T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BIM – IOT ENTEGRASYONU TABANLI BİR DİNAMİK TERMAL KONFOR MODELİ ÖNERİSİ: KONUT YAPISI ÖRNEĞİ

Mehmet Zahid ÇIKRIKCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Fiziği Programı

Danışman

Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK

Mart, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BIM-IOT ENTEGRASYONU TABANLI BİR DİNAMİK TERMAL KONFOR MODELİ ÖNERİSİ: KONUT YAPISI ÖRNEĞİ

Mehmet Zahid ÇIKRIKCI tarafından hazırlanan tez çalışması 13.03.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Fiziği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Gülay Zorer Gedik
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Suzi Dilara MANGAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Gül KOÇLAR ORAL, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "BIM-IoT Entegrasyonu Tabanlı Bir Dinamik Termal Konfor Modeli Önerisi: Konut Yapısı Örneği" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mehmet Zahid ÇIKRIKCI

İmza

Canım aileme,

TEŞEKKÜR

Öncelikle, danışman hocam Prof. Dr. Gülay Zorer Gedik'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik rehberliği, desteği ve yol göstericiliği sayesinde bu çalışmayı tamamlayabildim. Ayrıca, Yapı Fiziği Kürsüsü'ndeki uzmanlık alanıma ilgimi şekillendiren ve temel oluşturan değerli hocalarıma da teşekkür ederim. Bu kürsüde aldığım dersler benim için çok kıymetliydi.

Maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan anneme, babama ve aileme sonsuz teşekkür ederim. Sabırları, sevgileri ve teşvikleri olmasaydı bu süreçte ilerlemek çok daha zor olurdu.

Tez çalışmam süresince bana destek olan ve fikirleriyle katkı sağlayan değerli arkadaşlarıma da ayrıca teşekkür ederim. Birlikte geçirdiğimiz zaman ve paylaştığımız bilgiler, çok disiplinli bir alanda çalışan araştırmacı olarak benim için çok anlamlıydı.

Mehmet Zahid ÇIKRIKCI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 4

1.2 Tezin Amacı 9

1.3 Hipotez 10

2 TEMEL KAVRAMLAR 11

2.1 Termal Konfor Kavramı 11

2.1.1 İç Mekan Çevre Kalitesi ve Termal Konfor Tanımı ve Önemi 11

2.1.2 Termal Konfor Modelleri 12

2.1.3 Fanger Modeli (PMV/PPD – Statik Model) 14

2.2 Yapı Bilgi Modellemesi 17

2.2.1 BIM ve Kullanım Alanları 18

2.2.2 BIM Yazılımları 21

2.2.3 BIM Uygulama Programlama Arayüzü ve Araçları 22

2.3 Nesnelerin Interneti ve BIM-IoT Entegrasyonu 23

2.3.1 Nesnelerin İnterneti Tanımı 23

2.3.2 BIM-IoT Aygıtları Entegrasyonu ve Kullanım Alanları 24

3 MODELİN METODOLOJİSİ 26

3.1 Çalışmanın Metodolojisi 26

3.2 Aşama 1- IoT Modülünün Kurulması 28

3.2.1 IoT Aygıtının Donanımsal Kurulumu 28

3.2.2 Arduino UNO Microkontrol Kartı 31

3.2.3 DHT22 Sıcaklık ve Nem Sensörü 32

3.2.4 ESP32 WiFi Modülü 33

3.3 Aşama 2 – Veri Tabanının Tasarlanması 34

3.3.1 Veri tabanı seçimi 34

3.3.2 IoT Verileri için MongoDB Veri Tabanı Tasarlama Süreci 36

3.4 Aşama 3 – BIM Modelinde Termal Çevreyi Gerçek Zamanlı İzleme, Görselleştirme ve Optimizasyon 36

3.4.1 DynamoBIM Ortamındaki Genel Sürecin Açıklanması 36

3.4.2 Yüzeylerin Oluşturulması 37

3.4.3 Veri Tabanına Bağlantının Kurulması 38

3.4.4 Her Oda İçin İlgili Hesapların Yapılması 40

4 MODELİN UYGULANMASI: BULGULAR VE ANALİZ 50

4.1 Genel Bilgiler 50

4.1.1 Proje Bilgileri, Konum 50

4.1.2 Örnek Dairenin Kat Planı ve BIM Modeli 51

4.1.3 Örnek Dairenin İklimlendirme Sistemi 52

4.1.4 IoT Modülünün Seçilen Daireye Yerleşimi 52

4.2 Senaryolar 53

4.3 Modelin Uygulanması 55

4.3.1 T1 Zamanı- Senaryo 1 55

4.3.2 T1 Zamanı- Senaryo 2 56

4.3.3 T2 Zamanı- Senaryo 1 57

4.3.4 T2 Zamanı- Senaryo 2 58

4.3.5 T2 Zamanı- Senaryo 3 59

4.4 Bulguların Değerlendirilmesi 60

5 SONUÇ **63**

5.1 Çalışmanın Sınırlılıkları 65

5.2 Gelecekteki Çalışmalar ve Öneriler 65

KAYNAKÇA **67**

EK A: ARDUINO UNO MİKROKONTROL KARTININ KURULUMUNUN AÇIKLANMASI **76**

EK B: DHT22 SICAKLIK VE NEM SENSÖRÜNÜN KURULUMUNUN AÇIKLANMASI **77**

EK C: ESP32 WiFi MODÜLÜNÜN KURULUMUNUN AÇIKLANMASI **81**

EK D: VERİ TABANI VE HTTP SUNUCUSUNUN TASARIM SÜRECİNİN AÇIKLANMASI **85**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **93**

SİMGE LİSTESİ

AV	Air Velocity
AT	Air Temperature
clo	Clothing Insulation
MRT	Mean Radiant Temperature
met	Metabolic Equivalent of Task
RH	Relative Humidity

KISALTMA LİSTESİ

ASHRAE	American American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AEC	Architecture, Engineering, and Construction
AECO	Architecture, Engineering, Construction, and Operations
ANN	Artificial Neural Network
API	Application Programming Interface
BIM	Building Information Modelling
CDE	Common Data Environment
CAD	Computer Aided Design
DT	Digital Twin
GNN	Graph Neural Network
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
IAQ	Indoor Air Quality
IEQ	Indoor Environmental Quality
IOT	Internet of Things
MSE	Mean Squared Error
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 PMV termal konfor ifadelerinin renkli cetveli **16**
Şekil 2.2 PMV-PPD ilişkisi **16**
Şekil 2.3 BIM'den dijital ikizlere beş seviyeli olgunluk taksonomisi [62] **18**
Şekil 3.1 BIM-IoT tabanlı dinamik termal konfor modelinin mimarisi **27**
Şekil 3.2 DHT22 sıcaklık ve nem sensörünün pinleri **28**
Şekil 3.3 IoT aygıtının donanımsal kurulumu **29**
Şekil 3.4 Arduino Uno bağlantı şeması **31**
Şekil 3.5 BIM modelinde genel süreci gösteren dynamo kod grupları **37**
Şekil 3.6 Oda yüzeylerini oluşturan Dynamo düğüm grubu **37**
Şekil 3.7 Oda yüzeyi için oluşturulması gereken parametreler **38**
Şekil 3.8 Dynamo üzerinden veritabanına erişim ve veri çekme işlemi **39**
Şekil 3.9 Dictionary elemanlarını sıralayan Python script'i **39**
Şekil 3.10 Veritabanından gelen verileri kullanılabilir formata dönüştüren dynamo düğüm grubu **40**
Şekil 3.11 Her oda için yapılan işlemleri gösteren Dynamo düğüm grupları **41**
Şekil 3.12 Sıcaklık, nem, met ve clo değerlerinin elde edilmesi **41**
Şekil 3.13 Bson'dan string'e, string'den double'a veri dönüşümü yapan kodlar **42**
Şekil 3.14 PMV ve optimum sıcaklık hesabı yapan Dynamo düğümleri **42**
Şekil 3.15 PMV hesaplaması yapan python kodu **43**
Şekil 3.16 Optimum sıcaklık hesabı yapan python kodu 1 ..... **44**
Şekil 3.17 Optimum sıcaklık hesabı yapan python kodu 2 ..... **44**
Şekil 3.18 Optimum sıcaklık hesabı yapan python kodu 3 ..... **45**
Şekil 3.19 Oda yüzey parametrelerine ilgili değerlerin yazılmasını gösteren Dynamo düğüm grubu **46**
Şekil 3.20 String'ten float'a veri dönüşümü yapan python kodu **46**
Şekil 3.21 Yüzeylere parametrelerin yazılması **47**
Şekil 3.22 IoT aygıtının BIM nesnesi ve parametrelerinin yazılması **47**
Şekil 3.23 PMV görselleştirilmesini yapan Dynamo düğümleri **48**
Şekil 3.24 Mevcut PMV için RGB renk kodlarını hesaplayan python kodu **48**

Şekil 4.1 Yapının konumuna ait uydu görüntüsü **50**
Şekil 4.2 Çalışmanın gerçekleştirildiği bina ve daire **50**
Şekil 4.3 Seçilen dairenin kat planı ve yönelimi **51**
Şekil 4.4 Seçilen dairenin BIM modeline ait üç boyutlu kat planı **51**
Şekil 4.5 IoT aygıtının ve sensörlerin daireye yerleşimi **52**
Şekil 4.6 Modelin uygulandığı senaryolar **53**
Şekil 4.7 T1 zamanı senaryo 1 için yapılan ölçümün sonuçları **55**
Şekil 4.8 T1 zamanı senaryo 2 için yapılan ölçümün sonuçları **56**
Şekil 4.9 T2 zamanı senaryo 1 için yapılan ölçümün sonuçları **57**
Şekil 4.10 T2 zamanı senaryo 2 için yapılan ölçümün sonuçları **58**
Şekil 4.11 T2 zamanı senaryo 3 için yapılan ölçümün sonuçları **59**
Şekil 4.12 Tüm senaryolar için hesaplanan PMV değerleri **61**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 BIM-IoT tabanlı dinamik termal konfor modelleri..... **6**
Tablo 2.1 ASHRAE VE ISO 7730 standartlarında termal his ifadeleri..... **16**
Tablo 2.2 BIM yazılımları, özellikleri ve birbirinden farkları **21**
Tablo 3.1 Arduino Uno R3 teknik özellikler **32**
Tablo 3.2 DHT22 sıcaklık ve nem sensörü teknik özellikler..... **33**
Tablo 4.1 Hacimlerin işlevlerine göre seçilen aktiviteler ve met değerleri **54**

ÖZET

BIM-IoT Entegrasyonu Tabanlı Bir Dinamik Termal Konfor Modeli Önerisi: Konut Yapısı Örneği

Mehmet Zahid ÇIKRIKCI

Mimarlık Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Gülay Zorer GEDİK

Bina sektörü küresel enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır ve bunun önemli bir kısmı (%18) mevcut konut binalarından kaynaklanmaktadır. Bu enerji tüketimi, öncelikle bina sakinlerinin iç mekan termal konforunu sağlamak için kullanılan HVAC (Isıtma, Havalandırma, İklimlendirme ve Soğutma) sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, optimum termal konfor sağlayan enerji etkin iç mekan sıcaklıklarının sağlanması, HVAC sistemlerinin etkin kullanımı için oldukça önemlidir.

Bu tezde, konut binalarında iklimlendirme sistemlerinin verimli kullanılmasını sağlamak için BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) ve IoT (Nesnelerin İnterneti) entegrasyonuna dayalı dinamik bir termal konfor modeli geliştirilmekte ve konut binası örneğinde çalışılmaktadır. Bu entegrasyon, IoT sensörleri tarafından toplanan çevresel verilerin (sıcaklık ve nem gibi) gerçek zamanlı akışı ile birlikte BIM'in geometrik ve parametrik özelliklerinden yararlanmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, BIM platformlarının programlanabilirliği (API [Uygulama Programlama Arabirimi] aracılığıyla), modelin değişen termal konfor koşullarına ve parametrelerine uyum sağlayacak şekilde tasarlanmasını sağlamaktadır.

Çalışmada, mevcut bir konut binası, modeli test etmek için örnek olarak seçilmiştir. IoT sensörleri belirli bir düzende yerleştirilmiş ve bu sensörlerden toplanan veriler binanın BIM modeli ile entegre edilmiştir. Bu veriler API aracılığıyla algoritmik işleme tabi tutularak termal konfor koşulları PMV (Öngörülen Ortalama Oy) endeksi kullanılarak izlenmiş ve optimum termal konforu sağlamak için gerekli sıcaklık değerleri hesaplanmıştır.

Çalışmada geliştirilen model, konut yapılarındaki kullanıcı kaynaklı değişkenleri göz önüne alarak, bir konut yapısının gerçek zamanlı dinamik termal konforunun zamana bağlı olarak önizlenmesini sağlamıştır. Bu sayede konut yapılarının, eş zamanlı farklı konfor değerlerine sahip hacimlerden kaynaklanan ve oldukça zıtlık gösteren bir dinamik termal konfor desenine sahip olduğuna ve bu durumu göz önünde bulundurmayan iklimlendirme sistemlerinin yönetiminin, konfor aralıkları içinde gereksiz enerji tüketimine neden olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Çalışmada geliştirilen modelin, konut binalarında enerji verimli ve kullanıcı odaklı iklim kontrol çözümlerine ve akıllı bina uygulamalarına bir temel oluşturması amaçlanmıştır. Ek olarak, gelecekteki potansiyel çalışmalar için öneriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapı bilgi modellemesi, nesnelerin interneti, dinamik termal konfor, BIM-IoT entegrasyonu, HVAC

ABSTRACT

A Dynamic Thermal Comfort Model Proposal Based on BIM-IoT Integration: A Case Study on a Residential Building

Mehmet Zahid ÇIKRIKCI

Department of Architecture

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK

The building sector accounts for around 40% of global energy consumption, a significant portion of which (18%) comes from existing residential buildings. This energy consumption is primarily driven by HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration) systems used to provide indoor thermal comfort for building occupants. Therefore, ensuring energy efficient indoor temperatures that provide optimum thermal comfort is crucial for the effective utilization of HVAC systems.

In this thesis, a dynamic thermal comfort model based on BIM (Building Information Modeling) and IoT (Internet of Things) integration is developed and studied in the case of a residential building to ensure efficient use of HVAC systems in residential buildings. This integration aims to exploit the geometric and parametric properties of BIM, together with the real-time flow of environmental data (such as temperature and humidity) collected by IoT sensors. Furthermore, the programmability of BIM platforms (via API [Application Programming Interface]) allows the model to be designed to adapt to changing thermal comfort conditions and parameters.

In the study, an existing residential building was chosen as an example to test the model. IoT sensors were placed in a specific layout and the data collected from these sensors was integrated with the BIM model of the building. This data was subjected to algorithmic processing via API and thermal comfort conditions were monitored using the PMV (Predicted Mean Vote) index and the temperature values required to provide optimum thermal comfort were calculated.

This study provides a time-dependent preview of the real-time dynamic thermal comfort of a residential building, considering the user-induced variables in residential buildings. In this way, it was concluded that residential buildings have a highly contrasting dynamic thermal comfort pattern resulting from volumes with different simultaneous comfort values and that HVAC management that does not take this into account causes unnecessary energy consumption within comfort ranges.

The model developed in the study is intended to provide a basis for energy efficient and user-centric climate control solutions and smart building applications in residential buildings. In addition, it provides recommendations for potential future studies.

Keywords: Building information model, internet of things, dynamic thermal comfort, BIM-IoT integration, HVAC

1
GİRİŞ

Günümüz dünyasında, küresel ısınma, iklim değişikliği, enerji kaynaklarının tükenmesi ve ağır çevresel etkiler gibi pek çok yaygın endişenin temel kaynağı artan enerji tüketimidir ve bu tüketimin başrolünde yaşadığımız binalar yer almaktadır. Binalar, yaşam alanlarımız olmasının yanısıra, dünyanın enerji kaynaklarını en fazla tüketen unsurlardan biridir. İstatistiklere göre, dünya genel enerji tüketiminin yaklaşık %40'ı bina sektöründen kaynaklanmaktadır [1]. Bu tüketimin %18'ini mevcut betonarme konut yapıları oluşturmaktadır [2]. Türkiye'de de durum benzerdir. 2024 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'na göre, bina ve hizmet sektörü toplam enerji tüketiminin %32,6'sıyla, en yüksek paya sahip sektördür [3].

Binalardaki bu enerji tüketiminin %40-60'lık bir kısmı ise, işletme aşamasında ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemleri tarafından gerçekleştirilmektedir [4]. Bu enerji tüketim oranı, bu sistemlerin etkin kullanımını kritik hale getirmektedir. İklimlendirme sistemlerinin temel işlevi, iç mekân hava kalitesini optimize etmek ve kullanıcıların termal konforunu sağlamaktır [5]. Ancak bu işlevi yerine getirirken sistemin hassas kullanımı oldukça önemlidir. Yapılan bir çalışmada, 1°C'lik bir sıcaklık farkının, enerji tüketimini üç saat içinde 26,84 kWh'den 25,10 kWh'ye düşürdüğü gösterilmiştir [6]. Başka bir araştırmada ise, 1°C'lik farkın günlük HVAC enerji tüketiminde %5 tasarruf sağladığı gözlemlenmiştir [7]. Bu yüzden, HVAC sistemlerinin optimum enerji kullanımıyla işletilmesi önem taşımakta olup, bu konuda birçok akademik çalışma yapılmaktadır [8].

Modern binalarda çevresel ve ekonomik bir zorluk olarak ortaya çıkan bu konudaki araştırmalar, enerji açısından verimli iç mekan sıcaklıklarının elde

edilmesi ve bina sakinlerinin konforunun korunması için oldukça önemlidir. Son yıllarda, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) birlikte kullanımının ortaya çıkması ve giderek gelişmesi, binalarda enerji etkinliğine ulaşma ve termal konfor koşullarını iyileştirme potansiyelini önemli ölçüde artırmıştır. BIM ve IoT kombinasyonu, gerçek zamanlı verilerin toplanması ve analiz edilmesini sağlayarak bina performansını iyileştirme olanağı sunmaktadır [9]. Bununla birlikte, bu teknolojilerin optimum entegrasyonu ve dinamik termal konforun etkili ve tutarlı bir şekilde görselleştirilmesi ve yönetilmesi ile ilgili belirsizlikler devam etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, konut yapıları için BIM-IoT tabanlı bir dinamik termal konfor modeli geliştirilmektedir. Yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda, mevcut yöntemlerin genellikle sabit koşullar altında çalıştığı, gerçek zamanlı değişiklikleri ve bina tipolojisine göre değişmesi gereken özelleştirmeleri yeterince dikkate almadığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda, dinamik değişimlere ve kullanıcı ihtiyaçlarına yeterince yanıt verilememektedir. Özellikle konut gibi eş zamanda farklı işlevlerin gerçekleştiği birden çok hacme ve kullanıcı çeşitliliğine sahip yapılarda, termal konforu önemli düzeyde etkileyen metabolik aktivite ve giysi yalıtımı parametrelerinin değişken değer alabilmesi, daha tutarlı bir termal konfor modeli geliştirmek için önem arz etmektedir. Bu çalışma, BIM ve IoT teknolojilerini kullanarak konut yapılarındaki kullanıcıların dinamik değişimlerine yanıt veren ve bu yapılar üzerinde çalışılmış ilk dinamik termal konfor çalışmalarından biridir. Bu nedenle çalışma, bu alandaki önemli bir boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

Çalışmada mevcut bir konut yapısı örnek olarak seçilmiştir. Bu yapıya belirli bir düzen içinde internete bağlanabilen sıcaklık ve nem sensörleri yerleştirilmiş ve bu sensörlerden gelen veriler, yapının BIM modeline entegre edilmiştir. BIM platformumunun, Autodesk Revit üzerinde çalışan görsel programlama platformu Dynamo aracılığıyla API (Uygulama Programlama Arayüzü) üzerinden programlanabilmesi sayesinde, sensörlerden gelen veriler algoritmik işlemlere tâbi tutulmuştur. Bu sayede kullanıcı odaklı dinamik değişimlere uyum sağlaması ve anlık termal konfor modelinin izlenebilmesi ve optimize edilebilmesi sağlanmıştır.

Bu tez, konut yapıları için BIM-IoT tabanlı tutarlı bir dinamik termal konfor modelinin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Çalışmanın hipotezi, BIM-IoT entegrasyonuna dayalı dinamik termal konfor modelinin, metobolik aktivite, giysi yalıtım gibi kullanıcı kaynaklı termal konfor parametrelerine dinamik olarak uyum sağlayabileceği, mevcut termal konforun izlenebileceği ve gerekli optimum sıcaklığın hesaplanabileceği varsayımına dayanmaktadır.

Çalışma dört bölümden oluşmaktadır: Birinci bölüm, yapılan çalışmanın genel hatlarını özetleyen giriş bölümüyle başlamaktadır. Sonrasında, çalışma boyunca yapılan kapsamlı literatür taramasında konunun tarihsel süreç içindeki gelişimi açıklanmış ve yapılan çalışmanın literatürdeki yeri ile eksiklikleri ele alınmıştır. Ardından, alandaki mevcut problemler, kullanılan yöntemlerin sınırlılıkları ve çalışılan konunun önemi tartışılmıştır. Ek olarak, tezin amacı ve hipotezi belirtilmiştir.

İkinci bölümde, çalışmanın arka planını oluşturan termal konfor, yapı bilgi modellemesi (BIM), nesnelerin interneti (IoT) ve bu kavramların birbirleriyle ilişkisini ele alan BIM-IoT entegrasyonunun kullanım alanları gibi temel konular açıklanmıştır. Ayrıca, önerilen modelin temel dinamiklerini oluşturan bazı önemli bilgiler bu başlıklar altında vurgulanmıştır.

Üçüncü bölümde, modelin uygulandığı yapıya ait veriler paylaşılmış ve önerilen modelin metodolojisine ait tüm teknik detaylar, rehber olması amacıyla, adım adım açıklanmıştır.

Dördüncü, açıklanan metodoloji çerçevesinde geliştirilen modelin uygulanmasına ait bilgiler bulunmaktadır. Uygulamada, üç saatlik zaman dilimi aralığında, konutun ısıtma sistemi mevcut operasyona göre nispeten yükseltilerek, sabit bir şekilde çalıştırılmıştır. Başlangıç ve bitiş zamanlarında, konut yapılarındaki giysi yalıtımı ve metobolik aktivite gibi dinamik değişkenleri temel alan toplam beş farklı senaryo kapsamında ölçümler yapılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır.

Beşinci bölümde, yapılan çalışmanın sonuçları detaylı bir şekilde değerlendirilmiş, çalışmanın sınırlılıkları belirtilmiştir. Ayrıca, konuyla ilgili gelecekteki çalışma alanları ve bunların potansiyellerine dair önemli araştırma önerileri sunulmuştur.

1.1 Literatür Özeti

"Ölçülen şey yönetilir." - Peter Drucker [10].

Günümüzde insan medeniyetine en büyük tehdit olarak görülen iklim değişikliği, temelde insan faaliyetlerinin bir sonucudur [11]. Özellikle endüstri devriminden sonra artan, fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan yeşil sera gazları, küresel sıcaklıkların artışında en önemli etken olarak görülmektedir. Bu sebeple, günlük hayatın her alanında kullanılan fosil yakıt kaynaklı enerji tüketiminin kontrol edilmesi, azaltılması ve yenilenebilir alternatiflerle değiştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Yapılı çevre ve Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat Sektörü'nün (Architecture, Engineering and Construction Industry [AEC]) küresel enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını oluşturması ve karbondioksit salınımının %30'dan sorumlu olması, onu en büyük küresel sera gazı salınıcımsı yapmaktadır [12-14]. Bu durum küresel ölçekte araştırma topluluklarını; hem yeni binaların tasarım ve inşaat aşamasında enerji performansını artırmaya yönelik hem de mevcut binaların yenilenmesine ve enerji sistemlerinin (HVAC ve elektrik sistemleri) etkin bir şekilde kullanımına yönelik çalışmalara yönlendirmektedir.

Binaların enerji tüketimi yaşam döngüsü çerçevesinde incelendiğinde, bina işletme aşamasının, bütün döngü boyunca toplam enerji tüketiminin %84'ünü oluşturduğu belirtilmiştir [14-15]. Bu tüketimin temelinde, işletme aşamasında, kullanıcılar tarafından aktif olarak kullanılan ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri (HVAC) ve elektrikli cihazlar yatmaktadır. Yapılan bir çalışmada HVAC sistemlerinin, küresel anlamda bina enerji tüketiminin yaklaşık %40-60'ını oluşturduğu belirtilmektedir [4]. Bu durum binaların işletme aşamasında, bu sistemlerin enerji etkin kontrol ve optimizasyonunu önemli hale getirmektedir. Bu bağlamda, dünya genelinde enerji ile ilgili bina mevzuat ve düzenlemelerinde de bir artış söz konusudur. Örneğin, Avrupa Binalarda Enerji Performansı Direktifi (EPBD/2014), bina yönetmelikleri aracılığıyla, binalarda akıllı ön ölçümü ve aktif kontrol sistemlerini teşvik etmektedir.

Bina tasarım ve planlama aşamalarında, tasarımcılar genellikle bina enerji simülasyonu için EnergyPlus [16], Climate Consultant [17] gibi bağımsız yazılımlar ve bunların BIM tabanlı karşılıkları olan Bentley AECOsim Energy

Simulator [18], Autodesk Insight 360 ve Safaira [19] gibi sürümler kullanmaktadır [20]. Bu yazılımlar genellikle tasarım aşamasında sabit kullanıcı parametrelerini göz önüne alarak, kısa ve uzun dönem zaman aralıkları için binaların enerji tüketimini analiz etmektedir. Fakat gerçekte, insanlar dinamik bir ortamda yaşamaktadır. Bu sebeple ne iç ortamlar ne de bina sakinleri statiktir. Bu durum, gerçek zamanlı koşullar temelinde bina enerji performansını simüle etmeyi zorlaştırmaktadır. Barthelmes ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada da bu duruma değinilmektedir. Binalardaki enerji verimliliğinin yalnızca enerji verimli teknik çözümlere ve bina özelliklerinin tasarımına bağlı olmadığı, aynı zamanda bina sakinlerinin konfor kriterlerini nasıl belirlediklerine ve enerji ile ilgili çevresel yaşam tarzlarına büyük ölçüde bağlı olduğu belirtilmiştir [21].

Galvin de çalışmasında, benzer bir noktaya temas etmektedir. Politika yapıcıların, bina enerji tasarrufuyla ilgili politikalarında beklenen sonuçları elde edemediğini belirtmektedir. Bu durumun temel nedeni olarak; çoğu enerji standardının yalnızca yeni binalara yönelik olmasını ve mevcut binalardaki yüksek enerji tüketimi sorununun yeterince ele alınmamasını göstermektedir. Enerji standartlarını ve politikalarını mevcut binalar için daha etkili hale getirmenin bir yöntemi olarak; yeni ve verimli teknolojiler geliştirmeyi ve kullanmayı önermektedir [22].

Mevcut binaların tahmin edilenden fazla ve gereksiz enerji tüketimi sorununun arkasında; binalar faaliyete geçtikten sonra, kullanıcıların çeşitli profilleri ve adaptif davranışlarından dolayı birbirlerinden oldukça farklılaşması ve bunların anlık olarak takip edilememesi yatmaktadır. Bu durum; ısıtma, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinin karmaşık ve gereksiz kullanımına neden olmaktadır. Gittikçe dijitalleşen dünyamızda, teknolojinin gelişimiyle ortaya çıkan bir sistem olan Nesnelerin İnterneti (IoT), bu soruna güçlü yaklaşım sunmaktadır. Nesnelerin İnterneti, bina işletmelerini iyileştirmek ve sakinler için en iyi deneyimleri sağlamak amacıyla doğru, gerçek zamanlı ve yararlı bilgilerin sunulmasını sağlamaktadır [23]. Bu nedenle birçok akademisyen, farklı binaların mimari alanlarını daha hassas bir şekilde izlemek, hatta çevresel ekipmanlarını kontrol etmek için IoT teknolojisini kullanmaya çalışmaktadır [24].

Bazı araştırmacılar, akıllı binalarda, IoT özellikli Pasif Kızılötesi (PIR), giyilebilir (kol saati), hava sıcaklığı gibi sensörler aracılığıyla, enerji tüketimi ve termal

konforun birleşik analizini yaparak, iç mekanın çevre kontrolünü optimize etmeye çalışmışlardır [25,26].

Son yıllarda ortaya çıkan, kullanıcı merkezli dinamik çevre kontrolünde kullanılan bir yaklaşım ise Yapı Bilgi Modellemesinin (BIM) Nesnelerin İnterneti (IoT) ile entegrasyonudur. BIM modellerinin geometrik ve parametrik bilgileri ile IoT sensörleri tarafından toplanan gerçek zamanlı çevresel verilerin entegrasyonu yeni bir araştırma alanıdır ve özellikle tesis ve enerji yönetimi gibi konularda güçlü bir paradigma sunmaktadır [27].

Yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda, BIM-IoT entegrasyonuna dayalı dinamik termal konfor modellerinin; geliştirilen modelin amacı, kapsamı, uygulandığı yapı türü, sensör tipi, değerlendirmede kullanılan konfor indeksi ve değişken parametre olup olmadığına göre çeşitlendiği gözlemlenmektedir. Tablo 1'de, yapılan çalışmalar bu kategoriler çerçevesinde paylaşılmıştır.

Tablo 1.1 BIM-IoT tabanlı dinamik termal konfor modelleri

Yazar / Yıl	**Kapsam**	**Bina Türü**	**Sensör Tipi**	**Konfor İndeksi**	**Değişken Parametre**
(Wu ve diğ., 2019)	-Veri İzleme -Operasyon -Enerji Tahmini	Konferans Salonu	Sıcaklık, Nem, CO2	PMV, Kullanıcı Geri Bildirimli	met
(Ma ve diğ., 2019)	-Veri İzleme	Okul	Sıcaklık, Nem, Hava Hızı	PMV, Kullanıcı Geri Bildirimli	met clo
(Al-adhami ve diğ., 2020)	-Veri İzleme -Enerji Tahmini	Lisansüstü Ofis	Sıcaklık, Nem, Hava Hızı	PMV, Sabit	Yok
(Valinejadshoubia ve diğ., 2020)	-Veri İzleme -Operasyon	Ofis	Sıcaklık, Nem	ASHRAE Standart 55, Operasyonel Sıcaklık	Yok
(Zahid ve diğ., 2020)	-Görselleştirme -Operasyon	Ofis	Sıcaklık, Nem	PMV, Sabit	Yok

Tablo 1.2 BIM-IoT tabanlı dinamik termal konfor modelleri (devamı)

(Shahinmoghadam ve diğ., 2021)	-Görselleştirme -Veri İzleme	Stüdyo Daire	Sıcaklık, Nem, Kızılötesi Sensör	PMV, Kullanıcı Geri Bildirimli	met clo
(Kanna ve diğ., 2022)	-Görselleştirme -Operasyon	Ofis	Sıcaklık, Nem	PMV, Kullanıcı Geri Bildirimli	met clo
(Zhang ve diğ., 2023)	-Veri İzleme - Operasyon	Yüksek Katlı Ofis	Sıcaklık, Nem	ASHRAE Standart 55, Operasyonel Sıcaklık	Yok

Wu ve diğerleri yaptıkları çalışmada, 130 kişilik bir konferans salonunda, iç ortam konforunu doğru bir şekilde ölçmek ve iklimlendirme sistemlerinin verimiliğini artırmak için COZyBIM olarak adlandırdıkları bir model geliştirmiştir. Çalışmada internete bağlı sıcaklık, nem ve CO2 sensörü kullanılmıştır. Termal konfor indeksi olarak her kullanıcı için metabolik aktivite (MET) değeri sabit, giyim değeri (CLO) sezonluk kıyafete göre belirenen sabit PMV değeri kullanılmış ve kullanıcıdan alınan geri bildirime göre optimize edilmiştir. Yürütülen 2 saatlik zaman aralığında, optimize edilmiş PMV değerinin, sabit değere kıyaslanarak enerji tüketimi tahmini yapılmış ve tüketimin 30.5 kWh'den 26.84 kWh'ye düşürüldüğü gözlemlenmiştir [6].

Ma ve diğerleri bir okul binasında yaptıkları çalışmada, genel gruplara hitap eden PMV değeri üzerinden, kullanıcı farklılıklarından kaynaklı adaptif sapmaları hesaplayabilmek için kullanıcıdan geri bildirim alan Yapay Zeka Sinir Ağı (ANN) tabanlı bir model geliştirmiştir. Çalışmada, kullanıcılardan toplam 10 geri bildirim alınmıştır. 0.001 Ortalama Kare Hatasına (MSE), 10 iterasyonda ulaşılmıştır. Sonrasında ulaşılan adaptif PMV değeri üzerinden enerji tüketimi analizi yapılmıştır [28].

