

**T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MODÜLER BİNA YAPILARININ YENİLENEBİLİR ENERJİ
KAYNAKLARIYLA ENTEGRASYONUNUN YAŞAM DÖNGÜSÜ
MALİYETLERİ BAZLI İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Önder KUL
(1409211201)**

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Proje Yönetimi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Nurettin UĞURAL

ARALIK 2022

**T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MODÜLER BİNA YAPILARININ YENİLENEBİLİR ENERJİ
KAYNAKLARIYLA ENTEGRASYONUNUN YAŞAM DÖNGÜSÜ
MALİYETLERİ BAZLI İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Önder KUL
(1409211201)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 09 Aralık 2022
Tezin Savunulduğu Tarih: 26 Aralık 2022**

**Tez Danışmanı: - Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Nurettin UĞURAL
Jüri Üyeleri: - Prof. Dr. Fatma Heyecan GİRİTLİ
- Doç. Dr. Alihsan KOCA
- Doç. Dr. Ömer DABANLI
- Dr. Öğr. Üyesi Ethem TARHAN**

ARALIK 2022

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren, sorularımı her daim cevaplayan ve aynı zamanda beni motive eden danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Nurettin UĞURAL'a, her yardıma ihtiyaç duyup kapılarını çaldığımda yalnız bırakmayan kıymetli hocalarım Prof. Dr. F. Heyecan GİRİTLİ ve Doç. Dr. Alihsan KOCA'ya, karım Fatma Uğur KUL ve çocuklarıma, her zaman verdikleri güç ve destek ile motive eden ve beni bu çalışmayı yapmaya sevk eden kıymetli büyüklerime teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tüm süreç boyunca bize her türlü desteğini esirgemeyip binalarını kullandıran Mir Holding'e müteşekkirim.

08/12/2022

Önder KUL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
SİMGE LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. RADYANT ISITMA SİSTEMLERİ	5
2.1. Isı ve Kütle Transferinin RIS Üzerindeki Etkileri	5
2.1.1. İletim (Kondüksiyon)	6
2.1.2. Taşınım (Konveksiyon)	6
2.1.3. Işınım (Radyasyon)	7
2.1.4. Oda Havaının Tabakalanması	8
2.2. Isıl Konfor	8
2.3. Binalarda Isı Dengesi.....	9
2.4. Radyant İklimlendirme Sistemleri.....	11
2.4.1. Hidronik Radyant Isıtma Sistemleri	14
2.4.2. Radyant Panel İklimlendirme Sistemi Avantajları ve Dezavantajları	23
2.4.3. Radyant Isıtma-Soğutma Sistemlerinde Güncel Teknoloji	26
2.5. Radyant Isıtma ile Ortam Isıtmasının Karşılaştırılması.....	28
2.6. Hidronik Radyan Zeminlerin Kontrolü.....	29
2.7. Isı Kaynağı	30
2.8. Isı Pompası Entegreli Radyant Duvar Isıtma Soğutma Sistemi	39
3. YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYET ANALİZİ	45
3.1. LCC Analizi İlkesi	45
3.1.1. Bugünkü Değer Formülü ve Iskonto Oranı	45
3.2. LCC Analizinde Veri Girişi.....	46
3.2.1. Yatırım.....	46

3.2.2. İşletme Maliyeti.....	46
3.2.3. Hizmet Maliyeti.....	47
3.2.4. Artık Değer.....	47
3.3. LCC Analizinde Farklı Yaklaşımlar.....	48
3.3.1. Bugünkü Değer Yöntemi.....	48
3.3.2. Eşdeğer Yıllık Maliyet Yöntemi.....	48
3.3.3. Geri Ödeme Yöntemi	49
3.3.4. Duyarlılık Analizi ve Senaryo Analizi	49
3.4. Yaşam Döngüsü Maliyetinin Değerlendirilmesi	50
4. DENEY SİSTEMİ VE DENEYSEL YÖNTEM	51
4.1. Hipotez ve Yöntem.....	51
4.2. Bina Yerleşimi ve Mahal Listesi.....	53
4.3. Mekanik Sistem ve Bileşenler.....	55
4.3.1. Klima Santrali (Air Handling Units)	59
4.3.2. Hava Kaynaklı Isı Pompası.....	61
4.3.3. Dış Ünite Isı Pompası Sistemi	63
4.3.4. Yoğuşmalı Kombi.....	64
4.3.5. Sirkülasyon Pompaları.....	67
4.3.6. Akümülayon Tankı.....	69
4.3.7. Genleşme Tankı.....	70
4.3.8. Dağıtım Sistemi ve Kolektörler.....	71
4.3.9. İklimlendirme Sistemi – Isı Yayıncı.....	72
4.3.10. Ölçüm Cihazlar, Veri Toplama ve Kayıt Sistemi.....	76
5. SİSTEMİN YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYET ANALİZİ	79
5.1 Deneysel Ölçümler Öncesi Yapılan Çalışmalar	80
5.1.1. Kalibrasyon Çalışmaları	80
5.1.2. Ölçümlerin Tekrarlanabilirliği.....	80
5.1.3. Belirsizlik Analizi	81
5.2. LCC Analizi Modeli.....	81
5.2.1. Temel Veriler.....	82
5.2.2. Bileşen Verileri	85
5.2.3. İşletme Verileri.....	88
5.2.4. Yatırım Maliyeti.....	95

5.2.5. İşletme Maliyeti.....	96
5.2.6. Hizmet Maliyeti.....	96
5.2.7. Artık Değer.....	97
5.3. Sistemin Bugünkü Değer Yöntemi ile LCC Analizi	98
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	106
KAYNAKLAR.....	108



KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASHP	: Air Source Heat Pump (Hava Kaynaklı Isı Pompası)
ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği)
COP	: Co-Efficient of Performance (Performans Katsayısı)
DIN	: Alman Standart Enstitüsü
GSHP	: Ground Source Heat Pump (Toprak Kaynaklı Isı Pompası)
HVAC	: Heating Vantilating Air Conditioning (Isıtma Havalandırma İklimlendirme)
ILO	: International Labour Organization (Uluslararası Çalışma Örgütü)
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
LCC	: Life-Cycle Cost Analysis (Yaşam Döngüsü Analizi)
MPC	: Model Predictive Control (Model Öngörülü Kontrol)
PE-X	: Cross-Linked Poliethilen (Çapraz Bağlı Polietilen Boru)
PID	: Proportional Integral Derivative (Oransal-İntegral-Türevsel Kontrol)
RIS	: Radyant Isıtma Sistemi
TABS	: Thermally Activated Building System (Termalle Aktif Bina Sistemi)
VRF	: Variable Refrigerant Flow (Değişen Akışkan Debi)

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Yakıt fiyatları karşılaştırılması (“İstanbul Yakıt Fiyatları,” 2020).....	38
Tablo 4.1. Klima santrali unite seçimi ve serpantin yüzeyindeki hava hızlarına göre debi değerleri.....	60
Tablo 4.2. Geriye eğimli yuvarlak kanal fan teknik özellikleri.....	63
Tablo 4.3. Hava kaynaklı ısı pompası teknik özellikleri.....	63
Tablo 4.4. VRF dış ünite ısı pompası sistemi teknik özellikleri	64
Tablo 4.5. Kullanım Suyu Özellikleri.....	66
Tablo 4.6. Sistemde kullanılan pompaların özellikleri	69
Tablo 4.7. Kolektörlerin bulunduğu mahaller ve beslenen panel sayıları	75
Tablo 4.8. Toplam alan ve panel sayısı.....	75
Tablo 4.9. Sistemde kullanılan pompaların özellikleri	77
Tablo 5.1. Enerji ortalama birim fiyatlarının 2021 Temmuz-Aralık döneminde değişimi	83
Tablo 5.2. Temel veri girişinde enerji kaynağı maliyetleri	84
Tablo 5.3. Isı pompası, klima ve havalandırma sistemlerine ilişkin veriler	85
Tablo 5.4. Hidronik radyant ısıtma sistemlerine ilişkin veriler.....	87
Tablo 5.5. Gaz yakıtlı ısıtma sistemine ilişkin veriler	87
Tablo 5.6. İstanbul ili genelinde hava kaynaklı ısı pompası sisteminin aylık enerji tüketim değerleri (10^3 kWh)	88
Tablo 5.7. Gaz yakıtlı ısıtma sisteminin aylık enerji tüketim değerleri (10^3 kWh) .	90
Tablo 5.8. Mart ve Nisan aylarında hafta içi sistemin çalışma verileri ve COP	91
Tablo 5.9. Sistemler için toplam ilk yatırım maliyetleri	95
Tablo 5.10. 2021 verilerine göre sistemlerin Yıllık Enerji Tüketimleri ve İşletme Maliyetleri	96
Tablo 5.11. Yıllık periyodik bakım ve hata servis maliyetleri.....	97
Tablo 5.12. Kanunların belirlediği ekipman ömürleri (birim: yıl)	97
Tablo 5.13. İlk yatırım, işletme ve hizmet maliyetlerinin net bugünkü değerleri	103

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bir binanın enerji dengesi (Kaynak: http://nesa1.uni-siegen.de/wwwextern/idea/keytopic/3.htm).....	10
Şekil 2.2. Roma banyolarından Hpocaust kanalları kalıntısı (Bean, Olesen, & Kim, 2010b)	11
Şekil 2.3. Radyan yerden ısıtma	14
Şekil 2.4. Radyant modüler panel kurulum yöntemi ile ilgili patent görselleri (a) izometrik montaj görünümü (b) ön yüz parçalı görünümü	16
Şekil 2.5. Modüler radyant panel konfigürasyonları kesit görünüşü.....	17
Şekil 2.6. Radyant zeminlerde besleme sıcaklığı sıfırlama hattı.....	29
Şekil 2.7. Tipik bir kontrol şeması.....	30
Şekil 2.8. Tipik bir hava-su ısı pompası çevrimi.....	31
Şekil 2.9. Isı pompalarının açma/kapama döngüsü	32
Şekil 2.10. Tek kademeli ısı pompası sistemi (a) Şematik (b) t-s ve p-h diyagramlarında buhar-sıkıştırma prosesleri (Sarbu & Sebarchievici, 2016)	33
Şekil 2.11. Farklı toprak kaynaklı ısı pompası tipleri.....	36
Şekil 2.12. Toprak kaynaklı ısı pompaları (Aydın, 2018)	38
Şekil 2.13. Toprak kaynaklı ısı pompasının diğer ısıtma yöntemleri ile çevresel etki açısından kıyaslanması (Aydın, 2018).....	39
Şekil 2.14. TRNSYS programında sadeleştirilmiş bir toprak kaynaklı ısı pompalı radyant zemin ısıtma/soğutma sistemi modeli (Cacabelos ve vd., 2015).....	41
Şekil 2.15. GSHP system şematiği (Cacabelos ve vd., 2015).....	42
Şekil 2.16. Sketchup programında termal modelleme (Cacabelos ve vd., 2015).....	42
Şekil 4.1. Açık ofisten geniş açılı perspektifler.....	53
Şekil 4.2. Yemekhaneden bir görünüm.....	54
Şekil 4.3. Yemekhanenin teknik resmi	54
Şekil 4.4. Radyant sistem tesisat görseli	55
Şekil 4.5. Cihaz odasından bir tesisat görüntüsü.....	56
Şekil 4.6. Cihaz odasından bir tesisat görüntüsü	57
Şekil 4.7. Göstergeler ve vana elemanları.....	57
Şekil 4.8. Hibrid radyant panel ısıtma soğutma sisteminin (a) fiziksel kurulumu (b) devre şeması	58
Şekil 4.9. İndirgenmemiş baz alınmış ısı pompası içeren sistem	59
Şekil 4.10. İndirgenmiş baz alınmış ısı pompası içeren sistem.....	59
Şekil 4.11. Deneylerde kullanılan klima santrali görseli	60
Şekil 4.12. Hava kaynaklı ısı pompası A/W 75 E	61
Şekil 4.13. İklimlendirme sistemi kontrol ve takip yazılımı ana sayfa ve oda sıcaklığı / dış hava sıcaklığı değişim grafiği görseli.....	62
Şekil 4.14. İklimlendirme sistemi kontrol ve takip yazılımı ısı geri kazanım santrali modülü görseli	62

