji farkındalığı, güvenlik ve esneklik üzerine odaklanmaktadır. Kullanım senaryosu, aşağıdaki işlevsel gereksinimleri içermektedir.

KNX tabanlı bina otomasyon sistemleri, konutlarda konfor, enerji verimliliği ve güvenliği artırmak amacıyla birçok alt sistemi entegre şekilde yönetebilmektedir. Bu kapsamda aydınlatma sistemleri, yaşam alanlarının kullanım senaryolarına uygun olarak tasarlanmış ve enerji tasarrufu sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Salon, mutfak ve yatak odalarında dim edilebilir LED spotlar, avizeler ve aplikler aracılığıyla aydınlık düzeyi istenilen seviyede ayarlanabilirken, banyo ve antre gibi geçiş alanlarında hareket sensörleri ile otomatik kontrol sağlanmaktadır. Ayrıca, dış mekân bahçe aydınlatmaları zamanlayıcılar aracılığıyla programlanarak hem güvenlik hem de estetik amaçlarla yönetilmektedir.

İklimlendirme sistemleri de oda bazlı konfor ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde kontrol edilmektedir. Yerden ısıtma sistemleri ve VRF (Variable Refrigerant Flow) sistemleri, akıllı termostatlar aracılığıyla merkezi olarak veya bireysel düzeyde yönetilebilir. Pencere algılayıcıları yardımıyla pencere açıkken HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sisteminin devre dışı bırakılması senaryosu uygulanarak gereksiz enerji tüketiminin önüne geçilmektedir. Ayrıca kullanıcı alışkanlıklarına göre tanımlanmış konfor, ekonomi ve gece modları, günlük zaman programlarına entegre şekilde otomatik olarak çalışmaktadır.

Gölgeleme sistemleri kapsamında, güneş ışığına bağlı olarak otomatik jaluzi konumlandırması yapılmakta ve dış mekânda bulunan tenteler, rüzgâr ve ışık şiddetine göre sensör destekli kontrol mekanizmaları ile çalıştırılmaktadır. Bu sayede hem iç mekân sıcaklığı düzenlenmekte hem de yapının enerji tüketimi optimize edilmektedir.

Güvenlik bileşenleri açısından, kapı ve pencere manyetik kontakları ile fiziksel erişim noktaları izlenmekte; hareket dedektörleri, sirenler ve IP tabanlı kamera sistemleri ile bina içi ve çevresel güvenlik sağlanmaktadır. Kamera

sistemleri, akıllı görüntü işleme teknolojileriyle desteklenerek uzaktan erişim imkânı sunmaktadır.

Enerji izleme modülü ile ana elektrik hattı, güneş enerjisi (PV) üretimi ve seçilmiş prizlerin enerji tüketimi sürekli olarak ölçülmekte; kullanıcıya hem anlık hem de geçmişe dönük veri analizleri sunan ekran arayüzleri aracılığıyla şeffaf bir izleme imkânı sağlanmaktadır. Aşırı enerji tüketimi tespit edildiğinde, kullanıcıya uyarı gönderen senaryolar devreye alınarak enerji yönetimi daha etkin hâle getirilmektedir.

Tüm bu alt sistemlerin yönetimi, kullanıcı alışkanlıklarına göre tanımlanmış yaşam senaryoları ile desteklenmektedir. “Eve Giriş”, “Gece Modu”, “Tatil” veya “Çocuk Odası Uyku” gibi senaryolar hem manuel olarak (örneğin duvar panelleri üzerinden) çağrılabilen hem de zamanlayıcılar veya hareket sensörleri aracılığıyla otomatik olarak tetiklenebilmektedir. Bu bütüncül senaryo yönetimi, KNX sistemlerinin hem kullanıcı konforunu artıran hem de enerji verimliliğini destekleyen güçlü yapısını ortaya koymaktadır.

KNX otomasyonu ile güçlendirilen bu tür bir yapı, kullanıcı odaklı konforu, gömülü zekâyı ve sürdürülebilir performansı tek bir entegre sistem içerisinde bir araya getirmektedir. Bu yapılar, kullanıcıların bireysel ihtiyaç ve tercihlerine göre optimize edilen çevresel koşullar sunarken, enerji verimliliği ve kaynak yönetimini de en üst düzeye çıkarmayı hedefler. Gelişmiş sensörler ve kontrol sistemleri aracılığıyla bina; aydınlatma, ısıtma, soğutma ve güvenlik gibi teknik altyapı bileşenlerini otomatik olarak yönetir. Böylece hem kullanıcı deneyimi artırılır hem de uzun vadeli çevresel sürdürülebilirlik sağlanır. KNX protokolünün sunduğu esneklik ve birlikte çalışabilirlik sayesinde, farklı üreticilere ait cihazlar entegre bir şekilde çalışabilir ve bina otomasyon sistemleri daha verimli hâle getirilmesi planlanmıştır.[33]

KNX sisteminin tercih edilme nedenleri, sunduğu teknik avantajlar ve esnek altyapı olanakları ile doğrudan ilişkilidir. Öncelikle, KNX protokolü marka bağımsız bir yapıya sahiptir; bu sayede farklı üreticilere ait cihazlar birbiriyle uyumlu şekilde çalışabilir ve sistemler arası entegrasyon kolaylıkla sağlanabilir. Modüler sistem mimarisi sayesinde, mevcut yapılara sonradan yeni cihazlar eklenebilmekte veya mevcut bileşenler güncellenerek sistemin sürdürülebilirliği artırılmaktadır.

Aydınlatma, HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) ve güvenlik gibi temel bina sistemleri arasında senkronize kontrol imkânı sunarak bütüncül bir otomasyon deneyimi sağlar. Ayrıca, mobil cihazlar üzerinden sağlanan uzaktan erişim sayesinde sistemin her an izlenmesi ve yönetilmesi mümkün hâle gelir. Enerji verimliliği açısından da önemli katkılar sunan KNX, sensör tabanlı ve senaryoya dayalı kontrol mekanizmaları ile gereksiz enerji tüketiminin önüne geçer. Tüm bu özellikleriyle birlikte KNX, LEED ve BREEAM gibi yeşil bina sertifikasyon sistemlerinin gerekliliklerini karşılamada da etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır.

## **4.2 KNX ile Entegre Edilecek Sistemler**

Akıllı bina senaryosunda, KNX protokolüyle entegre edilecek sistemler çok katmanlı ve birbirine bağlı olarak yapılandırılır. Bu sistemler, konfor, güvenlik, enerji verimliliği ve otomatik kontrol amacıyla hem bireysel hem de merkezi şekilde yönetilebilir.

### **4.2.1 Aydınlatma sistemi**

KNX tabanlı bina otomasyon sistemlerinde kullanılan donanım bileşenleri, sistemin işlevselliği ve enerji verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Aydınlatma kontrolünde tercih edilen 4 veya 6 kanallı Universal KNX dim aktüatörleri, farklı alanlardaki aydınlatma gruplarının bağımsız olarak dim edilmesine olanak tanımakta ve enerji tasarrufu sağlayacak şekilde ışık seviyelerinin hassas biçimde ayarlanmasını mümkün kılmaktadır. Sistem, çevresel değişkenlere duyarlı hale getirilmek amacıyla KNX uyumlu ışık sensörleri ve KNX protokolüne entegre hareket dedektörleri ile desteklenmektedir. Bu sensörler sayesinde ortamdaki doğal ışık miktarı ve insan hareketliliği algılanarak aydınlatma otomatik olarak optimize edilebilmektedir. Kullanıcı ara yüzü açısından ise sistem, hem sahada konumlandırılmış duvar tipi KNX anahtar panelleri hem de merkezi zamanlayıcılar ile yönetilmekte; bunun yanı sıra mobil uygulamalar aracılığıyla uzaktan erişim ve kontrol imkânı sunulmaktadır. Bu çok katmanlı kontrol mimarisi, hem kullanıcı konforunu artırmakta hem de sistemin sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır.