Al-Adhami ve diğerleri, Huddersfield Üniversitesi lisansüstü ofisinde yaptıkları çalışmada, sıcaklık, nem ve hava hızı sensörlerinden gelen gerçek zamanlı veriler ile BIM ve EnergyPlus entegrasyonuna dayalı bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada clo değeri kış ve yaz mevsimi için sezonluk olarak, met değeri hacmin fonksiyonuna uygun olacak şekilde sabit alınmıştır. BIM platformundan ve sensörlerden gelen veriler aracılığıyla hesaplanan PMV değerine göre, enerji

tahmini yapan makine öğrenmesi algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma ile yapılan tahmin sonuçları, EnergyPlus simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanarak modelin doğruluğu test edilmiştir [29].

Valinejadshoubia ve diğerleri yaptıkları çalışmada, ASHRAE Standard 55'te önerilen kabul edilebilir işletme sıcaklığına göre, BIM-IoT tabanlı termal konfor sıcaklık aralığını izleyen, kayıt alan ve gerçek zamanlı alarm sistemi olarak işlev gören bir sistem geliştirmiştir [30].

Zahid ve diğerleri çalışmasında, "DynamicPMV" olarak adlandırdıkları model geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, bir ofisin BIM modelinde tüm ofis alanının birer metrekarelik voksel alanları için canlı olarak PMV değerlerinin görselleştirmesini sağlamıştır. Çalışmada, sıcaklık ve nem verisi sensörlerden, met ve clo değerleri ofis işlevine uygun olacak şekilde sabit alınmıştır. BIM modelindeki duvarların termal özelliklerinden yararlanarak, hacimler arası ısı geçişi geçişi hesaplanmış ve enterpolasyon algoritmasıyla bu ısının her bir voksele etkisiyle oluşan yeni sıcaklık değerlerine göre PMV değeri hesaplanıp görselleştirilmiştir [31]. Kanna ve arkadaşları ise, geliştirdikleri MyComfort adlı mobil uygulama ile Zahid ve arkadaşlarının geliştirdiği DynamicPMV modelini kullanıcıyla interaktif hale dönüştürmüştür. Çalışmada, met, clo değerleri ve mevcut termal konforla ilgili geri bildirimler mobil uygulama aracılığıyla kullanıcılardan alınarak, makine öğrenmesi algoritmasıyla her birey için uygun konfor değerleri; kullanıcının bölgesine ve tercihine duyarlı bir şekilde hesaplanıp ve görselleştirilmiştir [32].

Shahinmoghadam ve diğerleri yaptıkları çalışmada, BIM, IoT ve Sanal Gerçeklik (VR) teknolojilerinin yardımıyla, bir konut yapısında, ASHRAE Standart 55'te önerilen PMV-PPD tabanlı termal konfor durumlarını canlı izlemek için yeni bir sistem örnemiştir. Kullanıcılar geliştirilen sistemi kullanarak, binanın sanal ortamında gezinebilmekte, hacme ait bölgelerde konfor koşullarının kendisine uygunluğunu izleyebilmektedir. Ayrıca, VR kullanıcı arayüzünden ilgili kişisel parametleri (örneğin, giysi yalıtım seviyesi, metabolizma hızı) değiştirebilmekte ve bu sayede IoT sensörlerinden sürekli olarak akan canlı gerçek verilerin bir kombinasyonuna dayalı olarak termal hislerdeki olası değişiklikleri bölgesel olarak gözlemlemek için çeşitli what-if analizleri gerçekleştirebilmektedir [33].

Zhang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, yüksek katlı bir ofis yapısında, klimalı alanlarda çevresel parametrelerin eşit olmayan mekansal dağılımlarını ele alan, merkezi klima sistemlerinin kontrolünü optimize etmek için uzamsal-zamansal veri odaklı bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, grafik sinir ağı (GNN) algoritmasıyla BIM tabanlı uzamsal-zamansal model ile ofisin sıcaklık haritası yapılmış, her bölge ASHRAE Standard 55'ında önerilen kabul edilebilir işletme sıcaklığına göre konfor aralığında tutulmaya çalışılmıştır. Önerilen modelle termal konfora ulaşma süresini %36,5'ten (mevcut kontrol stratejisi) %81,3'e çıkarmayı başarmıştır [34].

Yapılan çalışmalar kapsamlı bir şekilde incelendiğinde geliştirilen modellerin; amaç ve kapsamına, modelin uygulandığı bina türüne, ölçülen ve değerlendirilen konfor indeksinin ve alt parametlerininin kabülüne göre oldukça farklılaştığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında, diğer çalışmalardan farklı olarak, BIM-IoT tabanlı bir dinamik termal konfor modeli konut yapıları üzerinde geliştirilerek uygulanmaktadır.

Konut yapıları, sahip olduğu işlev ve kullanıcı çeşitliliği yönünden diğer yapılardan farklılaşmaktadır. Eş zamanda farklı hacimlerde gerçekleşen çeşitli faaliyetler, kullanıcıların farklı giyim alışkanlıkları, binanın kullanıcılar tarafından toplam kullanılma saati ve bundan kaynaklı olarak iklimlendirme sistemlerin aktif bir şekilde kullanımı söz konusudur. Bu durumlar göz önüne alındığında, konut yapıları için farklı bir yaklaşıma ve çalışmaya ihtiyaç duyulmaktır ve henüz hiçbir çalışmada bu duruma odaklanılmamıştır. Bu tez çalışması, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, işletme (tesis yönetimi) aşamasında kullanılmak üzere, konut yapılarındaki kullanıcı çeşitliliğinden kaynaklanan değişken termal konfor parametrelerini göz önüne alabilen, teorik olarak tutarlı ve uygulanabilir BIM – IOT entegrasyonuna dayalı bir dinamik termal konfor modeli geliştirilmesi ve bu modelin mevcut bir konut yapısında denenmesi amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

Bu tezin hipotezi, konut yapılarında farklı hacimler içerisindeki termal konfor değerlerinin, BIM-IoT teknolojisine dayalı bir yöntemle, değişken kullanıcı parametrelerine duyarlı bir şekilde görüntülenebileceği; bu modelle yapılan gerçek zamanlı bir görüntüleme ve izlemenin, konfor aralıkları içindeki gereksiz enerji kullanımı tespit edilebileceği ve mevcut termal konfor değerine bağlı olarak enerji etkin optimum sıcaklıkların anlık olarak hesaplanabileceği düşüncesine dayanmaktadır.

2
TEMEL KAVRAMLAR

2.1 Termal Konfor Kavramı

"Eski zamanlarda, binalar yokken atalarımız kışın mağarada, yazın ise kuş yuvası gibi barınaklarda yaşamayı biliyorlardı." Ayinler Kitabı – Li Yun [35].

İnsanlık tarihine bakıldığında, eski çağlardan beri insanlar, hayatta kalıp yaşamlarını idâme ettirmek için yuva olarak adlandırdıkları kapalı mekânlarda barınma ihtiyacı duymuştur. Barınmak için ilk başlarda mağaraları kullanılırken, sonrasında bu durum kayalardaki oyuntulara, taşları ve toprağı kazarak ve oyarak oluşturdukları geniş boşluklara, ağaç ve hayvan derisinden yaptıkları çadırlara doğru evrim geçirmiş, nihai olarak günümüzdeki haline, binalara, dönüşmüştür [36].

Barınma ihtiyacını sağlayan yuvalar, yüzyıllar boyunca sürekli şekil değiştirse de, temelde istenilen ihtiyaçlar ve konfor koşulları hep aynı kalmıştır. İlk zamanlarda, soğuk ve sıcak hava koşulları, güneş, rüzgar, yağmur ve kar gibi doğa olayları; modern çağda ise bunların yanında hava kirliliği ve trafik gürültüsü barınmanın arkadasındaki temel ihtiyaçları ve konfor koşullarını oluşturmaktadır. Bunların içerisinde şüphesiz en önemlilerinden birisi, insanların sosyal, maddi ve manevi yaşamını en iyi şekilde devam ettirmesini sağlayan, zihinsel ve fiziksel konforun baş aktörü, termal konfordur.

2.1.1 İç Mekan Çevre Kalitesi ve Termal Konfor Tanımı ve Önemi

İnsanlar bulundukları çevreyle, dört duyu organı aracılığıyla etkileşim halindedir. Deri aracılığıyla hissel, görme duyusuyla görsel, işitme duyusuyla akustik, ağız ve burun yani soluma aracılığıyla hava kalitesi bakımından çevresini algılamakta ve değerlendirme yapmaktadır. Bu dört ana bileşen, iç mekan çevre kalitesini (IEQ)

oluşturur: 1) Termal konfor, 2) Akustik konfor, 3) Görsel konfor ve 4) İç Mekan Hava Kalitesi (IAQ). Her bileşen, literatürde kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır [37, 38].

Bir çalışmada, IEQ faktörleri önemlerine göre sıralanmaya çalışılmış, insan sağlığı ve çevresine karşı memmuniyeti bakımından termal konforun en önemli faktör olduğu bildirilmiştir [39]. Nitekim, başka bir çalışmada da, ELSEVIER veri tabanındaki 30.000 makale kapsamında farklı IEQ anahtar kelimelerinin görülme sıklığı üzerine yapılan incelemede, termal konforun 25723 görülme sıklığı ile birinci sırada olduğu ve bunu 5346 ile iç hava kalitesi, 1568 ile görsel konfor, 212 ile akustik konforun takip ettiği gözlemlenmiştir [40].

Literatürde termal konforun insan sağlığı ve iş verimliliği üzerinde önemli etkisi olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır. Sürekli termal konfor eksikliğine maruz kalmanın, hasta bina sendromuna yol açabileceği belirtilmiştir [41]. Bir çalışmada ofis çalışanlarının, memmun oldukları termal konfor koşullarında üretkenliklerinin arttığı sonucuna varılmıştır [42]. Bu sebeple termal konfor, mimari ve mekanik tasarım ekipleri için, tasarım aşamasında önemli bir kriter olmaktadır.

Termal konfor, ASHRAE Standard 55'te "termal ortamdan memnuniyeti ifade eden ve öznel olarak değerlendirilen zihin durumu" olarak tanımlamaktadır [43]. Termal konfor üzerine yapılmış çalışmaların genel anlamda odak noktası, belirli bir termal çevreyle ilgili fiziksel değerleri neye göre konforlu olarak değerlendireceğimizi ve hangi temel unsurların ya da faktörlerin termal konforu etkileyeceğini kapsamaktadır. Bunun nedeni, iç mekân termal konforunun sağlanmasında mekanik havalandırma ve ısıtma/soğutma sistemlerinden belirli ve net değerler çerçevesinde tasarlanması ve çalıştırılması gerektiği için, mühendislik bakış açısının "termal konforun" sabit ve kesin bir koşul olduğunu belirleme eğiliminde olmasıdır [44].

2.1.2 Termal Konfor Modelleri

Bir kullanıcının bulunduğu ortamı termal anlamda değerlendirmesi; fiziksel, psikolojik ve fizyolojik faktörleri işaret eden bir bilişsel süreçtir [45]. Birçok sağlık kuruşları, kurumlar ve araştırmacılar, insanların termal olarak konforlu

yaşaması için bu faktörleri etkileyen fiziksel çevreye dair bir takım tavsiyelerde bulunmaktadırlar.

Sağlık ve Güvenlik İdaresi standartında (HSE, 2024), en yaygın kullanılan termal konfor göstergesi olarak hava sıcaklığı gösterilmiştir. Ancak, sıcaklığın diğer çevresel faktörlerle birlikte göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmiştir [44]. ASHRAE Standart-55'te ise, insanların %80'inin rahat hissedeceği, etkili ve verimli bir şekilde faaliyetlerini sürdürebileceği, genel kabul gören ortak bir sıcaklık aralığı olduğu belirtilmiş ve psikometrik tablolar ile bu aralıklar paylaşılmıştır. Kanada İş Sağlığı ve Güvenliği Merkezi (CCOHS,20224), nem seviyelerinin %30 ile %70 arasında tutulmasını önermektedir. %70'in üzerindeki seviyelerin havasızlık hissi oluşturabileceğini, %30'un altındaki seviyelerin göz ve ciltte kuruluk oluşturabileceği belirtilmiştir [46].

Araştırmacılar ise, termal konforu daha detaylı açıklayabilmek için, deneysel veri setlerine dayalı, çeşitli termal konfor modelleri üzerine çalışmışlardır. Son zamanlarda, yaş, cinsiyet, yaşam tarzı ve kültür, ortam türüne (iç mekan, dış mekan) göre farklılaşan çeşitli termal konfor modelleri geliştirilmiştir. [47].

Geçmişten günümüze baktığımızda, araştırmacılar tarafından geliştirilen modeller arasında en çok bilinen ve diğerlerine temel olan modellere; Fanger'in modeli (1970), Gagga'nın modeli (1971), iki düğümlü model (1973), Tanabe'nin modeli (1980'ler), çok düğümlü model ve UCB (University of California, Berkeley Model) modeli örnek olarak verilebilir [48]. Birbirleriyle kıyaslandığında, Fanger'in ve Gagge'in modelleri en basit olanıdır ve insan vücudundaki termal değişimi daha basit şekilde temsil etmektedir. Çok düğümlü ve UCB modelinde ise, vücut segmentleri arasındaki daha detaylı etkileşimler dikkate alınır, bu sebeple yerel koşulların değişken olduğu ortamlarda ve dinamik koşullarda daha hassas sonuçlar verebilmektedir. Tanabe'nin modeli, dinamik ve zamanla değişen faktörleri hesaba kattığı için diğer modellerden ayrılmaktadır.

İç ortamlar için en yaygın kullanılan termal model klasik Fanger modelidir. Bu model ISO 7730, ASHRAE 55-2016 ve Çin standardı GB/18049 gibi birçok uluslararası standart tarafından benimsenmiştir [49]. Fanger modelinde kullanılan termal konfor indeksi, Tahmini Ortalama Oy (PMV) olarak adlandırılmaktadır.

Birçok çalışmada, PMV indeksine dayalı HVAC sistemlerinin kullanımının enerji etkin olduğu sonucuna ulaşmıştır. Yapılan bir çalışmada, PMV tabanlı ısıtma sisteminin, yıllık %33,5 oranında enerji tasarrufu sağlayabildiği gösterilmiştir. [50]. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen dinamik termal konfor modelinde de PMV indeksi temel alınacaktır.

2.1.3 Fanger Modeli (PMV/PPD – Statik Model)

Povl Ole Fanger, 1967 yılında, 1296 Danimarkalı öğrenciyi kapsayan bir örneklem üzerinde, sabit durum koşulları altında iklim kontrolü olan odalarda bir takım testler yaparak, termal konforu sağlayan temel konfor denklemini oluşturmuştur [51,52]. Denklemdeki ana fikir, deri sıcaklığı ve buharlaşma sınırları dahilinde, vücuttaki iç ısı üretiminin dış ortama ısı kaybıyla eşit olması durumunda termal konfor dengesinin sağlanmasıdır. İnsanın iç vücut sıcaklığı 37 °C, cilt yüzeyi sıcaklığı 32-34 °C dir. Bu değerler göz önüne alınarak, dış ortamla arasındaki denge hesaplanmaktadır.

Fanger'ın termal denge denkleminde, vücudun ısı üretimi ve kaybı Denklem 1'deki gibi ifade edilir:

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} = K = R + C \quad (2\text{-}1)$$

H : İnsan vücudundaki net ısı transferi (W/m²)

$\mathbf{E_d}$: Deri yoluyla su buharı difüzyonu (W/m²)

$\mathbf{E_{sw}}$: Terleme yoluyla buharlaşma ısı kaybı (W/m²)

$\mathbf{E_{re}}$: Solunum yoluyla gizli ısı kaybı (W/m²)

K: Deri ve giysi arasındaki iletim ısı kaybı (W/m²)

R: Radyasyon yoluyla ısı kaybı (W/m²)

C: Konveksiyon yoluyla ısı kaybı (W/m²)

Fanger 1970 yılında, sabit-durum konfor modelleri arasında en yaygın kullanılan ve birçok standarta temel olan PMV indeksini, bu temel denklem üzerinden geliştirmiştir [53]. Uluslararası standartlarda PMV, "büyük bir grup insanın yedi puanlık termal his ölçeğindeki oylarının ortalama değerini tahmin eden bir endeks" olarak tanımlanmaktadır. Denklem 1'deki değerler göz önüne alarak, PMV indeksinin hesaplanmasını gösteren Denklem 2 aşağıda paylaşılmıştır.

$PMV = (0.303e^{-0.0036M}+0.028)$ x {M - 3.05 x 10^{-3} x (5733 - 6.99M - P_a) - 0.42 x (M - 58.15) - 1.7 x 10^{-5} x M x (5867 - P_a) - 0.0014 x M x (34 - t_a) - 3.96 x 10 f_{cl} x [$(t_{cl}+273)^4$ - $(t_r + 273)^4$] - $f_{cl}\ x\ h_c\ x\ (t_{cl} - t_a)$ }

(2-2)

M : Metabolik Oran (W/m²)

$\boldsymbol{f_{cl}}$ **:** Kıyafet Durumu

$\boldsymbol{P_a}$ **:** Su Buharı Basıncı

$\boldsymbol{t_a}$ **:** İç Mekan Hava Sıcaklığı

$\boldsymbol{t_{cl}}$ **:** Kıyafet Yüzey Sıcaklığı (°C)

$\boldsymbol{t_r}$ **:** Ortalama Işınımsal Sıcaklık (°C)

$\boldsymbol{h_c}$ **:** Konveksiyon Isı Transfer Katsayısı (W/m²K)

Fanger daha sonra PMV indeksinin hesaplanmasını ve uygulanmasını kolaylaştırmak için, insan vücudu ile çevre arasındaki termal dengeyi etkileyen Denklem 3'teki altı temel parametreyi belirlemiştir:

$$f(\text{AT, MRT, AV, RH, MET, CLO}) = 0 \qquad (2\text{-}3)$$

Bu parametreler çevresel ve kişisel olmak üzere iki grupta toplanmaktadır.

Çevresel parametreler;

- Ortam Sıcaklığı (AT)
- Işınımsal Sıcaklık (MRT)
- Bağıl Nem (RH)
- Hava hızı (AV)

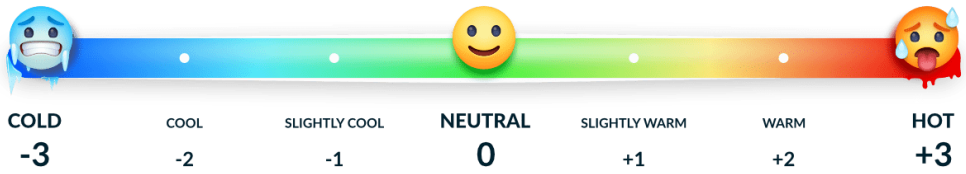
Kişisel parametreler;

- Metobolizma Hızı (MET)
- Giyim Yalıtımı (CLO)

şeklindedir.

Nihayetinde bu değerler fonksiyona girildiğinde, cilt sıcaklığı ve terleme oranı sınırları içinde, -3 ile +3 değer aralığında aldığı değere göre, kişinin bulunduğu ortamdaki termal konfor durumu değerlendirilmektedir (Şekil 2.1). PMV denklemine göre indeksin 0 olması kişinin termal olarak rahat hissedeceği bir

çevrede bulunduğu anlamına gelmektedir. +3'e doğru giden değerler, çevrenin kullanıcı için giderek sıcaklaştığını, -3'e doğru giden değerler giderek soğuklaştığını göstermektedir. ASHRAE 55:2010 ve ISO 7730 gibi uluslararası standartlarda bu değer aralığı kullanılmakta ve her tam sayı değer için bir ifade tanımlanmaktadır (Tablo 2.1).

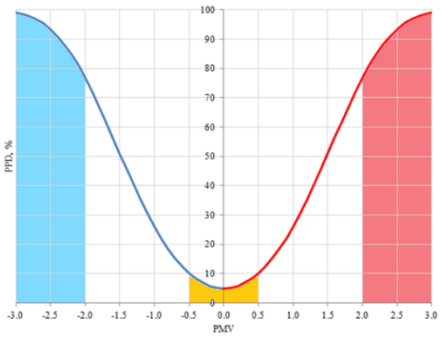


Şekil 2.1 PMV termal konfor ifadelerinin renkli cetveli

ASHRAE 55 & ISO7730	
Değer	**İfade**
-3	Çok Soğuk
-2	Soğuk
-1	Hafif Soğuk
0	Ilıman
+1	Hafif Sıcak
+2	Sıcak
+3	Çok Sıcak

Tablo 2.1 ASHRAE VE ISO 7730 standartlarında termal his ifadeleri

Fanger'in termal konfor modelinde diğer önemli kavram ise PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) değeridir. Tahmini Memnuniyetsizlik Yüzdesi olarak bilinen bu değer, kişiye göre farklılaşan fiziksel ve ruhsal yapıya göre, belirli bir PMV değerindeki ısıl çevreden hoşnut olmama yüzdesini vermektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 PMV-PPD ilişkisi

ASHRAE standartında PPD, “PMV’den belirlenen, termal olarak memnun olmayan insanların yüzdesinin nicel tahminini oluşturan bir endekstir” şeklinde tanımlanmaktadır (ASHRAE 2010). Bu açıdan baktığımızda, PMV ve PPD tek bir değerlendirme yönteminde iki farklı kavram olarak değerlendirilebilir. Bundan dolayı, ISO 7730 ve ASHRAE gibi uluslararası standartlara göre ideal bir termal ortamın, sadece %10 kullanıcının memnuniyetsizlik hissettiği “-0,5” – “+0,5” aralığında bir PMV değeri sağlanması tavsiye edilmektedir [54]. Bu tez çalışması kapsamında önerilen dinamik termal konfor modelinde, optimum sıcaklık değeri bu değer aralığına göre hesaplanmaktadır.

2.2 Yapı Bilgi Modellemesi

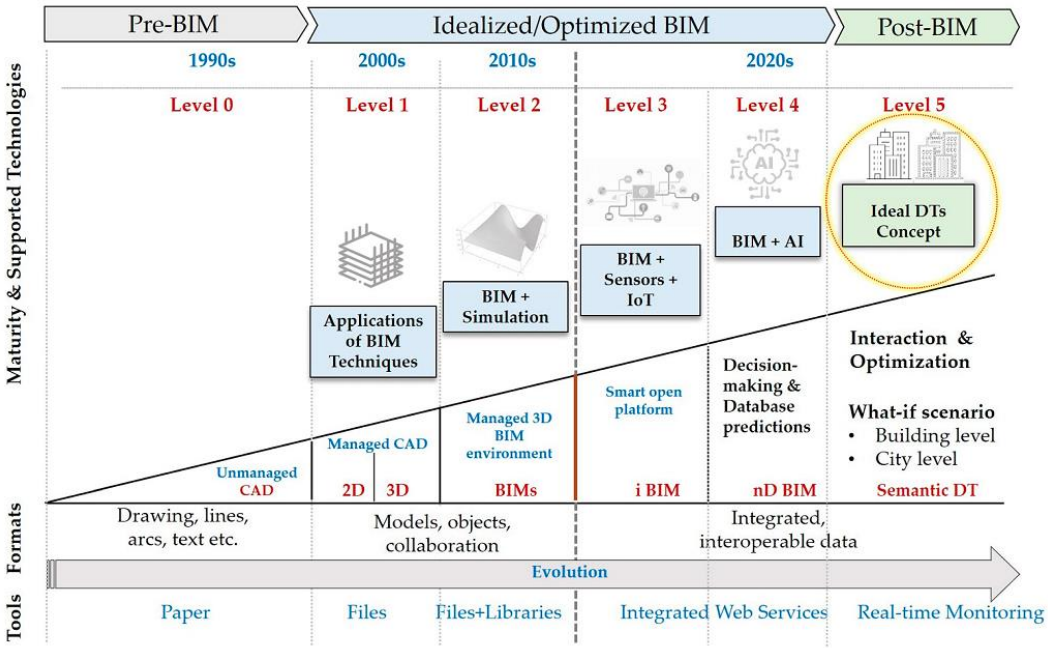
Dijital ikiz kavramının kökenleri, Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi’nin (NASA) 1970 yılındaki Apollo 13 insanlı Ay seyahati görevine kadar uzanmaktadır. Görev esnasında, mürettebat Ay’a giderken birçok sorunla ve sistem arızalarıyla karşılaşmıştır ve ilk dijital ikiz olarak kabul edilen bu sistemin kopyası, mürettabatı sorunsuz bir şekilde Dünya’ya geri getirmek için en iyi senaryoları ve kararları almarına yardımcı olmuştur [55]. Bu sebeple tarihe adını “başarısız başarı” olarak yazdırmıştır [56].

Dijital ikizin yapı endüstrisine kavramsal olarak ilk girişi ise 1970’li yıllarda Profesör Charles Eastman tarafından oluşturulan, etkileşimli grafiksel arayüz teknolojisiyle ilişkisel veritabanlarının birleşmesine dayanan ve ilk bina veritabanı platformlarından biri olan Bina Tanımlama Sistemine (BDS) dayanmaktadır. Bu çalışmalar ona daha sonra 'BIM'in babası' unvanını kazandırmıştır [57]. Sonrasında Eastman ve birçok araştımacının çalışmalarıyla geliştirilen Bina Tanımlama Sistemi; 1980’lerde Yapı Ürün Modeline (BPM), 1990' larda Jenerik Bina Modeline (GBM) dönüştü. 2000'lerde ve sonrasında ise günümüzdeki ismini, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), aldı. 2000’den bunu yana geçen zaman dilimi, Yapı Bilgi Modellemesinin mimarlar, inşaat mühendisleri ve yöneticiler ve diğer tüm paydaşlar tarafından benimsendiğini göstermekte, sistemin gelişmesi bu süreçte artmaktadır. Günümüzde yapı endüstirisinde standart bir uygulama olan Yapı Bilgi Modellemesi kullanımı, her geçen gün gelişmekte olan yapay zeka ve makine öğrenmesi gibi teknolojilerle daha da ilerlemekte, daha doğru ve öngörülü tasarımlar, simülasyonlar ve işletme yapmamızı sağlamaktadır [58].

2.2.1 BIM ve Kullanım Alanları

BIM (Building Information Modelling), türkçesiyle Yapı Bilgi Modellemesi; binaların fonksiyonel ve fiziksel karakteristik özelliklerinin, geometrik ve parametrik bilgi açısından zengin bir dijital kopyasını oluşturup; binayı tasarımından yapımına, işletmesinden bakımına kadar olan tüm yaşam döngüsü boyunca yönetmemizi sağlayan bir yaklaşım olarak tanımlanmaktadır [59,60]. BIM Modelleri aynı zamanda, yaşam döngüsünün her alanında kullanılmak üzere, değiştirilmesi ve ağa bağlanması mümkün olan bilgisayar dosyalarıdır ve bu özelliğiyle mimari, statik ve mekanik disiplinler çerçevesinde binaları tasarlayıp planlayanlar, inşa edenler, işleten ve bakımını yapanlar, büyük işletmeler ve devlet kurumları tarafından multidisipliner bir şekilde kullanılmaktadır [61].

Yapı Bilgi Modellemesinin kullanım alanlarının; BIM Olgunluk Seviyelerine (BIM Maturity Levels) ve bu seviyelerin tarihsel süreç içerisinde teknolojiyle birlikte gelişmesine bağlı olarak zaman içerisinde çeşitlendiği gözlemlenmektedir. Şekil 2.3'de BIM Olgunluk Seviyelerinin 1990'lı yıllardan günümüz ve ötesine, farklı olgunluk seviyelerindeki BIM modellerinin kullanım alanları ve niteliği kapsamlı bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.3 BIM'den dijital ikizlere beş seviyeli olgunluk taksonomisi [62]

Olgunluk seviyesi 0 olarak belirtilen ve BIM öncesi dönem olarak adlandırılan 1990-2000 yılları arasında ki bu dönemde paydaşlar arasında işbirliği; geleneksel

yöntem olarak adlandırılan ve dijital olarak birbirinden bağımsız CAD dosyalarının ayrı dosyalar ve çıktılar halinde manuel olarak yapılmasına dayanmaktaydı. Bu dosyalardaki veriler çoğunlukla iki boyutlu çizim ve yazı formatındaydı. Bu sebeple bu dönem, farklı projeler ve proje fazlarının arasında oldukça az entegrasyonun olduğu, muhtemel sorunlarla en çok karşılaşılan bir dönemdi. Projeyle ilgili dosyaların farklı paydaşlarda dağınık bulunmasından dolayı, proje yaşam döngüsüne analizlerin ve yönetimlerin yapılması oldukça güçtü. Dolayısıyla, nitelikli ve maliyet etkin projeler üretebilmek sınırlıydı.

Olgunluk Seviyesi 1 olarak adlandırılan 2000-2010 yılları arası dönemde ise, Autodesk Revit gibi kapsamlı BIM araçlarının piyasaya sürülmesiyle, 2 boyutlu çizimlerden, bina verilerinin görsel temsilini oluşturduğumuz ilk 3 boyutlu BIM modelleri elde edilmeye başlandı. Bu dönemde BIM projelendirme süreçleri yeni gelişmekte olduğu için, çalışmalar çoğunlukla BIM tekniklerinin uygulanmasıyla ilgili olmuştur. Farklı disiplinler arasında, günümüzdeki gibi merkezi BIM modeli bağlantısı mevcut değildi ve gelişmiş işbirliği olanakları yoktu. Fakat Google Drive, Dropbox gibi ortak veri ortamı (CDE) sağlayıcıları ile kısmı bir işbirliği sağlanmaktaydı [63].

2010-2020 yılları arasını kapsayan Seviye 2 Olgunluk döneminde BIM modelleri, tüm proje paydaşlarının ortak ağda 3 boyutlu modeller oluşturduğu ve kullandığı dönem olarak ifade edilmektedir. Ayrıca bu aşamada BIM, bina bileşenlerine ait veriler aracılığıyla BIM destekli çeşitli ve kapsamlı analizlerin yapılmaya başlandığı dönem olarak tanımlanmaktadır. Bu dönemde BIM modelleri, sadece geometrik verilerinin ötesinde yapı malzemeleri ve mekanik ekipmanla ilgili gerekli bilgileri sağladığı için, enerji performans analizi aktif bir araştırma alanı olmuştur. Autodesk CFD gibi araçların BIM ortamlarıyla entegrasyonu, doğal ve yapay havalandırmaların bina enerji performansı üzerine etkisini inceleme olanağı sağlamıştır. Bazı çalışmalarda da, BIM modelinde farklı HVAC çalışma koşullarının senaryoları simüle edilmiştir. Yapı sektöründe bu dönem, "tamamen BIM uyumlu" olarak nitelendirilen aşamadır [64].

2010'dan 2020'ye kadar olan sürecin ileri zamanlarında, bulut tabanlı teknolojiler, nesnelerin interneti ve açık veri gibi kavramların BIM süreçlerine dahil edilmesinin bir sonucu olarak, tüm yaşam döngüsünü kapsayan proje süreçleri birbirleriyle tamamen entegre hale gelmiştir. Bu nedenle Olgunluk Seviyesi 3'e

“tam entegre ve birlikte çalışabilir veri” dönemi de denilmektedir. Yapıyla ilgili gerçek zamanlı verilerin elde edilmesi ve bu verilerin disiplinler arası değişimi, operasyon ve bakımla ilgili birçok çalışma alanına kapı açmıştır. Bu dönemde yapılan çalışmalar alanları incelendiğinde; yapım sürecinin takip edilmesi [66,67], enerji performansı [68,69], iç ortam fiziksel çevre (aydınlatma ve akustik) [70-72], iç mekan termal konforu [71,73], iç mekan gerçek zamanlı risk yönetimi [74,75], bina alanlarının yönetimi [76,77] gibi oldukça çeşitli kategorilere ayrıldığı görülmektedir.

2020 yılından sonra oluşan 4. olgunluk seviyesindeki BIM modelleri, özellikle bu zamanlarda piyasaya sürülen Dynamo 2.00 sürümlerinde gelişen makine öğrenme altyapısı sayesinde, yapay zeka destekli analiz yapma konusunda oldukça gelişmiştir. Makine öğrenmesi destekli BIM Uygulama Programlama Arayüzü, 3. Seviye BIM Olgunluk modelindeki gelişmiş disiplinler arası tam entegrasyon ve nesnelerin interneti ile elde edilen gerçek zamanlı veriler sayesinde; hem tasarım aşaması için en doğru kararların alınması hem de işletme aşamasında en optimum yönetimin yapılması mümkün hale gelmiştir. Bu dönemde yapılan araştırmalara bakıldığında; yapay zeka sinir ağları (ANN) kullanılan BIM tabanlı modeller aracılığıyla kullanıcıya uygun termal konforun tahmin edilmesi [78], binaya ait gerçek zamanlı tüketim verileri aracılığıyla yaşam döngüsü senayolarının yapılması [79], anlık iç ortam koşullarına bağlı olarak en sürdürülebilir işletme kararların alınması [80], ANN ve Destek Vektör Makinesi (SVM) gibi yapay zeka algoritmaları ile mekanik, elektrik ve tesisat ekipmanlarının normal ve olması gereken durumlarının hesaplanması [81] gibi konularda çalışmaların yapıldığı görülmektedir [82].