Şekil 4.15. İklimlendirme sistemi kontrol ve takip yazılımı kollektör termostatları modülü	62
Şekil 4.16. Yoğuşmalı kombi görselleri.....	65
Şekil 4.17. Pompanın yandan ve önden görünüşleri.....	68
Şekil 4.18. Pompa Basma Debisi ve Basma Yüksekliği.....	68
Şekil 4.19. Pompa minimum güç tüketimi-debi grafiği.....	69
Şekil 4.20. Çift serpantinli akümülayon tankı	70
Şekil 4.21. Genleşme tankının teknik resmi (sol görünüş-ön görünüş- üst görünüş).71	
Şekil 4.22. Sistemde kullanılan kolektör ve özellikleri	72
Şekil 4.23. Işınım panel duvar/yer/çatı iklimlendirme sisteminin kesit görünüşleri ..73	
Şekil 4.24. Isı Pompası Entegreli Radyant System Tesisat Şeması.....	74
Şekil 4.25. Radyant boruların yerleşim şekilleri	76
Şekil 4.26.Radyant sistemde kullanılan döşeme blokları için teknik resimden elde edilen bir görüntüsü	76
Şekil 4.27. Atlas UKM-50 ultrasonik akış ölçer ve kalorimetre	77
Şekil 4.28. Kullanılan kontrol sistemi ve güç analizörü	78
Şekil 5.1. 2013-2021 yılları arasında enerji kaynaklarının birim fiyatları	82
Şekil 5.2. Sistemin aylara göre çeşitli donanımlar için elektrik enerjisi tüketimi	89
Şekil 5.3. İstanbul’da dış hava sıcaklıklarının aylık değişimi.....	89
Şekil 5.4. İstanbul’da ortalama dış hava ve iç ortam sıcaklıklarının aylara göre değişimi	89
Şekil 5.5. Örnek bina durumunda sıcaklık farklarına göre aylık doğal gaz tüketimi .90	
Şekil 5.6. Binanın ve ısı pompasının 18 Mart ile 31 Mart tarihleri arasındaki enerji tüketimi	93
Şekil 5.7. Binanın ve ısı pompasının 1 Nisan ile 21 Nisan arasındaki enerji tüketimi	93
Şekil 5.8. 18 Mart ile 31 Mart arasında ortalama dış hava sıcaklığı ve HP besleme suyu sıcaklığı.....	94
Şekil 5.9. 1 Nisan ile 21 Nisan arasında ortalama dış hava sıcaklığı ve HP besleme suyu sıcaklığı.....	94
Şekil 5.10. Dış hava sıcaklığına sahip ısı pompasının COP varyasyonları.....	94
Şekil 5.11. Sistemlerin LCC karşılaştırması	104
Şekil 5.12. Sistemlerin LCC karşılaştırması	104
Şekil 5.13. Sistemlerin LCC duyarlılık analizi ve maliyet aralığı karşılaştırması ...	105

SİMGE LİSTESİ

$\sum x^2$	: Kareler Toplamı
$sd(df)$	: Serbestlik Derecesi
$\overline{x^2}$	: Kareler Ortalaması
p	: Anlamlılık Düzeyi
N	: Örneklem Sayısı
Ort.	: Ortalama
S.S.	: Standart Sapma



Üniversite	: İstanbul Kültür Üniversitesi
Enstitüsü	: Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	: İnşaat Mühendisliği
Programı	: Proje Yönetimi
Tez Danışmanı	: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Nurettin UĞURAL
Tez Türü ve Tarihi	: Doktora Tezi – Aralık 2022

ÖZET

Sürdürülebilirlik inşaat sektöründe büyük önem arz eder hale geldiğinden, mekanların ısıtma ve soğutma için enerji tüketimini en aza indirmek amacıyla enerji tasarrufu konusunda ekonomik açıdan verimli yatırım kararları alınması gerekliliği artmıştır. Dünyada binaların ısıtma ve soğutma taleplerini karşılamak için Hava Kaynaklı Isı Pompası sistemleri kullanılmasına rağmen, yüksek ilk kurulum maliyetleri bu sistemlerin daha da yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu tez, İstanbul'da 2500 m² taban alanına sahip gerçek ölçekli bir ticari binanın ısı pompası sisteminin geleneksel gaz yakıtlı kazan sistemiyle karşılaştırmalı değerlendirmesini sunmaktadır. Tez dahilinde ısı pompası sisteminin temel performans değişkeni olan Performans Katsayısı (COP) deneysel olarak değerlendirildi. Ekonomik analiz sonuçları, yüksek başlangıç maliyetine rağmen, ısı pompası sisteminin gaz beslemeli kombi ile mukayese edildiğinde maliyet açısından verimliliğini ve tasarrufunu ortaya koydu. Bunun yanında çalışmamız ısı pompası sisteminin, yıllık enerji tüketimini de geleneksel gaz yakıtlı kazan sistemine kıyasla önemli ölçüde azaltabileceğini kanıtladı.

MODÜLER BİNA YAPILARININ YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARIYLA ENTEGRASYONUNUN YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYETLERİ BAZLI İNCELENMESİ

Önder KUL

Anahtar Kelimeler: yapı işletmesi; proje yönetimi, radyant ısıtma; yaşam döngüsü maliyet analizi, yenilenebilir enerji

University : Istanbul Kültür University
Institute : Institute of Postgraduate Education
Department : Civil Engineering
Programme : Project Management
Thesis Supervisor : Assistant Professor Dr. Mehmet Nurettin UGURAL
Degree Awarded and Date : Doctoral Thesis – December 2022

SUMMARY

Since sustainability has become a major concern in the construction industry, making economically efficient investment decisions in energy conservation are needed to minimize energy consumption for space heating and cooling. Although Air-Source Heat Pump (ASHP) systems are used to meet buildings' heating and cooling demands worldwide, high initial setup costs limit the widespread use of these systems. This thesis presents comparative assessment of ASHP system versus conventional gas-fired boiler system for a real commercial building with a floor area of 2500 m² in Istanbul, Turkey. The key performance variable, Coefficient of Performance (COP), of the ASHP system was experimentally evaluated. Moreover, the economic analysis results showed that despite the high initial cost, ASHP systems are cost competitive against gas-fired boiler in Turkey. ASHP system could reduce the present value of total Life-Cycle Cost (LCC) compared to the conventional gas-fired boiler system because it can dramatically reduce the energy consumption per year.

COMPARATIVE ECONOMIC and EXPERIMENTAL ASSESSMENT of AIR SOURCE HEAT PUMP and GAS-FIRED BOILER

Onder KUL

Keywords: construction management; project management; renewable energy ; radiant heating; life cycle cost;

1. GİRİŞ

Dünya genelinde birincil enerji kullanımının yaklaşık %40'ı binalarda gerçekleşmektedir. Her geçen gün artan dünya nüfusuna paralel olarak konut, eğitim, iş ya da sosyal ve kültürel alanlara duyulan ihtiyaç da artmaktadır. Bu artış kaçınılmaz olarak daha fazla alanda iklimlendirme ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Ayrıca, gerek küresel ısınmanın etkilerinin azaltılması yönündeki gayretler, gerekse fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi de yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve enerji verimliliği üzerine çalışmaların giderek önem kazanmasında etkili olmuştur. Dolayısı ile gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler başta olmak üzere, yüksek verimlilik ve etkinlik sağlayan gerek ilk yatırım gerekse işletme maliyetleri daha düşük olan yeni ve yenilikçi Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme HVAC sistemlerinin uygulamalarına yönelik çalışmalar da hız kazanmaktadır.

Hızlı büyüyen ekonomi ve kentleşme ile birlikte şehirlerdeki kirlilik sorunları, düşük dereceli yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelişi ve yeşil evler, pasif ev sistemleri, sıfır enerji bina sistemleri gibi çeşitli yenilikçi girişimleri ve bu girişimleri teşvik etmeye yönelik hibe ve destek programlarında da büyük bir ivmelenme meydana getirmiştir.

Bina kabuğu ve Isıtma, HVAC sistemlerinin enerji verimliliği, tüm ısı zincirinin yüksek performanslı olması bakımından bir ön koşul niteliğinde önemlidir. HVAC sistemlerinin tasarımında amaç fonksiyonu olan kullanıcıların ısı konforu çok faktörlü bir bağımlı değişken olmanın yanı sıra, aynı zamanda insanın fiziki ve ruhsal sağlığını ve üretkenliğini önemli ölçüde etkileyen bir moderatör değişken niteliğindedir.

Bina kabuğu yalıtım teknikleri ile ilgili bilimsel çalışmalar ışığında elde edilen son gelişmeler, binalarda ısıtma yükünü ciddi şekilde azaltmış ve oldukça verimli ve etkin ısıtma sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Bu kapsamda hidronik radyant zemin gibi düşük sıcaklıklı ısı yayıcı sistemlerin kullanımı uygulamada kendine yer bulmuştur. Hatta bu sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha uygulanabilir

hale getirilmesi, yüksek derecede ısı konfor ve görsel ve mimari özgürlük sağlama gibi ilave yetenekleri sayesinde zaman içerisinde oldukça cazip hale gelmiştir.

Ne var ki, hidronik radyant zeminlerin hem tasarım hem de işletim açısından daha karmaşık olması ve özellikle ilk yatırım, işletme ve hizmet maliyetlerinin görece yüksek olmasına karşın artık değerleri nispeten düşük kalması gibi olumsuz yanları da bulunmaktadır. Bu ekonomik nedenlerle, anılan avantajlarına rağmen bu sistemler, ancak enerji verimliliği, ısı konfor, estetik ve çevresel faktörler gibi birçok yönden elverişsiz olan daha basit sistemler karşısında uygulama alanı bulmakta zorlanmaktadır.

Nitekim, birçok dezavantajına rağmen Türkiye’de hala ısıtma için sıcak su kullanarak taşınım ile ısıtma yöntemi kullanılan radyatörlü sistemler ve soğutma için cebri soğuk hava ile taşınım yöntemi kullanarak ortamı heterojen olarak soğutan klimalı sistemler kullanılmaktadır. İki yöntemin toplam kurulum ve kullanım maliyetleri oldukça yüksek olmakla birlikte konfor yönüyle de mahal içinde dengesiz sıcaklık dağılımı oluşturmaktadırlar. Bu klasik iklimlendirme yöntemlerinde mahalın ısıtılabilmesi için konfor sıcaklığının çok üzerinde bir ısıtma ve aynı şekilde soğutulabilmesi için de konfor sıcaklığının çok altında bir soğutma yapılmaktadır. Bu da hem maliyet hem de sağlık açısından olumsuz etkiler doğurur. Ayrıca klimanın çalışırken mahalde meydana getirdiği hava hareketi de insan konforuna ve sağlığına olumsuz tesir etmektedir (Koca, 2011).

İnsan bedeninde ısıyı algılayan 20.000 civarında sensör vardır ve bunların %45’i sıcaklığı %55’i ise soğukluğu algılayarak beynimize iletir. Bedenimiz sürekli olarak termal konfora ulaşmak için kan akış hızını değiştirir. Bu hareket sürekli olarak bedenimizi yorarken hem konforsuzluk hem de yorgunluk oluşturur ve strese neden olur. İnsanoğlunun termal konforu hakkında yapılan araştırmalar (Bedir, 2012; Fabrizio vd., 2012; Koca vd., 2014; Tye-Gingras & Gosselin, 2012) sonucunda, binaları ısıtıp soğutmak şeklindeki klasik sistem yaklaşımları yerine, bina içinde yaşayan insanlara konfor sağlayacak yeni radyant sistemler geliştirildi. Bu yüksek konfor düzeyi, yaşam alanındaki ısı dağılımının homojen olduğu, hava sıcaklığıyla oda sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu için çok yüksek oranda ısıtma yapan, havanın ne kuru ne de nemli hissedildiği ve hava hareketlerinin rahatsızlık verici olmadığı durumlarda söz konusu olabilir. (Markov, 2003)

Bir odada tek bir lamba ile nasıl ideal aydınlatma mümkün değilse, tek bir klasik ısıtma ünitesi ile de yüksek termal konfor sağlamak mümkün değildir. Fanlı serinletici sistemlerle daha homojen bir ortam sıcaklığı sağlanabilir, ancak bu durumda ses ve hava hareket seviyesi rahatsızlık verici boyutlara ulaştığı için konfor sağlamaz. İnsan konforu için birçok değişkeni bir arada optimize etmek gerekir. Hem yüksek konfor sunan hem de %60 civarında enerji verimliliği sağlayan, klima gibi yüksek debili üfleme nedeniyle konforsuzluk veya hastalık oluşturmayan, yüksek konforlu ve hijyenik bir sistem olarak radyant panel iklimlendirme sistemi geliştirilmiştir. Radyant panel iklimlendirme sistemi, mimari ve mekanik açıdan yüksek değer ve tasarım katılacak villa, hastane, ofis, alışveriş merkezi projeleri, eğitim ve kültür tesislerine en uygun çözüm olarak sunulabilmektedir (mirhybridwall.com).