#### 4.2.2 Isıtma/soğutma ve HVAC sistemleri

Oda bazlı iklimlendirme çözümleriyle bireysel konfor koşullarını sağlarken, aynı zamanda enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak amaçlanmaktadır. KNX tabanlı iklimlendirme sistemlerinde, hem bireysel konforun sağlanması hem de enerji verimliliğinin artırılması amacıyla gelişmiş kontrol bileşenleri kullanılmaktadır. Oda bazlı sıcaklık yönetimi için tercih edilen KNX ekranlı termostatlar, yalnızca sıcaklık kontrolü sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda nem ve CO<sub>2</sub> düzeylerini ölçerek iç mekân hava kalitesini de optimize etmeye yönelik veri üretmektedir. Yerden ısıtma sistemleri için kullanılan 230V veya 24V KNX selenoid valf aktüatörleri, motorlu vana üzerindeki akışı hassas biçimde kontrol ederek, hem enerji tasarrufu hem de konforlu ısıl denge sağlamaktadır. Merkezi ısıtma sistemlerinin entegrasyonu ise röleli çıkışlar aracılığıyla doğrudan ya da Modbus protokolü üzerinden bir gateway kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Benzer şekilde, split klima üniteleri de VRF gateway ya da Modbus haberleşme protokolleri aracılığıyla KNX sistemine entegre edilmekte; böylece tüm iklimlendirme bileşenleri merkezi bir otomasyon çatısı altında senkronize şekilde yönetilebilmektedir.

KNX tabanlı iklimlendirme otomasyon sistemleri, hem kullanıcı konforunu artırmayı hem de enerji yönetimini optimize etmeyi amaçlayan gelişmiş kontrol senaryoları ile donatılmaktadır. Bu kapsamda, her bir odada kullanıcıya özel sıcaklık set değerlerinin tanımlanabilmesi, bireysel konfor beklentilerinin karşılanmasına olanak tanıırken, enerji tüketiminin oda bazlı yönetimi sayesinde genel sistem verimliliği de artırılmaktadır. Sisteme entegre pencere sensörleri aracılığıyla, pencere açıkken ısıtma veya soğutma fonksiyonlarının otomatik olarak devre dışı bırakılması sağlanmakta; böylece gereksiz enerji kayıplarının önüne geçilmektedir. Bununla birlikte, kombi kontrolü dış hava sıcaklığına göre modüle edilerek, yalnızca ihtiyaç duyulan düzeyde ısıtma sağlanmakta ve sistem yükü dengelenmektedir. Ayrıca, uzun süreli evde bulunulmayan durumlar için tasarlanan “Tatildeyim” modu sayesinde, iç mekân sıcaklığı minimum seviyede tutulmakta ve donma riskine karşı koruyucu bir eşik değeri sürdürülerek hem kullanıcı güvenliği hem de tesisatın sürdürülebilirliği sağlanmaktadır. Bu tür senaryo tabanlı uygulamalar, akıllı iklimlendirme sistemlerinin hem konfor hem de enerji tasarrufu açısından etkili bir şekilde çalışmasını mümkün kılmaktadır.

#### 4.2.3 Gölgeleme sistemleri (perde/panjur/jaluzi/tente)

Akıllı bina otomasyon sistemlerinde gölgeleme kontrolü, hem iç mekân konforunun artırılması hem de enerji verimliliğinin sağlanması açısından önemli bir bileşendir. Güneş ışığından maksimum düzeyde yararlanırken aynı zamanda mahremiyetin korunması, modern yaşam alanlarında öncelikli tasarım kriterlerinden biri hâline gelmiştir. Bu bağlamda, KNX tabanlı otomasyon sistemleriyle entegre çalışan otomatik jaluzi ve perde sistemleri, gün içerisindeki güneş hareketine ve ışık yoğunluğuna göre dinamik olarak konumlandırılabilen, böylece iç mekâna giren doğal ışık miktarı optimize edilmektedir. Aynı zamanda iç mekân sıcaklığı da bu sistemler aracılığıyla pasif olarak düzenlenmekte; özellikle soğutma ve ısıtma yüklerinin azaltılması yoluyla enerji tüketimi düşürülmektedir. Bu çift yönlü kontrol yaklaşımı, doğal aydınlatma ile mahremiyet arasında denge kurarken, yapının termal konforunu da sürdürülebilir biçimde yönetmeyi mümkün kılmaktadır.

KNX tabanlı otomasyon sistemlerinde gölgeleme uygulamaları, gelişmiş aktüatör, sensör ve zamanlayıcı bileşenleri aracılığıyla entegre ve akıllı bir şekilde yönetilmektedir. Bu kapsamda, jaluzi sistemlerinin kontrolü KNX jaluzi kontrol modülleri ile sağlanmakta; bu modüller sayesinde lamel açıları ve pozisyonları hassas bir biçimde ayarlanabilmektedir. Gölgeleme kontrolünün çevresel koşullara duyarlılığını artırmak amacıyla sisteme entegre edilen dış hava istasyonları, güneşin yönünü ve ışık şiddetini ölçerek jaluzi hareketlerini optimize ederken, rüzgâr sensörleri ise olumsuz hava koşullarında sistemin kendini korumaya almasını sağlamaktadır. Buna ek olarak, günün saatine bağlı olarak programlanan zamanlayıcılar sayesinde jaluziler, doğal ışık akışına uyumlu şekilde otomatik olarak konumlandırılmakta ve iç mekânda dengeli bir aydınlatma ile termal konfor sağlanmaktadır. Bu çok katmanlı kontrol yapısı, yalnızca kullanıcı konforunu artırmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji verimliliği ve bina zarfı güvenliği açısından da önemli katkılar sunmaktadır.

KNX tabanlı gölgeleme sistemleri, senaryo ve çevresel veriye dayalı kontrol mekanizmaları sayesinde kullanıcı konforunu ve enerji verimliliğini eş zamanlı olarak desteklemektedir. Örneğin, sabah saatlerinde jaluzilerin otomatik olarak açılmasıyla doğal ışık iç mekâna alınmakta, öğle vakti ise güneşin konumuna göre lamel pozisyonları optimize edilerek aşırı ısınma engellenmektedir. Rüzgâr sensörleri aracılığıyla rüzgâr hızının belirli bir eşiği aşması durumunda dış mekan tenteleri

otomatik olarak kapatılarak sistem bileşenlerinin güvenliği sağlanmaktadır. Ayrıca, “Sinema Modu” gibi yaşam senaryoları ile tüm perdeler eşzamanlı olarak kapatılabilmekte, böylece hem görsel konfor hem de mahremiyet ihtiyaçları karşılanmaktadır.

#### **4.2.4 Güvenlik ve erişim kontrolü**

Akıllı bina otomasyon sistemlerinde güvenlik, hem bina içi yaşam alanlarının hem de bina çevresinin sürekli ve etkin şekilde izlenmesini kapsayan bütüncül bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Bu kapsamda, hareket algılayıcılar, manyetik kontaklar, cam kırılma dedektörleri ve IP tabanlı kameralar gibi çeşitli algılama bileşenleri, olası ihlal ve tehlike durumlarını anlık olarak tespit edebilmektedir. Elde edilen veriler doğrultusunda, sistem otomatik olarak sirenleri devreye sokmakta, kullanıcıya uyarı bildirimleri göndermekte veya önceden tanımlı senaryoları aktif hâle getirmektedir. Özellikle bina çevresinde oluşabilecek yetkisiz girişler, ani hareketlilikler ya da acil durumlar, entegre güvenlik protokolleri sayesinde erken aşamada fark edilerek müdahale süresi minimize edilmektedir. Bu yapı, hem kullanıcı güvenliğini artırmakta hem de bina sistemlerinin fiziksel bütünlüğünü koruyarak akıllı yaşam alanlarının sürdürülebilirliğine katkı sunmaktadır.

Akıllı güvenlik sistemlerinin temel bileşenleri arasında sensörler, aktüatörler ve bağlantı modülleri yer almaktadır. Bu bağlamda, pencere ve kapılara yerleştirilen manyetik kontaklar ile PIR (Pasif Kızılötesi) hareket sensörleri, çevresel değişiklikleri algılayarak sistemin tehdit unsurlarına karşı tepki vermesini sağlar. Bu sensörlerden gelen veriler, sistemin bir diğer bileşeni olan aktüatörlere iletilir. Örneğin, bir hareket algılandığında veya kapı-pencere kontağı tetiklendiğinde, siren kontrol modülü devreye girerek sesli uyarı verir. Ayrıca, mobil bildirim servisleri aracılığıyla kullanıcıya gerçek zamanlı bildirim gönderilerek uzaktan müdahale imkânı sunulur. Bu yapı, hem fiziksel güvenliğini artırır hem de kullanıcıya sürekli erişilebilirlik sağlar. Kapı açıkken alarmın tetiklenmesi, hareket algılanmadığında sistemin otomatik olarak "bekleme" moduna alınması ve uzaktan alarm durumunun bildirilip sistemin devre dışı bırakılabilmesi sağlanmaktadır.