BIM Olgunluk taksonomisine göre, BIM kavramının ilk ortaya çıktığı 2000’li yıllardan günümüze kadar olan süreçteki 1., 2., 3. ve 4. BIM Olgunluk Seviyeleri, bir bütün olarak idealize edilmiş/optimize edilmiş BIM şeklinde tanımlanmaktadır. Burdan sonraki zaman aralığı ise “BIM Sonrası (Post BIM)” süreç olarak adlandırılmaktadır. Bu süreç, BIM modellerinden Dijital İkizlere modellerine geçişi, yani gerçek dünyadaki fiziksel objelerin, sistemlerin ve çevrenin sanal ve tam bir temsili olan modelleri kapsamaktadır. Dijital ikizler; mimari, statik, mekanik, elektrik ve sıhhi tesisat modelleri gibi tüm bina alt disiplinlerini tek bir platformda toplayan yazılım sistemleri (bknz. Autodesk

Tandem [83]) aracılığıyla, çift yönlü ve gerçek zamanlı veri gönderimi yaparak fiziki ve sanal dünya arasında bir köprü kurmaktadır [84]. Bu sayede, hem bina ölçeğinde hem şehir ölçeğinde, yapılı çevredeki enerji kullanımını, HVAC ve mekanik sistemlerini, sıcaklık, ışık, hava kalitesi ve diğer tüm dinamik koşullarını izleyebilen, tahmin edebilen ve gereken şartlara göre uyum sağlayabilen akıllı binaların ve şehirlerin gelişeceği öngörülmektedir.

2.2.2 BIM Yazılımları

BIM yazılımları, mimarlar, mühendisler, proje yüklenicileri ve yapı sektöründeki diğer paydaşlardan tarafından; bina projelerini tasarlamak, planlamak, inşa etmek ve yönetmek için kullanılan ve binaları yapısal bilgileri ile birlikte 3 boyutlu olarak modelleyen yazılımlar olarak tanımlanabilmektedir. Geleneksel 3 boyutlu Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) araçlarıyla kıyasladığında, BIM teknolojisi sadece geometrik bir temsil değil, aynı zamanda sanal modeldeki her bir bileşenin işlevsel, parametrik ve anlamsal olarak iyi bir şekilde tanımlandığı nesne odaklı bir sisteme dayanmaktadır [85]. BIM yazılımlarında duvar, döşeme, kapı ve pencere vb. gibi tüm bina bileşenleri kendi içinde nesnedir ve fiziksel olarak sahip olduğu tüm teknik özellikleri BIM modelinde de veri olarak taşıyabilmektedir.

Yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan BIM yazılımlarına; Revit (Autodesk), ArchiCAD (Graphisoft), Allplan Architecture ve Vectorworks (Nemetschek Group), Tekla Structures (Trimbles), Bentley Micro Station örnek olarak verilebilir [86]. Tablo 2.2'te BIM yazılımlarının, özellikleri ve birbirinden farklılaştığı noktalar gösterilmektedir.

Tablo 2.2 BIM yazılımları, özellikleri ve birbirinden farkları

Yazılım	Genel Amaç	Disiplinler	Görsel Programlama - API	Uyumluluk	Bulut ve Uzaktan Çalışma
Revit	Tüm AEC süreçlerini destekler.	- Mimari - İnşaat Müh. - Mekanik - Elektrik	- Dynamo - Python API desteği	Autodesk ekosistemine tam uyumlu	BIM 360 gelişmiş bulut tabanlı işbirliği
ArchiCAD	Hızlı tasarım, mimari projeler için uygun.	-Mimari	- GDL ve API desteği	IFC formatı desteği, açık BIM platformları	Bulut tabanlı çalışma sınırlı

Tablo 2.1 BIM yazılımları, özellikleri ve birbirinden farkları (devamı)

Allplan Architecture	Mimari ve mühendislik projelerinde detaylı çalışma	- Mimari - Statik	- Python API desteği	IFC formatı Nemetschek ekosistemiy-le uyum	Bulut tabanlı çalışma sınırlı
Vectorworks	Esnek, küçük ve orta ölçekli projeler için uygun.	- Mimari - İç Mimari - Peyzaj	- Marionette ile görsel programlama	Çeşitli formatlara (IFC, DWG) uyumlu	Bulut tabanlı çalışma sınırlı
Tekla Structures	Çelik ve betonarme yapıların detaylandırıl ması	- Statik - Çelik	- API ile özelleştirme	BIM modelleri ve mühendislik yazılımlarıy-la uyumlu	Bulut tabanlı model paylaşımı (Trimble Connect)
Bentley MicroStation	Büyük altyapı projeleri için tasarlanmış	- Altyapı ve ulaşım	- Script desteği - API	DGN formatı, çeşitli veri formatlarıyla entegrasyon	ProjectWi se ile bulut tabanlı işbirliği

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen modelde, yapı endüstrisinde en yaygın olarak kullanılması, Dynamo gibi gelişmiş görsel programlama aracı ve API desteği, multidisipliner kullanım alanına sahip olması gibi nedenlerden dolayı Autodesk Revit yazılımı kullanılmaktadır.

2.2.3 BIM Uygulama Programlama Arayüzü ve Araçları

Uygulama Programlama Arayüzü (API) genel olarak tanımlanacak olursa; üretilmiş bir yazılımın farklı yazılım uygulamaları ve çeşitli platformanlardan gelen verilerle iletişime geçip alışverişde bulunmasını sağlayan, kendi kullanıcısının amaçlarına uygun olarak bir yazılımın özelleştirilmesini sağlayan bir dizi kurallar ve protokoller bütünüdür. Uygulama Programlama Arayüzleri, yöntemler ve veri formatları tanımlayarak farklı yazılımlar ve dijital ortamlar arasında iş akışı kurulmasını sağlamaktadır.

BIM Uygulama Programlama Arayüzü ise; farklı yazılım uygulamalarındaki verilerin BIM verilerine erişmesini sağlayarak, bu verilerin kullanıcı isteği doğrultusunda manipüle edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede BIM platformunda oldukça çeşitli görevlerin efektif olarak gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

Autodesk Revit'in bir eklentisi ve görsel programlama aracı olan Dynamo, Revit API'siyle iletişime geçerek belirli bir amaç için prosedürel bilgileri BIM ortamına

getirmek için kullanılmaktadır [87]. Bu sayede, harici kütüphanelerden veya API'si olan herhangi bir yazılımdan entegre bir şekilde yararlanmaya olanak tanımaktadır. Kendi arayüzünde “node” olarak adlandırılan düğümlerle, özel algoritmalar oluşturan ilişkiler ve eylem serilerini tanımlayarak, BIM modelini ve öğelerini ihtiyaç duyulan fonksiyona uygun hale getirebilmektedir [88]. Bu tez çalışmasının konusu bağlamında Dynamo kullanımına bakıldığında; Dynamo, gerçek hayattaki sensörlerden gelen verileri depolayan veri tabanlarına bağlanılmasını, elde edilen verilerin python düğümleri aracılığıyla analiz edilmesini ve yeni hesaplamalar yapılmasını (PMV hesabı, optimum sıcaklık hesabı vs.), sonuçlardan elde edilen verilerin BIM modeline ve elemanlarına işlenerek BIM modelini gerçek dünyadaki eşleniğiyle senkronize edilmesini, bu sayede gerçek dünyadaki fiziki çevrenin görselleştirilmesini, izlenmesini ve analiz edilmesini sağlamaktadır.

2.3 Nesnelerin Interneti ve BIM-IoT Entegrasyonu

2.3.1 Nesnelerin İnterneti Tanımı

Nesnelerin İnternet (IoT), fiziksel nesnelerin birbirleriyle veya daha büyük sistemlerle bağlı bulunduğu iletişim ağı olarak açıklanmaktadır. Nesnelerin interneti açısından, nesne kavramı oldukça geniş anlam içermektedir. Bir ağa bağlı her cihaz, sensör, biochip veya erişim düzenekleri nesne olarak değerlendirilmektedir [89]. “Nesnelerin interneti” yanlış bir isimlendirme olarak kabul edilmiştir. Bunun nedeni cihazların genel internete bağlı zorunda olmamasıdır, sadece bir ağa bağlı olmaları [90] ve bireysel olarak adreslenebilir olmaları yeterli olarak görülmektedir [91][92].

Günümüzde, iş verimliliği, insanların sağlığı ve refahı, bina otomasyonu gibi oldukça geniş alanda kullanılan Nesnelerin İnternetine bağlı cihaz sayısı, 2021’de yaklaşık 30 milyar olarak tahmin edilirken, 2025’te bu sayının 75 milyarı geçeceği öngörülmektedir [93]. Bu istatistiğe benzer şekilde, IoT’nin 2008-2009 yıllarında doğdunu belirten uluslararası dijital iletişim şirketi Cisco Sistem de; 2003 yılındaki 0,08 olan nesne/insan oranının, 2010 yılında 1,84’e yükseldiğini tahmin etmektedir [94].

2.3.2 BIM-IoT Aygıtları Entegrasyonu ve Kullanım Alanları

Yapı Endüstrisi, diğer tüm endüstriler gibi, teknolojisinin gelişmesiyle birçok yönden dönüşüm yaşamıştır ve yaşamaktadır. BIM-IoT entegrasyonun ortaya çıkmasıda bu dönüşümlerin en önemlilerinden biri olarak sayılabilmektedir. Yapı Bilgi Modellemesinin, Nesnelerin İnternetine bağlı sensörler veya diğer cihazlarla entegrasyonu oldukça yeni bir araştırma alanıdır. Özellikle yapı endüstrisinde bir çok farklı alan için oldukça güçlü potasiyel faydalara sahiptir [95]. IoT'nin AEC endüstirisinde kullanımı; İnşaat Operasyonu ve İzlemesi, İnşaat Lojistiği ve Yönetimi, Sağlık ve Güvenlik Yönetimi, Tesis Yönetimi gibi birincil alanları kapsamaktadır.

İnşaat Operasyonu, Lojistiği ve Yönetimi kapsamında IoT; inşaat alanında nesnelerin gerçek zamanlı konumsal verilerini kullanarak, ekipman opertörünün talimatlarını, kompaktör yolunu ve otomatik vinç operasyonlarını hesaplamak gibi konularda kullanılmıştır. Benzer şekilde sahada kaynak yönetimi ve takibi için, Bluetooth Düşük Enerji ve hareket sensörleri gibi sensörler ile büyük şantiyelerde işçilerin, malzemelerin ve ekipmanların hareketlerini ve kaynak durumunu takip etmek için kullanılmıştır [95].

Sağlık ve Güvenlik Yönetimi alanında araştırmalar; çoğunlukla işçilerin veya bina kullanıcılarının sağlık koşullarıyla ilgili gerekli yasal düzenlemeler çerçevesinde risklere maruz kalmalarını engellemek için yapılan çalışmaları kapsamaktadır. Nesnelerin interneti aracılığıyla, bahsedilen sağlık ve güvenlik riskleriyle ilgili çevresel koşulların ve iç mekandaki ya da şantiye alanındaki insan faaliyetlerinin sensörler aracılığıyla anlık olarak izlenmesi, oluşabilecek potasiyel riskleri minimum düzeye indirebilmektedir.

Nesnelerin interneti, yapı endüstrisinde en yaygın olarak Tesis Yönetimi alanında kullanılmaktadır. Bina operasyonu ve bakımı, bina performansı yönetimi, enerji yönetimi, afet ve acil durum yönetimi gibi alanlarda oldukça çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [95]. IoT sensörlerinde elde edilen gerçek zamanlı, faydalı ve doğru bilgiler; BIM modelinin gerçek dünyadaki temsiliyle senkronize olmasını ve gerçek fiziki çevre koşullarının görselleştirilmesine, monitörize edilmesine ve otomatik karar alım yapılarının oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Özellikle fiziki çevre şartları, belirli kritik değer aralıklarında tutulmak istendiği zaman

dinamik gerçek zamanlı görselleştirme ve izleme oldukça önem arz etmektedir. Bu bağlamda Nesnelerin İnterneti ve BIM, kullanıcılar için istenilen düzenli termal konforu sağlayabilmek ve bunu yaparken enerji kaynaklarını en verimli şekilde kullanmak için güçlü bir potansiyele sahiptir [96]. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen BIM-IoT entegrasyonu tabanlı dinamik termal konfor modelinin kullanımı da, tesis yönetimi alanındaki kullanıma örnek olarak verilebilir.

3
MODELİN METODOLOJİSİ

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen BIM-IoT tabanlı dinamik termal konfor modelinin metodolojisi açıklanmaktadır. Modelin uygulanması için fiziki dünyaya ait bir yapı seçilmelidir. Seçilen yapının BIM modeli oluşturulduktan sonra, gerçek zamanlı çevresel veriler internete bağlı sıcaklık ve nem sensörleriyle modele belirli prosedürler çerçevesinde entegre edilir. Entegre edilen verilerle IoT özelliği kazanan BIM modeli, programlanabilir BIM ortamı sayesinde yapıya ait gerçek zamanlı hesaplamalar yapmamızı sağlamaktadır.

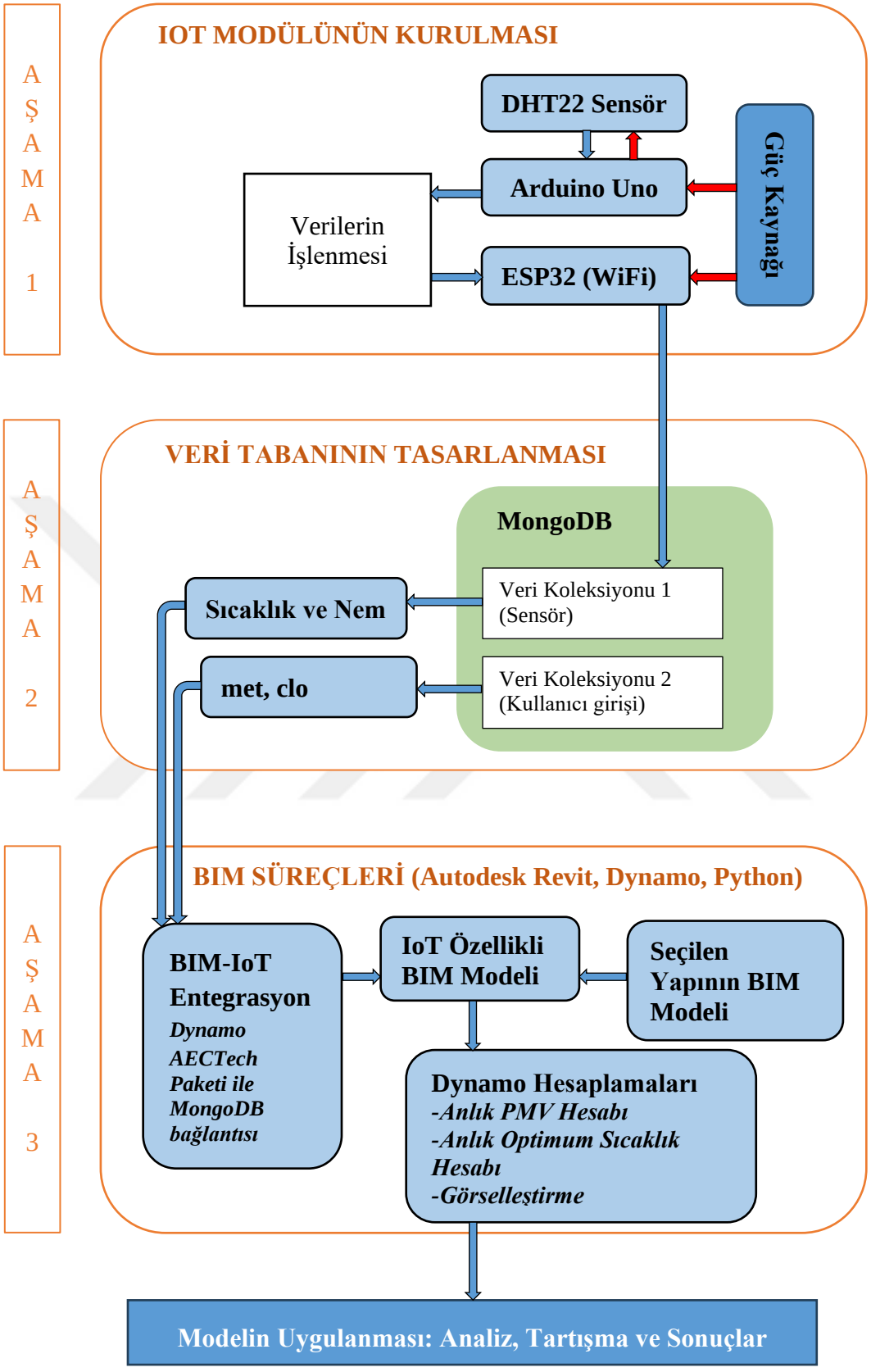
Yukarıda bahsedilen tüm süreç, aşağıdaki üç alt başlıkta sırasıyla bu bölümde açıklanmaktadır:

1. IoT Modülünün Kurulması
2. Veri Tabanının Tasarlanması
3. BIM Modelinde Termal Çevreyi Gerçek Zamanlı İzleme, Görselleştirme ve Optimizasyon

IoT modülünün kurulmasını kapsayan ilk aşamada, DHT22 sıcaklık ve nem sensörleri, Arduino UNO mikrokontrol kartı ve ESP32 WiFi kartının donanımsal ve yazılımsal kurulumu açıklanmaktadır. İkinci aşamada, birinci aşamada kurulan IoT modülünden gelen verilerin veri tabanında depolanması için gerekli kurulum açıklanmaktadır. Üçüncü aşamada ise, veri tabanında depolanan bu verilerin, BIM ortamına entegre edilip süreç dahilinde kullanılması açıklanmaktadır.

3.1 Çalışmanın Metodolojisi

Geliştirilen modelin metodolojisini gösteren üç aşamalı şematik diyagram Şekil 3.1‘de gösterilmektedir. Diyagramdaki mavi ok veri akışını, kırmızı ok ise donanımsal elektrik akışını ifade etmektedir.



Şekil 3.1 BIM-IoT tabanlı dinamik termal konfor modelinin mimarisi

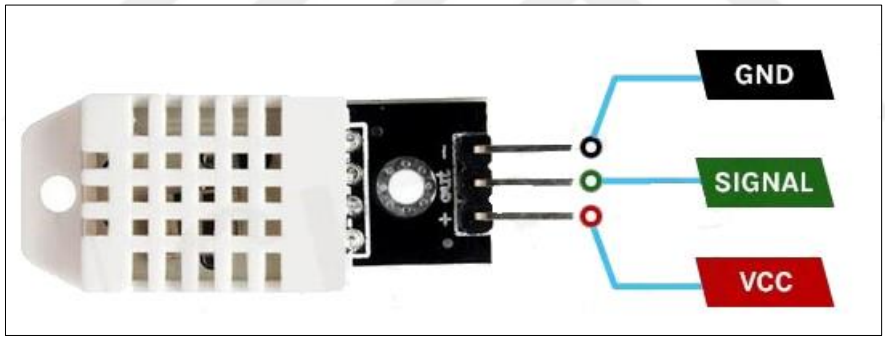
3.2 Aşama 1- IoT Modülünün Kurulması

Bu bölümde, IoT modülünün genel elektrik devresinin kurulumu ve mimarisi şekiller yardımıyla gösterilmektedir. Alt başlıklarda modülü oluşturan parçaların özellikleri paylaşılıp; IoT modülünden elde edilen verilerin, bilgisayara ortamında kullanılabilmesi için gerekli olan kodlama kısmı ve verilerin işlenmesi açıklanmaktadır.

3.2.1 IoT Aygıtının Donanımsal Kurulumu

Geliştirilen IoT aygıtı; DHT22 sıcaklık ve nem sensörü, Arduino UNO R3 mikrokontrol kartı ve ESP32 WiFi kartı olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır. Modülün donanımsal kurulumunda; önce DHT22 sıcaklık ve nem sensörünün Arduino UNO mikrokontrol kartıyla birleşimi, sonra ESP32 WiFi kartının Arduino UNO kartıyla bağlantısı açıklanacaktır.

DHT22 sıcaklık ve nem sensörü, her biri birbirinden farklı fonksiyona sahip üç farklı pinden oluşmaktadır. Bu pinler Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 DHT22 sıcaklık ve nem sensörünün pinleri

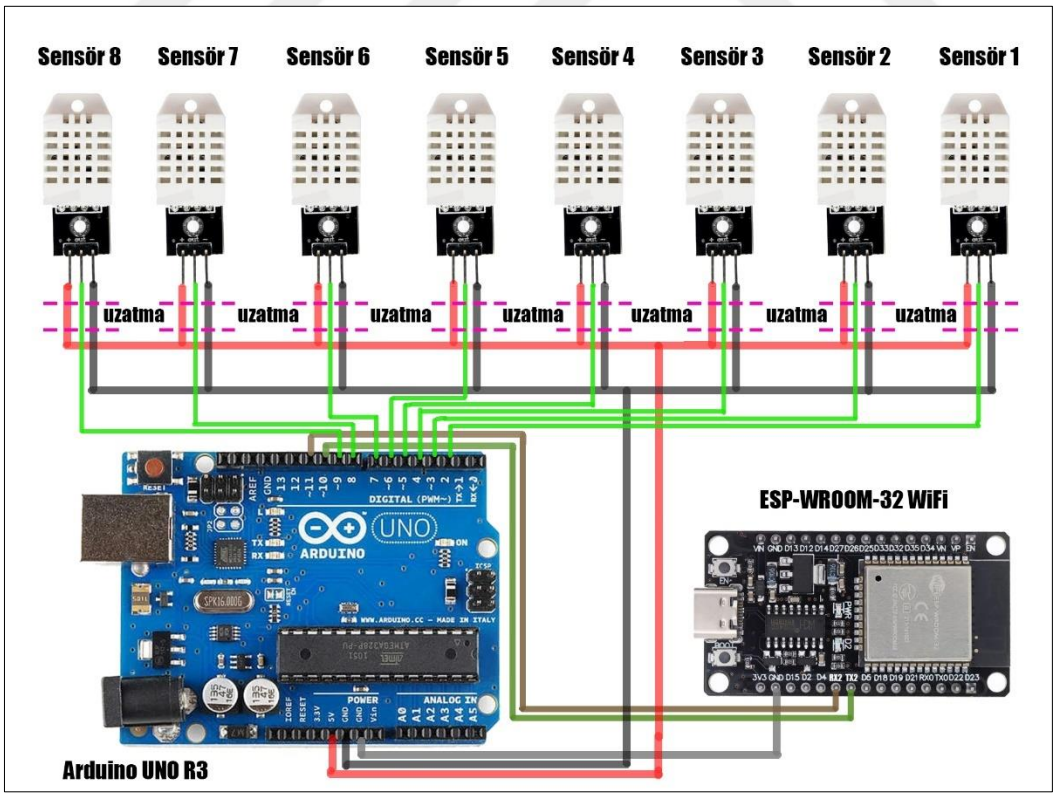
AM2302 olarak da bilinen bu sensör, sıcaklık ve nem ölçümü yapan dijital bir sensördür. Dijital olarak işlev görebilmesini sağlayan üç temel bağlantı noktası sırasıyla; **GND (Ground - Toprak), VCC (Voltage - Güç),** ve **DATA (Signal-Veri iletimi)** şeklindedir. Bu bağlantılar aşağıdaki gibi açıklanabilir.

GND (-, Ground - Toprak): GND pini, sensörün elektrik devresinin referans noktası olarak işlev görmektedir ve devredeki elektrik akımının geri dönebilmesi için güç kaynağının yani Arduino UNO'nun negatif terminaline bağlanması gerekmektedir. Sensörün stabil ve sağlıklı çalışabilmesi için GND hattının doğru bağlanması kritik öneme sahiptir.

VCC (+, Voltage - Güç Beslemesi): DHT22 sensörü, 3.3V veya 5V gerilimle çalışabilmektedir. DHT22'nin iç yapısında yer alan sıcaklık ve nemi ölçen devreler de dahil olmak üzere diğer elektronik devrelerin doğru çalışabilmesi için stabil bir güç kaynağı gereklidir. Kullanılacak mikrodenetleyici veya güç kaynağının çıkış gerilimine uygun olarak VCC pinin bağlanması gerekmektedir. Kurulan modülde DHT22 sensörlerinin güç kaynağı Arduino kartın 5V güç çıkışıyla sağlanmaktadır.

DATA (Signal - Veri iletimi): Sensörden veri okuma işlemi, bu pin aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. DHT22 sensörü tek hat üzerinden ölçtüğü sıcaklık ve nem değerlerini, belirli bir zaman aralığında dijital bir sinyal olarak bu pin üzerinden iletmektedir. DHT22 sensörünün bu bağlantı noktalarının doğru bir şekilde yapılandırılması, güvenilir ve doğru veri elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan IoT aygıtı; 8 adet DHT22 sensörü, 1 adet Arduino UNO R3 kartı ve 1 adet ESP-WROOM-32 WiFi kartından oluşmaktadır. Sistemin donanımsal kurulumu Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 IoT aygıtının donanımsal kurulumu

Bağlantıların daha düzenli ve yönetilebilir olmasını sağlaması, tüm sensörlerin aynı voltaj seviyesinden beslenmesini garanti altına alması ve aynı güç kaynağı kullanıldığı için gerilim seviyesinde tutarlılık sağlaması gibi sebeplerden dolayı; tüm sensörlerin güç beslemesi yapılan VCC yani artı (+) hatları ile yük boşaltımı yapılan GND yani eksi (–) hatları paralel olarak bağlanmıştır. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere, kırmızı renkle gösterilen, sensörlerin VCC artı (+) hatları birleşerek Ardunio UNO kartının güç bölümünde 5V'lik güç çıkışına bağlanmıştır. Bu sayede tüm sensörlere 5V'lik elektrik akışı sağlanmış olur. Siyah renkli hat bağlanan sensörlerin GND eksi (-) hatları ise, benzer şekilde birleştirilerek Arduino UNO kartının GND bölümüne bağlanmıştır.

DATA yani veri pinleri ise, diğer iki pinden farklı olarak, her sensörden bireysel veri alınması için ayrı ayrı birer dijital giriş pinine bağlanmıştır. Sekiz sensör, 2. dijital giriş pininden başlayarak sırasıyla 9. Dijital giriş pinine bağlanmıştır. Bu bağlantılar Şekil 3.3'te açık yeşil hat ile gösterilmiştir.

Modülün 3. Bileşeni olan ESP-WROOM-32 WiFi kartı ise, WiFi özelliği sayesinde yakınındaki herhangi bir modeme gibi bir internet sağlayıcıya bağlanarak, DHT22 sensörlerinden Arduino UNO'ya aktarılan sıcaklık ve nem verilerini istenilen URL adresine gönderilmesini sağlamaktadır.

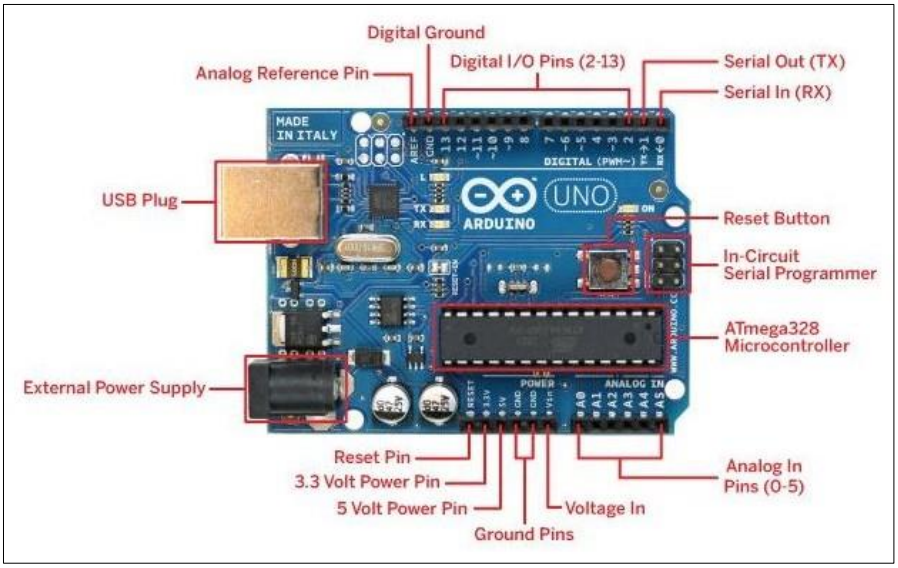
Arduino Uno, ESP32 kartı ile arasındaki veri alışverişi için UART (RX/TX), I2C (SDA/SCL) veya SoftwareSerial protokollerini kullanabilmektedir. Bu çalışmada, IoT modülündeki veri alışverişi için SoftwareSerial protokolü kullanılmıştır. Arduino Uno ile ESP32 arasındaki SoftwareSerial protokolüne göre yapılan RX-TX bağlantısı aşağıdaki işlem sırasına göre açıklanabilir:

- Arduino Uno (TX - 10. pin) → ESP32 TX2 (GPIO17) bağlantısı Şekil 3.3'te koyu yeşil hat üzerinden gösterilmiştir. Bu bağlantıda Arduino UNO, 10. Pin (veri gönderici) üzerinden veriyi ESP32'ye yollar. ESP32'nin TX2 pini (veri alıcı), Arduino'dan gelen veriyi alır. Bu bağlantı, sensörlerden Arduino UNO'ya aktarılan verilerin ESP32 WiFi kartına aktarılmasını sağlamaktadır. Bu sayede istenilen bir online ya da bir veri tabanına adresine sensörlerden gelen anlık sıcaklık ve nem verileri gönderilebilmektedir.

- Arduino Uno (RX - 11. pin) → ESP32 RX2 (GPIO16) bağlantısı Şekil 3.3'te kahverengi hat ile gösterilmiştir. Bu bağlantıda Arduino, seri haberleşme için veriyi RX pini üzerinden alır. ESP32'nin TX2 pini (veri gönderici), Arduino'ya veri gönderir. ESP32 internete bağlı olduğu için bir bulut platformundan veya mobil uygulamadan komut alabilmektedir. Bu komutları Arduino'ya ileterek belirli işlemleri bu bağlantı ile başlatabilmektedir. "Isıtma sistemini 3 Derece artır", "Fanı aç/kapat", "LED yak/söndür" gibi komutlar buna örnek olarak verilebilir. Bu sayede BIM yada benzeri bir online dijital platformda analiz sonucuna göre alınan kararlar, fiziki dünyadaki nesnelere bu bağlantı aracılığıyla komut olarak gönderebilmektedir.

3.2.2 Arduino UNO Microkontrol Kartı

Arduino Uno Mikrokontrol kartı, açık kaynaklı bir mikrodenetleyici kartıdır ve özellikle elektronik projeleri geliştirmek isteyen araştırmacılar, öğrenciler, profesyoneller veya hobi sahipleri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Arduino UNO işlemcisi, elektronik endüstrisindeki en yaygın kullanılan kartlardan biridir. Basit bir yapıya sahip olmasına rağmen çok çeşitli projelere ve uygulamalara imkan tanımaktadır. Arduino Uno'nun bu popülaritesinin temelinde, kolay programlanabilir olması, geniş topluluk desteği ve uygun maliyeti yatmaktadır.



Şekil 3.4 Arduino Uno bağlantı şeması

Arduino Uno, oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptir. En yaygın kullanım senaryolarına; sensör verilerinin toplanması ve WiFi/Bluetooth modülleriyle buluta iletilmesi gibi IoT projeleri; ışık kontrolü, sıcaklık takibi, otomatik kapı sistemleri gibi ev otomasyonu projeleri; robot kol kontrolü, otonom araç projeleri, servo motor kontrolü gibi robotik projeler; çevresel sensörlerle sıcaklık, nem, hava kalitesi ölçümü gibi veri toplama ve kayda alma; elektronik ve programlama eğitimlerinde temel projelerin gerçekleştirilmesi ve prototipleme; basit otomasyon çözümleri ve fabrika izleme sistemleri gibi endüstriyel uygulamalar örnek olarak verilebilir.

Arduino Uno R3 elektronik kartının teknik özelikleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Özellikler	**Değer**
Mikrodenetleyici	Atmega328P
Çalışma Voltajı	5V
Giriş Voltajı	7-12V (önerilen), 6-20V (maksimum)
Dijital G/Ç Pinleri	14 (6 PWM çıkışı destekler)
Analog Giriş Pinleri	6
Haberleşme	UART (Seri), I2C, SPI
Flash Bellek	32 KB
RAM (SRAM)	2 KB
EEPROM	1 KB
Saat Hızı	16 MHz
Bağlantı Arayüzü	USB Type-B
Enerji Tüketimi	Düşük güç tüketimi

Tablo 3.1 Arduino Uno R3 teknik özellikler

Arduino Uno kartının yazılımsal kurulum sürecine ait bilgiler, Ek A'da detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.2.3 DHT22 Sıcaklık ve Nem Sensörü

DHT22, sıcaklık ve nem ölçümü yapmak için yaygın olarak kullanılan dijital bir sensördür. Yüksek hassasiyet ve geniş ölçüm aralığı sunan DHT22, düşük maliyetli ve kolay kullanımı sayesinde IoT projelerinde, bina otomasyon sistemlerinde ve fiziksel çevre izleme uygulamalarında tercih edilmektedir. DHT22 sensörü, entegre bir ısı ve nem algılama modülü içerir. Bu sayede tek bir dijital veri pini üzerinden Arduino gibi mikrodenetleyicilere veri iletebilmektedir.