Radyant ısıtma yöntemi bir odadaki zemin ve duvarların yüzeylerini ısıtır. Daha sonra bu yüzeyler bu ısılarının çoğunu ışıma yoluyla yavaşça etrafa yayar. Böylece mahaldeki insanlar ve diğer canlılar ihtiyacı kadar bu ısıdan faydalanırlar. Işıma ile ısınmanın verdiği ısıl konfora hayattan verilebilecek en güzel örnek şudur: Çıplak ayakla güneş ışınlarıyla ısınmış olan toprağa basarak bir insan eğer bir esinti yok ise hava sıcaklığı düşük olmasına rağmen konforlu şekilde ısınmış hisseder. Radyant ısıtma sisteminde önce zemin yüzeyi ısınır ve ısı yukarıya doğru ışıma yoluyla yükselir. Bu durumda hava akımına ihtiyaç yoktur ve çatı düzeyinde biriken bir sıcak hava kütlesi meydana gelmez.

Radyant ısıtma sistemlerinin farklı koşullarda davranışı hakkında yeterli bilgi sahibi olunması, sistemin verimliliği, enerji tasarrufu, ısıl konfor sağlamadaki etkinliği, ilk yatırım, işletme ve hizmet maliyetleri, geri ödeme süresi, artık değeri gibi yaşam döngüsü maliyet analizi ile belirlenebilecek önemli sistem parametrelerinin belirlenmesi bakımından oldukça önemlidir. Zira, insanın gerek fiziksel ve ruhsal sağlığı açısından, gerekse verimliliği açısından çok önemli olan ısıl konforun yüksek düzeyde sağlanabilmesine imkân tanıyan bu ısıtma sistemlerinin, yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilmiş hali ile uygulamada daha fazla yer bulması ve inşaat mühendisliği ve mimarlık alanında yeni bina projelerinin bu sistemlere uygun olarak tasarlanması birçok açıdan önemlidir. Bu da bu sistemlerin ekonomik değerlendirmelerini ve yaşam döngüsü maliyet analizlerinin yapılmasını kaçınılmaz derecede önemli hale getirmektedir. Bu itibarla, İstanbul’da örnek olarak seçilen bir ofis binasında hava kaynaklı ısı pompası destekli radyant ısıtma sisteminin yaşam

döngüsü maliyet analizini konu alan bu bilimsel araştırma projesinin literatüre önemli katkı sunması beklenmektedir.



2. RADYANT ISITMA SİSTEMLERİ

Birçok farklı ısı ve kütle aktarım mekanizmasını içeren radyant ısıtma sistemlerinin (RIS) iyi bir şekilde anlaşılması, bu sistemlerin davranışının değerlendirebilmesi ve gerek tasarımında gerekse de işletmesinde iyileştirmeler yapılabilmesi bakımından oldukça önemlidir. Bu bakımdan çalışmasının bu bölümünde RIS'in fiziksel temeller ele alınmıştır.

Isıtma sistemleri belirli bir ihtiyacı karşılamak için kullanılmaktadır ve bu ihtiyacı birinci derecede belirleyen faktör insan konforudur. Her ne kadar insan konforu çeşitli yol ve yöntemler kullanılarak sağlanabilse de bu yol ve yöntemlerin uygulanmasında yer alan iş gücü ve maliyet gibi faktörler ile sistemin bu konforu sürdürmedeki başarısı değerlendirilmesi gereken başlıca faktörler arasındadır. Bu bakımdan RIS teknolojileri önemli avantajları ile öne çıkmaktadır. Amaç fonksiyonu olarak değerlendirebileceğimiz insan konforu faydalanılan ısı transfer mekanizmalarını da önemli kılmaktadır. Bu bakımdan ısı ve kütle transferinin de temel seviyede ele alınması gerekmektedir. Isı ve kütle transferi teorisinde iletim, taşınım ve ışıyım olmak üzere üç farklı ısı transferi mekanizması vardır. RIS'da bu üç mekanizma da aktiftir ve sistem performansı için önemlidir.

2.1. Isı ve Kütle Transferinin RIS Üzerindeki Etkileri

Malzemeler katıdan sıvı faza yahut sıvıdan katı faza geçişi sırasında faz değişim entalpisi veya faz değiştirme gizli ısısı denen bir enerji miktarını sabit sıcaklıkta alır veya verir. Bu süreç madde içerisinde aşamalı olarak gerçekleşmektedir ve madde içerisinde bir tabakalaşmaya sebep olur. Tabakalaşma, termal konforu ve ısı transferini etkilemesi bakımından dikkate alınması gereken bir etkidir. Diğer taraftan, ısıyımın, yukarıda saydığımız üç aktarım mekanizmasından herhangi biri yoluyla aktarılması, öncelikle ısıyımın kaynağı ve ısıtılmak istenen hedef arasında bulunan belirli bir direncin aşılmasını gerekli kılmaktadır.

Elektrik akımının iletme benzer şekilde, bir potansiyel fark ile bu potansiyel farkın iki ucu arasında yer alan direncin oranı ısı aktarım miktarını belirlemektedir. Isı transferinde, potansiyel fark kaynak ve hedef arasındaki sıcaklık farkı ile ifade edilmektedir, dirençler ise ısı transfer mekanizmasına bağlı olarak ısıyımın geçeceği tüm

ortamlar boyunca yer alan çeşitli faktörlerin etkisinde oluşmaktadır. Dolayısı ile bu üç ısı transfer mekanizmasına da kısaca değinmekte fayda vardır.

2.1.1. İletim (Kondüksiyon)

Termal enerji olarak da ifade edebileceğimiz ısı, bir madde içindeki moleküllerin ortalama kinetik enerjilerinin bir ölçüsüdür (Çengel & Boles 2008). Moleküllerin, dönme, öteleme ve titreşim gibi hareketleri maddenin sahip olduğu ısı enerjisini gösterdiği gibi, bir madde içerisinde ısı enerjisinin yayılımını da sağlayan mekanizmalardır. Hareket halinde bulunan moleküllerin birbirleri ile çarpışmaları ısının bu madde içinde ve bu madde ile temas halinde bulunan diğer maddelere yayılmasını sağlamaktadır. Çarpışmalar neticesinde moleküllerin sahip oldukları enerjinin bir kısmı temas edilen moleküller ile paylaşılmaktadır, dolayısı ile ve ısı enerjisinin yayılımı daima yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru gerçekleşmektedir.

Katı bir ortam içerisinde ısının bu şekilde aktarımına ısı iletimi denir. Isı iletiminin hızı sıcaklık farkı ve katı ortamın iletkenlik katsayısı adı verilen malzeme özelliğine ve katı ortamın ısı geçişinin olduğu yöndeki malzeme kalınlığına bağlıdır. İletkenlik ne kadar yüksek olursa, ısı transferi o kadar yüksek olur. Isı iletimi, Fourier Isı İletim yasası şeklinde tanımlanan bir fizik yasası çerçevesinde gerçekleşmektedir (Çengel & Boles 2008).

2.1.2. Taşınım (Konveksiyon)

Aralarında ısı transferinin söz konusu olduğu malzemelerden birinin akışkan olduğu durumda, örneğin bir yüzey üzerinde hava akımı bulunduğunda, ısının aktarımı adveksiyon yoluyla gerçekleşir. Bu durumda, sıcak olan yüzeye yakın olan moleküllere ısı aktarımı yapıldıktan sonra ısınan bu moleküller enerjileri ve buna bağlı olarak meydana gelen yoğunluk farkları gibi nedenlerle taşınır ve bunların yerini daha soğuk moleküller alırlar. Böylece, iletme nazaran, yüzeydeki sıcaklık gradyanı daha yüksek olmakta ve sadece iletimin meydana geldiği durağan ısı aktarımı durumuna göre ısı transferi artmaktadır.

Newton Soğuma yasası ile ifade edilen taşınımla ısı transferinde ısı transfer hızı, taşınımın meydana geldiği yüzey alanıyla, yüzey ve akışkan arasındaki sıcaklık farkıyla ve akışkanın cinsine ve hareket hızına bağlı olan ısı transfer katsayısıyla

orantılı olarak değişir (Çengel, 2015). Bir taşınım mekanizmasında akışkan türü hemen hemen sabit olmakla birlikte, akışkanın hareketi genellikle çok karmaşıktır ve bu nedenle toplam ısı transfer katsayısı genellikle deneysel olarak hesaplanmaktadır.

Konveksiyonun dış zorlanmış taşınım, iç zorlanmış taşınım ve doğal taşınım olmak üzere üç farklı şekli bulunmaktadır (Çolak & Ayık). Zorlanmış taşınım, sıvı hareketinin bir fan veya pompa tarafından zorlandığı anlamına gelir. Dış ifadesi, sıcak bir zemin üzerine soğuk hava üfleyen bir fan örneğinde olduğu gibi, ilgili sınır tabakalarının dışında bir serbest akış hızı veya sıcaklığının olduğu durumu ifade eder. İç ifadesi ise temas halinde bulunan iki taraftan sınır tabakası gelişiminin olduğu ve böylece serbest akış özelliklerinin ortadan kalktığı durumu ifade eder. Hidronik ısıtma sistemlerinde bir borudan su pompalayan bir pompa, zorlanmış iç konveksiyona bir örnektir. Doğal taşınım ise akışkan hareketi akışkan içerisindeki yoğunluk farklılıklarından ve kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır.

2.1.3. Işınım (Radyasyon)

Üçüncü ısı transfer mekanizması olan ışınímda ısı'nın yayılması için bir ortama ihtiyaç yoktur ve ısı'nın aktarımı boşlukta hareket edebilen elektromanyetik dalgalar yoluyla gerçekleşmektedir (Çengel, 2015). Radyatif sistemlerde ısı transferinin büyük bölümü ışınímla gerçekleşmektedir ve bu nedenle RIS için ışıním büyük önem taşımaktadır.

Işınım ile ısı transferinde malzemenin yüklü parçacıkları sıcaklıklarından dolayı titreştikçe ve çarpıştıkça radyasyon yayarlar. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, moleküllerin kinetik enerjisi ve elektromanyetik dalgaların frekansı o kadar yüksek olur. Belirli bir sıcaklığı olan tüm yüzeyler termal radyasyon yayarlar ve diğer yüzeylerden yayılan radyasyonu da soğururlar. Soğurulan ve yayılan radyasyon arasındaki denge, yüzeyin net bir ısı kaynağı mı yoksa çevre için bir alıcı mı olduğunu belirler. Stefan-Boltzman yasası ile ifade edilen ışıním ile ısı transferi, siyah cisim adı verilen ve emisyonu 1 olarak kabul edilen ideal bir cisim için tanımlanmış olup her materyal için o cisimden yayılan radyasyon ile aynı sıcaklıktaki bir siyah cismin radyasyonunun oranı şeklinde tanımlanan bir yayıcılık özelliği vardır ve bu değer tüm gerçek cisimler için 1'den küçüktür (Çengel, 2015). Bununla birlikte, yüzeylerin

yansıtıcılıkları ve birbirlerine görece duruşlarını ifade eden görünüm faktörü de ısınlımla ısı transferinde önemli parametrelerdir.

2.1.4. Oda Havasının Tabakalanması

Akıcı ortamlarda, sıcaklığa bağılı yoğunluk farkları ve kaldırma kuvvetleri yoğunluğu düşük olan sıcak akışkanın yükselmesine ve daha yoğun olan soğuk akışkanın ise aşağı çökmesine neden olur (Kong vd., 2008; Yu vd., 2018). Kapalı ortamlarda, örneğin bir odada, bu kuvvetler, sıcak havanın tavan altında, soğuk havanın ise zeminde kümelenmesine neden olur ve bir tabakalaşma etkisine yol açar. Tabakalaşma nedeniyle, termal konfor üzerinde olumsuz etki gösteren dikey yönlü bir sıcaklık gradyanının oluşumuna yol açabilmektedir. Öte yandan, ısıtma sırasında sıcak havanın, ısıl konforun aranmadığı boş bir bölge niteliğindeki tavana doğru yükselmesi, odanın yaşam alanını oluşturan alt ve orta seviyelerde termal konforun sağlanmasının gecikmesine neden olan diğere bir önemli etkidir ve ısıtma etkinliğini olumsuz olarak etkilemektedir. Her ne kadar, bazı özel durumlarda termal konforun korunmasına yardımcı olacak şekilde kullanılabilir olsa da tabakalaşma ısıtma uygulamalarında genellikle istenmeyen bir durumu temsil etmektedir.