#### **4.2.5 Enerji izleme ve yönetim**

Enerji izleme ve yönetimi sistemleri, sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sistemler, anlık enerji tüketim ve üretim verilerinin

izlenmesini sağlayarak kullanıcıya kapsamlı bir enerji profili sunar. Toplanan veriler doğrultusunda, gereksiz veya aşırı enerji tüketen yükler otomatik olarak tespit edilip devre dışı bırakılabilir. Bu sayede hem enerji israfı önlenir hem de sistem performansı optimize edilir. Ayrıca, enerji kullanım alışkanlıklarının analiziyle geleceğe yönelik daha verimli enerji yönetimi stratejileri geliştirilebilir.

Enerji yönetimi, akıllı bina otomasyon sistemlerinde sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından kritik bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, KNX uyumlu enerji analizörlerinin kullanımı, sistemin enerji tüketimini gerçek zamanlı izleme yeteneğini mümkün kılar. Özellikle Modbus protokolünü kullanan enerji analizörlerinin, Modbus/KNX dönüştürücü aracılığıyla KNX ağına entegre edilmesi sayesinde, farklı iletişim protokolleri arasında kesintisiz veri alışverişi sağlanmaktadır. Toplanan enerji verileri, kullanıcı dostu bir dokunmatik kontrol paneli veya mobil uygulama arayüzü üzerinden görselleştirilerek, sistem yöneticisinin anlık durumu izlemesine ve analiz etmesine olanak tanır. Ayrıca, yüksek güçlü tüketicilerin yönetimi için kullanılan röleli çıkış modülleri aracılığıyla, aşırı yük durumlarında yük atma veya zamanlanmış kontrol senaryoları uygulanarak enerji tüketimi optimize edilir. Bu bütüncül yaklaşım, enerji verimliliği hedeflerinin gerçekleştirilmesinde önemli katkılar sunar.

Enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengenin sağlanması, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edildiği akıllı bina sistemlerinde büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, fotovoltaik (PV) sistemlerden elde edilen elektrik üretiminin anlık tüketimle karşılaştırılması sayesinde, tüketici cihazlarının çalışma durumu dinamik olarak yönetilebilir. Üretim fazlası olduğunda enerji verimli şekilde değerlendirilirken, üretimin yetersiz kaldığı durumlarda ise, belirli cihazlar otomatik olarak devre dışı bırakılarak sistem dengesi korunur. Ayrıca, sistemde yüksek güç çekişi algılandığında, kullanıcıya görsel veya sesli uyarılar gönderilerek enerji yönetimine bilinçli katılım teşvik edilir. Kritik enerji yetersizliği durumlarında ise "Enerji Krizi" modu devreye girerek, önceden belirlenmiş düşük öncelikli cihazlar otomatik olarak kapatılır. Bu senaryo tabanlı yaklaşım, hem enerji güvenliğini sağlamakta hem de kullanıcı konforundan ödün vermeden sürdürülebilir bir tüketim stratejisi geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

### 4.3 Senaryo ve Mantık Yönetimi

Akıllı bina otomasyonunda kullanıcı alışkanlıklarına uyumlu, esnek ve durumlara duyarlı yaşam senaryolarının oluşturulması, karmaşık mantık işlemlerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla, KNX sistem mimarisi içerisinde yer alan KNX lojik kontrol modülleri, çoklu koşul ve durumlara göre programlanabilir kontrol senaryolarının geliştirilmesine olanak tanır. Söz konusu mantık işlemleri, ETS (Engineering Tool Software) üzerinden ilgili modüllerin konfigürasyonu ve parametre yapılarıyla programlanmakta, böylece sıcaklık, zaman, hareket veya enerji tüketimi gibi çok sayıda parametreye bağlı olarak otomatik tepkiler oluşturulabilmektedir. Bu esneklik, örneğin "evde kimse yoksa ışıkları ve prizleri kapat" veya "güneş ışığı yeterliyse aydınlatmaları devre dışı bırak" gibi enerji ve konfor odaklı senaryoların hayata geçirilmesini mümkün kılar. Kullanıcılar, geliştirilen bu mantık yapıları ile oluşturulan otomasyon senaryolarını duvar tipi kontrol panelleri, tabletler veya mobil cihazlar üzerinden kolaylıkla izleyebilir ve gerektiğinde müdahale edebilir. Bu yapı, hem teknik derinliği olan bir kontrol altyapısı sağlar hem de kullanıcı dostu ara yüzlerle yüksek yaşam konforu sunar.

Akıllı bina otomasyon sistemlerinde tanımlanan yaşam senaryoları, kullanıcı konforunu artırmakla birlikte enerji verimliliği ve güvenlik unsurlarını da bütüncül bir yaklaşımla yönetmeyi amaçlar. Örneğin, "eve giriş" senaryosunda sistem, hareket veya kimlik tanıma sensörleri aracılığıyla kullanıcıyı algıladığında, otomatik olarak iç mekân aydınlatmalarını ve ısıtma sistemini devreye alırken, aynı anda güvenlik sistemi devre dışı bırakılır. Bu durum, konforlu bir karşılama sağlarken, gereksiz alarm tetiklemelerini de önler. "Gece modu" senaryosunda ise, ortam ışıkları düşük seviyeye ayarlanarak huzurlu bir atmosfer oluşturulur, iç mekân sıcaklığı enerji tasarrufu amacıyla belirli bir eşiğe düşürülür ve dış panjurlar kapatılarak hem ısı kaybı azaltılır hem de mahremiyet sağlanır. "Tatil" modunda ise, uzun süreli yokluk durumları için sistem, tüm aydınlatmaları kapatarak gereksiz enerji tüketimini önler, ısıtmayı donma riskine karşı minimum seviyede tutar ve güvenlik sistemlerini tam kapasiteyle devreye alır. Bu senaryolar, KNX tabanlı mantık denetleyiciler aracılığıyla otomatik ve koşul tabanlı biçimde uygulanarak, kullanıcının günlük yaşamına entegre bir kontrol imkânı sunar.

Bu sistemler, KNX'in modüler ve birlikte çalışabilir yapısı sayesinde hem ayrı ayrı kontrol edilebilir hem de tümü birbiriyle koordineli şekilde çalıştırılabilir. Böylece, kullanıcıya konfor, güvenlik ve enerji verimliliği sunan tam entegre bir otomasyon sistemi sağlanır.

### **4.3.1 Örnek kontrol senaryoları**

KNX sistemleri, yalnızca cihaz kontrolü değil; aynı zamanda olaya, zamana veya kullanıcı davranışına bağlı olarak çalışan otomasyon senaryoları tanımlamaya olanak tanır. Bu senaryolar, mantık modülleri, zamanlayıcılar, sensörler ve kullanıcı girişleri ile tetiklenir.

Senaryo yönetimi sayesinde hem enerji tüketimi optimize edilir, hem de kullanıcı için konforlu ve sezgisel bir yaşam deneyimi sunulur.

#### **4.3.1.1 “Eve giriş” senaryosu**

Kullanıcı alışkanlıklarına uygun olarak tanımlanan senaryolar, hem konforun artırılmasını hem de enerji verimliliğinin sağlanmasını hedefler. Kullanıcının eve gelişiyle tetiklenen bu senaryo, akıllı anahtarın kullanılması veya giriş alanındaki hareket sensörünün aktifleşmesiyle devreye girer. Tetikleme sonrasında, giriş ve salon aydınlatmaları %70 parlaklık seviyesinde açılarak yeterli bir aydınlatma sağlanırken aynı zamanda gereksiz enerji tüketiminin önüne geçilir. Kombinin konfor moduna geçmesiyle birlikte iç mekân sıcaklığı kullanıcının tercih ettiği düzeye ulaşır; panjurların otomatik olarak açılması ise doğal aydınlatmadan faydalanılarak enerji kullanımını azaltır. Güvenlik sisteminin devre dışı kalması, kullanıcı varlığı doğrulandıktan sonra yanlış alarm riskini ortadan kaldırır. Opsiyonel olarak devreye alınabilen müzik sistemi ise kullanıcıya kişiselleştirilmiş bir karşılama deneyimi sunar. Bu bütünleşik yapı, yalnızca aktif kullanılan alanları devreye alarak diğer bölgeleri enerji tasarrufu modunda tutar; böylece konfor ve enerji verimliliği arasında optimum bir denge kurulmuş olur.

#### **4.3.1.2 “Gece modu” senaryosu**

Gece senaryoları, kullanıcı konforunu koruyarak enerji tüketimini optimize eden otomasyon stratejilerinin başında gelmektedir. Bu bağlamda geliştirilen gece modu senaryosu, saat 23:00'ten sonra otomatik olarak tetiklenebileceği gibi, kullanıcı tarafından mobil arayüz aracılığıyla manuel olarak da aktif edilebilir.