DHT22 sıcaklık ve nem sensörü ile ortam sıcaklığının ve neminin minimum 2 saniyelik periyotlar ile ölçümü yapılabilmektedir fakat bu süre tercihe bağlı olarak arttırılabilir. Artı (+) ve eksi (–) uçlarından gerekli elektrik beslemesi yapıldıktan sonra sinyal çıkışından dijital sıcaklık ve nem verileri alınabilmektedir. Arduino Uno çalışmalarında oldukça sık kullanılan bu sensör; -40 ile +80°C arasında ±/-0.5°C hata payı ile sıcaklık ölçebilmektedir. Bağıl nem olarak ise, 0-100% RH arasında ±/2-5% RH hata payı ile nem ölçümü yapabilmektedir. DHT22 sıcaklık ve nem sensörünün teknik özellikleri Tablo 3.2'de paylaşılmıştır.

Özellik	**Değer**
Çalışma Voltajı	3.3V - 5V
Sıcaklık Ölçüm Aralığı	-40°C ile +80°C arası
Bağıl Nem Ölçüm Aralığı	%0 - %100 RH
Sıcaklık Hassasiyeti	±0.5°C
Nem Hassasiyeti	±2-5% RH
Veri İletimi	Dijital, tek veri hattı (One-Wire)
Ölçüm Sıklığı	2 saniyede 1 ölçüm (minimum, ayarlanabilir)
Çıkış Pin Sayısı	3 (VCC, GND, DATA)
Güç Tüketimi	Düşük (yaklaşık 1-1.5 mA ölçüm sırasında)

Tablo 3.2 DHT22 sıcaklık ve nem sensörü teknik özellikler

Ek A'da paylaşılan Arduino UNO kurulumu tamamlandıktan sonra, DHT22 sensörünün kurulumu yapılabilir. Bunun için aşağıdaki iki aşamanın sırasıyla tamamlanması gerekmektedir:

1. DHT22 Sensör kütüphanesinin Arduino Uno Kartına Yüklenmesi
2. DHT22 Sensörün programlanması

İki aşamayla ilgili teknik detaylar, Ek B'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.2.4 ESP32 WiFi Modülü

ESP32, kablosuz bağlantı özellikleriyle öne çıkan güçlü bir mikrodenetleyici modülüdür. WiFi ve Bluetooth özelliği sayesinde IoT projelerinde yaygın olarak kullanılan bu modül; çift çekirdekli işlemcisi, düşük güç tüketimi ve geniş giriş/çıkış pin seçenekleri ile bina otomasyonu, akıllı ev sistemleri ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

ESP32 Modülü, Arduino gibi platformlarla uyumlu olup, kullanıcıların sensör verilerinin kablosuz ağ üzerinden gönderilmesine ve uzaktan kontrol edilmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 3.3'teki gösterildiği şekilde IoT aygıtına entegre edilen ESP32 WiFi modülü, işlev görebilmesi için aşağıdaki iki aşamanın tamamlanması gerekmektedir:

1. Arduino IDE'de ESP32 WiFi Kartının Kütüphanesinin Kurulması
2. ESP32 WiFi Kartının Programlanması

Ek C'de, bu iki aşamaya ait gerekli bilgiler detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.3 Aşama 2 – Veri Tabanının Tasarlanması

3.3.1 Veri tabanı seçimi

Günümüzde, dijital platformlarda yürütülen birçok çalışmada ve projede veri yönetimi oldukça önem arz etmektedir. Bu projelerin gereksinimlerine bağlı olarak veri yönetimini sağlayan veri tabanları, çalışmanın türüne göre farklılık göstermektedir. Bu bağlamda veri tabanı sistemlerini, SQL (Structured Query Language) ve NoSQL (Not Only SQL) olarak ikiye ayırmak mümkündür.

SQL veri tabanları, ilişkisel veritabanı yönetim sistemleri (RDBMS - Relational Database Management Systems) olarak da bilinmektedir. Bu sistemde veriler, satır ve sütunlardan oluşan tablo tabanlı bir yapı içinde saklanıp organize edilmektedir. Veriler arasındaki ilişkiler, önceden tanımlanmış şema (schema) kurallarıyla belirlenmektedir. Bu sayede veri tutarlılığı ve veri yapısının kesin bir şekilde belirlenmesi sağlanmaktadır. Örneğin; öğrenci kayıtlarını tutan bir SQL veri tabanında, öğrenci ID, ad, soyad gibi veriler belirli satırlarda hep aynı sırada saklanır, bu sayede veri tutarlığı sağlanmaktadır. Fakat başka açıdan değerlendirildiğinde SQL veri tabanlarındaki bu şema, bir SQL veri tabanında tanımlanmış yapıya uymayan, eksik alanlara sahip verilerin eklenmesini imkansız hale getirmektedir. Özellikli IoT projelerinde gerçek zamanlı verilerin depolanması söz konusu olduğunda, SQL'in sorguları oldukça karmaşık bir sürece dönüşmektedir.

Öte yandan, NoSQL, büyük miktarda ve farklı biçimlerdeki verileri depolama konusunda çift esneklik sunmaktadır. Aynı zamanda, SQL'de olduğu gibi zorunlu alanların tanımlanmasına da olanak tanımaktadır. Basit sorgularla büyük çaplı işlemleri gerçekleştirme imkanı sunduğundan, belirli görevlerde SQL'e kıyasla oldukça hızlıdır. IoT projelerinde, sensörlerden gelen verilerin yüksek hacimli, çeşitli ve sürekli değişen bir yapıya sahip olması nedeniyle NoSQL veritabanları, özellikle de MongoDB, daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. SQL tabanlı ilişkisel veritabanları, katı şema gereksinimleri ve sınırlı yatay ölçeklenebilirlik gibi nedenlerle IoT sistemlerinin dinamik ve hızla büyüyen veri gereksinimlerine uyum sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Ayrıca IoT aygıtlarından gelen veriler farklı formatlarda olabilmekte ve zaman içinde sensör tipleri, veri yapıları değişebilmektedir. MongoDB'nin sağladığı şemasız (schema-less) yapı; bu tür değişikliklere esnek bir şekilde uyum sağlarken, veriyi belge tabanlı (JSON benzeri BSON formatında) formatta saklayabilmesi sayesinde, sensör verilerini doğrudan, anlamlı ve hızlı bir şekilde depolayabilmektedir.

Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı bu çalışmada, veri toplama süreci için NoSQL tabanlı bir veri tabanı olan MongoDB tercih edilmiştir. MongoDB'nin seçilme sebebi, tez çalışması kapsamında geliştirilen modelin IoT tabanlı bir proje olmasıyla ilgilidir.

MongoDB, açık kaynaklı bir NoSQL veri tabanı yönetim programıdır ve web, mobil geliştiriciler arasında, basit sorgulama yapabilme özelliği sayesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde MongoDB, full stack (veya genel yazılım) geliştirmede önemli bir rol oynamakta ve MERN stack (MongoDB, Express, React, Node.js) olarak bilinen yazılım grubunun arasında yer almaktadır (32). MERN Stack mimarisi, MongoDB'ye kolayca bağlanan bir arayüz geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada geliştirilen IoT aygıtı için de bir Node.js sunucusu, IoT cihazı ile MongoDB arasında bir ara bağlantı görevi görecek şekilde tasarlanmıştır.

Ayrıca, 2021 yılında yayınlanan Dynamo AECTech paketi sayesinde, BIM ortamında MongoDB'ye gerçek zamanlı, doğrudan bağlantı mümkün hale gelmiştir. Bu durum, MongoDB'nin bu çalışma için tercih edilme sebeplerinden birisini oluşturmaktadır.

3.3.2 IoT Verileri için MongoDB Veri Tabanı Tasarlama Süreci

IoT tabanlı projelerde, sistemler sensörlerden elde edilen verilerin güvenilir, ölçeklenebilir ve hızlı bir şekilde saklanması oldukça önemlidir ve bunların sağlanması için projenin ihtiyaçlarına uygun olarak planlanmış veri tabanı tasarım süreçleri gerektirmektedir. Bu bağlamda, çalışmada verileri saklayacak MongoDB veri tabanı ve bu veri tabanına verileri gönderen sunucunun tasarımı aşağıdaki iki adımda gerçekleşmektedir:

1. MongoDB Sunucusunun Kurulumu
2. HTTP Sunucusunun Kurulumu

Ek D'de iki aşamaya ait bilgiler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu iki aşama tamamlandıktan sonra sekiz odanın en son zamana ait sıcaklık ve nem verileri, tek bir JSON nesnesi olarak veri tabanındaki koleksiyonda depolanmaktadır. Daha sonra, BIM platformunda Dynamo AECTech paketi aracılığıyla bu koleksiyona bağlantı yapılarak, bu son veri ile gerçek zamanlı hesaplama, görselleştirme ve analiz işlemleri yapılmaktadır.

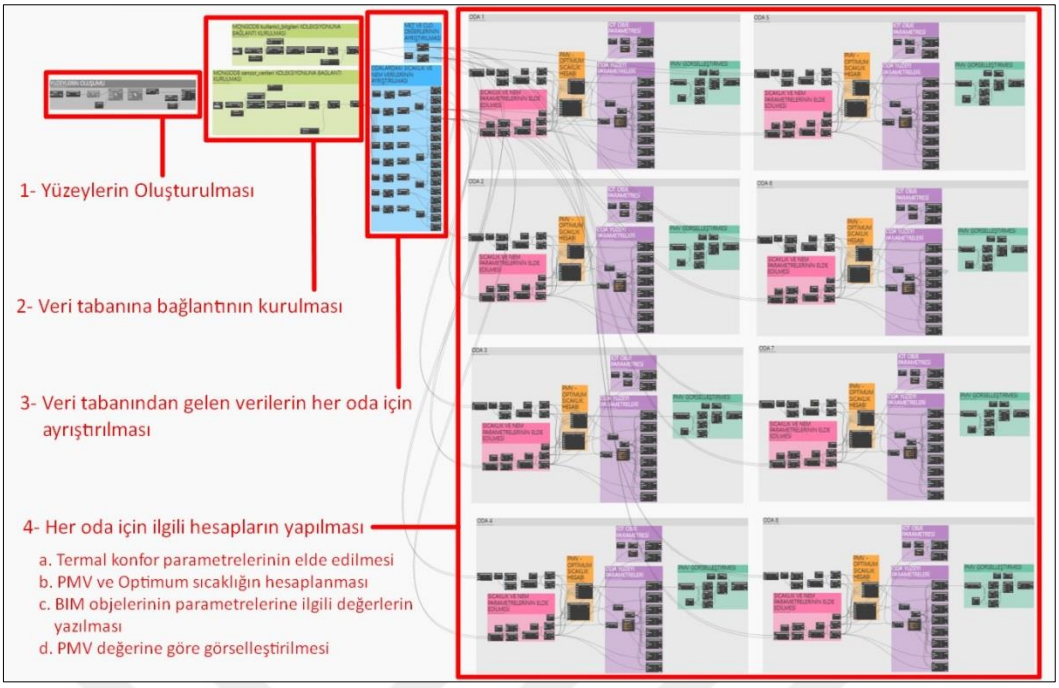
3.4 Aşama 3 – BIM Modelinde Termal Çevreyi Gerçek Zamanlı İzleme, Görselleştirme ve Optimizasyon

3.4.1 DynamoBIM Ortamındaki Genel Sürecin Açıklanması

Veri tabanı tasarımından sonra, BIM modelinde termal çevrenin gerçek zamanlı olarak izlenmesini, görselleştirilmesini ve gerekli hesaplamaların yapılmasını sağlayan Dynamo kodları aşağıdaki dört ana kısımdan oluşmaktadır:

1. Yüzeylerin oluşturulması
2. Veri tabanına bağlantının kurulması
3. Veri tabanından gelen verilerin her oda için ayrıştırılması
4. Her oda için ilgili hesapların yapılması

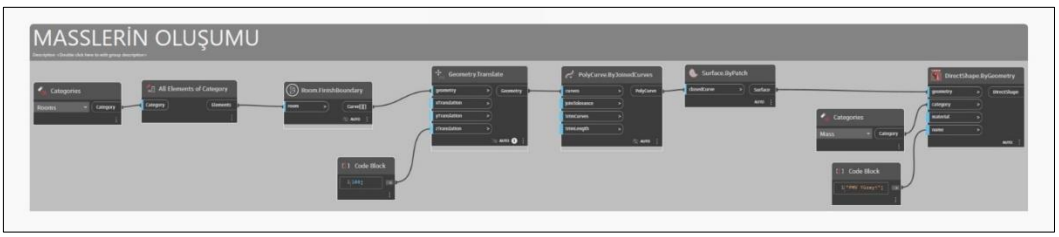
BIM modelindeki bu dört kısmı gösteren Dynamo kod gruplarının görüntüsü Şekil 3.5'de paylaşılmaktadır. Bu bölümde, dört kısım sırasıyla açıklanmaktadır.



Şekil 3.5 BIM modelinde genel süreci gösteren dynamo kod grupları

3.4.2 Yüzeylerin Oluşturulması

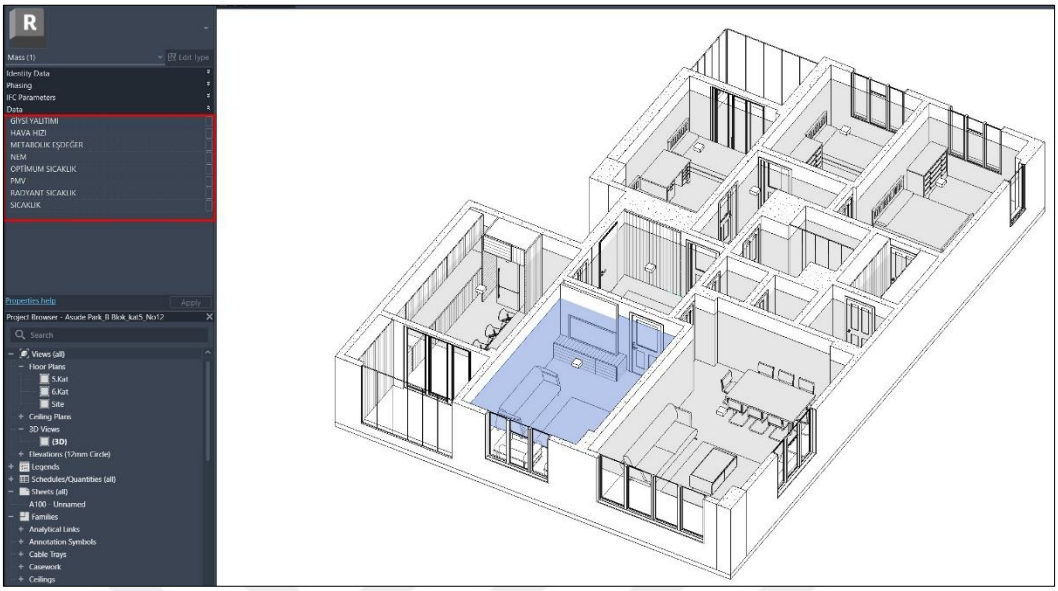
Bu aşamadan önce, seçilen yapının BIM modelinin modellenmiş ve her oda için Room Family'lerinin yerleştirilmiş olması gerekmektedir. Yüzeyleri oluşturulan Şekil 3.6'deki dynamo script'i, tanımlanmış bu Room Family'lerinin sınırlarını kullanarak, her oda için termal çevre yüzeyi (mass) oluşturmaktadır.



Şekil 3.6 Oda yüzeylerini oluşturan Dynamo düğüm grubu

Bu aşamada gerekli Dynamo script'i yazıldıktan sonra, bu script'in bir kez çalışıtırılması, yüzeylerin oluşturulması gerekmektedir. Bunun nedeni, daha sonraki aşamalarda bu yüzeyler üzerinde işlem yapabilmek için (sıcaklık, nem, PMV değerlerinin yüzey paratmelerine yazılması, PMV görselleştirmesi gibi), bu yüzeylerin ID'leri bilinmesi gerekmektedir. Yüzeylerin oluşturulmasından sonraki diğer öncül aşama ise, termal çevreyle ilgili anlık değerlerin yüzeydeki ilgili parametrelere yazılabilmesi için, oluşturulan yüzeyin ait olduğu mass

family'sinde ilgili parametrelerin, Manage > Project Parameters'den oluşturulmasıdır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Oda yüzeyi için oluşturulması gereken parametreler

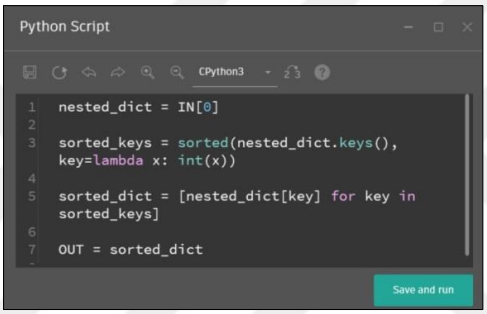
3.4.3 Veri Tabanına Bağlantının Kurulması

Aşama 2'de tasarımı yapılan, DHT22 sensörlerinden gelen gerçek zamanlı sıcaklık, nem verilerini ve met ve clo değerlerini depolayan MongoDB veri tabanına Dynamo ortamından bağlanmaktır. Bunun için, "AECTech – MongoDB" Dynamo paketinin yüklenmesi gerekmektedir. Dynamo arayüzünde Package > Search for Packages'e tıklanarak junkang.lau tarafından geliştirilmiş "AECTech – MongoDB" paketi yüklenmelidir.

İlgili paket yüklendikten sonra, Şekil 3.8'de gösterilen AECTech nodeları kullanılarak önceki aşamada oluşturulan "mongodb://localhost:27017" adresli MongoDB veri tabanına, her koleksiyon için ayrı ayrı olacak şekilde bağlanılır. Daha sonra sırasıyla ilgili koleksiyon seçimi yapılarak, koleksiyonların taşıdığı mevcut veriler List.GetItemAtIndex düğümü ile sonraki aşamalarda kullanılmak üzere listelenir.



Şekil 3.8 Dynamo üzerinden veritabanına erişim ve veri çekme işlemi

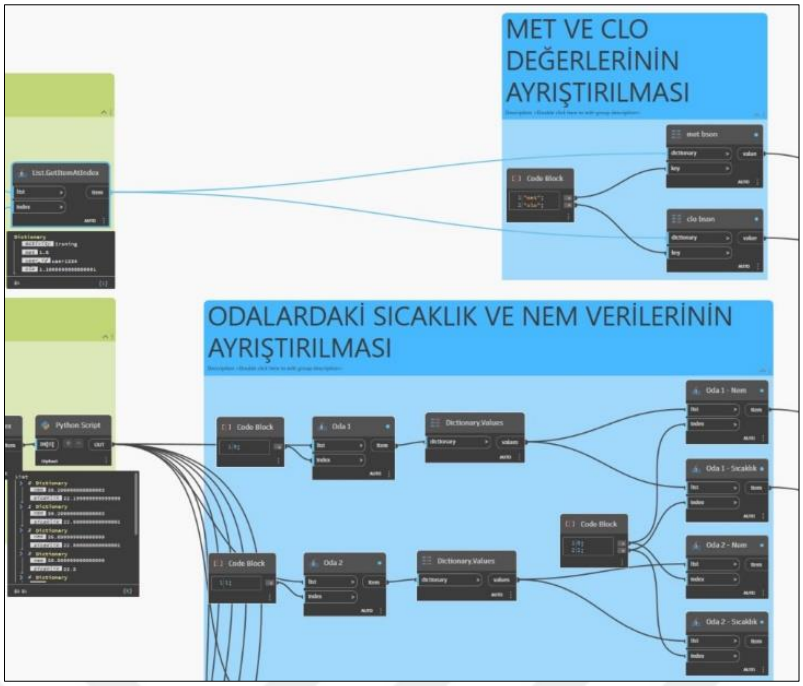


Şekil 3.9 Dictionary elemanlarını sıralayan Python script'i

Birden fazla sensörün verileri getirilirken, her sensöre ait veriler Dictionary formatında sırası bozulmuş şekilde listenebilir. Bu durumda Şekil 3.9'daki Python script'i kullanılarak bu sensör verileri oda sıralamasına göre sıralanabilir.

1. Veri Tabanından Gelen Verilerin Her Oda İçin Ayrıştırılması

Veri tabanından gelen her odaya ait veriler, tek bir listede farklı sözlükler (Dictionary) altında sıralanmaktadır. Her sözlük, sıcaklık ve nem anahtarları (keys) ve bu anahtarlara karşılık gelen sayısal değerler (values) taşımaktadır.



Şekil 3.10 Veritabanından gelen verileri kullanılabilir formata dönüştüren dynamo düğüm grubu

Şekil 3.10'de paylaşılan dynamo node grupları, farklı veri tabanından gelen ve sözlükler altında tek bir listede toplanan sıcaklık, nem, met ve clo değerlerini, her bir oda için ayrıştırmaktadır.

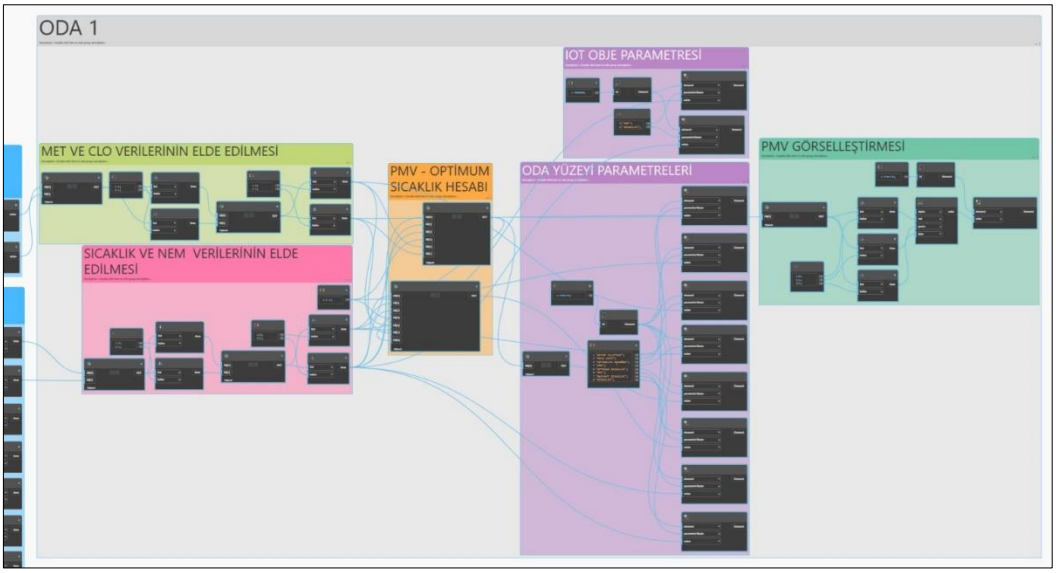
3.4.4 Her Oda İçin İlgili Hesapların Yapılması

Veri tabanında her oda tutulan veriler ayrıştırıldıktan sonra, her oda için yapılacak sıralı işlemlerde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Her odadaki işlemler birbirinin aynısı olduğu için, sadece tek bir odanın (Oda 1 – Salon) dynamo node grupları üzerinden açıklama yapılacaktır.

Her oda için yapılan işlemler sırasıyla aşağıdaki node gruplarından oluşmaktadır:

1. Sıcaklık, nem, met ve clo değerlerinin elde edilmesi
2. PMV değerinin ve optimum sıcaklığın hesaplanması
3. Hesaplamayla edilen ve fiziksel çevreye ait gerçek zamanlı verilerin, ilgili odada oluşturan yüzeylere ve IoT objelerine ait ilgili parametrelere yazdırılması
4. PMV değerine göre odanın görselleştirilmesi

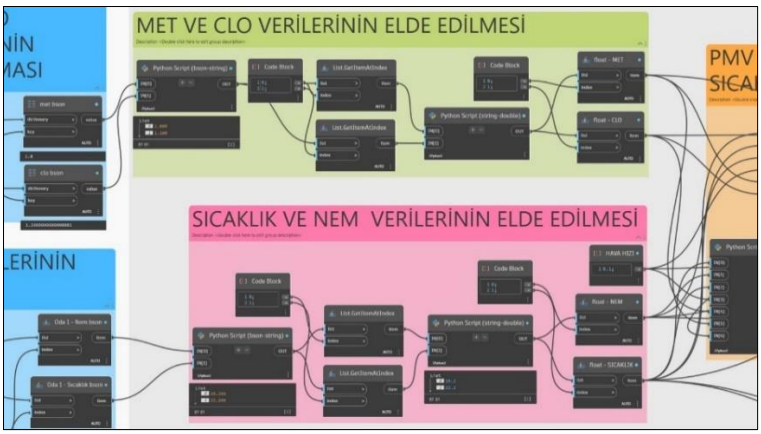
Şekil 3.11'te her oda için yapılan işlemleri yürüten bu Dynamo node grupları gösterilmektedir.



Şekil 3.11 Her oda için yapılan işlemleri gösteren Dynamo düğüm grupları

1. Termal konfor parametrelerinin elde edilmesi

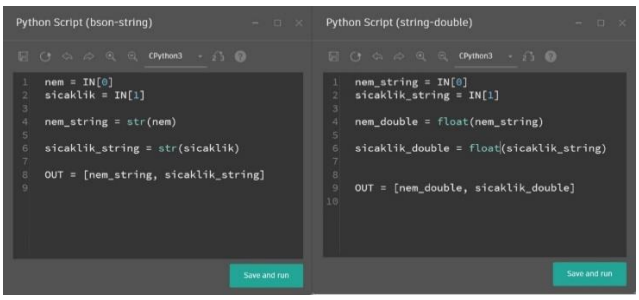
MongoDB veri tabanı, verileri JSON (JavaScript Object Notation) benzeri bir formatta saklamaktadır. Fakat bu işlemi yaparken, veri saklama ve sorgulama performansını artırmak için BSON (Binary JSON) kullanır. BSON, JSON'un binary bir türevidir. Bu sebeple veri tabanından aldığımız sayısal veriler, Dynamo ortamında işlem yapmak için desteklenmeyen Bson.Double formatında gelmektedir. Bu verilerin dynamo ortamında desteklenen double (float) veri türüne dönüşmesi gerekmektedir.



Şekil 3.12 Sıcaklık, nem, met ve clo değerlerinin elde edilmesi

Şekil 3.12'te bu verilerin Dynamo ortamında kullanılabilir formata dönüşümünü gösteren Dynamo script'i paylaşılmıştır. Veri tabanından gelen Bson.Double formatındaki veriler her oda için ayrıştırıldıktan sonra, birinci python düğümünde

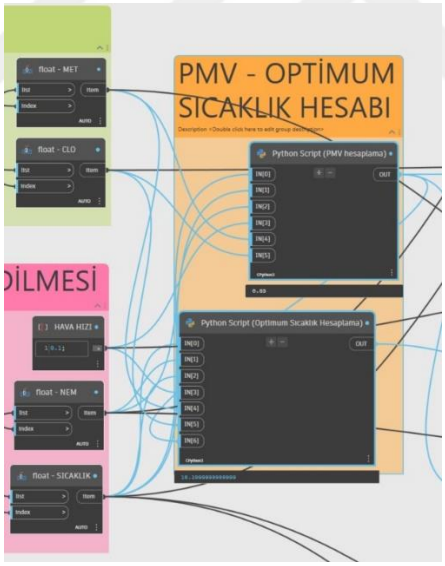
string türüne, ikinci python düğümünde Dynamo ortamında kullanılabilir double veri formatına dönüştürülmektedir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Bson'dan string'e, string'den double'a veri dönüşümü yapan kodlar

2. PMV ve Optimum sıcaklığın Hesaplanması

Gerekli veriler kullanılabilir formata dönüştürüldükten sonra, sırasıyla önce gerçek zamanlı PMV değerinin hesaplanmasını yapan python düğümü, sonra bu düğümün OUT çıktısından gelen PMV değerine göre optimum sıcaklığı hesaplayan python düğümüne ait kodlamalar yapılmalıdır. Bu işlemleri gerçekleştiren Dynamo node grubu Şekil 3.14'de gösterilmektedir.



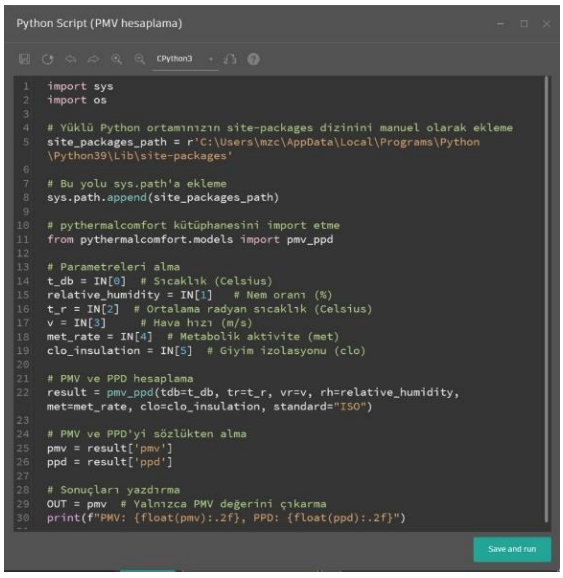
Şekil 3.14 PMV ve optimum sıcaklık hesabı yapan Dynamo düğümleri

Bu çalışmada, Dynamo Python düğümünde PMV değerinin hesaplanması için, 2020 yılında Tartarini ve diğerleri tarafından geliştirilen pythermalcomfort isimli python kütüphanesi kullanılmaktadır [98]. Pythermalcomfort kütüphanesi, ASHRAE 55 ve ISO 7730 gibi standartlara dayalı olarak termal konfor hesaplamaları yapmaya yarayan Python kütüphanesidir. PMV (Predicted Mean Vote) ve PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), Adaptive thermal comfort

(ASHRAE 55, EN 16798), SET (Standard Effective Temperature), Local discomfort tahminleri (cilt sıcaklığı vb.), İç ortam hava kalitesi ve hava hızı analizleri gibi bünyesinde ileri düzey fonksiyonlar hazırlanmış python modüllerini içerir. Bu sayede, en temel değikenler tanımlanarak, ilgili standart ve konfor modellerinde gerekli değerlerin hesaplanmasını kolaylaştırmaktadır.

Pythermalcomfort kütüphanesinin bilgisayara kurulabilmesi için, önce Python resmi internet sitesinden (https://www.python.org/downloads/) Python'un bilgisayara kurulması gerekmektedir. Daha sonra Windows Komut Satırına "pip install pythermalcomfort" yazılarak kütüphane kurulabilmektedir.

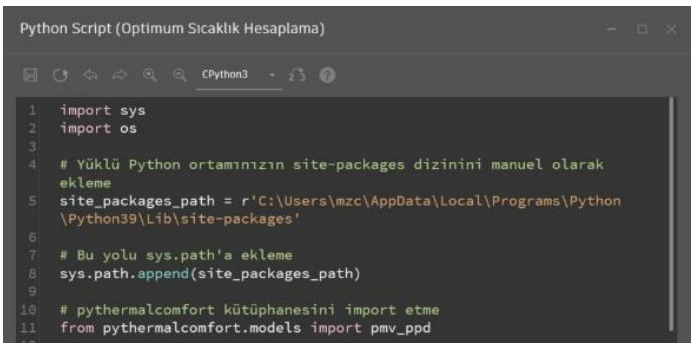
Dynamo Python düğümünde PMV hesaplamasını yapan python kodları Şekil 3.15'de paylaşılmıştır. Bu kodda önce, pythermalcomfort kütüphanesi ve bu kütüphaneye ait pmv_ppd modülü python düğümüne çağrılmaktadır. Daha sonra bu modülün değişkenleri (sıcaklık, nem, ortalama radyan sıcaklık, hava hızı, metabolik aktivite, giyim izolasyonu), sırasıyla Python düğümünün IN[0], IN[1], IN[2], IN[3], IN[3], IN[4], IN[5] girişlerine tanımlanmaktadır. Önceki dynamo düğümlerinde hazır hale getirilen gerekli veriler, bu python düğümünün tanımlanan girişlerine bağlanarak düğüm çalıştırıldığında OUT olarak PMV değerini döndürmektedir.