2.2. Isıl Konfor

İnsanların hayatlarının önemli bir bölümünü kapalı alanlarda geçirmekte olduğu günümüz yaşam tarzında bireylerin ve toplumun kişisel sağlığının ve aynı zamanda çalışma performansının korunmasında büyük öneme sahip olan konforun en önemli bileşeni olan ısıl konfor, HVAC sistemlerinin tasarım ve uygulamasında birincil amaçtır. Isıl konfor, vücudun fiziksel ısı dengesinin yanı sıra kişinin sağlığı, psiko-sosyal durumu ve mekanik ortam özellikleri gibi faktörleri de içermekte ve kişiden kişiye farklılık göstermektedir.

Terleme ve solunum gibi vücut fonksiyonları yoluyla; vücutla doğrudan temas eden yüzeylere iletim yoluyla; ortam havasına taşınım yoluyla ve çevredeki yüzeylere ısınlım yoluyla olmak üzere çeşitli sebeplerle insan vücudundan ısı kaybı meydana gelmektedir. Vücudun ısıl olarak dengede olması için de metabolik süreçler ve yukarıda sayılan ısı transferi mekanizmaları yoluyla kaybedilen ısı kadar ısı üretmesi gerekir. Normal koşullar altında bu ısı transferinin çoğunu konveksiyonla birlikte radyasyon oluşturur. Vücut sadece havanın sıcaklığını değil, aynı zamanda çevresinin

radyasyon sıcaklığını da algılar. Dolayısı ile ısıtım ve taşıtım ile olan ısı transferlerinin bir kombinasyonu olarak hesaplanan bir operasyonel sıcaklığın geçerli bir HVAC sistemi ile kontrol edilmesi ve gerçeklenmesi gerekmektedir.

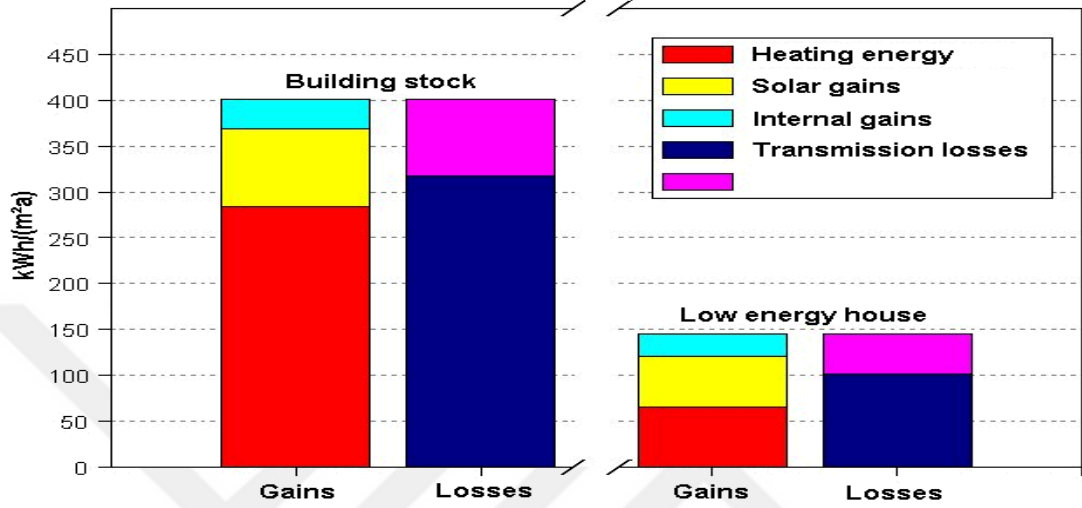
Termal konfor birey tarafından, çok soğuk, serin, biraz serin, konforlu, biraz sıcak, sıcak, çok sıcak şeklinde değişen bir baremde algılanmaktadır ve kişiye göre değişmekle birlikte dinamik bir yapıda olduğu için sürekli konfor halinde kalması neredeyse imkansızdır. İnsanın tatminsizlik doğası da dikkate alındığında, ısıl konforun sürekli kontrol edilen ve optimum bir aralıkta değişen bir nitelikte olduğu söylenebilir.

Özetlenecek olursa, ısıl konfor, hava akımı, radyasyon simetrisi, dikey hava sıcaklığı gradyanı, çalışma sıcaklığı ve hava nemi gibi ısıl parametrelerin yanı sıra psikososyal ve mekanik parametreleri de içermekte ve bina yapısı, kullanılan HVAC sistemi, dış iklim koşulları, havada bulunan kirletici yükleri ile ilişkilidir. Dolayısı ile HVAC sistemlerinin tasarımı ve uygulanması aşamasında, uygulama yapılacak olan binanın konumsal ve yapısal özellikleri, iklim zellikleri, HVAC sisteminin bileşenlerinin seçimi ve yerleşimi gibi çok sayıda parametre iyi bir iç mekân ısıl konforu için son derece önem arz etmektedir. Ayrıca ısıl konforu elde etmeye yönelik olarak yapılan tüm seçimlerin ekonomik sonuçları olmakta ve kurulan sistemin ilk yatırım maliyeti, işletme maliyeti, etkinliği gibi çok sayıda operasyonel parametre değerini belirlemektedir. Bu bakımdan ele alındığında, süreç baştan aşağı titizlikle yönetilen bir çalışma niteliğindedir.

2.3. Binalarda Isı Dengesi

Binalar çeşitli nedenlerle ve çeşitli kaynaklarla enerji alışverişlerinde bulunmaktadır. Kazançlar, binaya pozitif bir ısı akışını, kayıplar ise binadan çevreye olan enerji akışını gösterir. Dahili kazançlar, bir kişi, bir bilgisayar veya ışıklar tarafından yayılan ısıdır. Harici kazançlar ise, örneğin, binaya gelen güneş ışınlarının kısa dalgalı termal ışınımdır. İletim kayıpları ise, kışın duvardan meydana gelen ısı kayıpları ile kapı ve pencerelerin açılması nedeniyle sıcak i havanın soğuk dış hava ile yer değiştirmesinden kaynaklanan havalandırma (ventilasyon) kayıplarıdır. Aşağıda ekil 2.1’de mavi ve mor çubuklar kayıpları, turuncu, kırmızı ve açık mavi çubuklar kazançları göstermektedir. Kazançlar ve kayıplar şeklindeki enerji akışları,

normal şartlar altında, binanın çevresi ile ısı dengeye, yani aynı sıcaklığa gelmesi ile sonuçlanır. Dolayısı ile dış ortam sıcaklığı ile ısı konfor sıcaklığı arasında kalan farkı karşılamak için binaya kazandırılması gereken bir ısı miktarı bulunmaktadır. Şekil 2.1’de grafikte kırmızı ile gösterilen bu ısı miktarı, istenen çalışma sıcaklığını korumak için gerekli ısıtma yükünü temsil etmektedir.



Şekil 2.1. Bir binanın enerji dengesi (Kaynak: <http://nesa1.uni-siegen.de/wwwextern/idea/keytopic/3.htm>)

Dış ortam sıcaklığının konfor sıcaklığına eşit veya çok yakın olduğu durumlarda ısıtma yükünün olmadığı kabul edilebilir. Ters durumlarda ise, yani dış ortam sıcaklıklarının konfor sıcaklığından yüksek olduğu yaz ayları gibi durumlarda ise, binanın ısı kazançları kayıplarından fazla olmakta, dolayısı ile ısı konforun sağlanmasında soğutma yükleri söz konusu olabilmektedir.

Isı ihtiyacı binanın HVAC sistemi tarafından karşılanmaktadır. Isıtma sistemleri kabaca, ısıyı ısı kaynağından alarak binanın farklı bölümlerine dağıtan bir dağıtım şebekesi (kanallar, borular, vb.) ve ısı yayıcılarından oluşmaktadır. Sistemi ve bileşenlerini kontrol etmek için farklı kontrol stratejileri mevcuttur. Çok çeşitli farklı ısı kaynakları, dağıtım teknikleri ve ısı yayıcılar mevcuttur ancak bu projede sadece hidronik radyant tip ısı sistemleri ele alınarak bu sistemlerin yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmıştır. Bu itibarla, kullanılan RIS'in ana özellikleri çalışmanın ilerleyen bölümlerinde verilmiştir.

2.4. Radyant İklimlendirme Sistemleri

Radyant ısıtmanın tarihçesi 3000 yıl kadar geriye gitmektedir (Kim vd., 2015). Çinliler tarafından kullanılan “Kang” ve Koreliler tarafından kullanılan “Ondol” denen sistemler ilk radyant ısıtma örnekleri olarak gösterilmektedir (Bean vd., 2010). Bu sistemlerde ocakların baca gazları zemin altına döşenen borulardan geçirilerek zeminden ısıtma sağlanıyordu. Bundan yaklaşık 1000 yıl kadar sonra Avrupa’da Romalılar tarafından “Hypocaust” geliştirilmiş ve Avrupa’da kullanılmaya devam etmiştir. Birkaç asır kullanım dışı kalmasına rağmen radyant ısıtma Avrupa’da son 50 yıldır modern formda yaygınlaşan şekilde ısıtma ve soğutma amaçlı olarak konut ve ticari binalarda en ideal yöntem olarak görülmekte ve kullanılmaktadır (US5292065, 1996). ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) üyelerinin kaleme aldığı radyant ısıtma soğutma sistemlerinin tarihçesine göre radyant yerden ısıtma sistemleri binlerce yıl önce kullanılmaktaydı (Bean vd., 2010a). Bu tarihçede belirtildiği gibi arkeolojik çalışmaların ortaya koyduğu üzere bu sistemler, çok eski zamanlarda öncelikle tarihi Asya ülkeleri olan Çin ve Hun İmparatorluklarında, sonrasında da Yunanlılar ve Romalılar tarafından kullanılmıştır. Ayrıca Orta Doğu’da da benzer sistemlerden faydalanılmıştır. Hypocaustum adı verilen bir seri odacıktan oluşan taş ya da fırınlanmış killi toprak malzemeden yapılan ve zemin altına döşenen ısıtma sistemleri tüm odaları ısıtmak için kullanılmaktaydı.



Şekil 2.2. Roma banyolarından Hypocaust kanalları kalıntısı (Bean vd., 2010b)

Soğutulmuş su kullanılan ilk radyant soğutma sistemi, 8. yüzyıl başlarında bugünkü Irak siyasi sınırları dahilinde kalan coğrafyada görülmüştür. Çok daha sonra 20. yüzyılda savaş sonrası İngiltere’de bir banka binası beton zemine bakır boruların

döşenmesi ile kurulan sistem hem ısıtma hem soğutma için kullanılmıştır. II. Dünya Savaşı öncesi Almanya Parlamentosu binasına radyant soğutma sistemi ilave edilmiştir. Sistem, merkezi ısıtma, nemlendirici ve soğutma sistemlerini içermektedir. Enerji ve konfor yönüyle diğer ısıtma soğutma sistemlerine karşılık çok avantaj sağlayan radyant sistemler günümüzde de gelişen teknolojinin getirdiği kurulum, sökme ve taşıma kolaylıkları nedeniyle yaygınlaşmaktadır. Özellikle modern ticari ve devlet binalarında ayrıca müstakil şahsi ev binalarında tercih edilmektedir. Örneğin 1933'te İngiltere'de ICI laboratuvarında polietilen malzemenin keşfedilmesi, PE-X borularının geliştirilmesine imkan sağlamış ve borulamada karşılaşılan önceki zorlukların birçoğuna çözüm sunmuştur (Bean vd., 2010b).

Radyant panel iklimlendirme sistemlerinde klima sistemi gibi yüksek hava hareketi, soğutma için yüksek enerji harcama ihtiyacı, hibrid radyatör sistemlerinde olduğu gibi konforu bozan konveksiyonel iletim yoktur. Bunlar yerine, ortam sıcaklığına yakın tavan ve duvar sıcaklığı, minimum hava hareketi ile insanın konforu için en uygun yöntem olan ışıma vardır. Klasik sistemlerle sadece insanın maksimum %30 ısı alabildiği bir hava hareketi sağlanabilmektedir. Oysa, insan ısıyı %50 oranında ışıyım yoluyla alır. Dolayısıyla klasik sistemler, çok düşük ışıma oranıyla ısı konfora önemli düzeyde katkı sağlayamamaktadır. Oysa ısı pompası entegreli hibrid radyant panel ısıtma soğutma sistemleri %70 civarı ışıyım ve %30 civarı da hava hareketi ile insan için en ideal konfor şartlarını sunmaktadır (Zhao vd., 2016).