Senaryo kapsamında, tüm iç aydınlatmalar kapatılır veya belirli alanlarda %10 düzeyinde loş aydınlatma sağlanarak hem görsel konfor sürdürülür hem de gereksiz enerji tüketimi engellenir. Aynı anda oda termostatları ekonomi moduna geçerek iç ortam sıcaklığı, gece uyku konforunu bozmayacak şekilde düşürülür. Panjur ve perdelerin otomatik olarak kapanması, ısı kaybını azaltmanın yanı sıra mahremiyet sağlar. Güvenlik sistemi “aktif” moda alınarak gece boyunca bina dışı tehditlere karşı koruma sağlanır. Ayrıca bahçe aydınlatması, önceden tanımlı zamanlayıcıya göre otomatik olarak kapatılarak dış mekân enerji yönetimi desteklenir. Bu kapsamlı senaryo sayesinde, gece boyunca kullanıcı konforu kesintiye uğramadan, sistem genelinde önemli ölçüde enerji tasarrufu elde edilir.

#### **4.3.1.3 “Sabah rutini” senaryosu**

Kullanıcıya konforlu ve enerji açısından dengeli bir başlangıç sunmayı amaçlayan önemli bir uygulamadır. Bu senaryo, saat 07:00’de otomatik olarak tetiklenebileceği gibi, kullanıcı tarafından bir alarm komutu aracılığıyla da devreye alınabilir. Senaryonun başlatılmasıyla birlikte panjurlar %100 oranında açılarak doğal ışığın iç mekâna girmesi sağlanır ve gün ışığına adaptasyon kolaylaştırılır. Aynı anda mutfak ve banyo aydınlatmaları otomatik olarak devreye girer; bu sayede kullanıcı sabah aktivitelerine hazırlıksız bir ortamla karşılaşmadan başlayabilir. Kombi, önceden tanımlı sabah sıcaklık değerine geçerek termal konforu artırırken, banyo bölgesinde zemin ısıtmasının aktifleşmesi özellikle kış aylarında kullanım konforunu üst düzeye taşır. Bununla birlikte, gece boyunca açık kalan arka bahçe aydınlatması otomatik olarak kapatılarak gereksiz enerji tüketimi engellenir. Tüm bu eylemler, kullanıcıya fiziksel konforun yanı sıra zamandan ve enerjiden tasarruf sağlayan, çevresel koşullara uyumlu bir sabah rutini sunar.

#### **4.3.1.4 “Tatil modu” senaryosu**

Tatil modu senaryosu, kullanıcı binadan uzun süreli olarak ayrıldığında enerji tüketimini minimize ederken güvenliği en üst düzeyde tutmayı amaçlayan stratejik bir otomasyon uygulamasıdır. Bu senaryo, kullanıcı tarafından fiziksel bir tatil butonuna basılarak ya da mobil arayüz üzerinden uzaktan komut verilerek devreye alınabilir. Senaryo etkinleştirildiğinde, HVAC sistemleri yalnızca donma riskini önleyecek şekilde minimum sıcaklık değerinde (yaklaşık 5–7°C) çalışacak biçimde ayarlanır; böylece hem sistemlerin korunması sağlanır hem de enerji israfı önlenir.

Tüm iç mekân aydınlatmaları kapanarak gereksiz enerji tüketimi engellenirken, panjurlar otomatik olarak kapatılarak ısı yalıtımı ve dış müdahalelere karşı fiziksel güvenlik artırılır. Aynı anda, güvenlik sistemi tüm çevresel sensörleriyle birlikte devreye girer; bu da hareket, cam kırılma, kapı açılması gibi riskleri anlık olarak algılayabilme olanağı sağlar. Ayrıca çamaşır makinesi, su ısıtıcısı gibi aktif kullanılmayan ve bekleme konumunda enerji harcayan priz devreleri otomatik olarak kesilerek toplam enerji tüketimi daha da düşürülür. Bu kapsamlı senaryo sayesinde, kullanıcı evde bulunmadığı süre boyunca düşük enerji tüketimi ve yüksek güvenlik seviyesini eşzamanlı olarak elde eder.

#### **4.3.1.5 “Enerji krizi” senaryosu**

Fotovoltaik (PV) sistem üretiminin düşük olduğu ve aynı anda enerji tüketiminin yüksek seyrettiği durumlarda, sistemde tanımlı eşik değerlerin aşılması halinde enerji yönetim senaryosu otomatik olarak devreye girer. Analizlerden alınan bu bilgi ile senaryo tetiklenir. Senaryo kapsamında HVAC sistemleri düşük güç moduna alınarak iklimlendirme yükü azaltılır ve enerji tüketimi kontrol altına alınır. Aynı anda, dim edilebilen aydınlatma sistemleri %50 parlaklığa düşürülerek hem kullanıcı konforu korunur hem de gereksiz tüketim sınırlanır. Priz linyelerinin bazılarının kapatılmasıyla, özellikle beklemede enerji tüketen cihazların devreden çıkarılması sağlanır. Ek olarak, mobil uygulama aracılığıyla kullanıcıya bir uyarı bildirimini gönderilerek sistemin durumu hakkında bilgi verilir ve bilinçli müdahale imkânı tanınır. Bu otomatik ve çok katmanlı müdahale mekanizması sayesinde, oluşabilecek anlık enerji krizi etkin biçimde yönetilir ve sistemin sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlanmış olur.

#### **4.3.1.6 “Sinema modu” senaryosu**

Evde sinema modu senaryosu, kullanıcıya yüksek düzeyde konfor ve deneyim sunmak amacıyla çoklu otomasyon bileşenlerinin eş zamanlı olarak yönetilmesini sağlar. Bu senaryo, kullanıcı tarafından bir uzaktan kumanda ya da duvar paneli üzerinden manuel olarak etkinleştirildiğinde devreye girer. Uygulama başladığında, salon aydınlatmaları %10 seviyesinde loş moda alınarak sinema izlemeye uygun bir atmosfer oluşturulur. Aynı anda panjurlar kapatılarak dış ortam ışığının iç mekâna girişi engellenir ve görsel odak sağlanır. Konforu artırmak amacıyla klima sessiz moda geçirilir, böylece hem sıcaklık düzenlenir hem de

akustik rahatsızlık önlenir. Projeksiyon cihazının otomatik olarak devreye girmesiyle birlikte görüntü sistemi hazır hale gelirken, entegre hoparlör sisteminin açılması sayesinde yüksek kaliteli ses deneyimi sağlanır. Bu bütünleşik otomasyon yapısı, kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duymadan evde profesyonel düzeyde bir sinema ortamı oluşturarak konforlu ve etkileyici bir kullanıcı deneyimi sunar.

### 3.3.1.7 Kullanıcıya özel senaryolar

Bu tür senaryolar, genellikle son kullanıcının günlük yaşam alışkanlıklarına ve konfor beklentilerine yönelik olarak geliştirilen, kişiselleştirilmiş otomasyon uygulamalarıdır. Temel amacı, kullanıcıya kullanım kolaylığı ve enerji verimliliği sunmaktır. Örnek senaryoda, kullanıcı herhangi bir bölgedeki anahtara uzun süreli bastığında, sistem yalnızca ilgili bölgenin aydınlatmasını aktif hale getirirken, evin diğer alanlarında açık kalan tüm aydınlatmaları otomatik olarak kapatmaktadır. Bu sayede, kullanıcı yalnızca bulunduğu mekânı aktif hâle getirirken diğer alanlarda enerji israfı önlenmiş olur. Aynı zamanda, bu senaryo türü, kullanıcı müdahalesi gerektirmeden, otomasyon sistemi üzerinden hızlı ve etkili bir aydınlatma yönetimi sağlayarak hem konforu artırmakta hem de toplam enerji tüketimini azaltmaktadır. Özelleştirilebilir yapısıyla farklı kullanıcı tercihlerini karşılayabilen bu uygulama, modern akıllı bina sistemlerinin esnekliğini ve kullanıcı odaklı yapısını yansıtmaktadır

## 4.4 Senaryoların Ölçülebilir Katkısı (Literatüre Dayalı)

Çizelge 4.1’de KNX tabanlı otomasyon senaryolarının literatüre dayalı enerji tasarrufu etkilerini gösteren Çizelge akademik formatta yeniden düzenlenmiştir.

**Çizelge 4.1: KNX Tabanlı Otomasyon Senaryolarının Literatüre Dayalı Enerji Tasarrufu Etkileri**

Senaryo	Enerji Tasarrufu Oranı	Literatür Kaynağı
Gece Modu	% 10–15	Vanus et al., 2022
Tatil Modu	% 20	Dweik et al., 2022
Pencere Açıldığında HVAC Kapatma	% 8–12	Benndorf et al., 2018
Enerji Krizi	Anlık %25 azaltım	Sutrich, 2024

Bu Çizelge, farklı otomasyon senaryolarının enerji verimliliği açısından somut katkılarını ortaya koyarak, KNX sistemlerinin sürdürülebilir bina yönetimine sağladığı katkıyı bilimsel verilerle desteklemektedir.