Şekil 3.15 PMV hesaplaması yapan python kodu

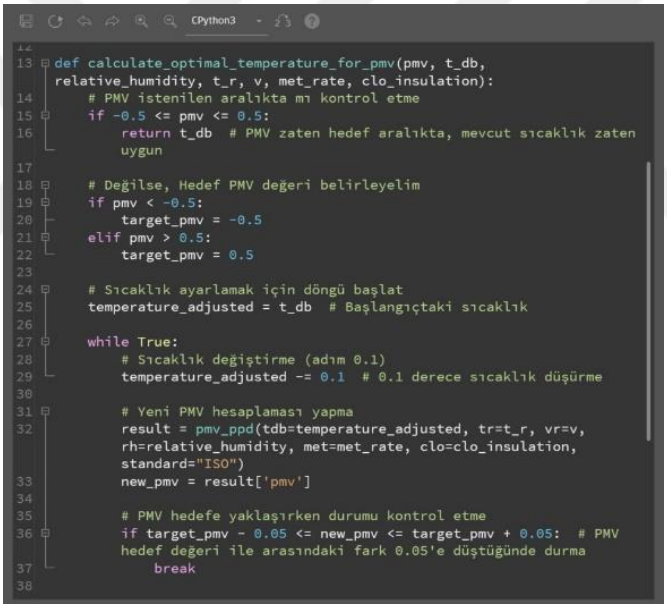
Gerçek zamanlı PMV hesabı yapıldıktan sonra, bu düğümde elde edilen PMV değeri yeni bir python düğümünde kullanılarak optimum sıcaklık değerini hesaplayan diğer python düğümü çalıştırılmaktadır. Optimum sıcaklığı hesaplayan

python düğümüne ait python kodları Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de sırasıyla paylaşılmıştır.



Şekil 3.16 Optimum sıcaklık hesabı yapan python kodu 1

Şekil 3.16'da gösterilen kodlar, düğüme pythermalcomfort kütüphanesini ve pmv_ppd modülünü çağırmaktadır.



Şekil 3.17 Optimum sıcaklık hesabı yapan python kodu 2

Şekilde 3.17'deki kod grubu, optimum termal konforu hesaplayan fonksiyonun tasarımını ve tanımlanmasını göstermektedir. Bu fonksiyon bir döngü şeklinde çalışmaktadır. Eğer PMV değeri, "-0.5" ile "+0.5" arasında ise, mevcut sıcaklık optimum sıcaklık olarak tanımlanır. Eğer PMV değeri "-0.5" değerinden aşağıdaysa, "-0.5" değeri hedeflenen PMV değeri olarak tanımlanır. Daha sonra mevcut sıcaklık "0.1" artırılarak yeni PMV hesaplanır. Hesaplanan yeni PMV, -0.5 değerinin yine altındaysa tekrar hesaplama yapılır ve bu döngüde ulaşılan PMV değeriyle, hedef PMV olarak tanımlanan "-0.5" değeri arasında "0.05" fark

kalana devam eder. Bu farka ulaşıldığı zaman, fonksiyon ulaştığı sıcaklık değerini optimum sıcaklık olarak kabul eder. Aynı işlemler, mevcut PMV'nin "+0.5" değerinden yukarı olduğu zamanda mevcut sıcaklıktan "-0.1" azaltılarak yapılmaktadır. ISO 7730 ve ASHRAE gibi uluslararası standartlara göre ideal bir termal ortamın, sadece %10 kullanıcının memnuniyetsizlik hissettiği "-0,5" – "+0,5" aralığında bir PMV değeri sağlanması tavsiye edilmesinden dolayı, bu aralığa uygun koşullama yapılarak optimum sıcaklık hesabı yapılmaktadır [54].

```
    # Optimum sıcaklığı döndürme
    return temperature_adjusted

# Parametreleri alma (giriş değerleri)
t_db = IN[0]  # Sıcaklık (Celsius)
relative_humidity = IN[1]   # Nem oranı (%)
t_r = IN[2]  # Ortalama radyan sıcaklık (Celsius)
v = IN[3]     # Hava hızı (m/s)
met_rate = IN[4]  # Metabolik aktivite (met)
clo_insulation = IN[5]  # Giyim izolasyonu (clo)
pmv = IN[6]  # PMV değeri

# Fonksiyonu çağır ve sonuçları alma
optimal_temperature = calculate_optimal_temperature_for_pmv(pmv, t_db,
relative_humidity, t_r, v, met_rate, clo_insulation)

# Sonucu dışarıya verme
OUT = optimal_temperature
```

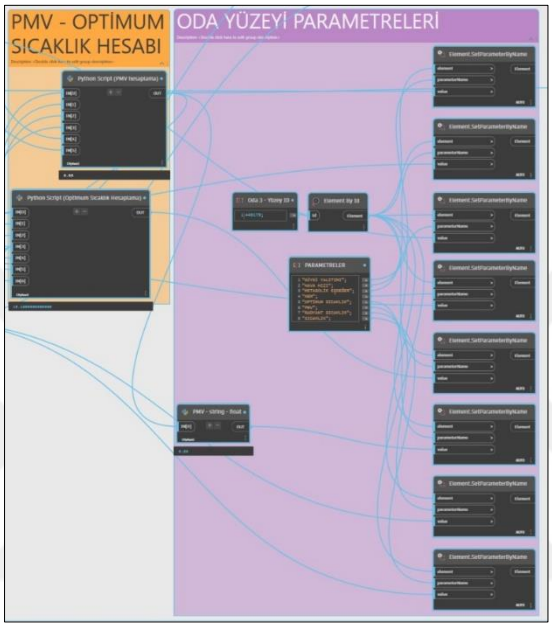
Şekil 3.18 Optimum sıcaklık hesabı yapan python kodu 3

Yukarıdaki optimum sıcaklık hesabı yapan fonksiyon tanımlandıktan sonra pmv_ppd modülünde kullanılmak üzere, PMV hesabını yapan python düğümündekiyle aynı şekilde, sıcaklık, nem, ortalama radyan sıcaklık, hava hızı, metabolik aktivite ve giyim izolasyonu girişleri aynı girişlere tanımlanır. Fakat PMV hesaplayan python düğümüne ek olarak, optimum sıcaklık hesaplayan python düğümünde, optimum sıcaklık fonksiyonunun çalıştırılması için PMV değerine ihtiytaç duyulmaktadır. Bu sebeple, IN[6] input girişine mevcut pmv girişi tanımlanır ve bu girişe, PMV hesabı yapan düğümden çıkan sonuç bağlanır. Diğer girişlere ise, önceki dynamo düğümlerinden gelen sıcaklık, nem, hava hızı, met ve clo verileri bağlandıktan sonra, bu değişkenlerle optimum sıcaklığı hesaplayan fonksiyon çalıştırılır ve hesaplanan optimum sıcaklığı hesaplayan bu python düğümünün çıkışına gönderilir.

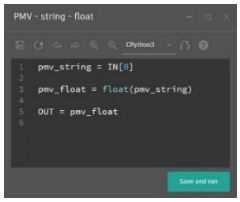
3. BIM objelerinin parametrelerine ilgili değerlerin yazılması

Mevcut PMV değeri ve optimum sıcaklık elde edildikten sonra bu değerler; sensörlerden gelen sıcaklık, nem, sabit olarak kabul edilen hava hızı ve kullanıcı girişli met ve clo değerleriyle birlikte ait oldukları odanın yüzeyine Elements.SetParameterByValue düğümü ile yazdırılır. Fakat bu düğüm ile

objelerin parametrelerine istenilen değerlerin yazdırılabilmesi için yüzeye ait ID'nin bilinmesi gerekmektedir. Bu ID, ilgili yüzeyin BIM modelinde seçilmesinden sonra, Manage sekmesinde IDs of Selection butonundan öğrenilebilir. Bu işlemleri gerçekleştiren Dynamo node grubu Şekil 3.19'da paylaşılmıştır. Burada yapılan tek ek işlem, PMV değerinin yüzeye yazdırılmadan önce veri türünün double veri türüne dönüştürülmesidir. Bu işlemi gerçekleştirilen python düğümünde kod ise Şekil 3.20'de paylaşılmıştır.

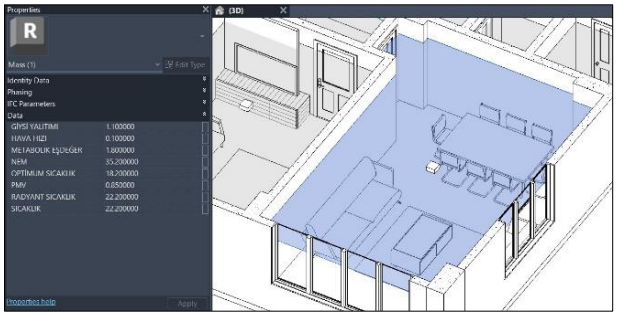


Şekil 3.19 Oda yüzey parametrelerine ilgili değerlerin yazılmasını gösteren Dynamo düğüm grubu



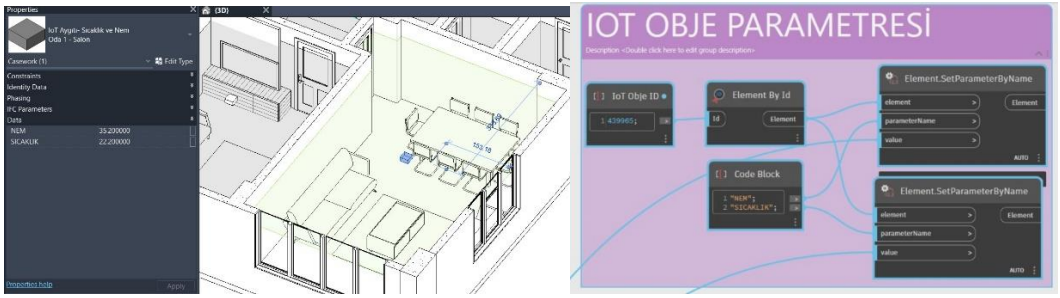
Şekil 3.20 String'ten float'a veri dönüşümü yapan python kodu

Dynamo scripti çalıştırıldıktan sonra, BIM modelindeki ilgili yüzeyin parametrelerine, Şekil 3.21'deki gibi ilgili değerler yazdırılır. Bu sayede ilgili değerler, oda yüzeyinin parametreleri üzerinde gerçek zamanlı olarak takip edilebilmektedir.



Şekil 3.21 Yüzeylere parametrelerin yazılması

BIM ortamında IoT aygıtının temsili olan objeler modellenip fiziki dünyadaki konumuna uygun şekilde modele yerleştirildikten sonra ve ilgili parametreler oluşturulur. Daha sonra Şekil 3.22'teki dynamo node grubu ile bu objelere gerçek zamanlı sıcaklık ve nem değerlerinin yazdırılması sağlanır. Sıcaklık ve nem değerleri, sıcaklık ve nem verilerinin elde edilmesi bölümünde açıklanan düğümlerden elde edilir. Bu dynamo scripti düzgün çalışabilmesi için, oda yüzeylerinde yapıldığı gibi, IoT Aygıtı Objesinin ID'sinin öğrenilmesi ve Element.SetParameterByName düğümüne gerekli yere bağlanması gerekmektedir. Bu işlemlerdeki genel amaç; fiziki dünyada sıcaklık ve nem değerlerini ölçen sensörlerinin yerinin BIM modelinde gösterilmesi ve bu sensörlere ait son zamanlı verilerin BIM modelinde gerçek zamanlı olarak izlenebilmesidir.

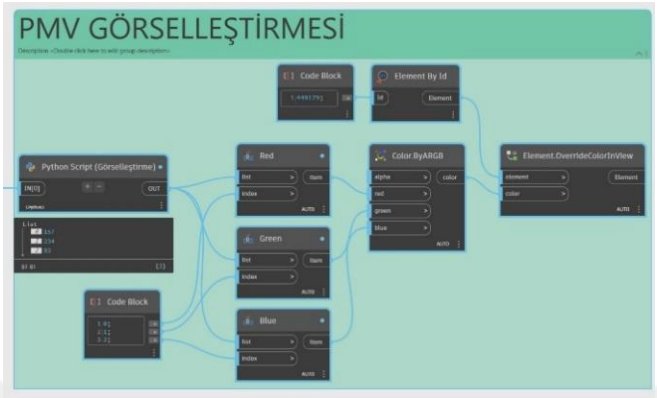


Şekil 3.22 IoT aygıtının BIM nesnesi ve parametrelerinin yazılması

4. PMV değerine göre görselleştirmenin yapılması

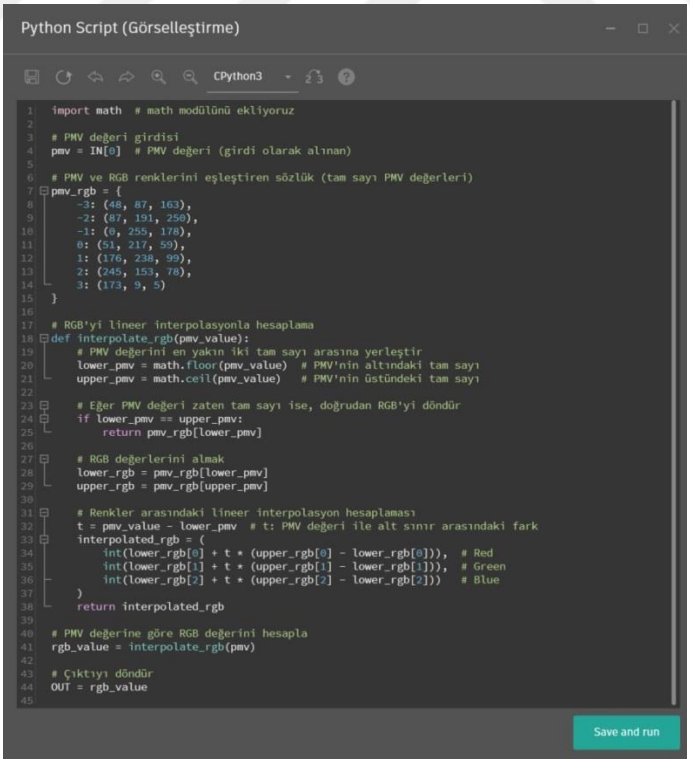
Her odaya ait yüzeylerin, anlık PMV değerlerine göre renklendirilmesini sağlayan Dynamo node grubu Şekil 3.23'da gösterilmektedir. Burada node grubunda ilk önce hesaplanan mevcut PMV değerininin karşılık geldiği renk değerine ait RGB kodları Görselleştirme olarak adlandırlan Python düğümünde hesaplanır. Düğümde hesaplanan RGB değerleri, GetItemAtIndex düğümüyle Red, Green ve Blue değeri olacak şekilde ayrıştırılır. Daha sonra bu değerler, Color.ByARGB düğümünde karşılık geldikleri yerlere bağlanılarak, bu RGB değerlerinin temsil

ettiği renk değerine ulaşılır. Modelde herhangi bir objeyi renkledirmeyi sağlayan Element.OverrideColorInView düğümüne ulaşılan renk değeri ve renklendirilecek objenin ID'si bağlandıktan sonra, scriptin çalıştırılmasıyla renklendirme işlemi tamamlanmış olur.



Şekil 3.23 PMV görselleştirilmesini yapan Dynamo düğümleri

Buradaki Dynamo node grubunun başında bulunan, mevcut PMV değerine ait RGB değerlerini hesaplayan python düğümüne ait kodlama Şekil 3.24'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.24 Mevcut PMV için RGB renk kodlarını hesaplayan python kodu

Bu düğümdeki kodlamada, ilk önce IN[0] girişine pmv değeri tanımlanır. Bu girişe, iki bölüm önce açıklanan, PMV hesabı yapan python düğümünün çıkışı

bağlanmalıdır. Daha sonra, her tam sayı PMV değerlerinin temsil ettiği renklere ait RGB kodları tanımlanır. Lineer enterpolasyon algoritması çalıştıran fonksiyon sayesinde, ara sayılara denk gelen PMV değerleri için RGB kodları tahmin edilir. Örneğin; “-2.5” PMV değerine ait RGB kodlarının hesaplanması için; “-3” PMV değerine karşılık gelen (48,67,163) RGB değerleri ile, “-2” ye karşılık gelen (87,191,250) RGB değerlerinin, istenilen PMV bu iki değerin tam ortada olduğu için aritmetik ortalaması alınır (67,129,206). Böylelikle mevcut PMV’ye ait RGB kodları elde edilir. Daha sonra yukarıda anlatılan işlemler devam eder ve renklendirme işlemi tamamlanır.

4
MODELİN UYGULANMASI: BULGULAR VE ANALİZ

4.1 Genel Bilgiler

4.1.1 Proje Bilgileri, Konum

Çalışma kapsamında modelin uygulanması için, Konya'nın Selçuklu ilçesinin Yazır Mahallesinde bulunan 7 katlı apartman binasının 6. katındaki 4+1 bir daire örnek olarak seçilmiştir. Yapının bulunduğu konuma ait uydu görüntüsü Şekil 4.1'te, binaya ve daireye ait dış görüntü Şekil 4.2'de paylaşılmıştır.



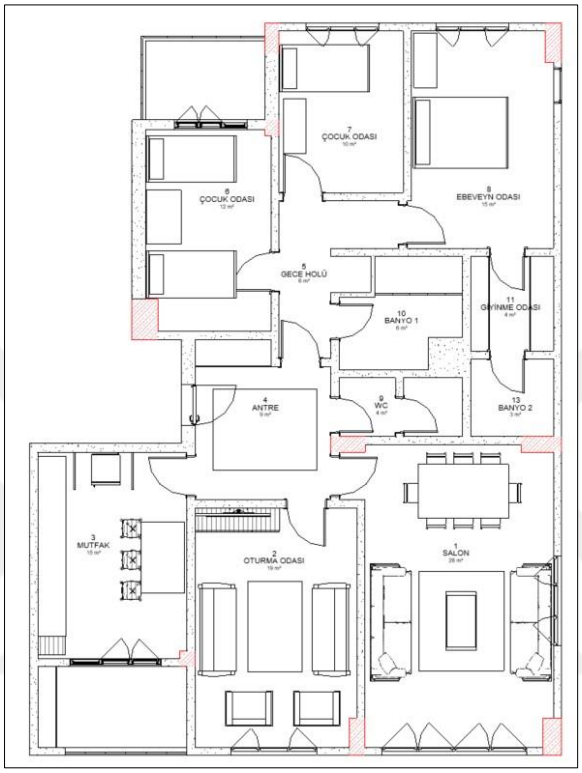
Şekil 4.1 Yapının konumuna ait uydu görüntüsü



Şekil 4.2 Çalışmanın gerçekleştirildiği bina ve daire

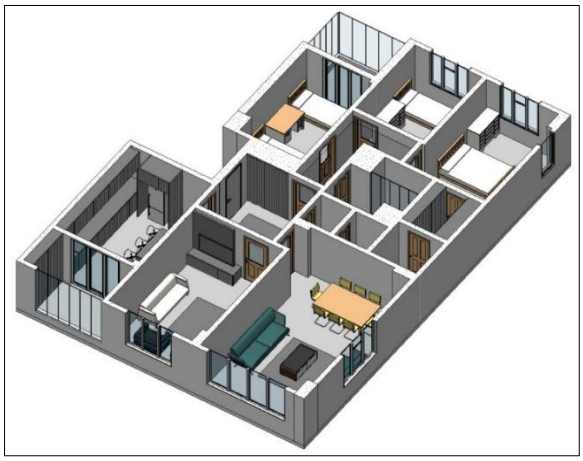
4.1.2 Örnek Dairenin Kat Planı ve BIM Modeli

Çalışmada modelin uygulanması için örnek olarak seçilen dairenin planı Şekil 4.3'te paylaşılmıştır. Dairenin güney ve güneydoğuya bakan cephelerinde mutfak, oturma odası ve salon gibi yaşam alanları bulunurken, kuzey ve kuzey doğuya bakan cephelerinde çocuk odaları ve ebeveyn odası bulunmaktadır.



Şekil 4.3 Seçilen dairenin kat planı ve yönelimi

Seçilen dairenin BIM modelinde ait, 3D kat planını gösteren görüntü Şekil 4.4'te paylaşılmaktadır.



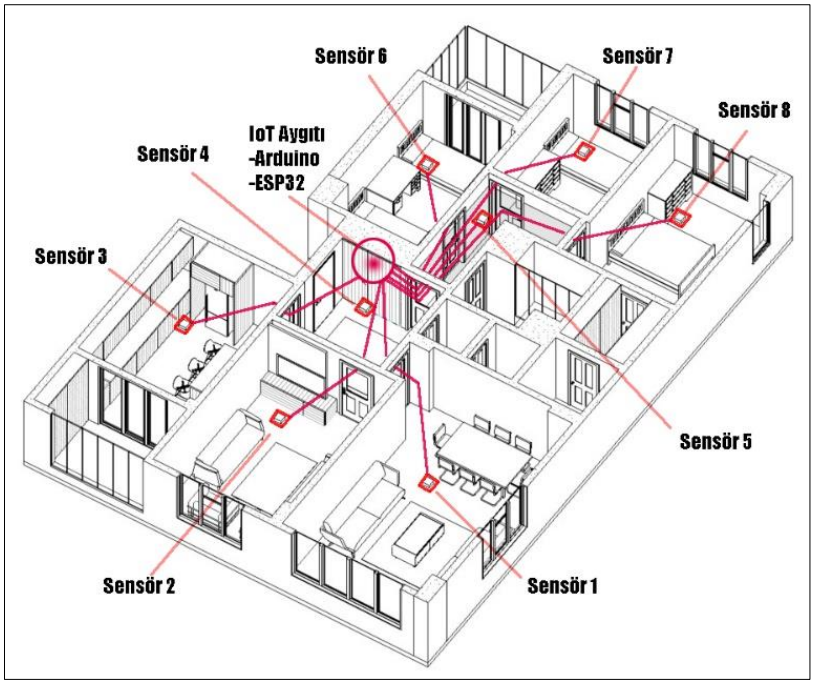
Şekil 4.4 Seçilen dairenin BIM modeline ait 3D kat planı

4.1.3 Örnek Dairenin İklimlendirme Sistemi

Çalışmada modelin test edildiği örnek dairenin ısıtma sistemi, merkezi bir kombi ile sağlanan yerden ısıtma sistemine dayanmaktadır. Isıtma kaynağı olarak E.C.A. Proteus Premix kombisi bulunmaktadır. Bu sistemde, kombi belirlenen bir sıcaklık değeri doğrultusunda tüm yaşam alanlarına genel ısıtma sağlamaktadır. Ancak, her bir odanın sıcaklık ayarı bireysel olarak kontrol edilmemekte, tüm mekanlar aynı ayar üzerinden ısıtılmaktadır. Dolayısıyla, sistem odalar arasında farklı sıcaklık tercihlerine olanak tanımayan merkezi bir kontrol mekanizması ile çalışmaktadır.

4.1.4 IoT Modülünün Seçilen Daireye Yerleşimi

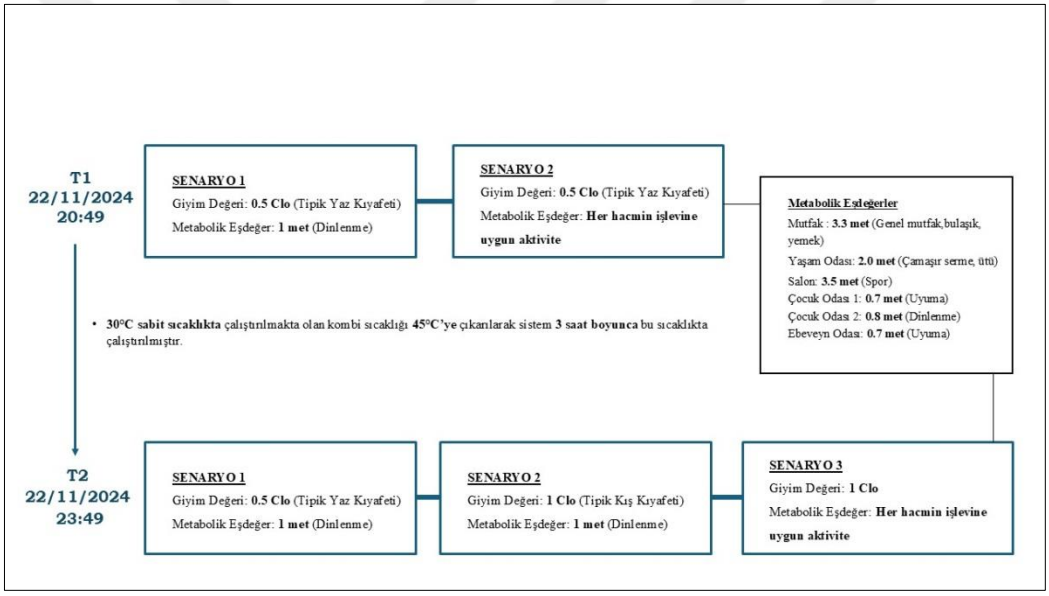
IoT aygıtının internet sağlayıcısı olarak kullandığı modem; dairenin antresindeki dolapta bulunmaktadır. Dolayısıyla, IoT aygıtının internete erişiminde sorun olmaması için ESP32 WiFi modülünün internet sağlayıcısına yakın olarak konumlandırılması gerekmektedir. Bu sebeple, Arduino UNO ve ESP32 WiFi modülü bu dolapta yerleştirilmiştir. DHT22 sıcaklık ve nem sensörleri ise, Şekil 3.3'te gösterildiği şekilde uzatılarak her odanın orta noktasında bulunan avizelere sabitlenmiştir. IoT aygıtının ve sensörlerin daireye yerleşimini gösteren görüntü Şekil 4.5'te paylaşılmaktadır.



Şekil 4.5 IoT aygıtının ve sensörlerin daireye yerleşimi

4.2 Senaryolar

Çalışma kapsamında geliştirilen modelin uygulanması için, T1 ve T2 olmak üzere iki farklı zamana ve işletim senaryonasuna ait ölçümlere dayanan beş farklı senaryo türetilmiştir. Senaryolar, diğer bina türleriyle kıyaslandığında, konut binalarında oldukça çeşitliklik gösteren giyim değeri ve metabolik eşdeğer değişkenleri değiştirilerek ve ısıtma sistemini iki zaman arasında belirli bir değerde çalıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Oluşturulan bu senaryolar ile, aynı konut ortamında iki farklı işletim senaryosu içinde, alternatif üretilen senaryolar ile konut yapılarındaki termal konfor dinamiklerinin ve gerekli optimum sıcaklıkların enerji etkinliği açısından incelenmesi amaçlanmıştır. Oluşturulan senaryolara ait detaylar Şekil 4.6'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.6 Modelin uygulandığı senaryolar

T1 zamanına ait ilk senaryoda bütün hacimlerde giyim değeri olarak 0.5 clo (tipik yaz kıyafeti) ve metabolik eşdeğer olarak 1 met (dinlenme) eşit alınmış ve dairenin mevcut termal konfor koşulları ve optimum sıcaklık değerleri ölçülmüştür. T1 zamanında ait ikinci senaryoda, giyim değeri sabit tutularak, met değeri olarak her hacmin işlevine uygun olarak gerçekleştirilen aktivitelerin değerleri kullanıcı girişli olarak hesaplamaya dahil edilmiş ve ikinci ölçüm yapılmıştır. Bu senaryoda, dairenin kuzeyde konumlanan yatak odaları için dinlenme ve uyku gibi pasif aktiviteler; güneyde ve dairenin merkezinde bulunan mutfak, yaşam odası ve salon, antre ve gece holü için gün içinde gerçekleşen daha aktif aktiviteler seçilmiştir.

Hacme uygun aktivitelerin met değerleri; Herrmann ve diğerleri tarafından yapılan, fiziksel aktivitelerin metabolik eşdeğer ölçümlerini kapsayan çalışmadan elde edilmiştir [99]. İnsanların gerçekleştirdiği çeşitli fiziksel aktivitelerin enerji maliyetlerini kapsamlı bir şekilde araştıran bu çalışma, 83 adet ev içi aktivite için met değerlerinin ölçümünü yapmıştır. T1 senaryo 2 için hacimlerin işlevine uygun olarak seçilen ev içi aktivitelerin met değerleri Tablo 4.1'de paylaşılmıştır. Bu değerler hesaplamaya dahil edildikten sonra T1 Senaryo 2 için yeniden ölçüm yapılmıştır.

T2 Senaryosu için Kullanılan Met Değerleri		
Salon	3.3 met	Spor, Ev içi kalistenik
Yaşam Odası	2.0 met	Çamaşır serme, ütü
Mutfak	3.5 met	Genel mutfak işleri, bulaşık, yemek
Antre	2.0 met	Genel temizlik, hafif efor
Gece Holü	2.0 met	Genel temizlik, hafif efor
Çocuk Odası 1	0.7 met	Uyuma
Çocuk Odası 2	0.8 met	Dinlenme
Ebeveyn Odası	0.7 met	Uyuma

Tablo 4.1 Hacimlerin işlevlerine göre seçilen aktiviteler ve met değerleri

T1 zamanında tek bölgeli yerden ısıtma konfigürasyonuyla çalışan ısıtma sistemini kontrol eden kombi, başlangıçta 30°C sabit sıcaklıkta çalıştırılmaktadır. T1 zamanı için ölçümler yapıldıktan sonra, kombi sıcaklığı 45°C'ye çıkarılarak sistem 3 saat boyunca bu sıcaklıkta çalıştırılmıştır. 3 saatlik işlemin sonunda oluşan durumda T2 zamanına ait senaryolar için yeniden PMV ve optimum sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

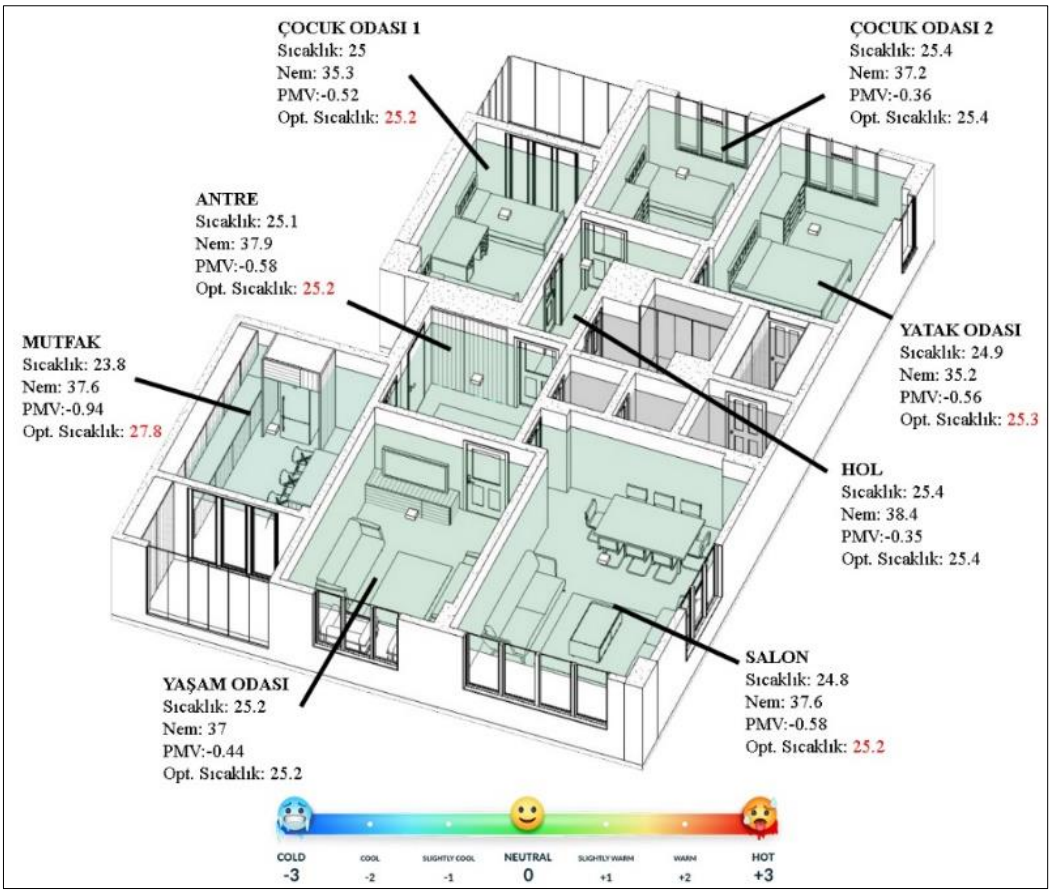
T2 zamanı birinci senaryoda, ısıtma sisteminin termal konfor üzerine etkisini gözlemlemek adına met ve clo değerleri, T1 zamanı birinci senaryo ile aynı alınmıştır. T2 zamanı ikinci senaryoda ise, tüm hacimler için 1 clo değeri (tipik

kış kıyafeti) kabul edilmiş, met değerleri sabit tutulmuş. Üçüncü senaryoda 1 clo değeriyle birlikte, Tablo 4.1'deki her hacmin işlevine uygun aktivitelerin met değerleri tekrar girilerek ölçüm yapılmıştır.

4.3 Modelin Uygulanması

4.3.1 T1 Zamanı- Senaryo 1 (0.5 clo 1 met)

Şekil 4.7, her hacim için tipik yaz kıyafetlerinin (0,5 clo) ve sabit dinlenme faaliyetinin (1 met) atandığı T1- Senaryo 1'in ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlar BIM modeli üzerinde paylaşılmıştır.