Hibrit radyant duvar panel sistemleri yüzeyden ısıtma ve soğutma için cam elyaf takviyeli bir dış kabuk (GRC, prekast beton), bu kabuk içerisine düşük yoğunlukta, kalın bir köpük beton doldurularak ve köpüğün içerisine gömülmüş 10 mm çapındaki oksijen bariyerli PE-X borularından oluşan hafif bir kompozit yapıda cephe giydirme sistemi şeklinde tasarlanmaktadır. Hibrit duvar sistemleri aynı zamanda ısı ve ses yalıtımına da katkıda bulunmaktadır. Hafif, esnek ve düşük maliyetli olması yanında beton panelleri ile mukavemeti de artırılarak depreme karşı da bina dayanımına katkıda bulunmaktadır. Cam elyaf takviyesi hibrit duvarın kopma ve eğilme mukavemetini artırarak dış sıcaklık farklılıklarından dolayı panelde oluşan ısı gerilimlerin neden olduğu çatlamaları önler veya azaltır. 170°C'de erime noktası olması, yüksek ısıda buhar oluşturması ve bu buharın da kanallar oluşturması ile sistemin yangın dayanımı artmaktadır. Geliştirilen panel içerisinde bulunan yalıtım

katmanı sayesinde panel arkasına gerçekleşebilecek ısı kayıpları engellenir (Erikci Çelik vd., 2016; Koca, 2018; Koca & Cetin, 2017; Koca vd., 2014).

Bir ortamın ısıtılması için radyant panel kullanıldığında panelden yayılan ışınlama ile birlikte ısı enerjisi doğrudan ortamdaki cisimlere aktarılır ve yüksek panel yüzey sıcaklığı nedeniyle avaraj radyant sıcaklığı da yükselir. Böylece radyant panellerle ısıtma taşıyıcısı ısıtma sistemlerine göre daha düşük hava sıcaklığında yapılabilen ve aynı konfor şartları sağlanabilmektedir (Bedir, 2012; Koca vd., 2014). Bu da daha düşük enerji girişi ihtiyacı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla hem konforu arttırırken hem de enerji verimliliğini arttıran bir iklimlendirme sistemi tercih edilmiş olur.

Radyant ısıtma yöntemi, bir odadaki zemin ve duvarların yüzeylerini ısıtır. Bu yüzeyler daha sonra ısıyı çoğunlukla radyasyon yoluyla yavaşça ortama yayar. Böylece mahaldeki insanlar ve diğer canlılar, ihtiyaç duydukları kadar bu sıcaktan faydalanırlar. Radyasyonla ısıtılarak verilen termal konforlara verilebilecek günlük hayattan en iyi örnek şudur: Esinti olmadığı göz önüne alındığında, bir kişi ayakkabı olmadan güneş ışınlarından ısıtılan yeryüzüne adım attığında rahatça ısınır, düşük hava sıcaklığına rağmen. Radyant bir ısıtma sisteminde, başlangıçta zemin yüzeyi ısınır ve radyasyon ile ısı artar. Bu durumda, hava akımına gerek yoktur ve tavan seviyesinde biriken sıcak hava kütlesi oluşmaz. İnsan konforu için en uygun yöntemler olan radyant ısıtma sistemlerinde kafa seviyesinde daha serin ve ayak seviyesinde daha sıcak hissedilir.

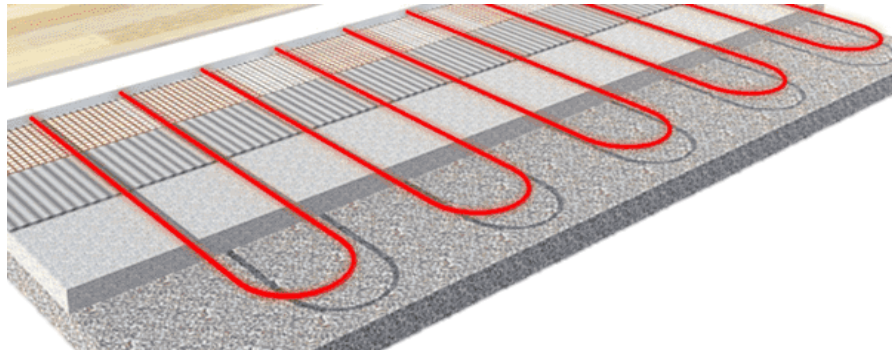
Radyant iklimlendirme sistemlerinin ısı konfor ve enerji verimliliği ile ilgili son yıllarda yapılan birçok değerli araştırma literatürde mevcuttur (Koca & Cetin, 2017; Zhao vd., 2016). Bu iki parametrenin iyileştirilmesi için birçok tasarım optimizasyonu yapmak mümkündür. Yıllar içinde teknolojinin de ilerlemesiyle modern yapısıyla ilk çıktığı (US005579996A, 1996; US5292065, 1996; US005931381A, 1999) yıllardan beri geliştirilmektedir. Geliştirilen radyant ısıtma soğutma sistemleri ile ilgili birçok patent alınmıştır. Bu konuyla ilgili birçok sayısal ve deneysel analizler yapıp tezler ve uluslararası dergi ve konferanslarda makalelere, bildirilere konu edilmiştir. Son yıllarda ülkemizde de radyant sistemlerle ilgili patent ve yayın çalışmaları önemli yol kat etmiştir. Ancak hala sistemin ısı konfor ve enerji verimliliğini arttırmak için tasarımsal olarak geliştirilmesi gereken

yönleri mevcuttur. Ayrıca sistemin ekonomik parametrelerinin de kapsamlı olarak yaşam döngüsü maliyetleri yönüyle analiz edilmesi gerekmektedir.

2.4.1. Hidronik Radyant Isıtma Sistemleri

Radyant iklimlendirme sistemleri ile ilgili önemli gelişmeler elde edilmiş ve konu ile ilgili çok sayıda patent ve makale yayınlanmıştır. Bu kapsamda, çeşitli tasarımlar, hibrit radyant panel iklimlendirme sistemleri ve bunların optimizasyonu ve yaşam döngüsü maliyet analizlerini de içeren çok sayıda inceleme ve analiz literatürde önemli bir yer tutmuş ve halen güncelliğini korumaktadır.

Radyant ısıtma sistemlerinin popülerlik kazanması 19. yüzyılda hidronik ısıtma sistemlerinin gelişmesiyle olmuştur. Çapraz bağlı polietilen (PE-X) boruların radyant bir zeminde kullanılmaya başlanması ile eski boru malzemeleriyle ilgili sorunların büyük ölçüde ortadan kaldırılmasına imkân sağlamış ve bu sistemlerin popülerliğinin artmasında bir kilometre taşı olmuştur. Ancak, o dönemde RIS'ların ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması ve petrol fiyatlarının düşük olması, radyatörlerin kullanımının ekonomik olarak cazip kalmasına neden olmuş ve buna bağlı olarak PE-X borular ve hidronik RIS'lar ticari pazarda gelişmemiştir. 1970'li yıllarda ortaya çıkan enerji krizi ve ardından 80'lerde yaşanan ekonomik durgunluk, enerji verimliliğini yeniden gündeme getirmiş ve buna bağlı olarak radyant zemin ısıtması yeniden popülerlik kazanmıştır.



Şekil 2.3. Radyant yerden ısıtma

Hidronik radyant ısıtma sistemi, karmaşık dinamikleri olan bir sistemdir. Tüm ısı transfer mekanizmalarının birlikte yer aldığı ve ısı depolama etkilerinin önemli olduğu bu sistemde paneller, duvarlar, tavanlar, döşemeler veya bina beton iskeleti gibi yapıların içine yerleştirilebilen borulardan sıcak su sirkülasyonu sağlanır. Radyant olması sebebiyle ışınlımla ısı transferi özelliği yüksek olmakla birlikte önemli miktarda

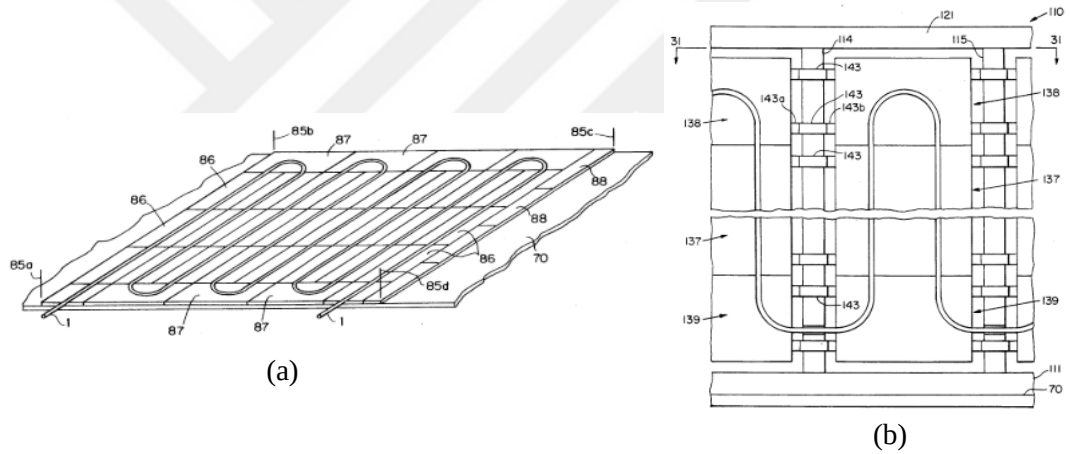
bir taşınım ile ısı transferine sahiptir, bu nedenle her iki ısı transfer mekanizması da dikkate alınmalıdır. Radyant ısıtma sistemleri, operasyonel sıcaklığa daha düşük bir hava sıcaklığı ile ulaşılabilmesi için odanın ortalama radyant sıcaklığının artırılmasını sağlar. Hava sıcaklığının daha düşük olması, algılanan iç hava kalitesini artırır ve böylece iç mekân iklimi iyileştirilmesine imkân sağlar. Toplam radyant yüzey alanının büyüklüğü ortamda ihtiyaç duyulan toplam ısı miktarının daha düşük yüzey sıcaklığına sahip yüzeyler ile elde edilmesini sağladığından, yüzeylere temas eden kullanıcılar bakımından da konforun artırılmasını sağlamaktadır.

Yüzey sıcaklığının yüksek olması hava hareketini tetiklemesi nedeniyle ısı transferinin taşınım kısmının daha büyük olmasına neden olacağından böylesi bir sistemin radyant sistem olarak adlandırılması söz konusu olmayacaktır. Isıl konforun sağlanması bakımından daha avantajlı olan RIS'lar konutlarda çok daha fazla tercih edilmelidir. Nitekim günümüzde, hidronik radyant yerden ısıtma, konut binalarını ısıtmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıcak su taşıyan bir dizi gömülü boru içeren bu sistem, diğer ısıtma sistemlerinin getirdiği sınırlamalara karşı uygun bir çözüm olabileceği gibi, enerji tüketimini ve dolayısıyla enerji faturalarını düşürmek için de iyi bir seçim olabilir. Hidronik yerden ısıtma sisteminde döşeme ve çevresi öncelikle yalıtılır; daha sonra her boşluk için 5 katmanlı borular, yalıtımın üstüne özel bir düzende döşenir. Sonuçta borular beton, seramik, taş vb. zemin kaplama malzemeleri ile kaplanmaktadır. Her bir boru serpantin uçları, biri kaynaktan besleme suyunu dağıtmak ve diğeri dönüş suyunu toplamak için olmak üzere iki kollektöre bağlanır. Sıcak su kaynağından zemine gömülü borulara kontrollü bir ılık su akışı pompalanır. Sert zeminlerde, giriş suyu sıcaklığı genellikle 45°C ila 50°C'dir. Tavan döşemelerde bu sıcaklık 55°C ila 60°C'dir. Sıcak su radyatörlerinin kullanıldığı geleneksel ısıtma sistemlerinde giriş suyu sıcaklığının 70°C ila 80°C olduğu düşünülürse düşük enerji gereksinimi önemli bir avantajdır. Döşemeden ısıtmada, ısı konfor durumuna göre, bitmiş yüzey sıcaklığı 29°C ile 33°C arasında olmalıdır. Yerden ısıtma sistemleri genellikle konut binaları için kullanılsa da, stadyum alanları veya mağazaların ısıtılması gibi diğer uygulamalarda da kullanılabilirler (Khorasanizadeh vd., 2014).