#### 4.5 Donanım Listesi (Örnek Konfigürasyon)

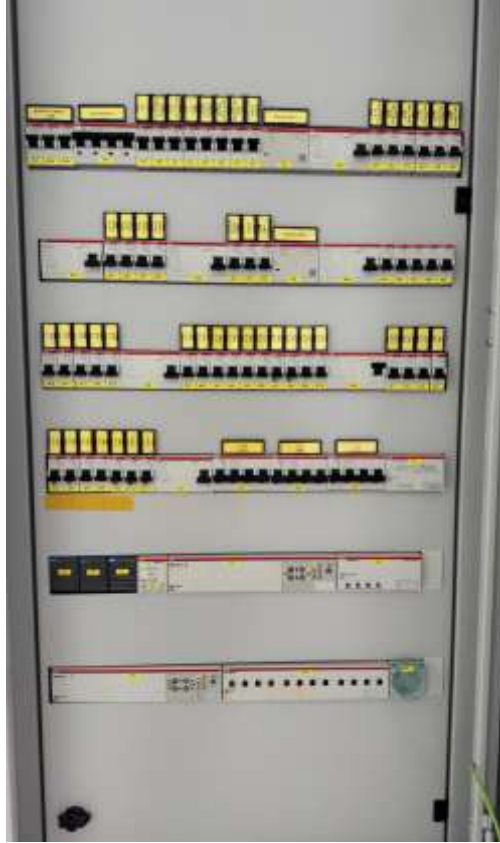
Bina otomasyon sistemlerinin uygulanabilirliği ve fonksiyonelliği, büyük ölçüde kullanılan donanım bileşenlerinin doğru seçimi ve işlevsel olarak sistem ihtiyaçlarına uygun biçimde konfigüre edilmesine bağlıdır. Bu kapsamda hazırlanan Çizelge 4.2, örnek bir konut uygulaması için kullanılan KNX tabanlı donanım bileşenlerini ve bu bileşenlerin görevlerini sistematik bir şekilde ortaya koymaktadır. Söz konusu donanım listesi, bir konutta yaygın olarak ihtiyaç duyulan aydınlatma kontrolü, iklimlendirme, perde-panjur yönetimi, güvenlik ve enerji izleme gibi işlevlere karşılık gelecek şekilde yapılandırılmıştır.

**Çizelge 4.2: Örnek Bir Konut Uygulaması İçin Önerilen KNX Donanım Bileşenleri ve Görevleri**

No	Donanım Adı	Model/Marka	Görev / Açıklama
1	<b>KNX IP Router</b>	ABB iPR/S 3.5.1	KNX hattını IP ağına entegre ederek ETS programlamasına olanak sağlar.
2	<b>KNX Güç Kaynağı (640mA)</b>	SV/S 30.640.3.1	KNX hattına gerekli sabit 30V DC gerilimi sağlar.
3	<b>KNX Röleli Anahtarlama Aktüatörü (24x10A)</b>	SAH/S24.10.7.1	Aydınlatma ve priz hatlarının aç/kapa kontrolü için kullanılır.
4	<b>KNX Dim Aktüatörü (4 kanal)</b>	UD/S4 210.2.1	LED aydınlatmaların parlaklık seviyesinin ayarlanmasını sağlar.
5	<b>KNX Jaluzi/Panjur Aktüatörü (8 kanal)</b>	JRA/S8 230.1.1	Panjur, jaluzi ve tente sistemlerinin yön ve seviye kontrolünü sağlar.
6	<b>KNX Oda Termostatı (CO<sub>2</sub>/Nem Ölçerli)</b>	Core Eclipse Controller	Oda sıcaklığı, aydınlatma perde panjurları kontrolü ve HVAC tetikleme için kullanılır.
7	<b>KNX Oda Anahtarı (1-2-4 Gang)</b>	Core Eclipse Push Button	Oda içindeki aydınlatma ve Perde Panjurları kontrol etmek için kullanılır.
8	<b>KNX Hareket Sensörü (Tavan Tipi)</b>	ABB 6131/31-24	Oda ve koridorlarda varlık algılayarak otomasyon senaryolarını tetikler.
9	<b>KNX Işık Sensörü (Gün Işığı Sensörü)</b>	ABB HS/S4.2.1	Doğal ışık miktarına göre aydınlatma sistemini kontrol eder.

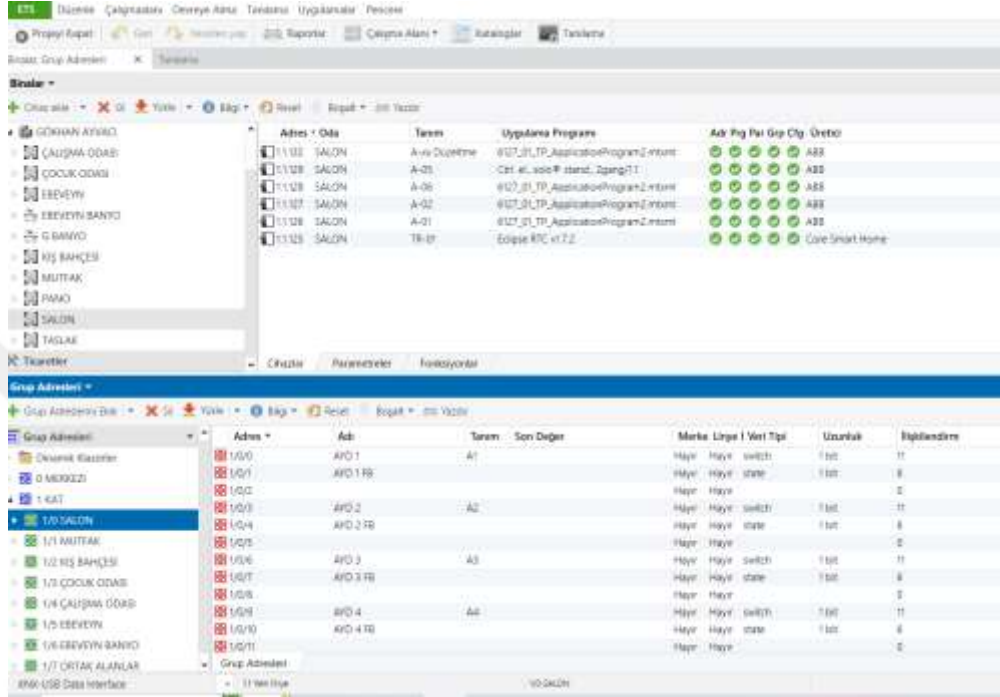
**Çizelge 4.2: (Devamı) Örnek Bir Konut Uygulaması İçin Önerilen KNX Donanım Bileşenleri ve Görevleri**

No	Donanım Adı	Model/Marka	Görev / Açıklama
10	<b>KNX Enerji Ölçer (Tüketim İzleme)</b>	Schneider MTN6600	Gerçek zamanlı enerji tüketimi ve voltaj analizi yapar.
11	<b>KNX Mantık Modülü</b>	Logic Machine5	IF-THEN tarzı senaryo kontrollerinin merkezi yönetimini sağlar.
12	<b>KNX Zamanlayıcı Modül</b>	ABB FW/S8.2.1	Zaman bazlı kontrol fonksiyonlarını yürütür (örneğin gece/gündüz geçişi).
13	<b>KNX Hava Durumu İstasyonu</b>	Theben Meteodata 140S 24V	Dış sıcaklık, güneş yönü, rüzgar hızı verileriyle gölgeleme sistemlerini yönetir.
14	<b>KNX VRF Gateway</b>	Core LG Gateway	VRF Sisteminin KNX üzerinden derecesel kontrolünü sağlar.
15	<b>KNX IP Kamera Entegrasyonu</b>	Hikvision	Güvenlik sistemiyle entegre görüntü aktarımı sağlar (isteğe bağlı).
16	<b>İnterkom Sistemi</b>	Akuvox R20A	Görüntülü Görüşme Sistemidir. isteğe bağlı).
17	<b>KNX Touch Panel</b>	Core Eclipse	Tüm kontrol noktalarının tek bir nokta üzerinden kontrolü ve mobil erişimi sağlar.



**Şekil 4.3: Kat Dağıtım Panosu**

Sistem, ETS5/6 yazılımı ile yapılandırılır ve senaryolar otomasyon modülü üzerinden tanımlanır. Bileşenler modüler olarak çalıştığı için istenirse ekleme veya çıkarma yapılabilir. KNX sertifikalı tüm markalar ile eşdeğer cihazlar kullanılabilir. IP tabanlı entegrasyon sayesinde uzaktan erişim ve mobil uygulama kontrolü mümkündür.