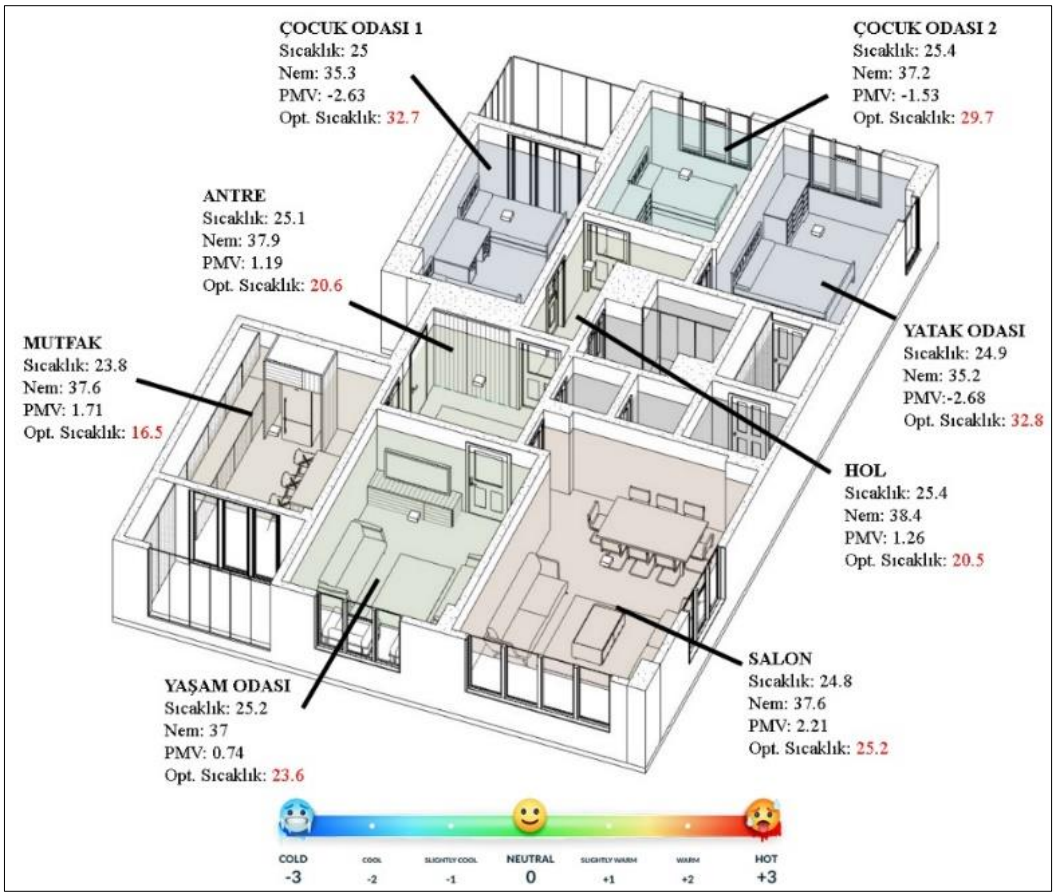


Şekil 4.7 T1 zamanı senaryo 1 için yapılan ölçümün sonuçları

T1 zamanına ait birinci senaryonun sonuçlarına bakıldığında; yaşam odası, hol ve çocuk odası 2'nin işletme için kabul edilebilir olarak belirlenen -0.5 - 0.5 PMV aralığında olduğu görülmektedir. Dairenin dış mekâna yüzeyinin geniş olduğu diğer hacimlerde (mutfak, salon, çocuk odası 1, yatak odası); -0.94 ile -0.52 arasında değişen negatif yönde hafif konforsuzluk söz konusudur.

4.3.2 T1 Zamanı- Senaryo 2 (0.5 clo, Hacimlerin İşlevine Uygun Aktivite)

Şekil 4.8, her hacim için tipik yaz kıyafetlerinin (0,5 clo) ve hacimlerin işlevlerine uygun faaliyetlerin metabolik eşdeğerlerinin atandığı T1- Senaryo 2'nin ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlar BIM modeli üzerinde paylaşılmıştır.

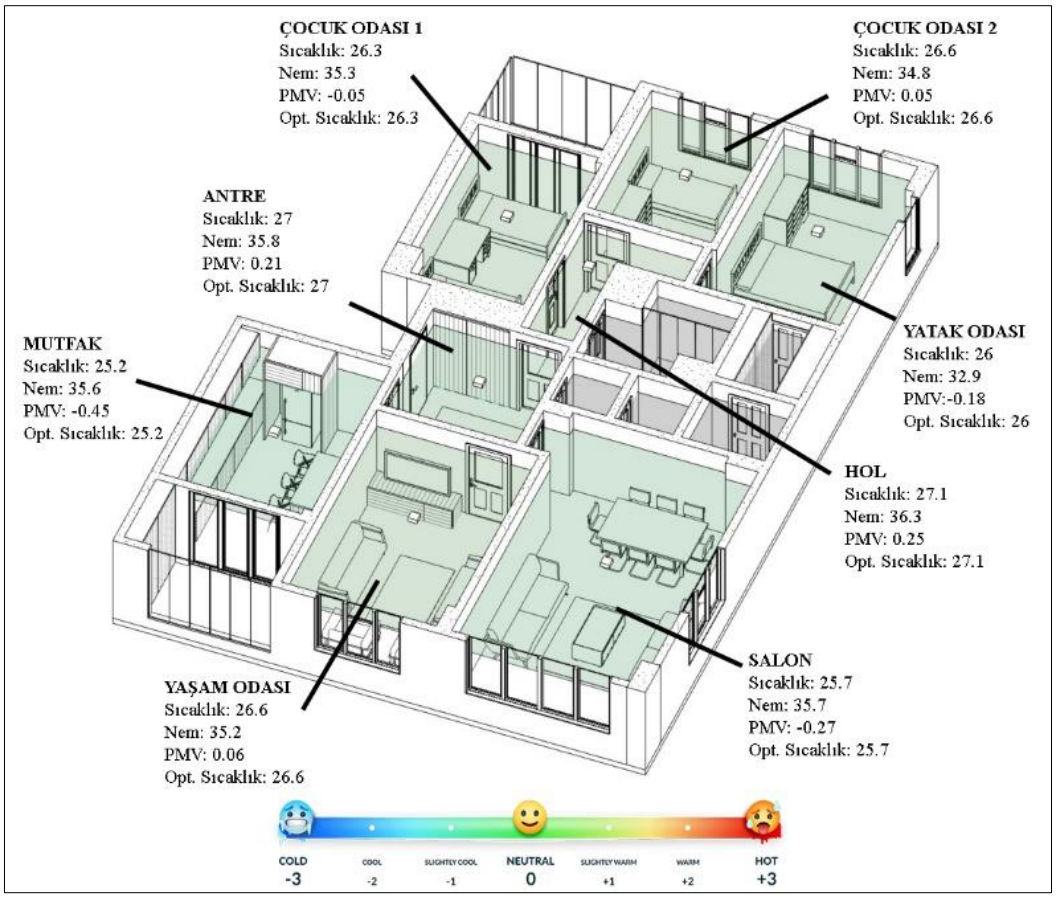


Şekil 4.8 T1 zamanı senaryo 2 için yapılan ölçümün sonuçları

Her hacmin işlevine uygun olarak belirlenen faaliyetlerinin metabolik eşdeğerlerinin termal konfor hesabına dahil edilmesiyle, T1 zamanına ait ikinci senaryonun sonuçlarında oldukça zıtlık gösteren bir termal konfor deseni görülmektedir. Uyku faaliyetinin yapıldığı çocuk odası 1 ve yatak odasında -2.63 ve -2.68; dinlenme eyleminin yapıldığı çocuk odası 2'de -1.53 PMV değerleri gibi negatif yönde yüksek bir konforsuzluk söz konusudur. Günlük ev içi aktivitelerin gerçekleştiği diğer hacimlerde ise, 0.74 ile 2.21 PMV değerleri arasında pozitif yönde konforsuzluk gözlemlenmektedir. Mutfak için 1.71, yaşam odasında 0.74, salonda 2.21, antrede 1.19, holde 1.26 PMV değerleri ölçülmüş, konforsuzluğun giderilmesi için gereken optimum sıcaklık değerleri hesaplanmıştır.

4.3.3 T2 Zamanı- Senaryo 1 (0.5 clo, 1 met)

Şekil 4.9, her hacim için tipik yaz kıyafetlerinin (0,5 clo) ve sabit dinlenme faaliyetinin (1 met) atandığı T2- Senaryo 1'in ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlar BIM modeli üzerinde paylaşılmıştır.



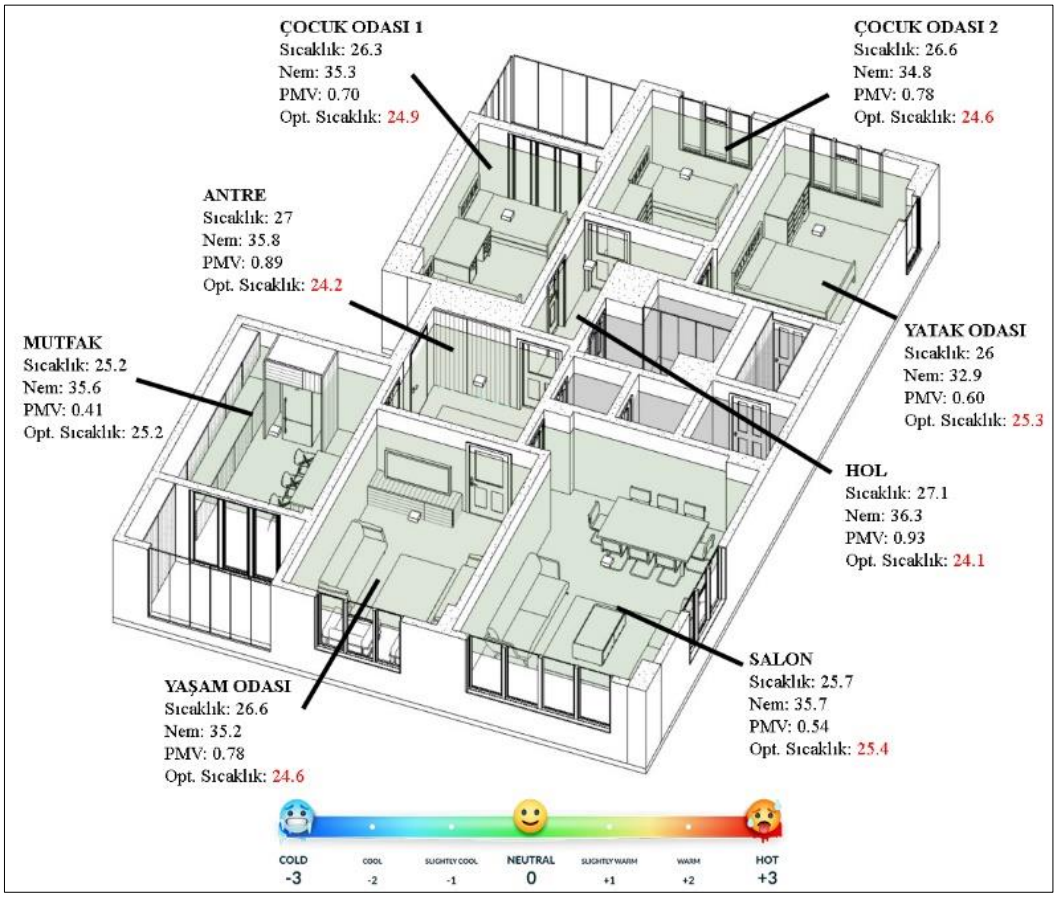
Şekil 4.9 T2 zamanı senaryo 1 için yapılan ölçümün sonuçları

T1 zamanında 30°C sabit sıcaklıkta çalışmakta olan kombinin ayar sıcaklığı 45°C'ye çıkarılarak 3 saat boyunca çalıştırılmasından sonra, yeniden PMV ve optimum sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. T2- Senaryo 1'de, T1- Senaryo 1'deki clo ve met değişkenleri değiştirilmemiştir. Oluşan termal çevrenin ölçümüne bakıldığında, tüm hacimlerin kabul edilebilir işletme aralığını "-0.50-0.50" PMV'ye ulaştığı görülmektedir. Dış mekâna sınırı olmayan antre ve hol hacimlerinde, sırasıyla 1.9 ve 1.7 derecelik sıcaklık artışı; dış mekâna sınırı olan hacimlere kıyasla küçük yüzey alanına ve hacme sahip mutfak, yaşam odası, çocuk odası 1 ve çocuk odası 2'de sırasıyla 1.4, 1.4, 1.3, 1.2 derecelik sıcaklık artışı; dış mekânla ilişki açısından en yüksek yüzey alanına sahip olan salon ve

yatak odasında ise sırasıyla 0.9 ve 1.1 derecelik sıcaklık artışı gözlemlenmektedir. Tüm hacimlerin nem oranında ise, %1,8 ile %2,4 arasında düşüş görülmektedir.

4.3.4 T2 Zamanı- Senaryo 2 (1 clo, 1 met)

Şekil 4.10, her hacim için tipik kış kıyafetlerinin (1 clo) ve sabit dinlenme faaliyetinin (1 met) atandığı T2- Senaryo 2'nin ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlar BIM modeli üzerinde paylaşılmıştır.



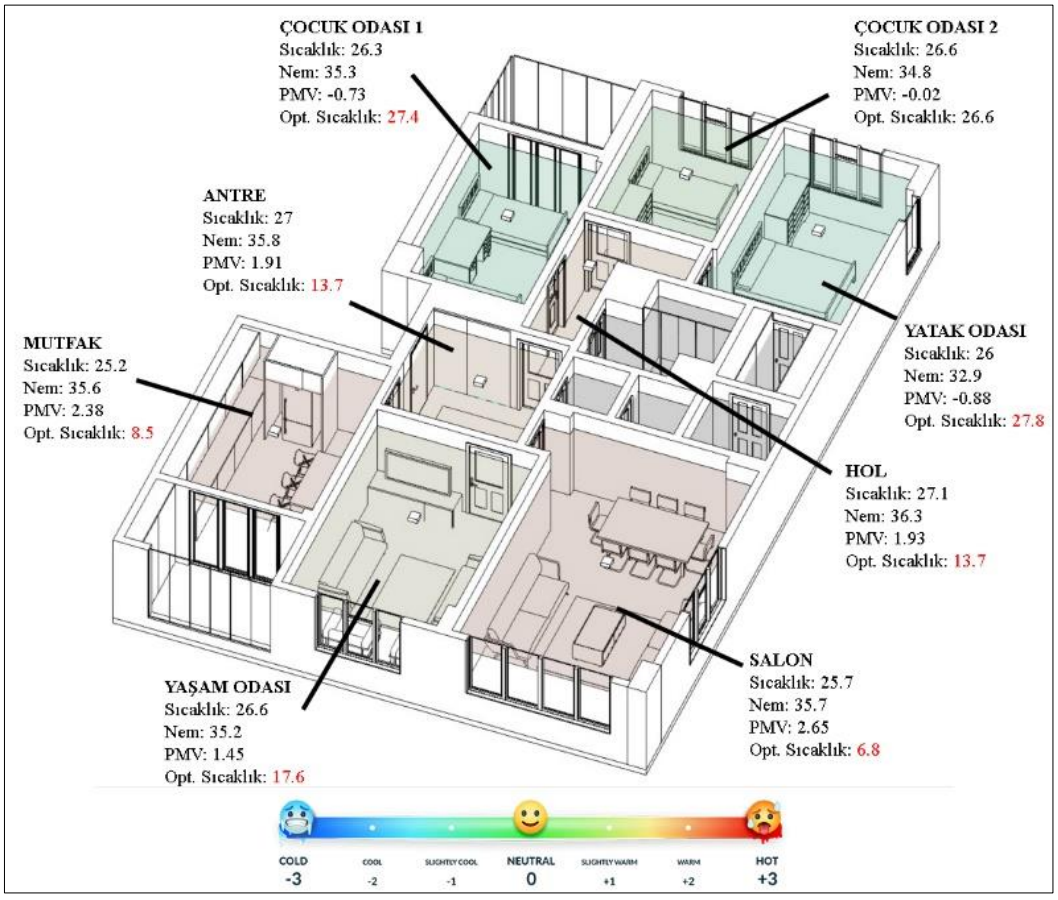
Şekil 4.10 T2 zamanı senaryo 2 için yapılan ölçümün sonuçları

Clo değerinin tipik yazlık giysiden tipik kışlık giysiyle değiştirildiği T2-Senaryo 2'de, mutfak hariç tüm alanlarda 0,50 ila 1,00 arasında değişen hafif bir pozitif konforsuzluk olduğu görülmektedir. Mutfak 0,41 PMV değeri ile kabul edilen konfor aralığında kalırken, oturma odası ve yatak odası sırasıyla 0,54 ve 0,60 PMV değerlerine sahip olup kabul edilebilir konfor aralığına ve optimum sıcaklığa en yakındır. En yüksek konforsuzluk, 0,89 ve 0,93 PMV değerleri ile dairenin merkezindeki giriş ve hol alanlarında gözlenmektedir. Oturma odası, çocuk odası 1 ve çocuk odası 2'de 0,78, 0,70 ve 0,78 PMV değerleri hesaplanmış

ve bu değerlerin diğer mekanlara kıyasla kabul edilebilir aralığa uzaklık açısından ortada olduğu görülmektedir.

4.3.5 T2 Zamanı- Senaryo 3 (1 clo, Hacimlerin İşlevine Uygun Aktivite)

Şekil 4.11, her hacim için tipik kışlık giysilerin (1 clo) ve hacimlerin işlevlerine uygun faaliyetlerin metabolik eşdeğerlerinin atandığı T2- Senaryo 3'ün ölçüm sonuçlarını sunmaktadır. Bu sonuçlar BIM modeli üzerinde paylaşılmıştır.



Şekil 4.11 T2 zamanı senaryo 3 için yapılan ölçümün sonuçları

T2-Senaryo 3 ölçümleri, T2-Senaryo 2'ye Tablo 4.1'de her bir mekanın işlevine göre belirlenen met değerlerinin dahil edilmesiyle elde edilmiştir. T1-Senaryo 2'de mekanlar arasında gözlemlenen termal konfor koşullarındaki zıtlık, T2-Senaryo 3'te de benzer şekilde görülmektedir. Mutfak, oturma odası, salon, giriş ve hol gibi daha yüksek metabolik eşdeğerli faaliyetlerin gerçekleştiği odalarda sırasıyla 2,38, 1,45, 2,65, 1,91 ve 1,93 PMV değerleriyle pozitif yönde yüksek bir konforsuzluk gözlemlenmektedir. Öte yandan, uyku faaliyetinin gerçekleştiği çocuk odası 1 ve yatak odasında, -0,73 ve -0,88 PMV değerleri ile negatif yönlü hafif konforsuzluk

gözlemlenmektedir. Dinlenme faaliyetlerinin gerçekleştirildiği çocuk odası 2, -0,02 PMV değeri ile kabul edilebilir PMV aralığındadır.

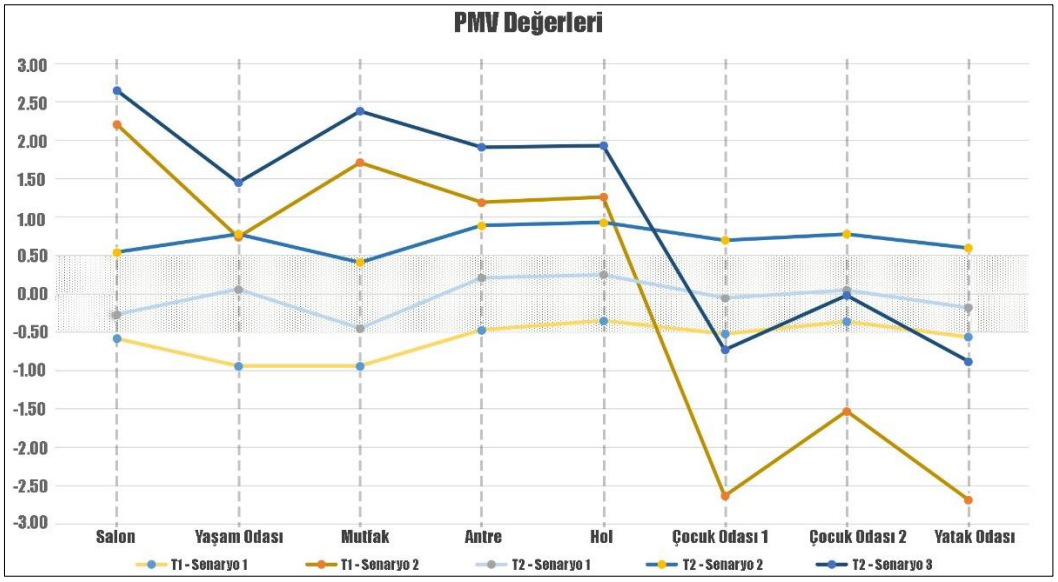
4.4 Bulguların Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulguların, konut yapılarındaki termal konfor dinamiklerinin ve gerekli optimum sıcaklıkların enerji etkinliği açısından analiz edilmesinde kullanılması amaçlanmaktadır. Bu bağlamda bulgular; iki zaman arasındaki yapılan işletmenin hedefi ve iki farklı zamanda üretilen senaryoların oluşturulma amaçlarına göre değerlendirilmesi gerekmektedir.

Oluşturulan senaryoların ve yapılan işletmenin amacını kısaca özetlemek gerekirse; T1'in birinci senaryosunda, clo ve met değerleri tüm hacimler için sabit alınarak, konut yapılarındaki bu iki önemli değişkeni göz önüne almayan, sadece sıcaklık ve nem parametreleri ile yapılan termal konfor değerlendirilmesinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. T1'in ikinci senaryosunda, konut yapılarındaki gerçek kullanım senaryosuna uygun olarak seçilen faaliyetlerin hesaba katılmasıyla, metabolik aktivitenin konut yapılarındaki termal konfor koşullarına etkisinin ortaya çıkarılması hedeflenmiştir.

T2'nin birinci senaryosunda ise, clo ve met değerleri T1'in birinci senaryosuyla aynı tutulmuş ve ısıtma sistemi T1 birinci senaryoda belirlenen konforsuzluk koşullarını gidermek için kullanılmıştır. Bu sayede, clo ve met değerlerini göz önüne almayan bir işletim senaryosu üretilmiştir. Daha sonra, T2'nin ikinci senaryosunda giyim yalıtımı, tipik yaz kıyafetinden tipik kış kıyafetiyle değiştirilerek clo değerinin etkisinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Son olarak, gerçek kullanım senaryosuna uygun olarak seçilen faaliyetler de hesaba katılarak T2'nin üçüncü senaryosu oluşturulmuştur.

İki farklı zamana ait oluşturulan bu senaryolarda tüm hacimler için yapılan PMV hesaplamalarının sonuçları Şekil 4.12'deki grafikte paylaşılmıştır. Sarı renk tonlarındaki çizgiler T1 zamanına ait senaryoların sonuçlarını, mavi renk tonlarındaki çizgiler T2 zamanına ait senaryoların sonuçlarını göstermektedir. Grafikteki noktayla taranan alan, işletme için kabul edilebilir "-0.50 – 0.50" PMV aralığını ifade etmektedir.



Şekil 4.12 Tüm senaryolar için hesaplanan PMV değerleri

T1-Senaryo 1'de, mekanlar arası PMV değerlerinde küçük farklılıklar bulunsa da, tüm mekanlardaki PMV değerlerinin ya konfor aralığında ya da bu aralığa çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak, aynı sıcaklık ve nem seviyelerine sahip olmasına rağmen, her bir mekanda gerçekleşen faaliyetlerin met değerleri hesaplamaya dahil edildiğinde, T1-Senaryo 2'de mekanlar arası PMV değerlerinde önemli ölçüde farklılıklar görülmekte ve hiçbir mekanda gerekli konfor koşulları karşılanamamaktadır. Bu durum, konut binalarında gerçekleşen farklı faaliyetlerin termal konfor üzerindeki önemli etkisini açıkça vurgulamaktadır.

T2-Senaryo 1'de, ısıtma sistemi ayar sıcaklığının 30°C'den 45°C'ye yükseltilmesi ve üç saat boyunca çalıştırılmasıyla, aynı clo ve met değerlerine sahip T1-Senaryo 1'deki PMV değerlerinin tüm mahaller için konfor aralığına ulaştırıldığı görülmektedir. Clo değerinin tipik kışlık giysi yalıtımını yansıtacak şekilde ayarlandığı T2-Senaryo 2'de ise, biri hariç tüm odalardaki PMV değerleri kabul edilebilir konfor aralığının biraz üzerindedir. Bu durum, giysi yalıtım seviyeleri dikkate alınmadan kullanılan ısıtma sistemlerinin, konfor sınırları içinde gereksiz enerji tüketimine yol açabileceğini göstermektedir.

Her bir mekanda gerçekleşen faaliyetleri dikkate alan T2-Senaryo 3 ölçümünde, odalar arasında PMV değerlerinde bir kez daha önemli bir farklılık gözlemlenmiştir. Isıtma sisteminin belirli bir süre boyunca çalıştırılmasına ve giysi yalıtımının tipik kış kıyafetlerine göre ayarlanmasına rağmen, uyku ve

dinlenme gibi pasif faaliyetlerin gerçekleştiği odalarda PMV değerleri kabul edilebilir çalışma aralığının biraz altında kalırken, daha aktif faaliyetlerin gerçekleştiği alanlarda PMV değerleri kabul edilebilir aralığın önemli ölçüde üzerindedir. Bu durum, konut binalarındaki faaliyetlerin çeşitliliğini ve bunların termal konfor üzerindeki önemli etkisini vurgulamaktadır.

5
SONUÇ

Bu tez çalışmasında, işletme aşamasında kullanılmak üzere, konut yapılarındaki kullanıcı çeşitliliğinden kaynaklanan değişken termal konfor parametrelerini göz önüne alan, anlık olarak optimum sıcaklık hesaplaması yapabilen, uygulanabilir, BIM – IOT entegrasyonuna dayalı bir dinamik termal konfor modeli geliştirilmiş ve bu model mevcut bir konut yapısında denenmiştir.

Modelin uygulanması için Konya ilinde bir konut yapısı örnek olarak seçilmiştir. Arduino Uno, DHT22 sıcaklık ve nem sensörü, ESP32 WiFi modülünün donanımsal entegrasyonuyla oluşturulan düşük maliyetli IoT aygıtı; uygun programlama işlemleri yapıldıktan sonra, seçilen konut yapısına ait hacimlere yerleştirilmiş, bu hacimlerdeki sıcaklık ve nem verileri gerçek zamanlı ölçüm yoluyla elde edilmiştir.

Elde edilen IoT tabanlı verilerin depolanması için, bu verilerin dinamik, değişken ve yüksek hacimli yapısı göz önünde bulundurularak, veri tabanı seçimi ve tasarımı yapılmıştır. Node.js kullanılarak oluşturulan HTTP sunucusu sayesinde, gerçek zamanlı IoT verilerinin, uygun formatta ve belirlenen veri koleksiyonu yapısına göre tasarlanan veritabanında depolanması sağlanmıştır. IoT verilerini depolayan veri koleksiyonuyla birlikte, kullanıcı girişli değişkenleri değerlendirmek amacıyla manuel olarak oluşturulan ve konut yapısının işletim senaryosuna uygun clo ve met değerlerini içeren veri koleksiyonu; seçilen dairenin BIM modeline Dynamo görsel programlama aracı kullanılarak entegre edilmiştir. Bu sayede, seçilen konut dairesindeki her oda için, anlık PMV ve optimum sıcaklık değerlerinin BIM ortamında hesaplanması, termal çevrenin görselleştirilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen bu model, konut yapısının termal konfor koşullarını önemli ölçüde etkileyen clo ve met değerlerinin değişimine ve

ısıtma sisteminin kullanımına göre oluşturulan senaryolar ile test edilmiş ve önemli bulgulara ulaşılmıştır.

Bu çalışma kapsamında ulaşılan bulgular ve bunların değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Konut yapıları doğası gereği, çeşitli giyim alışkanlıklarına sahip kullanıcılara ve eş zamanda oldukça çeşitli faaliyetlerin gerçekleştiği farklı hacimlere sahip dinamik bir yapıdan oluşmaktadır. Bunların termal konfor dinamiklerine etkisi oldukça yüksektir. Bu durum, konut yapılarında birbirine zıtlık gösteren termal konfor koşullarının oluşumuna neden olmaktadır.
- Konut binalarındaki farklı hacimlerdeki termal konfor değerleri, değişken kullanıcı parametrelerine yanıt verebilen BIM-IoT tabanlı bir yaklaşım kullanılarak hesaplanabilir ve görselleştirilebilir. Ek olarak, gerekli optimum sıcaklık değerlerine ulaşılabilir.
- Konut yapılarındaki değişken parametreleri dikkate almayan iklimlendirme sistemlerinin, bütünsel termal konfor sağlamada başarısız olduğu ve konfor aralıkları içinde gereksiz enerji tüketimine neden olduğu tespit edilmiştir.
- Konut binalarında gerekli olan iklimlendirme işlemlerinin süresi ve miktarı, mekanların konumuna ve dış ortamla etkileşim derecesine bağlı olarak değişmektedir. Tek konfigürasyonlu merkezi ısıtma sistemleri, konut yapılarındaki hacimler için gereken termal konfor koşullarını sağlama konusunda yetersiz kalabilmektedir. Her hacmin ihtiyacına uygun konfor koşullarının sağlanması ve iklimlendirme sistemlerinin enerji etkin yönetilebilmesi için ayarlamaların her alana özel olarak yapılması gerekir.

Çalışmanın sonuçları, konut yapılarında farklı hacimler içerisindeki termal konfor değerlerinin, BIM-IoT teknolojisine dayalı bir yöntemle, değişken kullanıcı parametrelerine duyarlı bir şekilde görüntülenebileceği; bu modelle yapılan gerçek zamanlı bir görüntüleme ve izlemenin, konfor aralıkları içindeki gereksiz enerji kullanımı tespit edilebileceği ve mevcut termal konfor değerine bağlı olarak enerji etkin optimum sıcaklıkların anlık olarak hesaplanabileceği hipotezini doğrulamaktadır.

5.1 Çalışmanın Sınırlılıkları

Bu çalışmanın, aşağıda listelenen bazı sınırlamaları mevcuttur:

- Geliştirilen model, anlık termal konfor koşullarını görüntüleme ve analiz etmeye odaklanmıştır. Tesis yönetimi için bir işletme modeli geliştirilmemiştir.
- Çalışmada, kullanıcılardan gerçek zamanlı geri bildirim alınmamış, bunun yerine elle oluşturulan veri koleksiyonu kullanılmıştır. Bu bağlamda çalışmanın kapsamı, kullanıcılardan geri bildirim alabilen, ilgili veritabanına bağlı bir mobil uygulamanın geliştirilmesiyle genişletilebilir.
- Çalışmada kullanıcıların termal çevresiyle etkileşime girdiği (örneğin pencere kullanımı, mekanik ısıtma ve soğutma sistemleri) senaryolar kapsama dahil edilmemiştir. Çalışma, kapalı ortamlarda sabit iklimlendirme koşullarını kapsayan senaryolar ile gerçekleştirilmiştir.
- Çalışmada geliştirilen model, konut yapılarında termal konfor koşullarını görüntüleme ve analiz etmeye odaklanmıştır. Tesis yönetimi için enerji etkin kararlar alabilen bir işletme modeli geliştirilmemiştir.

Gelecekteki çalışmalar için, bu sınırlamalar göz önüne alınarak, çalışma kapsamının genişletilmesi amaçlanmaktadır.

5.2 Gelecekteki Çalışmalar ve Öneriler

Bu çalışmada geliştirilen modelin, konut binalarında iklimlendirme sistemlerinin verimli kullanımına katkıda bulunması ve enerji tasarruflu, kullanıcı merkezli bina tasarımına ve işletimine yardımcı olması beklenmektedir.

Geleceğe dönük olarak bu çalışmanın; mevcut durumun tespitini yapan, BIM ortamında kurulabilen etkili iş akışları (Autodesk CFD, EnergyPlus) sayesinde kullanıcıların adaptif davranışlarını (kıyafet, doğal iklimlendirme sistemlerinin kullanımı) göz önüne alabilen senaryo tabanlı değerlendirmeler yapabilecek şekilde geliştirilmesi amaçlanmaktır. Bu sayede, enerji etkinliği açısından en uygun kararlar alabilen, makine öğrenmesiyle güçlendirilmiş bir işletme modeli oluşturulması amaçlanmaktadır.

Bu modelin mevcut binalarda test edilmesi, gerçek zamanlı veri setlerine ve kullanıcı geri bildirimlerine dayanan kapsamlı Kullanım Sonrası Değerlendirme

(POE) analizleri ile birlikte; farklı kullanıcılar, bina tipleri ve iklim bölgeleri için optimum mimari ve mekanik tasarım kuramları üzerine yapılan çalışmaların geliştirilmesine olanak sağlaması beklenmektedir.