Işınım odanın havasını doğrudan etkilemez ancak odanın iç yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını azaltır. Ortamdaki ana ısı değişim mekanizması ışıınım olmakla birlikte, taşınımlı ısı transferi oda içerisinde doğal hava hareketine neden

olduğu için önemlidir. Optimize edilmiş bir serbest konveksiyon durumu, odanın çeşitli kısımlarını ısıtır ve enerji tüketiminde gözle görülür bir azalmaya neden olur. Enerji analizi ile yerden ısıtma sistemlerini geleneksel radyatör sistemleriyle karşılaştırılmış ve yerden ısıtma sistemlerinin daha ekonomik olduğu doğrulanmıştır (Sarbu & Sebarchievici, 2016).

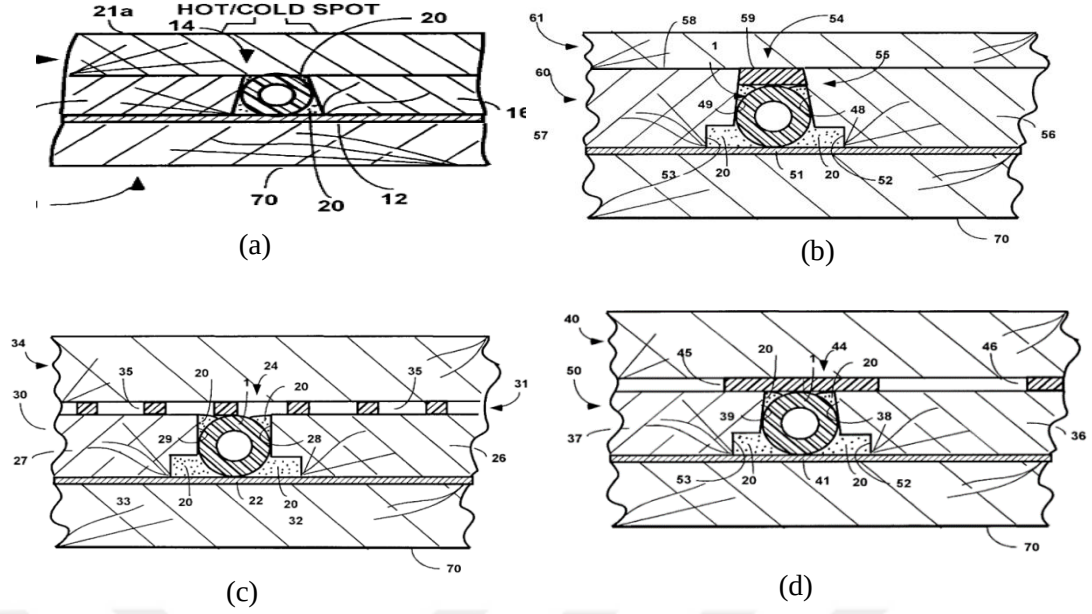
(US5292065, 1996) numaralı patentte radyant zemin (RFH) ve duvar (RWH) ısıtma sistemlerinin kolay kurulumu ve sökümü sağlayan lamine (çimento, alçı ya da derz dolgusu gerekmeden) bir kurulum yöntemi icat edilmiştir. Sistemde, lamineler ısı iletim plakaları olarak kullanılmıştır. Lamineler yanyana bitişik olarak alttaki ahşap taşıyıcı kirişlere vidalarla sabitlenerek dizilmiştir (Şekil 2.4). Isı transfer plakalarının içinden sıcak su geçen borular dolanmaktadır ve borulardaki ısı plakalara iletilerek plakalardan iklimlendirilecek olan mahale ısı ışıma yoluyla yayılmaktadır. Bu kurulum kolaylığı kurulum maliyetlerinin düşmesine çok önemli katkıda bulunmuştur.



Şekil 2.4. Radyant modüler panel kurulum yöntemi ile ilgili patent görselleri (a) izometrik montaj görünümü (b) ön yüz parçalı görünümü

US005931381A (1999) numaralı patentte radyant panel ısıtma sisteminde metal lamineler kullanılarak (

Şekil 2.5) sıcak ya da soğuk noktaları elimine etmek ya da tamamen yok etmek suretiyle soğutma esnasındaki yoğuşmaya engel olmak ve performansı arttırmak amaçlanmıştır.



Şekil 2.5. Modüler radyant panel konfigürasyonları kesit görünüşü

CA2236560A1 (1999) numaralı patentte modüler radyant panel duvar ve zemin ısıtma sistemlerinde ısıl iletken metal plakanın kolayca altındaki ahşap taşıyıcıya monte edilmesi için gerekli tasarım ve birleştirme yöntemi açıklanır.

Radyant zemin/duvar ısıtma soğutma sistemleri ile ilgili kurulum kolaylığı ve maliyeti azaltma üzerine yoğunlaşan pantent tescilli tasarım çalışmaları son yıllara kadar devam etmektedir. 2000’li yıllardan itibaren akademik çalışmaların arttığı gözlemlenmektedir. Akademik çalışmalar farklı yapı ve binalarda kullanılan bu sistemin enerji kullanımındaki verimliliğin yüksek olmasına dikkat çekmek ve bu enerji verimliliğini daha ileriye taşımak üzere ölçüm ve simülasyon yöntemleri geliştirmek için yürütülen çalışmalarla birlikte optimizasyon çalışmaları devam etmektedir.

Hidronik radyant sistemlerinde, yapı içerisinde bulunan borulardan su dolaştırılarak zemin veya tavana entegre olarak ısı ya da soğutma elde edilir. Radyant sistemler büyük ölçüde termal olarak kontrol edilen yapı elemanları ile havası iklimlendirilen mahal arasındaki ışınlı ısı transferine ve bunların üstün performanslarına bağlıdır. Oda havası sıcaklığı, geniş zemin yüzeyi ile radyant ısı alışverişi nedeniyle ısıtma ve soğutma mevsimleri için daha düşük ve daha yüksek ayar noktalarında tutulabilir, böylece eşdeğer konfor korunurken enerji kullanımının % 27-59 oranında azaldığı bildirilir (Fabrizio vd., 2012; Kilis vd., 2010; Park vd., 2014; Sastry & Rumsey, 2014). Geniş döşeme yüzeyi odaya eşit ısı transferi sağlar, böylece

mekanda bulunanların termal konforu artar (Khorasanizadeh vd., 2014). Hidronik sistemler orta derecede soğutulmuş veya sıcak su sıcaklığı ile çalışır, bu nedenle tesisin verimliliği (örn. Soğutucu veya ısı pompası) daha yüksektir ve enerji kaynaklarının kullanımını azaltır (Fabrizio vd., 2012).

Radyant iklimlendirme sistemin enerji verimliliğini arttırarak yaşam döngü maliyetini azaltmak üzere kontrol ve optimizasyon yöntemleri geliştirilmesi için yapılan çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Joe & Karava (2019) çalışmalarında ofis binalarındaki hidronik radyant zemin sistemlerinin performansını optimize etmek için gerçek bir binada model öngörülü kontrole (Model Predictive Control, MPC) dayalı akıllı bir işletme stratejisi uygulamışlardır (Prívara vd., 2011). MPC yaklaşımı ile, ekipman ve termal konfor kısıtlamalarını karşılarken enerji tüketimini ve maliyeti en aza indirmek için bölge yükleri ve sıcaklıkları, dış hava koşulları ve iklimlendirme sistem modellerinin dinamik tahminlerini kullanmışlardır. Gerçek bir binadan alınan verilerden faydalanılarak tahmin edilen ve doğrulanan veriye dayalı bina modellerini kapsayan ve öngörülen dışsal düzensizlikleri küresel olarak minimize eden rijit konfor sınırlarıyla kısıtlı doğrusal / karesel programlamaya dayanan bir optimize edici kullanmışlardır.

Geleneksel olarak, iklimlendirme sistemleri tasarımcıları, enerji verimliliği standartları ve bina yönetmelikleri ile birkaç yıllık deneyimle kazanılan temel kurallara göre belirlenen bir dizi özelliğe güvenmektedir. Ayrıntılı bina enerji simülasyon araçlarının ortaya çıkmasıyla (Crawley vd., 2000; Ulleberg & Morner, 1997), tasarımcılar çeşitli tasarım ve işletim özelliklerinin etkisini değerlendirmek ve sonuçta en iyi bina enerji sistemlerini seçmek için bir dizi parametrik analiz yapabilmektedirler. Bununla birlikte, bu parametrik analizler genellikle sadece bir veya sınırlı sayıda parametrenin etkisini değerlendirmeye dayanmaktadır. Bu yaklaşım potansiyel olarak önemli etkileri göz ardı etmeye neden olabilir ve bu nedenle bina ısıtma soğutma sistemi tasarım özelliklerinin mümkün olan en iyi seçimine yol açmayabilir.

Birçok tasarım parametresi, binaların ısıtma ve soğutma termal yükleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu parametreler bina kabuğu, bina şekli ve yönü, duvar ve çatı konstrüksiyonları, pencere tipleri ve boyutları gibi özelliklerini ve bunların yanı sıra ısıtma, havalandırma ve klima (HVAC) sistemlerinin özelliklerini ve çalışma ayarlarını içerir. Bu parametrelerin toplam bina enerji kullanımına

interaktif bağımlılığı, istenen iç mekân termal konfor koşullarını korurken enerji kullanımını ve maliyeti en aza indirebilecek tasarım özelliklerinin en iyi kombinasyonunu belirlemek konusunda sistem tasarımcılarını daha zorlamaktadır.

Bichiou & Krarti (2011) her iki bina kabuğu özelliğini ısıtma ve iklimlendirme sistemi tasarım ve işletim ayarlarını en iyi şekilde seçmek için kapsamlı bir enerji simülasyon ortamı geliştirmişlerdir. Simülasyon ortamını kullanarak, yaşam döngüsü maliyetlerini en aza indiren bina tasarım özelliklerini belirleyebilmişlerdir. Simülasyon ortamında Genetik Algoritma (Goldberg & Holland, 1988), Parçacık Sürü (Particle Swarm) Algoritması (Kennedy & Eberhart, 1995) ve Sıralı Arama (Sequential Search) algoritması (Christensen vd., 2005) dahil olmak üzere üç optimizasyon algoritması göz önünde bulundurulmuştur. Üç algoritmanın sağlamlığı ve etkinliği, çeşitli tasarım uygulamaları ve iklim koşulları için simülasyon ortamının performansını değerlendirmek için karşılaştırılmışlardır. ABD’de beş bölgede bütçe kısıtlamaları olan ve olmayan yaşam döngüsü maliyetlerini azaltmak ve en uygun müstakil konut tasarımını yapmak için bu simülasyon ortamı uygulanmıştır. Optimum seçimin, iklime ve ev tipine bağlı olarak yaşam döngüsü maliyetlerini %10-25 oranında azaltılabileceği bulunmuştur.

Tipik radyant zemin sistemleri, yük değişimi için önemli bir potansiyel sunan beton plakalara gömülüdür, buna termal kütle nedeniyle yaz aylarında ön soğutma örnek olarak verilebilir (Joe vd., 2016). Bu yaklaşım, geceleri yüksek soğutucu verimliliği ve düşük elektrik fiyatı nedeniyle maliyet avantajları sağlar. Bu faydalar, tahmine dayalı optimal kontrol ile maksimize edilebilir. Önceki araştırmalar ayrıca, hava veya oda sıcaklığındaki değişikliklere yanıt vermek için geleneksel kontrol stratejileriyle başa çıkması zor olan büyük termal ataleti nedeniyle radyant sistemlerin kontrolü ile ilgili zorlukları da rapor etmektedir (Joe & Karava, 2019). Yoğuşma ve rahatsızlık kısıtlamalarının üstesinden gelmek için besleme suyu sıcaklıkları tarafından belirlenen düşük ısıtma ve soğutma gücü ek sınırlamaları duraklatır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, çoğu çalışma ısıtma mevsimi boyunca sıcaklık düzenlemesine odaklanmıştır. Vanayı kontrol etmek ve oda hava sıcaklığını (Ahn & Song, 2010; Cho & Zaheer-Uddin, 1999; Rhee vd., 2011) ve Öngörülen Ortalama Değeri (PMV) (Batista vd., 2013) standart eşiklerde tutmak için geleneksel geri besleme stratejileri uygulanmıştır. Ayrıca, dış hava sıcaklığı, sezgisel kurallara göre beton döşemeye sağlanan besleme suyu sıcaklığını (Arteconi vd., 2014; Lehmann vd.,

2011) ve ısı akışını (Oldewurtel vd., 2012) kontrol etmek için kullanılmıştır. Bununla birlikte, koşullandırılmış odalar güneş radyasyonu nedeniyle gündüzleri sıklıkla aşırı ısınmıştır. Bu, kullanıldığı saatlerde ofis ortamlarında önemli miktarda dahili ısı kazancının üretilmesi nedeniyle daha da büyük bir sorun oluşturabilir.