**Şekil 4.4: ETS Program Görüntüsü**

KNX tabanlı bina otomasyon sistemlerinin etkin ve sürdürülebilir şekilde tasarlanabilmesi için donanım seçimi sürecinde çeşitli teknik ve yapısal kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu kriterler Çizelge 4.3 **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de verilmektedir. Bu bağlamda ilk ve en temel kriter, kullanılacak tüm cihazların KNX Association tarafından sertifikalandırılmış olmasıdır. Bu sertifikasyon, cihazların KNX protokolüyle tam uyumlu çalışmasını garanti altına alarak sistem güvenilirliğini artırır. Donanım seçiminde marka çeşitliliği mümkün olmakla birlikte, farklı üreticilere ait cihazların entegre bir yapıda sorunsuz çalışabilmesi için ETS (Engineering Tool Software) yazılımı ile yapılan yapılandırılmaların dikkatli ve sistematik biçimde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, enerji tüketimi, özellikle röleli modüllerin standby durumlarındaki güç tüketimi açısından değerlendirilmelidir; düşük bekleme tüketimine sahip cihazlar (örneğin < 0.5 W), uzun vadeli enerji verimliliği açısından avantaj sağlar. Yedek kanal planlaması ise sistemin ileride genişletilebilmesi ve esnek biçimde yeniden

yapılandırılabilmesi açısından kritik bir tasarım ilkesidir; bu nedenle kullanılmayan çıkışların yedek olarak bırakılması önerilmektedir. Son olarak, sistemin senaryo esnekliği, özellikle mantık kontrol modüllerinin yazılımsal olarak çok işlevli olmasıyla ilişkilidir. Haftalık zamanlama, koşul-bağımlı senaryolar ve çoklu olay yönetimi gibi işlevlerin desteklenmesi, kullanıcıya yüksek düzeyde kontrol ve özelleştirme imkânı sunarak sistemin fonksiyonel değerini artırmaktadır. Bu kriterler, KNX sistemlerinin uzun ömürlü, modüler ve enerji açısından verimli bir şekilde yapılandırılmasında temel rol oynamaktadır.

**Çizelge 4.3: KNX Donanımı Seçimi İçin Temel Teknik ve Yapısal Değerlendirme Kriterleri**

Kriter	Açıklama
<b>Uyumluluk</b>	Tüm cihazların KNX sertifikalı olması gerekir (KNX Association).
<b>Marka Karışıklığı</b>	Farklı üreticilerin cihazları birbiriyle çalışabilir ancak ETS yapılandırması dikkatli yapılmalıdır.
<b>Enerji Tüketimi</b>	Röleli modüllerin standby tüketimi düşük olmalıdır (örn. < 0.5W).
<b>Yedek Kanal Planlaması</b>	Gelecekteki genişlemeler için kullanılmayan çıkış bırakılması önerilir.
<b>Senaryo Esnekliği</b>	Logic modülü yazılım destekli, çok işlevli olmalı (ör. haftalık zamanlama + koşul ilişkileri).

#### 4.6 Enerji Kazancı ve Geri Dönüş Süresi (ROI)

KNX sistemleri ile donatılmış bir yapıda aydınlatma, HVAC, gölgeleme ve cihaz kontrolü gibi temel alanlarda yapılan otomasyon sayesinde, ciddi oranlarda enerji tasarrufu sağlanabilir. 300 m<sup>2</sup>'lik bir konut uygulaması için tahmini tasarruf dağılımı aşağıdaki Çizelgede çıkartılmaktadır.

**Çizelge 4.4: KNX Otomasyonunun Sistem Bazında Enerji Tasarrufu Potansiyeli**

Sistem	Tasarruf Potansiyeli	Açıklama
<b>Aydınlatma</b>	%20–30	Dimleme, gün ışığı kontrolü, hareket sensörü
<b>Isıtma/Soğutma</b>	%15–30	Oda bazlı sıcaklık kontrolü, pencere sensörü, zamanlayıcı
<b>Panjur/Jaluzi Kontrolü</b>	%8–15	Yazın iç mekân soğutma yükü azalır
<b>Güçlü Yük Yönetimi (priz/cihaz)</b>	%10–20	Standby azaltma, tatil modu
<b>Toplam</b>	<b>%25–30</b>	Bina genelinde toplam enerji verimliliği artışı

KNX tabanlı bina otomasyon sistemleri, enerji verimliliği hedefi doğrultusunda önemli katkılar sunmakta olup, sistem tasarımı ve kullanıcı alışkanlıklarına bağlı olarak toplamda %30'a varan enerji tasarrufu sağlayabilmektedir. Bu tasarruf oranı, özellikle aydınlatma, iklimlendirme, gölgeleme ve enerji izleme gibi alt sistemlerin senaryo tabanlı ve sensör destekli kontrolü sayesinde elde edilmektedir. KNX otomasyon altyapısı, enerji tüketimini gerçek zamanlı izleme ve optimize etme imkânı sunduğundan, gereksiz kullanımın önüne geçilerek hem çevresel sürdürülebilirlik sağlanmakta hem de işletme maliyetleri azaltılmaktadır. Bu yönüyle KNX, sadece kullanıcı konforunu artırmakla kalmayıp aynı zamanda enerji yönetimi açısından da geleceğe dönük akıllı bina uygulamaları için stratejik bir çözüm sunmaktadır [31].

#### **4.7 Yatırım Maliyeti ve Geri Dönüş Süresi**

KNX tabanlı bina otomasyon sistemlerinin uygulanabilirliğini değerlendirirken, sistemin sağladığı enerji verimliliği, kullanıcı konforu ve sürdürülebilirlik gibi avantajların yanı sıra, yatırım maliyeti ve geri dönüş süresi de önemli bir karar kriteri olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, başlangıçta geleneksel çözümlere kıyasla daha yüksek kurulum maliyetleri gerektirse de, sağladıkları uzun vadeli tasarruflar ve işletme giderlerindeki düşüş ile ekonomik açıdan rasyonel bir yatırım haline gelmektedir. Özellikle enerji tüketiminin yoğun olduğu büyük ölçekli yapılarda, KNX sistemleri sayesinde elde edilen verimlilik, yatırımın geri dönüş süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Bu nedenle, yatırım maliyetinin bileşenleri ve bu yatırımların ne ölçüde ve ne sürede geri kazanılabileceği, sistemin genel performansını ve sürdürülebilirliğini değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir.

##### **4.7.1 Yaklaşık sistem kurulum maliyeti**

KNX tabanlı bina otomasyon sistemlerinin uygulanmasında, sistemin sağlayacağı uzun vadeli faydaların yanı sıra, ilk yatırım aşamasındaki kurulum maliyetleri de dikkatle değerlendirilmesi gereken önemli bir husustur. Bu sistemlerin maliyet yapısı, yalnızca temel donanım bileşenlerinden değil; aynı zamanda yazılım lisansları, proje tasarımı, programlama, montaj ve devreye alma gibi hizmet kalemlerinden oluşan çok katmanlı bir bütçe yapısını kapsamaktadır. Kurulum maliyetleri, bina tipi, kullanım amacı, kontrol edilecek alan sayısı ve senaryo

çeşitliliği gibi etkenlere bağlı olarak değişkenlik gösterse de, belli başlı maliyet kalemleri çoğu projede ortak bir yapıya sahiptir.

Bu bağlamda, Çizelge 4.5 Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı., tipik bir konut eya küçük ölçekli ticari bina uygulaması için KNX tabanlı otomasyon sistemine ait yaklaşık kurulum maliyet kalemlerini sistematik biçimde sunmaktadır. Çizelgede, güç kaynakları, aktüatör ve sensör modülleri, kontrol panelleri gibi temel donanım bileşenlerinin yanı sıra, ETS yazılım lisansı ve mühendislik hizmetleri gibi dolaylı maliyetler de ayrı başlıklar altında ele alınmıştır. Böylelikle yatırımcılara, sistemin toplam kurulum maliyetinin nasıl oluştuğu ve hangi bileşenlerin bütçede en yüksek paya sahip olduğu konusunda bütüncül bir bakış açısı sunulmaktadır. Bu maliyet analizi, yatırım karar süreçlerinde şeffaflık ve öngörülebilirlik sağlaması açısından büyük önem taşımaktadır.