Enerji etkin tasarım çalışmaları ve bina simülasyonları, enerji verimliliği ve net sıfır hedeflerine ulaşmak için oldukça önemlidir; ancak bu hedeflere, bina operasyonlarını optimize etmeden ulaşmak oldukça zordur. Simülasyonlar aracılığıyla enerji verimli ve sürdürülebilir kararlar alınsa bile, binalardaki (özellikle konut) kullanıcıların termal ortamla etkileşimleri oldukça dinamik ve çeşitlidir. Bu bağlamda, enerji verimli tasarım ve simülasyonlara ek olarak, enerji verimliliği için bina operasyonlarını optimize etmenin bu hedeflere ulaşmak için gerekli olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır.

Bu nedenle araştırmacıların, tasarımcıların ve tesis yöneticilerinin bina operasyonlarını iyileştirmek ve mevcut yöntemleri geliştirmek için günümüz teknolojilerinin potansiyel faydalarından yararlanmaları; politika yapıcıların binaların sürdürülebilir ve enerji tasarruflu işletilmesini sağlamak için yeni yönetmelikler ve standartlar üzerine çalışmalar yapması oldukça önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA

[1] J. Hogeling, "Heating systems and their energy use," REHVA European HVAC Journal, vol. 52, no. 3, p. 5, 2015. Available: https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/heating-systems-and-their-energy-use. [Accessed: Jan. 1, 2025]

[2] International Energy Agency, "IEA website," 2014. Available: http://www.iea.org/. [Accessed: Sep. 20, 2014]

[3] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, *Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2024-2030)*, 2024.

[4] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, "A review on buildings energy consumption information," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, 2008, Doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.

[5] ASHRAE, *ASHRAE Handbook—Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013.

[6] I. Wu and C. C. Liu, "A visual and persuasive energy conservation system based on BIM and IoT technology," *Sensors*, vol. 20, no. 1, p. 139, 2020, Doi: 10.3390/s20010139

[7] A. C. Roussac, J. Steinfeld, and R. De Dear, "A preliminary evaluation of two strategies for raising indoor air temperature setpoints in office buildings," *Architectural Science Review*, vol. 54, no. 2, pp. 148–156, 2011, Doi: 10.1080/00038628.2011.582390.

[8] S. Wang and Z. Ma, "Supervisory and optimal control of building HVAC systems: A review," *HVAC&R Research*, vol. 14, no. 1, pp. 3–32, 2008, Doi: 10.1080/10789669.2008.10390991.

[9] S. Tang, D. R. Shelden, C. M. Eastman, P. Pishdad-Bozorgi, and X. Gao, "A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends," *Automation in Construction*, vol. 101, pp. 127–139, 2019, Doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.020.

[10] L. Prusak, "What can't be measured," Harvard Business Review, Oct. 2010. [Online]. Available: https://hbr.org/2010/10/what-cant-be-measured. [Accessed: Dec. 29, 2024]

[11] M. Al-Adhami, S. Wu, and E. Delzendeh, "A real-time approach to evaluate occupants' thermal comfort in the indoor environment," in Proc. 37th CIB W78 Information Technology for Construction Conference (CIB W78), São Paulo, Brazil, 2020, pp. 477–487, Doi: 10.46421/2706-6568.37.2020.paper 035.

[12] ARCHITECTURE2030. "The 2030 Challenge," Architecture 2030: Architecture2030.org, 2018. Available: https://architecture2030.org/2030_challenges/2030-challenge/. [Accessed: Oct. 5, 2018]

[13] E. Asadi, M. G. da Silva, C. H. Antunes, and L. Dias, "Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application," *Energy and Buildings*, vol. 44, pp. 81–87, 2012, Doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.016.

[14] DOE, *Buildings Energy Data Book*, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, DC, USA, 2010.

[15] B. Becerik-Gerber, F. Jazizadeh, N. Li, and G. Calis, "Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, no. 3, pp. 431–442, 2011, Doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000433.

[16] V. Shabunko, C. M. Lim, and S. Mathew, "EnergyPlus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam," Energy and Buildings, vol. 169, pp. 507–516, 2018, Doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.039

[17] M. Milne, R. Liggett, A. Benson, and Y. Bhattacharya, "Climate Consultant 4.0 develops design guidelines for each unique climate," in *Proceedings of the American Solar Energy Society,* Buffalo, NY, USA, May 11–16, 2009.

[18] N. D. Šekularac, D. M. Šumarac, J. L. Tovarović-Cikic, M. M. Cokic, and J. A. Ivanović-Šekularac, "Re-use of historic buildings and energy refurbishment analysis via building performance simulation: A case study," *Thermal Science*, vol. 22, pp. 2335–2354, 2018, Doi: 10.2298/TSCI171124089S.

[19] Y. W. Al-Saeed and A. Ahmed, "Evaluating design strategies for nearly zero energy buildings in the Middle East and North Africa regions," Designs, vol. 2, no. 4, pp. 35, 2018, Doi: 10.3390/designs2040035.

[20] I.-C. Wu and C.-C. Liu, "A visual and persuasive energy conservation system based on BIM and IoT technology," *Sensors*, vol. 20, no. 1, pp. 139, 2020, Doi: 10.3390/s20010139.

[21] V. Barthelmes, V. Fabi, S. Corgnati, and V. Serra, "Human factor and energy efficiency in buildings: Motivating end-users behavioural change," *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 825, pp. 514–525, 2019, Doi: 10.1007/978-3-319-96068-5_58.

[22] R. Galvin, "The Rebound Effect in Home Heating: A Guide for Policymakers and Practitioners," *Building Research & Information Book Series*. Routledge, 2015.

[23] F. J. Ferrández-Pastor, H. Mora, A. Jimeno-Morenilla, and B. Volckaert, "Deployment of IoT edge and fog computing technologies to develop smart building services," *Sustainability*, vol. 10, no. 11, p. 3832, 2018. Doi: 10.3390/su10113832.

[24] M. Jia, A. Komeily, Y. Wang, and R. S. Srinivasan, "Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications," *Automation in Construction*, vol. 101, pp. 111–126, 2019, Doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.023.

[25] C. C. Cheng and D. Lee, "Smart sensors enable smart air conditioning control," *Sensors (Basel)*, vol. 14, no. 6, pp. 11179–11203, 2014

[26] C.-C. Cheng and D. Lee, "Enabling smart air conditioning by sensor development: A review," *Sensors*, vol. 16, no. 12, 2016.

[27] S. Tang, D. R. Shelden, C. M. Eastman, P. Pishdad-Bozorgi, and X. Gao, "A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: present status and future trends," *Automation in Construction*, vol. 101, pp. 127–139, 2019, Doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.020.

[28] G. Ma, Y. Liu, and S. Shang, "A Building Information Model (BIM) and Artificial Neural Network (ANN) based system for personal thermal comfort evaluation and energy-efficient design of interior space," *Sustainability*, vol. 11, no. 18, p. 4972, 2019, Doi: 10.3390/su11184972.

[29] M. Al-Adhami, S. Wu, and E. Delzendeh, "A real-time approach to evaluate occupants' thermal comfort in the indoor environment," *Proc. 37th CIB W78 Information Technology for Construction Conference (CIB W78)*, São Paulo, Brazil, 2020, pp. 477–487, Doi: 10.46421/2706-6568.37.2020. paper035.

[30] M. Valinejadshoubi, O. Moselhi, A. Bagchi, and A. Salem, "Development of an IoT and BIM-based automated alert system for thermal comfort monitoring in buildings," *Sustainable Cities and Society*, vol. 62, p. 102602, 2020, Doi: 10.1016/j.scs.2020.102602.

[31] H. Zahid, O. Elmansoury, and R. Yaagoubi, "Dynamic Predicted Mean Vote: An IoT-BIM integrated approach for indoor thermal comfort optimization," *Automation in Construction*, vol. 129, p. 103805, 2021, ISSN: 0926-5805, Doi: 10.1016/j.autcon.2021.103805.

[32] K. Kanna, K. AIT Lachguer, and R. Yaagoubi, "MyComfort: An integration of BIM-IoT-machine learning for optimizing indoor thermal comfort based on user experience," *Energy and Buildings*, vol. 277, p. 112547, 2022, ISSN: 0378-7788, Doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112547.

[33] M. Shahinmoghadam, W. Natephra, and A. Motamedi, "BIM- and IoT-based virtual reality tool for real-time thermal comfort assessment in building enclosures," *Building and Environment*, vol. 199, p. 107905, 2021, ISSN: 0360-1323, Doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107905.

[34] J. Zhang, F. Xiao, A. Li, T. Ma, K. Xu, H. Zhang, R. Yan, X. Fang, Y. Li, and D. Wang, "Graph neural network-based spatio-temporal indoor environment prediction and optimal control for central air-conditioning

systems," *Building and Environment*, vol. 242, p. 110600, 2023, ISSN: 0360-1323, Doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110600.

[35] "Ceremonial usages; their origins, development, and intention," *Chinese Text Project*. [Online]. Available: https://ctext.org/liji/li-yun. [Accessed: Jan. 1, 2025]

[36] O. Çakır, "İnsanlık tarihi boyunca barınma çözümleri ve gelecekte gelenekseli arayış," *Yapı Dergisi*. [Online]. Available: https://yapidergisi.com/insanlik-tarihi-boyunca-barinma-cozumleri-ve-gelecekte-gelenekseli-arayis/. [Accessed: Jan. 1, 2025]

[37] I. Asadi *et al.*, "A survey of evaluation methods used for holistic comfort assessment," *PLoS ONE*, vol. 953–954, no. 3, pp. 1513–1519, 2016. Doi: 10.1016/j.buildenv.2016.09.007.

[38] C. Peretti and S. Schiavon, "Indoor environmental quality surveys: A brief literature review," in *Proc. 12th Int. Conf. Indoor Air Quality and Climate*, vol. 2, 2011, pp. 1331–1336.

[39] M. Frontczak and P. Wargocki, "Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments", *Building and Environment*, vol. 46, no. 4, pp. 922–937, 2011, issn: 0360-1323. Doi: 10.1016/j.buildenv.2010.10.021

[40] M. M. Abdelrahman, *Spatial-Temporal Indoor Environmental Satisfaction Prediction Using Graph Neural Networks*. National University of Singapore (Singapore), 2021. [Online]. Available: PQDT-Global.

[41] J. A. Myhren and S. Holmberg, "Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating," *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 524–536, 2008. Doi: 10.1016/j.enbuild.2007.04.013.

[42] C. Huizenga, S. Abbaszadeh, L. Zagreus, and E. A. Arens, "Air quality and thermal comfort in office buildings: results of a large indoor environmental quality survey," Center for the Built Environment, 2006

[43] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE, Georgia, USA, ISSN 1041–2336, 2021.

[44] Y. Xiong, "*Adaptive thermal comfort in residential buildings, a case study of Wuhan*," Ph.D. dissertation, Division of Architecture, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, 2024.

[45] Z. Lin and S. Deng, "A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—developing a thermal comfort model for sleeping environments," *Building and Environment*, vol. 43, no. 1, pp. 70–81, 2008. Doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11.026.

[46] Loughborough University, "Occupational Health Service and Wellbeing," May 24, 2024. [Online]. Available: https://www.lboro.ac.uk/media/wwwlboroacuk/content/universitycommittees/hse/SAF20-A1%20-

%20FULL%20SET%20(REDUCED)%20-%20NEW.pdf. [Accessed: Jan. 2, 2025]

[47] Canadian Centre for Occupational Health and Safety (CCOHS), "Thermal comfort," 2018. [Online]. Available: http://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/thermal_comfort.html. [Accessed: Jan. 2, 2025]

[48] R.F. Rupp, N.G. Vásquez, and R. Lamberts, "A review of human thermal comfort in the built environment," *Energy and Buildings*, vol. 105, pp. 178–205, 2015. Doi: 10.1016/j.enbuild.2015.07.047.

[49] Q. Zhao, Z. Lian, and D. Lai, "Thermal comfort models and their developments: A review," *Energy Built Environ.*, vol. 2, no. 1, pp. 21–33, 2021. Doi: 10.1016/j.enbenv.2020.05.007.

[50] J. Park, T. Kim, and C. S. Lee, "Development of thermal comfort-based controller and potential reduction of the cooling energy consumption of a residential building in Kuwait," *Energies*, vol. 12, no. 17, p. 3348, 2019. Doi: 10.3390/en12173348.

[51] P.O. Fanger, "Calculation of thermal comfort, Introduction of a basic comfort equation," *ASHRAE Trans.*, vol. 73, pp. III4.1–III4.20, 1967.

[52] F.R.D.A. Alfano, B.W. Olesen, and B.I. Palella, "Povl Ole Fanger's impact ten years later," *Energy and Buildings*, vol. 152, pp. 243–249, 2017, Doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.038.

[53] P.O. Fanger., Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering, New York: McGraw-Hill, 1970, pp. 22–42.

[54] ISO 7730, Ergonomics of the Thermal Environment-Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2005.

[55] Z. ElArwady, A. Kandil, M. Afiffy, and M. Marzouk, "Modeling indoor thermal comfort in buildings using digital twin and machine learning," *Developments in the Built Environment*, vol. 19, p. 100480, 2024. Doi: 10.1016/j.dibe.2024.100480.

[56] Mohon, L., "Apollo 13: The Successful Failure," NASA, Apr. 6, 2020. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/missions/apollo/apollo-13-the-successful-failure/. [Accessed: Jan. 02, 2025].

[57] "Charles M. Eastman," *Wikipedia*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_M._Eastman. [Accessed: Jan. 2, 2025]

[58] "Exploring the History and Evolution of BIM In the Construction Industry," RIB Software, Feb. 10, 2017. [Online]. Available: https://www.rib-software.com/en/blogs/bim-history-evolution. [Accessed: Jan. 2, 2025]

[59] Z. Mortice, "What is building information modeling (BIM)?," Autodesk, Sep. 9, 2024. [Online]. Available: https://www.autodesk.com/design-make/articles/bim-building-information-modeling.

[60] Eischet, O., "Introduction to BIM: Making Sense of the Buzzword," *Specter Automation Insights*, Jul. 14, 2022. [Online]. Available: https://medium.com/specter-automation-insights/introduction-to-bim-making-sense-of-the-buzzword-b73d556a9e01. [Accessed: Jan. 7, 2025]

[61] "Building information modeling," Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Building_information_modeling. [Accessed: Jan. 7, 2025]

[62] "4 Stages of BIM Process in Building Construction," Top BIM Company. [Online]. Available: https://www.topbimcompany.com/stages-of-bim-process-in-construction/. [Accessed: Jan. 7, 2025]

[63] O. Eischet, "BIM Maturity Levels Explained," *Specter Automation Insights*, Jan. 26, 2023. [Online]. Available: https://medium.com/specter-automation-insights/bim-maturity-levels-explained-922060c163ef. Accessed: Jan. 2, 2025. [Accessed: Jan. 7, 2025]

[64] N. A. Megahed and A. M. Hassan, "Evolution of BIM to DTs: A Paradigm Shift for the Post-Pandemic AECO Industry," *Urban Science*, vol. 6, no. 4, p. 67, 2022. Doi: 10.3390/urbansci6040067.

[65] M. Deng, C. C. Menassa, and V. R. Kamat, "From BIM to Digital Twins: A Systematic Review of the Evolution of Intelligent Building Representations in the AEC-FM Industry," *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 26, pp. 58, Mar. 2021. Doi: 10.36680/j.itcon.2021.005.

[66] Z. Liu and Z. Deng, "A Systematic Method of Integrating BIM and Sensor Technology for Sustainable Construction Design," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 910, p. 012071, 2017.

[67] C. Z. Li, F. Xue, X. Li, J. Hong, and G. Q. Shen, "An Internet of Things-enabled BIM platform for on-site assembly services in prefabricated construction," *Automation in Construction*, vol. 89, pp. 146–161, 2018.

[68] D. Lee, G. Cha, and S. Park, "A study on data visualization of embedded sensors for building energy monitoring using BIM," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 17, no. 6, pp. 807–814, 2016.

[69] B. Dave, A. Buda, A. Nurminen, and K. Främling, "A framework for integrating BIM and IoT through open standards," *Automation in Construction*, vol. 95, pp. 35–45, 2018.

[70] E. Kim, Y. Cho, S. BF-Tech, and K. G. Kim, "Real Time Building Data collecting Using IoT and BIM," 2018.

[71] Y. Nakama, Y. Onishi, and K. Iki, "Development of building information management system with data collecting functions based on IoT technology," in *33rd eCAADe Conference Proceedings*, Vienna, Austria, 2015.

[72] D. Pasini, S. M. Ventura, S. Rinaldi, P. Bellagente, A. Flammini, and A. L. C. Ciribini, "Exploiting Internet of Things and building information modeling framework for management of cognitive buildings," in *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 2016.

[73] K.-M. Chang, R.-J. Dzeng, and Y.-J. Wu, "An Automated IoT Visualization BIM Platform for Decision Support in Facilities Management," *Applied Sciences*, vol. 8, p. 1086, 2018.

[74] X.-S. Chen, C.-C. Liu, and I. C. Wu, "A BIM-based visualization and warning system for fire rescue," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 37, pp. 42–53, 2018.

[75] R. Wehbe and I. Shahrour, "Indoor hazards management using digital technology," *MATEC Web of Conferences*, vol. 2019, EDP Sciences.

[76] Y. Fang, Y. K. Cho, S. Zhang, and E. Perez, "Case Study of BIM and Cloud–Enabled Real-Time RFID Indoor Localization for Construction Management Applications," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 142, no. 7, p. 05016003, 2016.

[77] I. Ha, H. Kim, S. Park, and H. Kim, "Image retrieval using BIM and features from pretrained VGG network for indoor localization," *Building and Environment*, vol. 140, pp. 23–31, 2018.

[78] C.-C. Liu, W.-L. Kuo, R.-S. Shiu, and I.-C. Wu, "Estimating and visualizing thermal comfort level via a predicted mean vote in a BIM system," 2014.

[79] R. Escandón, F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro, R. Suárez, and J. J. Sendra, "Thermal comfort prediction in a building category: artificial neural network generation from calibrated models for a social housing stock in southern Europe," *Applied Thermal Engineering*, vol. 150, pp. 492–505, 2019. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.008.

[80] X. Gao, P. J. B. R. Pishdad-Bozorgi, and Information, "A framework of developing machine learning models for facility life-cycle cost analysis," *Building Research & Information*, vol. 48, no. 5, pp. 501–525, 2020. Doi: 10.1080/09613218.2019.1689511.

[81] M. Austin, P. Delgoshaei, M. Coelho, and M. Heidarinejad, "Architecting smart city digital twins: combined semantic model and machine learning approach," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 36, no. 4, p. 04020026, 2020. Doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000913.

[82] M. Deng, C. C. Menassa, and V. R. Kamat, "From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry," *Journal of Information Technology in Construction*

(ITcon), vol. 26, Special issue: 'Next Generation ICT- How distant is ubiquitous computing?', pp. 58–83, 2021. Doi: 10.36680/j.itcon.2021.005.

[83] Autodesk, "Buildings that deliver smarter operations," *Autodesk*, [Online]. Available: https://intandem.autodesk.com/features/. [Accessed: Jan. 9, 2025]

[84] Autodesk, "Digital Twin Technology," Autodesk, [Online]. Available: https://www.autodesk.com/design-make/emerging-tech/digital-twin. [Accessed: Jan. 9, 2025].

[85] L. Maia, P. Mêda, and J. G. Freitas, "BIM methodology, a new approach-case study of structural elements creation," *Procedia Engineering*, vol. 114, pp. 816–823, 2015. Doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.032.

[86] Wikipedia, "List of BIM software," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_BIM_software. [Accessed: Jan. 9, 2025]

[87] S. C. Huang, *A BIM Workflow for Responsive Energy-Efficient Façade*, Master's Thesis, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, 2016, 134p.

[88] Dynamo Primer, "What is Dynamo?", Primer Dynamo BIM, [Online]. Available: https://primer.dynamobim.org/01_Introduction/1-2_what_is_dynamo.html. [Accessed: Jan. 9, 2025].

[89] "Internet of things," Wikipedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things#cite_note-6. Accessed: Jan. 8, 2025.

[90] Beal, V., "What is a Network?" Webopedia, Mar. 2, 2022. [Online]. Available: https://www.webopedia.com/. [Accessed: Jan. 8, 2025]

[91] N. Dey, A. E. Hassanien, C. Bhatt, A. Ashour, and S. C. Satapathy, Eds., Internet of Things and Big Data Analytics Toward Next-Generation Intelligence. Cham, Switzerland: Springer, 2018, p. 440. ISBN: 978-3-319-60435-0. OCLC: 1001327784.

[92] "Forecast: The Internet of Things, Worldwide, 2013," Gartner, Nov. 18, 2013. [Online]. Available: https://wwwd.gartner.com/. [Accessed: Jan. 8, 2025]

[93] L. Mostarda, A. Navarra, and F. Nobili, "Fast file transfers from IoT devices by using multiple interfaces," *Sensors*, vol. 21, no. 1, p. 36, 2021, Doi: 10.3390/s21010036.

[94] D. Evans, "The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything," *CISCO White Paper*, Apr. 2011. [Online]. Available: http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf. [Accessed: Jan. 8, 2025.]

[95] S. Tang, D. R. Shelden, C. M. Eastman, P. Pishdad-Bozorgi, and X. Gao, "A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: present status and future trends," *Automation in Construction*, vol. 101, pp. 127–139, 2019, Doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.020.

[96] F. J. Ferrández-Pastor, H. Mora, A. Jimeno-Morenilla, and B. Volckaert, "Deployment of IoT edge and fog computing technologies to develop smart building services," *Sustainability*, vol. 10, no. 11, p. 3832, 2018, Doi: 10.3390/su10113832.

[97] "Download and Install VCP Drivers," Silicon Labs. [Online]. Available: https://www.silabs.com/developer-tools/usb-to-uart-bridge-vcp-drivers?utm_source=chatgpt.com&tab=downloads. [Accessed: Jan. 28, 2025]

[98] F. Tartarini and S. Schiavon, "pythermalcomfort: A Python package for thermal comfort research," *SoftwareX*, vol. 12, p. 100578, 2020. Doi: 10.1016/j.softx.2020.100578.

[99] S. D. Herrmann, E. A. Willis, B. E. Ainsworth, T. V. Barreira, M. Hastert, C. L. Kracht, J. M. Schuna Jr., Z. Cai, M. Quan, C. Tudor-Locke, and M. C. Whitt-Glover, "2024 Adult Compendium of Physical Activities: A third update of the energy costs of human activities," *Journal of Sport and Health Science*, vol. 13, no. 1, pp. 6–12, 2024.

EK A
ARDUINO UNO MİKROKONTROL KARTININ KURULUMUNUN AÇIKLANMASI

Arduino Uno R3 kartının projenin amacına uygun olarak kontrol edilmesi için, bu kartın USB kablosu ile bilgisayara bağlanarak özel bir yazılım aracılığıyla programlanması gerekmektedir. Aşağıda adım adım kurulum süreci açıklanmıştır:

1. Gerekli Yazılımların İndirilmesi

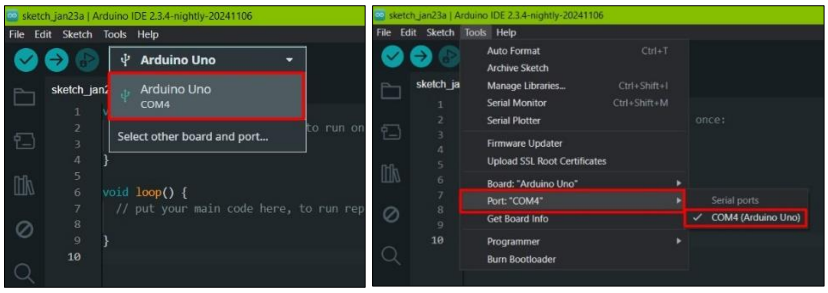
Arduino'yu programlamak için kullanılan resmi yazılım Arduino IDE'dir. Resmi web sitesi https://www.arduino.cc/en/software ‘den Windows, macOS veya Linux sürümlerinden uygun olanı seçilerek indirilebilmektedir.

2. Arduino Uno Sürücülerinin Yüklenmesi

USB kablosu ile bilgisayara bağlandıktan sonra işletim sistemi genellikle sürücüleri otomatik olarak tanımaktadır. Eğer tanımazsa, IDE içindeki “Drivers” klasöründen manuel olarak yüklenebilmektedir.

3. Arduino IDE Kurulumu ve Kartın Tanıtılması

Kurulum tamamlandıktan sırasıyla; Arduino'yu bilgisayara bağlanmalı (USB Type-B kablo ile) ve birinci basamakta yüklenen Arduino IDE açılarak, Kart Seçimi bölümünden "Arduino Uno", Bağlantı Noktası (Port) için “Tools” menüsünden doğru COM portu (USB girişi) seçilmelidir (Şekil A.1).



Şekil A.1 Arduino Uno arayüzünde kart seçiminin yapılması

EK B
DHT22 SICAKLIK VE NEM SENSÖRÜNÜN KURULUMUNUN AÇIKLANMASI

Ek-A'da paylaşılan Arduino UNO kartının kurulumundan sonra, aşağıdaki iki aşamanın sırasıyla tamamlanması gerekmektedir:

1. DHT22 Sensör kütüphanesinin Arduino Uno Kartına Yüklenmesi
2. DHT22 Sensörün programlanması

1. DHT22 Sensör kütüphanesinin Arduino Uno Kartına Yüklenmesi

DHT22 sensörünün Arduino ile kullanılabilmesi için, Arduino IDE'de DHT22 sensör kütüphanesinin yüklenmesi gereklidir. Bu sayede sensörden gelen veriler doğru işlenir. Bu sensörün kütüphanesini yüklemek için aşağıdaki adımlar izlenmelidir:

1. Bölüm 3.2.1'de anlatıldığı şekilde kurulan DHT22, Arduino Uno ve ESP32 parçalarını içeren IoT aygıtı, Arduino Uno'nun USB bölümünden bilgisayara bağlanır.
2. Bilgisayarda Arduino IDE yazılımı açılır.
3. "Library Manager" kısmından DHT sensor library yazılarak sensöre ait kütüphaneler taranır. Adafruit tarafından oluşturulan kütüphane yüklenir (Şekil B.1)



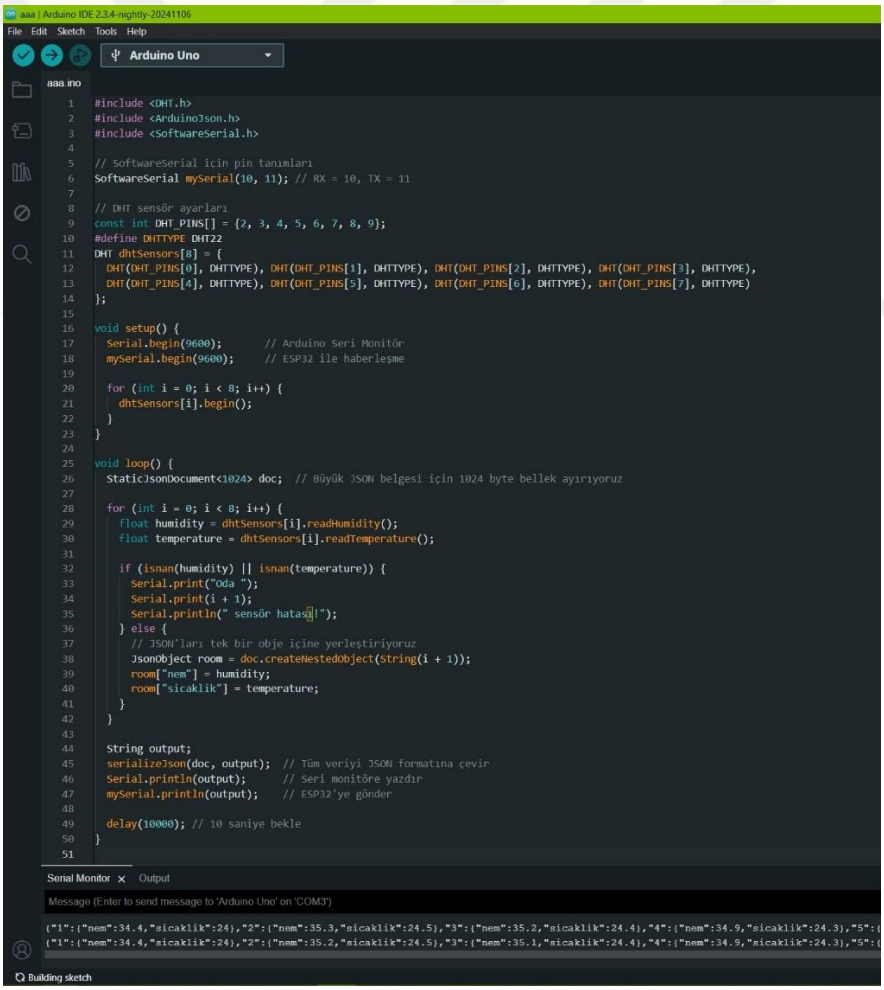
Şekil B.1 DHT22 sensör kütüphanesinin Arduino IDE'de kurulması

4. Arduino IDE'de JSON verisi oluşturabilmemiz için gerekli Benoit Blanchon tarafından oluşturulmuş ArduinoJson kütüphanesi, önceki basamaktaki yöntemle yüklenir.

2. DHT22 Sensörün programlanması

DHT22'den gelen verilerin işlenebilmesi için gerekli olan sensör kütüphanesinin kurulumu yapıldıktan sonra, sensör verilerin ayrı ayrı odalar için tanımlanması ve okunabilmesi amacıyla, Arduino UNO arayüzünde gerekli kodlarla programlama yapılması gerekmektedir.

Bölüm 3.2.1'de kurulan 8 sensörlü IoT aygıtı için; her sensörün farklı bir odada kullanılması ve 10 saniyede bir ölçüm yapması için gereken kodlama Şekil B.2'de paylaşılmıştır.



Şekil B.2 Arduino IDE ortamında DHT22 sensörlerinden veri okuma için kodlar

Şekil B.2'de paylaşılan Arduino kodu aşağıdaki gibi işlev görmektedir:

1. Birinci grup: Kütüphanelerin Dahil Edilmesi

- **#include <DHT.h>:** DHT sensöründen gelen verilerin okunabilmesi için gerekli kütüphane dahil edilir.
- **#include <ArduinoJson.h>:** JSON formatında veri gönderebilmek için gerekli kütüphane dahil edilir.
- **#include <SoftwareSerial.h>:** ESP32 ile yazılımsal seri haberleşmeyi sağlamak için gerekli kütüphane dahil edilir.

2. **İkinci grup: DHT Sensör Ayarları**
   - **const int DHT_PINS[]** = {2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9};: 8 adet DHT22 sensörünün bağlandığı pinler tanımlanır.
   - **#define DHTTYPE DHT22:** Kullanılan sensör tipi DHT22 olarak belirlenir.
   - **DHT dhtSensors[8] =** {...};: 8 adet DHT sensörü için bir dizi oluşturulur ve her sensör için pin bağlantısı yapılır.
3. **setup() Fonksiyonu:**
   - **Serial.begin(9600);:** Seri haberleşmeyi başlatır (9600 baud hızında).
   - **mySerial.begin(9600);:** ESP32 ile haberleşmeyi başlatır.
   - **dhtSensors[i].begin();:** Her bir DHT sensörü başlatılır.başlatılıyor.
   - **for (int i = 0; i < 8; i++)** döngüsü, sensör dizisindeki her sensör için tek tek işlem yapılmasını sağlar. Burada i, sensörlerin sırasını temsil eder ve 0'dan başlayıp 7'ye kadar gider.
   - **dhtSensors[i].begin();** komutu, dizideki her bir DHT sensörünü başlatır. Yani, her sensörün düzgün çalışabilmesi için gerekli olan ayarları yapar ve sensörü aktif hale getirir. Bu işlem her sensör için tekrar edilir.
4. **loop() Fonksiyonu:**
   - **StaticJsonDocument<1024> doc;:** JSON verisini tutabilmek için 1024 baytlık bir bellek alanı ayırır.Her bir sensörden sıcaklık ve nem verisi okunur.
   - **if (isnan(humidity) || isnan(temperature)):** Eğer sensör verisi geçersizse (örneğin, sensör bağlantısı hatalıysa) hata mesajı yazdırılır.
5. **JSON Verisi Oluşturma:**
   - **JsonObject room = doc.createNestedObject(String(i + 1));**: Her bir odanın verisini ayrı bir nesne olarak JSON belgesine ekler.

- **room["nem"] = humidity;, room["sicaklik"] = temperature;:** Her bir odanın nem ve sıcaklık verileri JSON nesnesine eklenir.
- **String output; serializeJson(doc, output);:** JSON belgesini string formatına dönüştürür.
- **Serial.println(output);:** JSON verisini seri monitöre yazdırır.
- **mySerial.println(output);:** JSON verisini ESP32'ye gönderir.

6. Veri Gönderme ve Döngü:

- **delay(10000);** komutu ile her 10 saniyede bir veri gönderimi yapılır.

Bu kod, her bir sensörden sıcaklık ve nem verilerini alır, verileri JSON formatına dönüştürür ve her oda için ayrı bir nesne oluşturur. Tüm veriler tek bir JSON nesnesinde toplanır ve hem seri monitöre hem de ESP32'ye gönderilir. Eğer sensörde bir hata meydana gelirse, hangi odada sorun olduğu belirtilir.