Bina kontrol sistemleri genellikle hiyerarşik bir şekilde organize edilir. Bir denetim katmanı, cihaz kontrolörleri için önceden programlanmış programları ve ayar noktalarını yönetir ve bir yerel döngü kontrol katmanı, aktüatörleri oransal integral (PI) kontrolörleri ile manipüle eder. Radyant zemin sistemlerinin soğutma mevsiminde ön soğutma potansiyelini en üst düzeye çıkarmak ve ısıtma mevsiminde aşırı ısınmayı azaltmak için, ileri izleme ve kontrol stratejileri gereklidir. Bu şekilde, zamana göre değişen hizmet fiyatları, iç ısı kazançları (insanlar / aydınlatma) ve hava modelleri (güneş / ortam sıcaklığı) gibi çeşitli faktörler göz önüne alındığında, verilen enerjinin optimum profilinden faydalanılabilir. Model Öngörülü Kontrol (MPC), bina dinamiklerini, HVAC ekipmanlarını vb. veri güdümlü bina modellerinin izlenen veriler kullanılarak oluşturulabileceği ve bu modellerin enerji verimliliği yüksek veya uygun maliyetli kontrol stratejilerini belirlemek için kullanılabileceği düşüncesine dayanmaktadır. Her kontrol zaman adımında, hava ve iç yük ölçümleri ve tahminleri kullanılarak, bir açık döngü optimal kontrol problemi sonlu bir ufukta çözülür ve optimal giriş yörüngesindeki ilk değer sisteme uygulanır (Joe & Karava, 2019; Rawlings vd., 2018). Bir sonraki kontrol zaman adımında, hava / iç kazanç tahmini hakkında güncellenmiş bilgilerle yeni bir optimal kontrol problemi formüle edilerek çözülmektedir. Şebekeye bağlı konut binaları (Kuboth vd., 2019; Mirakhorli & Dong, 2018) veya binaya entegre termal depolama sistemleri de (Cox vd., 2019; Gholamibozanjani vd., 2018) dahil olmak üzere birçok çalışmada önemli enerji ve maliyet tasarrufu potansiyeli gösterilmiştir. Bu optimizasyon ve tahmin özellikleri, radyant zemin sistemlerinin kontrolü için umut verici bir çözüm sunar. Girdi çıktı ilişkilerine dayanan makine öğrenimi yaklaşımlarıyla karşılaştırıldığında, MPC bina sistemi hakkında önceden bilgi sahibi olmaktan ve enerji tasarrufu ve hesaplama süresi açısından daha iyi performans sergilemek için kullanılır (S. Liu & Henze, 2006; S. Wang & Ma, 2008).

Önceki araştırmalarda, bulanık mantık (Kang vd., 2015) veya yapay sinir ağları (Dong vd., 2008) kullanılarak konutlarda optimum radyant yerden ısıtma uygulamaları için simülasyonlar (Lehmann vd., 2013; Sourbron vd., 2013) ve deneysel (Viot vd.,

2018) uygulamalar gerçekleştirilmiş, ayrıca, ofis ortamlarında (Vána vd., 2014) radyant yerden ısıtma sistemi, optimize etmek için entegre güneş sistemli tasarımlar da dahil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı (Li vd., 2015; X. Liu vd., 2018) ve regresyon temelli uyarlamalı öngörücü kontrol yöntemleri araştırılmıştır (Schmelas vd., 2015). Önlenmesi zor olan aşırı ısınma, çoğu MPC çalışmasında (Gholamibozanjani vd., 2018; Joe & Karava, 2019; Kuboth vd., 2019), özellikle büyük cam alanı olan binalar için son yıllarda raporlanmaya devam edilmektedir (Dermardiros vd., 2017).

Soğutma uygulamalarında, hava dağıtım HVAC sistemleri için öngörücü ön soğutma etkisi araştırılmıştır. Enerji ve maliyet tasarrufu potansiyeli, bina enerji simülasyon araçlarına uygulanan kural tabanlı kontroller (Turner vd., 2015), kontrol odaklı bina modelleri (Braun, 2003; Braun vd., 2001) ve saha testleri (Braun, 2003) ve ayrıca optimizasyon tabanlı kontroller (Cai vd., 2016; Huang vd., 2015; K. ho Lee & Braun, 2008) ve termal depolamalı tesis sistemleri (Henze vd., 2004) ile açıkça gösterilmiştir.

Yaygın bir yanlış, radyant ısıtmanın yüksek sıcaklık kaynağı gerektirdiğidir veya radyant koşullandırmanın büyük sıcaklık farkı (veya gradyan) gerektirdiğidir. Gerçek tam tersidir: Radyant ısıtma ve soğutma sistemi besleme suyu sıcaklığı tipik olarak ısıtma için 180°F'den daha düşük ve soğutma için 45°F'den yüksek [ayar noktaları] [180°F ve 45°F], geleneksel bir basınçlı hava sistemi için tipik besleme suyu sıcaklıklarıdır. Merkezi tesis ısıtma ve soğutma ekipmanı, bu sıcaklık ayar noktalarında daha verimli çalışabilir. Bunun nedeni, radyant olarak koşullandırılmış bir alanın geniş bir yüzey alanı ile çevrelenmesidir ve sonuçta ortaya çıkan ısı alışverişi hem geniş alana hem de sıcaklık farkına bağlıdır, bu gerekli ısı alışverişi için geniş yüzey alanı nedeniyle küçük olabilir. En çekici radyant soğutma türü, termal olarak etkinleştirilen bina sistemleridir (TABS) (P. Ma vd., 2013)

Yüzey sıcaklığı yüzeyden ortama gerçekleşecek olan ısı transferi miktarını belirleyen en önemli parametredir. RIS sistemlerinde yüzey sıcaklığı kontrolü önemli bir yer tutmaktadır. Borularda dolaştırılan suyun ısısı boru ve duvar malzemeleri aracılığıyla ortama yayılır. Isı, borular içinde zorlanmış iç taşınım, borulardan yüzeye iletimle taşınırken ortama aktarımı ise dış taşınım ve ışıma yoluyla gerçekleşmektedir.

Dolayısı ile RIS'daki boruların tasarımı ve yerleşimi, sistemin ısı performans üzerinde çeşitli etkileri olan farklı parametreleri içerir. Boru boyunun ısı performans üzerinde önemli bir etkisi olmamakla birlikte yük kayıpları göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Bununla birlikte boruların zeminden ne kadar derine döşendiği ısı performansını etkilemektedir çünkü mesafe ne kadar fazla olursa ısı direnç o kadar fazla artar ve su ile ısıtma bölgesi arasında daha fazla ısı kütle bulunur, böylece ısı transfer hızı azalır ve ısı konforu elde edilme süresi uzar. Ayrıca borular arasında bulunan mesafenin küçük olması birim alan başına düşen su miktarını artıracığı için ortalama yüzey sıcaklığını artıracak yönde bir etki yapacak ve yüzey sıcaklık gradyanını azaltacaktır. Yani, borular arasındaki mesafenin azalması ısı transfer hızını artıracaktır. Bu nedenle borular arasındaki mesafenin tüm bu ısı faktörleri ve boruların esnekliği ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak optimum şekilde seçilmelidir. İstenen yüzey sıcaklığına ulaşma noktasında boruların mekanik özelliklerinin bir kısıt oluşturması durumunda boru çapları düşürülerek daha sık şekilde döşenebilir ancak bu durumda da basınç düşümleri yani yük kayıpları dikkate alınmalıdır. Öte yandan, girdi parametreleri olan sıcak su debisi ve sıcaklığının da toplam ısı transfer hızı üzerinde etkili olduğu dikkate alındığında, ihtiyaç duyulan ısı transfer hızını elde etmek için burada anılan parametreler üzerinde gerekli kısıt parametreleri ve sınır şartları dikkate alınarak optimum değerler ile hedeflenen ısı transferi hızı elde edilmelidir.

Radyant Yerden Isıtma

Isı konforu için en uygun dikey sıcaklık gradyanı zeminde sıcaklığın en yüksek tavan kısmında ise en düşük olduğu durum olduğundan, zeminin sıcak olması ısı konforu için en tercih edilen durumdur. Zeminin ısıtılması bina kabuğuna yerleştirilmiş termo-aktif yapı bileşenleri veya ahşap ya da ince bir beton örtüsü gibi düşük ısı kapasitesine sahip olan ve dolayısıyla hızlı yanıt veren bir sistem ile mümkündür. Sıcak zemin, doğal taşınımın zeminden yukarı doğru tetikleyerek tabakalaşma sorunlarını azaltır. Zeminin soğuk olması yüzeyle temas eden havayı soğuttuğu için zemin kısmında hava hareketlerini minimize eder ve tabakalaşmaya neden olur, benzer şekilde sıcak bir tavan da aynı etkiyi göstererek tabakalaşmaya neden olmaktadır.

Radyant yerden ısıtma için çok sayıda tasarım, kurulum ve yerleşim olanağı mevcuttur ancak bu tez çalışmasında hava kaynaklı ısı pompası destekli hidronik

Radyant panel ısıtma sistemi tasarlanıp kurulmuş ve bu kurulum üzerinden hesaplama ve analizler gerçekleştirilmiştir.

2.4.2. Radyant Panel İklimlendirme Sistemi Avantajları ve Dezavantajları

Radyant sistemlerin başlıca avantajları arasında iyileştirilmiş iç ortam iklimi ve ısı konforu yanı sıra, enerji verimliliği ve daha küçük sıcaklık farklarında çalışması nedeniyle düşük ekserji yıkımı olduğunu belirtmek gerekir. Ayrıca, entegre edildiği güneş enerjisi, sistemleri veya ısı pompaları gibi çevre dostu enerji kaynaklarının verimliliğini artırdığı bilinmektedir. Isı pompalarının COP değerleri daha küçük sıcaklık farkları ile çalıştıklarında daha yüksektir. Daha küçük sıcaklık farkları, aynı zamanda dağıtım ve ısı üretimindeki ısı kayıplarının azalmasını da sağlamaktadır. Borular bina yapısına gömülü olduğundan ve büyük havalandırma kanalları ve estetik olmayan ısı yayıcılar içermediğinden mimari özgürlük ve kullanım alanı açısından da avantaj sağlayan RIS'lerin avantajlarından en iyi şekilde yararlanmak için, özellikle yavaş tepki veren termo-aktif yapı bileşenlerinin gelişmiş bir kontrol sistemi içinde uygulanması önemlidir.

Özellikle maksimum ısı yükü olduğu durumlarda destek unsuru olarak radyant sistemle birlikte kullanılan ısı pompası gibi sistemlerin de kontrol stratejilerinin RIS ile birlikte hesaba katılması gerekmektedir. Bu tür sistemlerin tasarlanması ve uygulanmasındaki karmaşıklık, daha yüksek bir yatırım maliyetine yol açmaktadır. Dolayısı ile günümüzde nispeten ucuz olan fosil yakıtlarla ısıtma sistemleri karşısında RIS'lerin teşvikler ile desteklenmesi ve bu tez çalışmasında olduğu gibi bu sistemlerin Yaşam Döngüsü Maliyet analizlerinin titizlikle yapılarak tüm ekonomik parametrelerinin ortaya konulması oldukça önemlidir.

Kısa süreli kendi kendini düzenleme özelliğine sahip olan hidronik radyant sistemler, içinden suyun aktığı yapı elemanına bu yapı elemanının sıcaklığı ile RIS yüzeyi arasındaki sıcaklık farkıyla orantılı bir ısı geçişi sağlar. Isı yükü arttığında odanın operasyonel sıcaklığı düştüğünde, bu fark büyüdüğü için güç çıkışı artar ve uzun vadede sistemdeki ortalama su sıcaklığı düşerek ısı konforu elde edilmesi için gerekli ısıtma yükünü artırır. Bu nedenle bu sistemlerin bina kabuğunun özelliklerine bağlı olarak en baştan tasarlanması gerekmektedir. Esasen bir termal sistem olmasına rağmen, mimarlık ve inşaat mühendisliği alanında da ilgi toplaması ve üzerinde çalışılma gerekliliği söz konusu bu ilişki nedeniyle kaçınılmazdır. Dolayısı ile hidronik

radyant ısıtma sistemlerinin Yaşam Döngüsü Maliyetlerinin bir kısmı da bina inşaatı sürecini de kapsayacak kadar geniş bir alanı ilgilendirmektedir. Nitekim, hidronik RIS'lar alçı veya beton gibi farklı malzeme katmanlarına gömülü olarak yerleştirilmekte ve boruların nasıl yerleştirileceği, ne kadar derine gömülü olacağı, aralarındaki mesafenin ne kadar olması gerektiği gibi parametreler bina kabuğunun inşaatı sırasında gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bu kapsamda, tez çalışmasına konu edinilen hidronik radyant panel ısıtma sistemlerinin avantaj ve dezavantajları, uygulamada karşılaşılabilecek sorunlar ve genel uygulamalar hakkında detaylı bilgi sahibi olmak, her adımda karşılaşılabilecek olan maliyetlerin minimize edilmesi bakımından önem teşkil etmektedir.