**Çizelge 4.5:** KNX Tabanlı Bina Otomasyon Sisteminin Tipik Kurulum Maliyet Kalemleri (EUR)

<b>Kalem</b>	<b>Maliyet Aralığı (EUR)</b>	<b>Açıklama</b>
KNX donanımı (sensör, aktüatör, termostat vs.)	12.000 – 15.000 €	Donanım bedeli
Kurulum ve devreye alma	2.000 – 3.500 €	Elektrikçi ve KNX programcısı
ETS yazılım lisansı + eğitim	1.000 € (tek seferlik)	Lisans veya uzman hizmeti
<b>Toplam</b>	<b>15.000 – 19.500 €</b>	Ortalama 17.000 € alınabilir

Maliyetler, Avrupa ve Türkiye piyasası ortalamasına göre tahmini değerlerdir.

#### **4.7.1.1 Yıllık enerji tüketimi & tasarruf**

- Ortalama konut elektrik tüketimi: **12.000 – 16.000 kWh / yıl**
- KNX ile %30 tasarruf varsayılırsa:
  - **3.600 – 4.800 kWh / yıl kazanç**
  - Türkiye’de 1 kWh ~ 3,92 TL (2025) → Yıllık kazanç: **14.112 – 18.816 TL**
  - Avrupa’da ortalama ~0.3€/kWh → Yıllık kazanç: **1080 – 1.440 €**

**Çizelge 4.6: Farklı Senaryolarda KNX Sisteminin Yıllık Tasarrufu ve Geri Dönüş Süresi**

Senaryo	Yıllık Tasarruf (€)	Sistem Maliyeti (€)	Geri Dönüş Süresi
<b>Ortalama Konut (Türkiye)</b>	~16.500£ / ~366€	~17.500€	≈ 4-5 yıl
<b>Enerji Odaklı Konut (AB)</b>	~1000€	~17.500€	≈ 2-3 yıl

KNX tabanlı bina otomasyon sistemleri, yatırım geri dönüşü (ROI) açısından değerlendirildiğinde oldukça avantajlı bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Literatürde ve saha uygulamalarında elde edilen veriler doğrultusunda, KNX tabanlı otomasyon sistemlerinin 3 ila 5 yıl içerisinde kendini amorti ettiği ve bu sürecin ardından bina ömrü boyunca enerji faturalarında sürekli ve anlamlı tasarruf sağladığı raporlanmaktadır. Bu geri dönüş süresi, sistemin ölçeği, yapı tipi (konut, ticari, endüstriyel) ve uygulanan senaryoların kapsamına göre değişiklik gösterebilmekle birlikte, özellikle aydınlatma, HVAC ve cihaz yönetimi gibi yüksek enerji tüketimli alanlarda sağlanan optimizasyon sayesinde önemli oranda kısalmaktadır. Geri dönüş süresi sonrasında ise KNX sistemleri, azalan işletme maliyetleri, azalan enerji tüketimi ve daha düşük bakım ihtiyacı sayesinde bina yönetiminde sürdürülebilir bir avantaj sunmakta; böylece yalnızca konfor ve güvenlik değil, aynı zamanda ekonomik verimlilik açısından da uzun vadeli katkılar sağlamaktadır[34].

KNX tabanlı bina otomasyon sistemleri yalnızca enerji verimliliği ve işletme maliyetlerinde sağladığı düşüşle değil, aynı zamanda çeşitli parasal olmayan avantajlarıyla da sürdürülebilir bina yönetiminde önemli bir yer tutmaktadır. Öncelikle, bu sistemlerin donanımsal dayanıklılığı ve teknolojik kararlılığı, ortalama olarak 15 yıl ve üzeri bir süre boyunca sorunsuz çalışabilmelerini mümkün kılar; bu da uzun vadeli yatırım güvenliği açısından önemli bir avantajdır. Ayrıca, akıllı bina sistemlerinin entegre olduğu yapılar, kullanıcıya sunduğu yüksek konfor seviyesi ve teknolojik altyapı sayesinde mülk değerinde artış yaratmakta ve gayrimenkul piyasasında rekabet avantajı sağlamaktadır. KNX sistemleri aynı zamanda LEED, BREEAM gibi uluslararası çevresel sürdürülebilirlik sertifikalarında enerji verimliliği, kullanıcı kontrolü ve otomasyon gibi başlıklarda puan kazandırıcı unsur olarak değerlendirilmektedir. Kullanıcı açısından bakıldığında ise zaman yönetimi, uzaktan erişim, güvenlik senaryoları ve otomatik kontroller sayesinde konfor, güvenlik ve erişim kolaylığı gibi günlük yaşamı doğrudan etkileyen faydalar

sağlanmaktadır. Son olarak, sistemin merkezi yapılandırması ve ETS üzerinden denetlenebilir olması, arıza tespitini kolaylaştırmakta ve müdahale sürelerini ile bakım maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir. Bu yönleriyle KNX sistemleri, enerji ve ekonomi ekseninin ötesine geçerek yaşam kalitesini ve bina değerini doğrudan etkileyen bütüncül bir çözüm sunmaktadır.



## 5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, bina otomasyonu alanında uluslararası bir standart olan KNX protokolü temel alınarak, akıllı bina sistemlerinin teknik yapısı, entegrasyon olanakları ve enerji verimliliğine olan katkıları ayrıntılı biçimde incelenmiştir. KNX sistemlerinin özellikle iklimlendirme, aydınlatma, gölgeleme, güvenlik ve enerji yönetimi gibi kritik alt sistemlerde sunduğu entegrasyon kabiliyeti, hem kullanıcı konforunu hem de enerji tasarrufu potansiyelini önemli ölçüde artırmaktadır.

KNX protokolü, farklı üreticilere ait cihazların birlikte çalışmasına olanak tanıyan açık ve evrensel bir platformdur. Bu özellik, sistemin esneklik ve ölçeklenebilirlik açısından yüksek performans göstermesini sağlar.

Yerden ısıtma, kombi, VRF, fan-coil gibi HVAC sistemleri KNX ile entegre edildiğinde, oda bazlı sıcaklık kontrolü, zaman bazlı senaryolar, ve dış hava koşullarına göre adaptif yönetim gibi gelişmiş kontrol işlevleri mümkün hale gelir. Aydınlatma, perde ve cihaz kontrolünde kullanılan sensörler, zamanlayıcılar ve mantık modülleri, enerji kullanımını kullanıcı davranışına göre optimize ederek %25–30 arasında enerji tasarrufu sağlayabilmektedir.

Gerçekleştirilen örnek proje senaryosu kapsamında, 300 m<sup>2</sup>'lik bir müstakil villada uygulanan KNX sistemiyle; enerji izleme, aydınlatma kontrolü, gölgeleme, HVAC ve güvenlik sistemleri entegre edilmiştir. Sistem yatırım maliyetinin 3 ila 5 yıl içerisinde kendini amorti edebileceği hesaplanmıştır.

Literatür destekli analizler, KNX sistemlerinin yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle karbon ayak izinin azaltılması, akıllı şehir altyapılarına uyumluluk, ve yenilenebilir enerji sistemleriyle entegrasyon gibi alanlarda KNX önemli bir rol oynamaktadır.

Gelişen enerji politikaları, yükselen enerji maliyetleri ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda bina otomasyon sistemleri, gelecekteki yapıların

vazgeçilmez bileşenlerinden biri olacaktır. Bu kapsamda, KNX gibi açık protokollere dayalı sistemler, akıllı şehir altyapılarının temel yapı taşlarını oluşturacaktır. IoT ve yapay zekâ entegrasyonları ile KNX sistemlerinin proaktif ve öğrenen yapılar haline gelmesi beklenmektedir. Evsel, ticari ve endüstriyel yapılarda KNX sistemlerinin karbonsuzlaştırma stratejilerine doğrudan katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

KNX, yalnızca bir teknolojik çözüm olmanın ötesinde, geleceğe hazır akıllı şehirlerin temel ilkeleriyle uyumlu sürdürülebilir bir altyapı modeli sunmaktadır. Günümüz kentlerinin karşı karşıya olduğu enerji verimliliği, kaynak yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik ve kullanıcı merkezli yaşam alanları gibi çok boyutlu ihtiyaçlara entegre yanıt verebilen KNX sistemi, bu yönüyle akıllı şehir vizyonunun somut bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Farklı üreticilere ait sistemlerin birlikte çalışabilirliğini destekleyen açık standart yapısı, uzun vadeli teknoloji yatırımlarında esneklik ve ölçeklenebilirlik sağlamaktadır. Ayrıca, enerji tasarrufunu teşvik eden senaryo yönetimi, uzaktan erişim imkânı ve çevresel koşullara duyarlı otomasyon kabiliyetleri sayesinde KNX, sürdürülebilir kentsel altyapı dönüşümünde stratejik bir araç olarak ön plana çıkmaktadır. [31].