EK C
ESP32 WiFi MODÜLÜNÜN KURULUMUNUN AÇIKLANMASI

ESP32 WiFi modülü, IoT aygıtına donanımsal olarak entegre edildikten sonra, gerçek zamanlı sıcaklık ve nem verilerini istenilen adrese gönderebilmesi için aşağıdaki iki aşamanın tamamlanması gerekmektedir:

1. Arduino IDE'de ESP32 WiFi Kartının Kütüphanesinin Kurulması
2. ESP32 WiFi Kartının Programlanması

1. WiFi Kartının Kütüphanesinin Kurulması

ESP32, WiFi özelliklerine sahip bir mikrodenetleyici olduğundan, bu özellikleri kullanabilmek için ilgili kütüphanenin kodlamaya eklenmesi gerekmektedir. Bu kütüphane, ESP32'nin WiFi modülünü yönetmek ve internet bağlantısı sağlamak için gerekli fonksiyonları içermektedir.

ESP32 WiFi modülü ilk kez bir bilgisayarda kullanılacağı zaman, aşağıdaki adımlar izlenerek gerekli kütüphanelerin ve driverlerin kurulması gerekmektedir.

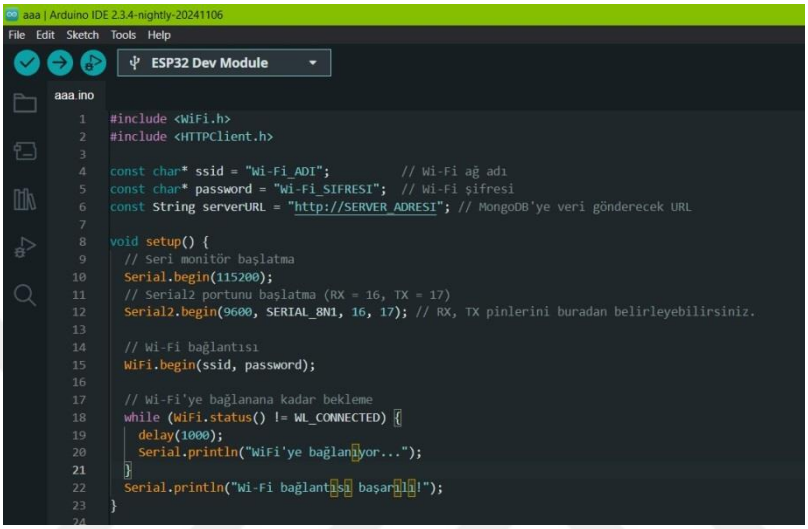
Arduino IDE üzerinde ESP32 kartı WiFi özelliğinin kullanılması için, WiFi.h kütüphanesinin kodlamaya dahil edilmesi gerekmektedir. Bunun için, öncelikle Arduino IDE'de aşağıdaki işlemler yapılır.

Arduino IDE açılır ve File > Preferences menüsüne gidilir. "Additional Boards Manager URLs" kısmına "https://dl.espressif.com/dl/package_esp32_index.json" linki eklenir. Ardından Tools > Board > Boards Manager sekmesine giderek ve "ESP32" aratılır. Gerekli ESP32 kartları yüklenir.

Son olarak, ESP32 donanımın tanınması için gerekli driverler indirilerek kurulur [97].

2. WiFi Kartının Kodlanması

Bu bölümde, DHT22 sensöründen Arduino Kartına, daha ESP32 WiFi kartına ordan istenilen veri tabanına gönderilen URL adresine gönderilmesi sürecini gösteren kodlama açıklanmaktadır. Önceki adımda, ESP32 kartının çalışması için gerekli kurulumlar yapıldıktan sonra, Arduino IDE programında Şekil 3.5'te seçimi gösterilen Arduino UNO portu yerine ESP32 kartı seçilir (Şekil C.1).



Şekil C.1 ESP32 WiFi kartının kodlanması (İlk Kısım)

ESP32 kartına ait kodlamanın ilk kısmı aşağıdaki gibi işlev görmektedir:

3. Birinci grup: Kütüphanelerin Dahil Edilmesi

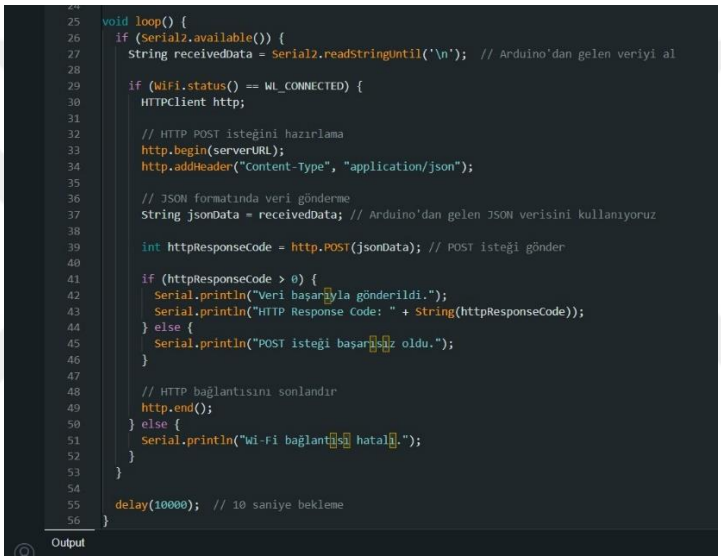
- **#include <WiFi.h>**: ESP32'nin Wi-Fi bağlantısını yönetmek için gerekli kütüphanenin dahil edilmesini sağlar.
- **#include <HTTPClient.h>**: HTTP protokolü üzerinden veri gönderimi (POST) veya alınması (GET) gibi işlemleri gerçekleştirmek için kullanılır.

4. İkinci grup: Wi-Fi ve Sunucu Ayarları

- ***const char* ssid = "Wi-Fi_ADI";:** Bağlanılacak Wi-Fi ağının adı belirtilir (kullanıcı tarafından doldurulması gerekmektedir).
- ***const char* password = "Wi-Fi_SIFRESI";**: Bağlanılacak Wi-Fi ağının şifresi belirtilir (kullanıcı tarafından doldurulması gerekmektedir).
- **const String serverURL = "http://SERVER_ADRESI";**: Arduino'dan gelen verilerin gönderileceği sunucu URL'si tanımlanır (kullanıcı tarafından doldurulması gerekmektedir). Buradaki URL bir sonraki bölümde veri tabanı, veri göndermek için oluşturduğumuz HTTP

sunucusunun URL'si olacaktır. Bunun için 3.3. Veri tabanının tasarlanması bölümüne bakınız.

5. **setup() Fonksiyonu**
   - **Serial.begin(115200);**: ESP32'nin seri haberleşmesini başlatır (115200 baud hızında).
   - **Serial2.begin(9600, SERIAL_8N1, 16, 17);**: RX (16) ve TX (17) pinlerini kullanarak ESP32'nin Arduino ile seri haberleşmesini başlatır.
   - **WiFi.begin(ssid, password);**: ESP32'nin belirtilen Wi-Fi ağına bağlanmasını sağlar. Wi-Fi bağlantı durumu **WiFi.status()** ile kontrol edilir ve bağlantı tamamlanana kadar döngüde beklenir.



Şekil C.2 ESP32 WiFi kartının kodlanması (İkinci Kısım)

6. **loop() Fonksiyonu**
   - **if (Serial2.available())**: Arduino'dan veri gelip gelmediğini kontrol eder.
   - **String receivedData = Serial2.readStringUntil('\n');**: Arduino'dan gelen JSON formatındaki veriyi satır sonuna kadar okur.
   - **if (WiFi.status() == WL_CONNECTED)**: ESP32'nin Wi-Fi ağına bağlı olup olmadığını kontrol eder.
   - **HTTPClient http;**: HTTP isteklerini yönetmek için bir HTTPClient nesnesi oluşturur.
   - **http.begin(serverURL);**: Belirtilen sunucu URL'sine bir HTTP bağlantısı başlatır.

- **http.addHeader("Content-Type", "application/json");**: HTTP isteğinin içeriğini JSON formatında belirler.
- **int httpResponseCode = http.POST(jsonData);**: Arduino'dan gelen JSON verisini sunucuya POST isteğiyle gönderir.
- Eğer istek başarılıysa yanıt kodu yazdırılır (**httpResponseCode > 0**); aksi durumda hata mesajı görüntülenir.
- **http.end();**: HTTP bağlantısı sonlandırılır.

7. **Veri Gönderme ve Döngü**
   - **delay(10000);**: Döngü her veri gönderiminden sonra 10 saniye bekler.

Kodlama tamamlandıktan sonra, sol üstte ok işareti şeklindeki upload butonu ile kod karta yüklenir. Genel olarak bu kodun işlevi; ESP32'nin Wi-Fi özelliğini kullanarak, Arduino cihazından gelen JSON formatındaki sensör verilerini bir sunucuya (örneğin, MongoDB'ye bağlı bir Node.js sunucusuna) göndermektir. İlk olarak Arduino ile ESP32 arasında bir seri haberleşme yapılması sağlanır ve ESP32 bu verileri belirli bir URL'ye HTTP POST isteği ile iletmektedir. Kodlamada girilen URL, oluşturulan veri tabanına veri gönderen HTTP sunucunun adresi olmalıdır. Bu HTTP sunucusunun oluşturulması, Ek-D'de açıklanmaktadır.

EK D
VERİ TABANI VE HTTP SUNUCUSUNUN TASARIM SÜREÇLERİNİN AÇIKLANMASI

Çalışmada verileri depolayacak olan MongoDB veri tabanı ve bu veri tabanına verileri gönderen sunucunun tasarımı aşağıdaki iki adımda gerçekleşmektedir:

1. MongoDB Sunucusunun Kurulumu
2. HTTP Sunucusunun Kurulumu

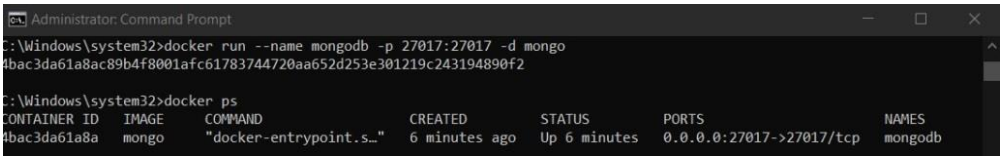
Aşağıda iki aşamaya ait bilgiler detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

1. MongoDB Sunucusunun Kurulumu

İlk adımda, IoT verilerinin depolanacağı bir MongoDB sunucusu oluşturulması gerekmektedir. Bu sunucunun oluşturulmasında, Docker yazılımı kullanılarak hızlı ve taşınabilir bir sanal ortam kurulumu sağlanabilmektedir. Docker, MongoDB'yi izole bir ortamda çalıştırarak yönetiminin kolaylaştırılmasını ve sistem kaynaklarının verimli kullanılmasını sağlamaktadır.

Docker yazılımı, resmi internet sitesi “https://www.docker.com/” adresinden, bilgisayarda yüklü olan işletim sistemine uygun olan versiyon indirilip kurulabilir. Kurulumdan sonra, Başlat menüsünde komut satırında “docker - version” komutu çalıştırılarak Docker’ın kurulu olduğu kontrol edilmelidir.

Docker kurulumu tamamlandıktan sonra, önce komut satırında “docker pull mongo” çalıştırılarak image çekilir. Sonra Şekil D.1‘deki komut, komut satırında çalıştırılarak bir MongoDB konteyneri oluşturulabilir. Daha sonra “docker ps” komutu çalıştırılarak, oluşturulan konteyner kontrol edilmelidir.



Şekil D.1 Oluşturulan MongoDB konteynerinin kontrolü

Bu işlemden sonra, oluşturulan bu MongoDB konteynerına veri gönderen gönderen bir HTTP sunucusunun oluşturulması gerekmektedir.

2. HTTP Sunucusunun Oluşturulması

ESP32 gibi mikrodenetleyiciler, doğrudan MongoDB'ye veri gönderememektedir. Bunun nedeni, MongoDB sunucularına istemci bağlantılarının yapılabilmesi için genellikle TCP/IP ve belirli protokollerinin uygulanmasının gerekmesidir. Bu nedenle, MongoDB sunucusuna, ESP32 WiFi modülünden veri gönderebilmek için önce bir HTTP sunucusunun oluşturulması, verilerin bu sunucuya gönderilmesi; sonra bu sunucu aracılığıyla verilerin MongoDB'ye yazılması gerekmektedir.

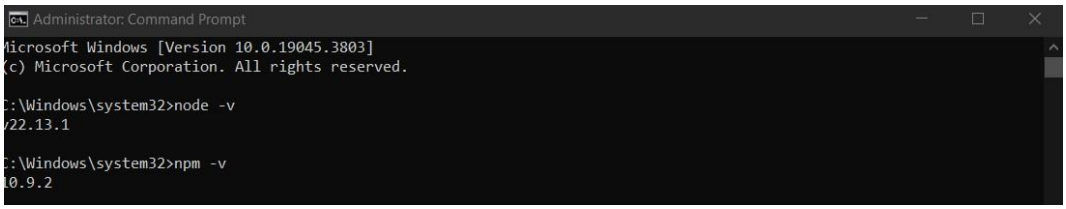
HTTP sunucusunun oluşturmak için, Node.js kullanılarak bir HTTP API geliştirmek gerekmektedir. Bu HTTP sunucusunun görevleri aşağıdaki gibidir:

- DHT22 sıcaklık sensöründen önce Arduino'ya sonra ESP32 cihazına giden verileri almak.
- Bu verileri doğrulamak ve işlemek.
- MongoDB'ye uygun formatta kaydetmek**.**

Aşağıda HTTP sunucusunun oluşturulmasını gösteren adımlar sırasıyla paylaşılmıştır.

I. Gerekli Yazılımların Kurulumu

HTTP sunucusunu oluşturmak için Node.js; gerekli paketleri (Express, MongoDB driver) yüklemek için npm kurulumu gerekmektedir. Bunun için Node.js'in resmi internet sitesi https://nodejs.org/tr adresinden Node.js'in LTS sürümü indirilip kurulmalıdır. Kurulum tamamlandıktan sonra komut satırında "node -v" ve "npm -v" komutları çalıştırılarak, kurulumun doğru yapılıp yapılmadığı kontrol edilmelidir. Doğru kurulum sonrası yapılan kontrole ait görüntü Şekil D.2'de paylaşılmıştır.

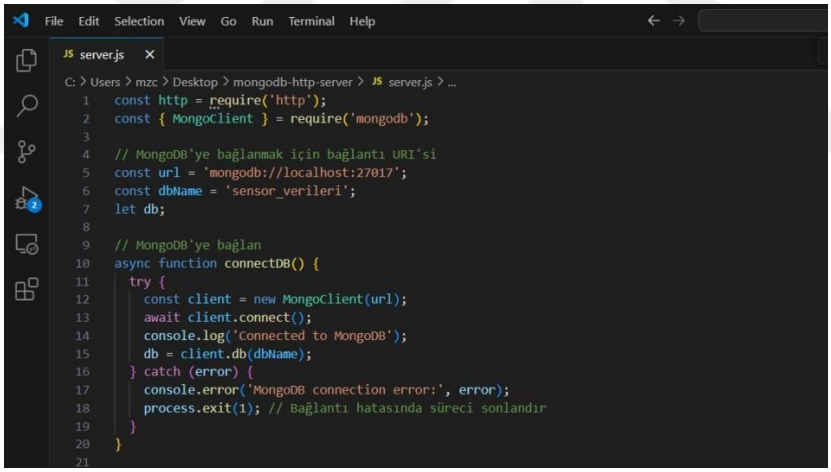


Şekil D.2 Node.js kurulum kontrolü

II. HTTP Sunucusunun Node.js ile Kurulumu

Node.js kurulumu tamamlandıktan sonra, ESP32'den gelen JSON formatındaki anlık sıcaklık ve nem verilerini alan ve MongoDB veri tabanıyla iletişime geçerek aldığı bu verileri veri tabanına istenilen şekilde yazan HTTP sunucusun oluşturulması gerekmektedir.

Sunucunun kurulumu, VisualStudio Code kaynak kod düzenleyicisinde gerçekleştirilmektedir. HTTP sunucusunun oluşturulmasını açıklayan kod grubu Şekil D.3, Şekil D.4, Şekil D.5, Şekil D.6'da paylaşılarak, ilgili kodların fonksiyonları aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır.



Şekil D.3 HTTP sunucusu ve veri yönetim modülü kurulumu (Birinci Kısım)

a. Kütüphanelerin Dahil Edilmesi

- **const http = require('http');**: HTTP protokolü üzerinden sunucu oluşturmak için kullanılan kütüphane.
- **const { MongoClient } = require('mongodb');**: MongoDB ile bağlantı kurmak ve veritabanı işlemleri yapmak için kullanılan kütüphane.

b. MongoDB Bağlantısı İçin Ayarların Tanımlanması

- **const url = 'mongodb://localhost:27017';**: MongoDB bağlantısı için kullanılacak URL, burada yerel MongoDB sunucusuna bağlanır.

- **const dbName = 'sensor_verileri';**: Kullanılacak veritabanının adı.
- **let db;**: MongoDB bağlantısını temsil eden değişken.

c. MongoDB'ye Bağlanma Fonksiyonu

- **async function connectDB() { ... }**: MongoDB'ye asenkron olarak bağlanmak için kullanılan fonksiyon. Bağlantı sağlandığında veritabanını seçer ve hata durumunda işlemi sonlandırır.

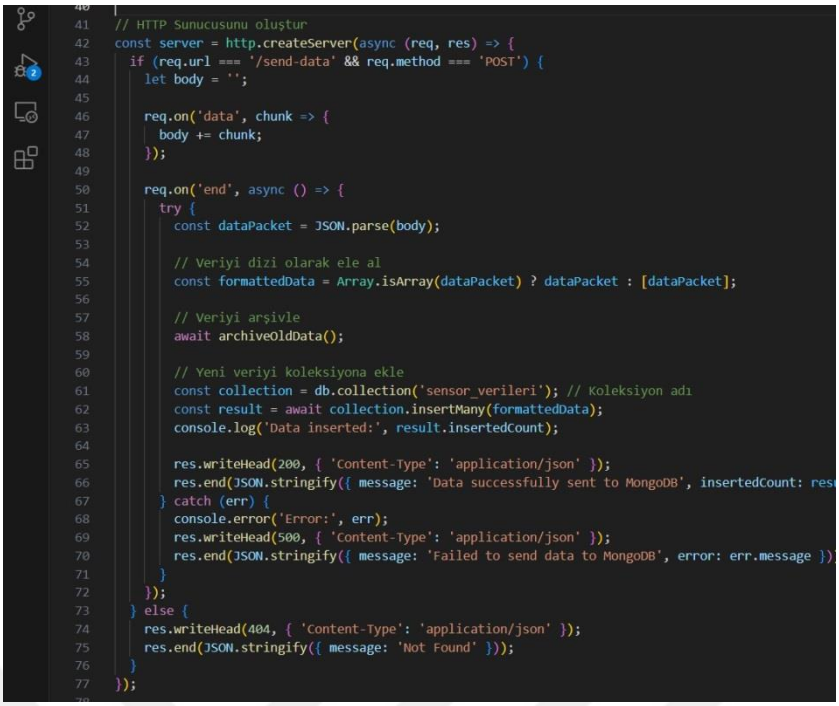


```
// Eski veriyi bir koleksiyona aktar
async function archiveOldData() {
  const collection = db.collection('sensor_verileri'); // Anlık verilerin koleksiyonu
  const archiveCollection = db.collection('archived_sensor_verileri'); // Arşiv koleksiyonu

  // Anlık veriyi al
  const latestData = await collection.find({}).toArray();

  // Eğer veri varsa, eski veriyi arşive taşı
  if (latestData.length > 0) {
    const result = await archiveCollection.insertMany(latestData);
    console.log('Old data archived:', result.insertedCount);

    // Ardından anlık veriyi sıfırla
    await collection.deleteMany({});
    console.log('Old data deleted from active collection');
  }
}
```

Şekil D.4 HTTP sunucusu ve veri yönetim modülü kurulumu (İkinci Kısım)

d. Anlık Veriyi Tutan Eski Veriyi Arşive Taşıyan Fonksiyon

- **async function archiveOldData() { ... }**: Anlık verileri arşiv koleksiyonuna taşır ve ardından aktif koleksiyondaki veriyi siler.
- **const collection = db.collection('sensor_verileri');**: Anlık verilerin tutulduğu koleksiyon.
- **const archiveCollection = db.collection('archived_sensor_verileri');**: Arşiv verilerini saklayacak olan koleksiyon.
- **const latestData = await collection.find({}).toArray();**: Anlık veriyi alır. **const result = await archiveCollection.insertMany(latestData);**: Eski veriyi arşiv koleksiyonuna ekler.
- **await collection.deleteMany({});**: Anlık veriyi aktif koleksiyondan siler.



```
// HTTP Sunucusunu oluştur
const server = http.createServer(async (req, res) => {
  if (req.url === '/send-data' && req.method === 'POST') {
    let body = '';

    req.on('data', chunk => {
      body += chunk;
    });

    req.on('end', async () => {
      try {
        const dataPacket = JSON.parse(body);

        // Veriyi dizi olarak ele al
        const formattedData = Array.isArray(dataPacket) ? dataPacket : [dataPacket];

        // Veriyi arşivle
        await archiveOldData();

        // Yeni veriyi koleksiyona ekle
        const collection = db.collection('sensor_verileri'); // Koleksiyon adı
        const result = await collection.insertMany(formattedData);
        console.log('Data inserted:', result.insertedCount);

        res.writeHead(200, { 'Content-Type': 'application/json' });
        res.end(JSON.stringify({ message: 'Data successfully sent to MongoDB', insertedCount: res
      } catch (err) {
        console.error('Error:', err);
        res.writeHead(500, { 'Content-Type': 'application/json' });
        res.end(JSON.stringify({ message: 'Failed to send data to MongoDB', error: err.message }))
      }
    });
  } else {
    res.writeHead(404, { 'Content-Type': 'application/json' });
    res.end(JSON.stringify({ message: 'Not Found' }));
  }
});
```

Şekil D.5 HTTP sunucusu ve veri yönetim modülü kurulumu (Üçüncü Kısım)

e. HTTP Sunucusunun Kurulumu

- **const server = http.createServer(async (req, res) => { ... });**: Bir HTTP sunucusu oluşturur ve gelen talepleri asenkron olarak işler.

f. Gelen Veriyi Ele Alan POST İsteği

- **if (req.url === '/send-data' && req.method === 'POST') { ... }**: Eğer gelen istek "/send-data" URL'sine ve POST metoduyla ise, bu kısmı işler.
- **let body = '';**: Gelen veriyi tutacak değişken.
- **req.on('data', chunk => { body += chunk; });**: Veri geldikçe veriyi parçalara ayırır ve birleştirir.
- **req.on('end', async () => { ... });**: Veri tam olarak geldikten sonra işleme başlar.
- **const dataPacket = JSON.parse(body);**: Gelen veriyi JSON formatına çevirir.
- **const formattedData = Array.isArray(dataPacket) ? dataPacket : [dataPacket];**: Gelen veriyi dizi formatına çevirir.
- **await archiveOldData();**: Eski veriyi arşivler.
- **const collection = db.collection('sensor_verileri');**: Verilerin kaydedileceği koleksiyonu belirtir.

- **const result = await collection.insertMany(formattedData);**: Veriyi MongoDB koleksiyonuna ekler.
- **res.writeHead(200, { 'Content-Type': 'application/json' });**: HTTP yanıtını başarılı olarak başlatır.
- **res.end(JSON.stringify({ message: 'Data successfully sent to MongoDB', insertedCount: result.insertedCount }));**: İşlem başarılıysa başarı mesajı döner.

g. Hata Durumunda Yanıt Verme

- **catch (err) { ... }**: Hata meydana gelirse hata mesajı ile 500 durum kodu döner.
- **res.writeHead(500, { 'Content-Type': 'application/json' });**: Hata durumunda yanıt başlığı ayarlanır.
- **res.end(JSON.stringify({ message: 'Failed to send data to MongoDB', error: err.message }));**: Hata mesajı döndürülür.



Şekil D.6 HTTP sunucusu ve veri yönetim modülü kurulumu (Dördüncü Kısım)

h. Sunucu Dinleyicisi ve Bağlantı Başlatma

- **connectDB().then(() => { ... });**: MongoDB bağlantısı başarılı olduktan sonra sunucu çalışmaya başlar.
- **server.listen(3001, () => { ... });**: HTTP sunucusunu belirtilen portta çalıştırmaya başlar (3001).

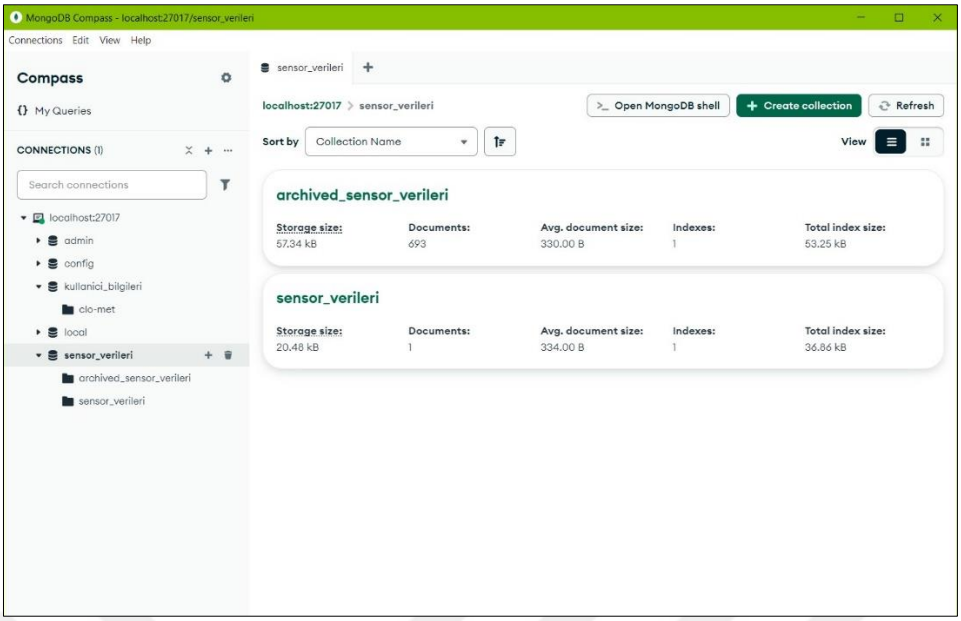
Bu komuttan sonra, Run butonuyla ilgili kod çalıştırılır. Genel olarak özetlemek gerekirse bu kod grubu aşağıdaki fonksiyonları sırasıyla yerine getirmektedir:

1. **MongoDB Bağlantısı Kurulması**: MongoDB veritabanına bağlantı kurmak için gerekli ayarlar yapılır ve connectDB fonksiyonu ile veritabanına bağlanılır.
2. **Veri Arşivleme**: archiveOldData fonksiyonu ile, mevcut verilerin bir kısmı (eski veriler) başka bir koleksiyona (arşiv koleksiyonu) taşınır ve aktif koleksiyon sıfırlanır. Buradaki amaç, BIM platformuna anlık olarak

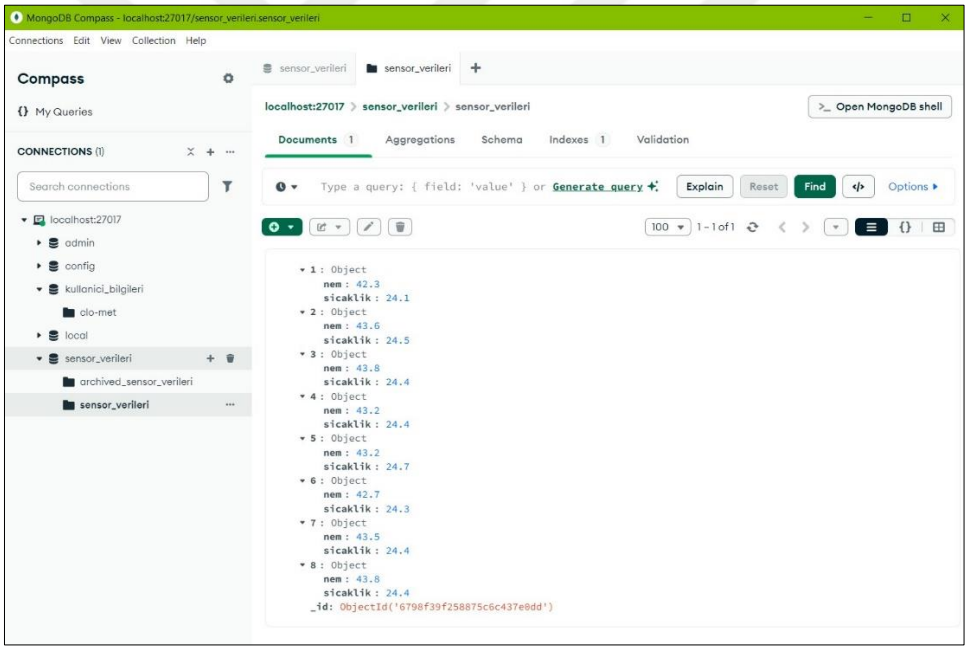
alacağımız veriyi geçmiş verilerden ayırmaktır. Bu sayede, mevcut sıcaklık ve nem değerleri üzerinden analiz yapılabilmektedir.

3. **HTTP Sunucusu Oluşturulması**: http.createServer ile bir HTTP sunucusu başlatılır. Bu sunucu, belirli bir URL (örneğin /send-data) ve HTTP POST isteği almaktadır.
4. **Veri Alımı ve İşlenmesi**: HTTP istekleri sırasında gelen veriler (JSON formatında) alınır ve işlenir. Veriler bir diziye dönüştürülüp MongoDB'ye eklenir.
5. **Veri MongoDB'ye Gönderilmesi**: Alınan veriler, sensor_verileri koleksiyonuna eklenmektedir.
6. **Yanıt Gönderimi**: Verilerin başarıyla MongoDB'ye eklenmesinin ardından, istemciye başarılı bir yanıt döndürülmesi sağlanmaktadır (200 OK). Hata durumunda ise hata mesajı ile yanıt verilir.
7. **Sunucu Dinlenmeye Başlaması (Aktif Hale Gelmesi)**: Sunucu başlatılır ve belirli bir portta (3001) dinlemeye başlanır. Bu durumda "http://(kullanicinin-ip-adresi):3001/send-data" URL'sinde sunucunun çalışıp çalışmadığı kontrol edilmelidir.

Bu kod, Aşama 1'deki IoT aygıtından gelen verileri MongoDB veri tabanına gönderme ve anlık veri ile eski verileri ayırarak eskileri arşivleme işlemini gerçekleştiren bir HTTP sunucusu kurmaktadır. Nihai olarak, Aşama 1'deki IoT aygıtının kurulumu tamamlanıp ve Aşama 2'deki veri tabanı ve bu veri tabanına veri gönderen HTTP sunucu oluşturulduktan sonra, veri tabanında Şekil D.7'daki gibi sensor_verileri veri tabanında iki adet koleksiyon oluşmaktadır. Bunlardan archived_sensor_verileri koleksiyonunda geçmişteki veriler depolanırken, sensor_verileri koleksiyonunda sekiz odanın sadece en son tarihli sıcaklık ve nem verileri birleştirilmiş tek JSON nesnesi olarak tutulmaktadır (Şekil D.7). Kullanıcı girişleri met ve clo değerleri ise, kullanıcı_bilgileri veri tabanında clo-met koleksiyonunda tutulmaktadır. Bu koleksiyona, bir HTTP sunucusuna bağlı olan ve gerçek kullanıcılardan veri alan bir mobil uygulama ya da farklı bir platform entegre edileblir. Bu durum çalışma kapsamında olmadığı için bu koleksiyondaki veriler, çalışma kapsamında oluşturulan senaryoların gerektirdiği kadar verilerin manuel girilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil D.7 MongoDB anlık ve geçmiş verileri depolayan koleksiyonlar



Şekil D.8 MongoDB anlık verileri depolayan koleksiyon ve veri formatı

Şekil D.8'de sekiz odanın en son zamana ait sıcaklık ve nem verilerinin tek bir JSON nesnesi olarak depolandığı gösterilmektedir. Daha sonra, BIM platformunda Dynamo aracılığıyla bu koleksiyona bağlantı yapılarak, bu son veri ile gerçek zamanlı hesaplama, görselleştirme ve analiz işlemleri yapılabilmektedir.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Çıkrıkcı, M. Z., Zorer Gedik, G., "Konut Yapıları İçin BIM-IOT Entegrasyonu Tabanlı Bir Dinamik Termal Konfor Modeli Önerisi", *10. Uluslararası Mimarlık ve Tasarım Kongresi,* Kongre Kitabı, sf. 476, İstanbul, Türkiye. 23-24 Kasım 2024, ISBN: 978-625-6471-50-4