Bu tez çalışması kapsamında, KNX sistemlerinin akademik çerçevede teorik temelleri ile uygulamalı tasarımı arasında köprü kurarak, enerji verimliliği merkezli bir bina otomasyon yaklaşımı sunmaktadır. İlerleyen çalışmalarda daha fazla gerçek uygulama datası ile enerji kazanımları doğrulanabilir, Farklı iklim bölgelerine göre senaryo varyasyonları geliştirilebilir ve bina bilgi modelleme (BIM) ve KNX entegrasyonu birlikte ele alınabilir.

KNX sistemleri, günümüzün ve geleceğin akıllı binalarında yalnızca bir “lüks” değil; zorunlu bir altyapı bileşeni olarak konumlanmaktadır. Sistemsel esnekliği, düşük enerji tüketimi, kullanıcı dostu yönetimi ve çevresel etkiler açısından pozitif katkısı sayesinde, bu teknoloji akıllı binaların sürdürülebilirliğinde kilit bir role sahiptir.

## KAYNAKÇA

- [1] International Energy, A., *Buildings – Tracking Report 2022*. 2022.
- [2] Jung, M., J. Weidinger, W. Kastner, ve A. Olivieri. *Building automation and smart cities: An integration approach based on a service-oriented architecture*. in *2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. 2013. IEEE.
- [3] Kuzuoğlu, F.M., *KNX Bina Otomasyonu Veri Yolu Standardı Üzerinden Bağlı Olduğu Klimanın Kontrolünü Sağlayan Arabirim Tasarımı*. 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: İstanbul.
- [4] Gökbayrak, A.B., *Kablosuz Algılayıcı Ağı ve KNX Entegrasyonu ile Ev Otomasyonu*. 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: İstanbul.
- [5] Sönmez, M., *Akıllı Binalardaki Teknik-Teknolojik Sistemler ve Enerji İzleme Sisteminin Entegrasyonu*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: İstanbul, 2006.
- [6] De Luca, G., P. Lillo, L. Mainetti, V. Mighali, L. Patrono, ve I. Sergi. *KNX-based home automation systems for Android mobile devices*. in *The Second International Conference on Smart Systems, Devices and Technologies (SMART 2013)*. 2013.
- [7] Dweik, W., M. Abdalla, Y. AlHroob, A. AlMajali, S.A. Mustafa, ve M. Abdel-Majeed, *Skeleton of implementing voice control for building automation systems*. *Scientific Programming*, 2022. 2022(1):
- [8] Mevenkamp, M., C. Eder, ve I. Beinaar. *KNX-based Energy Efficient Heating and Lighting in Educational Buildings*. in *KNX Scientific Conference, Wien*. 2006.
- [9] Piironen, P., *Benefits and cost-effectiveness of smart services in apartment and office buildings in Finland*. 2021.
- [10] Sutrich, M., *Modular Energy Management System*, Technische Universität Wien, 2024.
- [11] Sarjakoski, O., *Designing a KNX-house Automation System for a private residence*. 2015.

- [12] Association, K.N.X., *The worldwide standard for home and building control*. 2008.
- [13] Erb, B., G. Neugschwandtner, W. Kastner, ve M. Kögler. *Open-source foundations for PC based KNX/EIB access and management*. in *Konnex Scientific Conference*. 2005.
- [14] Graveto, V.M.G.d.N., *Security and Safety for Building Automation and Control Systems*, Universidade de Coimbra, 2023.
- [15] Parhamfar, M., S. Shojaeian, ve Z. Bandegani, *Feasibility Study and Design of Smart Low-Energy Building Electrical Installations (Case Study: Isfahan University, Virtual Faculty Building)*. Energy, 2023. 6(3).
- [16] Benndorf, G.A., D. Wystrcil, ve N. Réhault, *Energy performance optimization in buildings: A review on semantic interoperability, fault detection, and predictive control*. Applied Physics Reviews, 2018. 5(4).
- [17] Kalair, A.R., *Synergetic electrothermal storage integrated trigeneration nanogrid*. 2024, Swinburne.
- [18] Kumar, P. ve S. Akhai, *Effective energy management in smart buildings using VRV/VRF systems*, in *Additive Manufacturing in Industry 4.0*. 2022, CRC Press. p. 27-35.
- [19] Mammadzada, M., *Management with fuzzy logic of electrical energy obtained from solar panels and application in intelligent home systems*. 2023.
- [20] Konstantinidis, D., *Towards Net Zero Energy Buildings*. 2015.
- [21] Olesen, B.W., *Radiant floor heating in theory and practice*. ASHRAE Journal, 2008. 50(9): p. 34-42.
- [22] Varga, T., *Integrovaný systém v budově-System techniky prostředí v objektu administrativní budovy-Řídící systém KNX*. 2012.
- [23] Kim, J., D. Song, S. Kim, S. Park, Y. Choi, ve H. Lim, *Energy-saving potential of extending temperature set-points in a VRF air-conditioned building*. Energies, 2020. 13(9): p. 2160.
- [24] Martirano, L. ve M. Mitolo. *Building automation and control systems (bacs): a review*. in *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. 2020. IEEE.
- [25] Pelesic, I., A. Fernbach, W. Granzer, ve W. Kastner. *Semantic integration in building automation a case study for KNX, oBIX and*

- Semantic Web Applications*. in *Proceedings of the KNX Scientific Conference*. 2016.
- [26] Melfi, R., B. Rosenblum, B. Nordman, ve K. Christensen. *Measuring building occupancy using existing network infrastructure*. in *2011 International Green Computing Conference and Workshops*. 2011. IEEE.
- [27] Kaya, F., O. Akar, ve N. Ekren, *Investigation of Building Automation Systems in Terms of Lighting Efficiency*. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 2024. 14(3): p. 1571-1585.
- [28] Dounis, A.I. ve C. Caraiscos, *Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. 13(6-7): p. 1246-1261.
- [29] Mumovic, D. ve M. Santamouris, *A Handbook of Sustainable Building Design and Engineering: "An Integrated Approach to Energy, Health and Operational Performance"*. 2013: Routledge.
- [30] Kollatou, T., D. Tsiamitros, D. Stimoniaris, V. Kikis, M. Zehir, A. Batman, M. Bagriyanik, A. Ozdemir, ve E. Dialynas. *Advanced Demand-Side Management in Microgrids using KNX Technologies*. in *2014 KNX Scientific Conference*. 2014.
- [31] Sitzia, G., M.C. Roscia, M. Valerii, ve E. Ghiani. *Integrating Energy Communities and Digital Condominiums with KNX Technology*. in *2024 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2024. IEEE.
- [32] Shehata, M., A. Eberlein, ve A.O. Fapojuwo. *Managing policy interactions in KNX-based smart homes*. in *31st Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2007)*. 2007. IEEE.
- [33] LILLO, P., L. MAINETTI, V. MIGHALI, L. PATRONO, ve I. SERGI, *Il ruolo dello standard KNX nell'impiantistica*, in *Automazione Integrata*. 2013. p. 36-38.
- [34] Iváncsy, T. ve Z.Á. Tamus, *Analysis of the Energy Consumption of Building Automation Systems*, in *Sustainability Through Innovation in Product Life Cycle Design*. 2016, Springer. p. 871-881.

## ÖZGEÇMİŞ

Fatih ÜLKER eğitim hayatına Artvin Teknik Lisesi'nde başlamış ve bu okulu dereceyle tamamlamıştır. Ardından Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü'ne girmiş, 2012 yılında bölümünü yine dereceyle bitirerek mezun olmuştur. Üniversite yıllarından itibaren KNX bina otomasyon sistemlerine ilgi duymuş ve bu alanda uzmanlaşarak KNX Tutor unvanını almıştır. Uzun yıllar çeşitli firmalarda KNX alanında profesyonel olarak görev yapmış, edindiği bilgi ve deneyimi kendi girişimi olan GNYTEK Teknoloji & Mühendislik çatısı altında devam ettirmektedir. GNYTEK, aynı zamanda KNX Association tarafından yetkilendirilmiş resmi bir KNX eğitim merkezidir.

Fatih ÜLKER, akademik alanda da aktif olup Marmara Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nda Akıllı Bina Sistemleri ve Aydınlatma Tekniği derslerini vermektedir. Aynı üniversitede TBMYO Danışma Kurulu Üyesi olarak görev yapmaktadır. Memleketine olan bağlılığını her fırsatta vurgulayan Ülker, Artvinliler Hizmet Vakfı yönetim kurulu üyeliğiyle de sosyal sorumluluk faaliyetlerine katkı sunmaktadır.