Radyant panel iklimlendirme sisteminin konvansiyonel sistemlere başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Uygulamaya bağlı olarak %20-50 arası ısı kaybında düşüş olduğu görülür,
- Yüksek sıcaklık üreten boilerlerden düşük sıcaklık kaynağı olan ısı pompaları ve güneş panellerine kadar geniş perspektifteki tüm su ısıtıcıları için uygun bir sistemdir,
- Isıtılması zor olan yüksek, geniş iç hacimli ve camlı mekanlar için idealdir,
- Bina içinde hava hareketine neden olmadığından dolayı toz ve kir birikimine ve hava kontaminasyonuna neden olmaz ve böylece alerjik sorunları ortadan kaldırmış olur,
- Radyant sistemi görünür olmadığından ısıtılan alanı daraltmaz ve alandaki hareketliliğe engel teşkil etmez. Isıtma ekipmanlarının etrafında çalışma gibi bir durum oluşmaz.
- Termal konforun en iyi düzeyde sağlandığı iklimlendirme sistemi olup, insan fizyolojisi için en uygun ortamı sağlar. İnsan fizyolojisi için en uygun sistemdir. Prensip olarak havanın iklimlendirilmesi yerine taşınım ile birlikte yüksek oranda ışıyım ile direkt olarak kişilerin ısıtılması & soğutulması ile konfor sağlanır.
- Mahalin her noktasında eşit termal konfor ve homojen sıcaklık dağılımı sağlanır.
- Çok soğuk veya sıcak yüzey oluşmaz, sene boyunca sistem yüzey sıcaklığı 16-35°C arasında değişir.

- Havayı kurutmaz.
- Mahal içerisinde insanı rahatsız edici yüksek hızda hava akımı olmaz.
- Hem ısıtma hem de soğutma yapılabildiği için aynı mahalde ısıtma ve soğutma sistemleri ayrı ayrı kurmaya gerek kalmadan aynı sistem akışkan sıcaklığı değiştirerek tüm yıl boyunca kullanılabilir.
- Klasik sistemlere göre mahal içerisinde daha fazla yaşam alanı sağlandığı gibi daha estetik bir görünüm de elde edilmiş olur.
- Klasik sistemlere göre pik yükü azaltıldığı için ısıtma ve soğutma durumunda %60'a kadar enerji tasarrufu sağlar.
- Oda sıcaklığına en yakın sıcaklıktaki akışkan sıcaklığı gereksinimi ile bu sistemlerde kullanılan ısıtıcı ya da soğutucu ısı üreteçlerinin verimleri ciddi ölçüde artar, enerji tüketimi ve işletme maliyetleri düşer. Ayrıca konumuzu yakından ilgilendirdiği üzere ısı pompası cihazlarının performanslarını maksimuma çıkarır.
- Soğutmada, gidiş dönüş su sıcaklık farkı düşük olduğundan soğutma grubu ve ısı pompası cihazlarının verimliliği artar.
- Kışın ve yazın ısınımsal sıcaklık etkisiyle 2-3 derece daha düşük/yüksek sıcaklıklarda termal konfor sağlandığından binanın ısı kaybı/kazancı %15'e kadar azalır.
- 30°C sıcaklıklı akışkan ile ısıtıp, 20°C sıcaklıklı akışkanla serinletilebildiği için, kalitesiz enerji diye adlandırılan düşük ekserjili enerji kaynaklarının kullanılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı için en ideal sistemdir. Bu sayede ülkemizin enerjide dışa bağımlılığını azaltacak belki de en önemli iklimlendirme sistemidir.
- Doğal çevrenin sürdürülebilirliğine katkı sağlar. Sistemin içerdiği kendi yalıtımıyla binanın ekstradan içten de yalıtılması da söz konusudur.
- Herhangi bir ses, gürültü oluşturmaz, mahalli pasif olarak iklimlendirir.
- LEED, Breeam gibi sertifikaların alınmasını kolaylaştırır.
- Klasik veya yenilenebilir bütün enerji üreteçleriyle uyumludur.

Hidronik (sıcak su dolaşımı) radyant sistemlerin yoğuşma sorunu uzun vadede bakım ve ekipman maliyetleri meydana getirmektedir. Bu maliyetleri en aza indirmek için önemli gelişmeler literatürde mevcuttur. Örneğin PE-X polietilen çok güçlü esnek malzemeden üretilmiş boruların sıcak su dolaşımında kullanımı pek çok

sorunu ortadan kaldırmış, kurulum – bakım kolaylığına ve maliyetine önemli katkıda bulunmuştur. PE-X plastik boruları oksijen bariyerli olarak üretilmelidirler. Sistemin oksijen difüzyonuna müsaade edilmemelidir. Bunun nedeni oksijenin kapalı sıcak su döngüsündeki günde 1lt suyun içindeki 5mg (mg/lt/gün) oksijen varlığının ölü su (oksijensiz su) olgusunu ortadan kaldırdığını ve sistemde taze su varmış gibi ciddi korozyon sorunu oluşturduğu Alman standart enstitüsü (DIN) tarafından yapılan testlerle ortaya konmuştur. Isıtma sistemi ekipmanlarındaki korozyonun önlenmesi için DIN tarafından belirlenen güvenli oksijen difüzyonu limiti PE-X plastik boru sistemindeki 40°C sıcaklıktaki suda 0.1mg/lt/gün olarak belirlenmiştir.

Hidronik ısıtma döngüsünün beslediği su sıcaklığı düşük kalması boruların ömrünün uzun olması için daha uygun görülebilir ancak boylerin düşük sıcaklığa ayarlanması fosil yakıtın yoğunlaşması sorunuyla sonuçlanmaktadır. Fosil yakıtın yoğunlaşma sıcaklığı 60°C'ye kadar yükselebilmektedir. Bu yoğunlaşmanın olmaması için bu eşik sıcaklığın altına inilmesi istenmez. Genellikle fosil yakıtlarının yakılmasıyla sisteme sıcak su besleyen radyant duvar ısıtma sistemlerinde 60°C üzerinde genellikle 90°C civarında olunması gerekir. Boruların ömrünü uzatmak için boylerden çıkan sıcak su sisteme dağılmadan önce sıcaklığı düşürülebilir. 1990 yılında hidronik ısıtma döngüsüne girmeden önce su sıcaklık kontrolü için termostat ile geri beslemenin sağlandığı kapalı döngü kontrol sistemi icat edilmiştir (US00519988A, 1992).

Bu çalışmada, MİR Holding Isı Sistemleri tarafından geliştirilmiş olan radyant panel sistemi ısı pompası entegreli bir hibrit radyant panel iklimlendirme sistemine dönüştürülmüştür. Ayrıca sadece satın alma ve kurulum maliyeti yönüyle değil işletme esnasındaki termal ve ekonomik parametrelerin yılın en sıcak ve en soğuk dönemlerinde yapılan uzun süreli deneysel ölçümlerle bir yaşam döngüsü maliyeti (LCC) analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.4.3. Radyant Isıtma-Soğutma Sistemlerinde Güncel Teknoloji

Bina enerji performansında kontrolün önemi genellikle hafife alınmaktadır. Açma/kapama, PI veya PID regülatörleri sabit bir ayar noktasını takip etmeye uygundur, ancak kesintili senaryoların kullanılması enerji tüketimini azaltmak için daha uygundur. Geleneksel düzenleyiciler, binalar gibi bazı ataletlere sahip sistemlerin geçici durum kontrolü için her zaman uygun olmayabilir. Kapalı döngü kontrol prensibi, kontrollü değerin geri bildirimine dayanır. Yüksek ataletli bir sistemin

(zaman gecikmesi) kontrolü istendiğinde, hızlı bir sistem yanıtına dayalı geleneksel kontrol teknikleri artık yeterli değildir.

Radyant zeminden panel ısıtma sistemi verimli bir sistemdir ancak kontrolü hassastır. Bir radyant ısıtma sisteminin ısıtma gücü, genellikle su besleme sıcaklığı ile dış sıcaklık arasındaki uygunluğu veren bir "ısıtma eğrisi" kullanılarak dış ortam koşullarına bağlı olarak modüle edilir (Şekil 1). Prensip, iç/dış sıcaklık farkına bağlı olarak ısı kayıplarını telafi etmektir. Böylece zeminin su besleme sıcaklığı sürekli değişmektedir. Kayıplar, sıcaklık farkı ile neredeyse doğrusal olarak gelişir ve ısıtma eğrisi düz bir çizgidir. Eğim, mahalin özelliklerine, istenen konfor sıcaklığına ve zeminin boyutuna bağlıdır. Bu nedenle bu düzenleme, dış sıcaklığın sürekli olarak ölçülmesine dayanmaktadır. Tipik bir radyant ısıtma sistemi kurulumu aşağıdaki unsurları içerir:

- Dışarda kuzeyde konumlu direk güneş ışınlarına maruz kalmayan bir uzaktan kontrollü sıcaklık sensörü
- Kazandan gelen su ile su dönüş sıcaklığını karıştırarak su besleme sıcaklığını ayarlayan üç yollu vana,
- Borularda su sirkülasyonu için bir pompa
- "Kablosuz sensör" olarak da bilinen ve bina sakinleri veya güneş enerjisi kazançları nedeniyle aşırı ısınmayı önlemek için sıklıkla gerekli olan bir iç mekân sıcaklık sensörü.
- Dış sıcaklık ölçümüne göre su kaynağı sıcaklığını ayarlamak için üç yollu vananın konumuna etki eden bir regülatör. Regülatör, uzak sensör sayesinde ayar noktasına ulaşırsa pompayı kapatabilir veya ısıtma eğrisini değiştirebilir.

Yine de kontrol gerçek zamanlı ölçümlere dayalıdır ve gelecekteki rahatsızlıkları tahmin edemez. Böylelikle böyle bir sistemin potansiyeli, bir Model Öngörücü Kontrol (MPC) tekniği kullanılarak yapay zeka eklenerek daha da geliştirilebilir. MPC yöntemi, kontrol edilen bir sistemin davranışının uzaklaşan bir ufukta açıkça tahmin edilebildiği başarılı bir optimizasyona dayalı stratejidir (Rao & Rawlings, 2000). MPC'nin ana unsurları objektif fonksiyon, tahmin ufku, karar zaman adımı, manipüle edilmiş değişkenler, optimizasyon algoritması ve geri besleme sinyalleridir (Thieblemont vd., 2017).

İlk olarak, son teknoloji, ısıtım panel iklimlendirmeli bir binanın öngörülü kontrol yöntemleri üzerinde gerçekleştirilen çeşitli araştırma çalışmalarını tanıtmaktadır. Aşağıdaki bölüm, deney odasındaki tahmine dayalı bir stratejinin potansiyelini göstermeyi amaçlamaktadır. Kullanılan ekipman, ölçülmesi gerekli parametreler belirlenerek kontrol mantığı sunulmaktadır. Son olarak, iki referans stratejisi ile MPC kontrolü arasındaki karşılaştırmanın deney sonuçları, bu tür bir MPC tekniğinin uygunluğuna karar vermek için sunulmuştur.

2.5. Radyant Isıtma ile Ortam Isıtmasının Karşılaştırılması

Çalışmalar, radyant sistemlerin geleneksel tüm hava sistemlerinden daha az enerji kullandığını ve daha iyi termal konfor sağladığını göstermektedir. Ancak RIS'lar gizli yükleri karşılamadığından havalandırma sistemi gereklidir, burada önemli olan havalandırma sisteminin aynı zamanda ısıtma sağlayıp sağlamaması gerektiğidir. Hidronik RIS'larda suyun havaya göre ısı kapasitesinin yüksek olması ve dolayısı ile daha fazla ısı taşıyabilmesi nedeniyle RIS ile birlikte kullanılacak dış hava sistemleri geleneksel bir tam hava sistemi ile aynı boyuta ihtiyaç duymaz. Aynı zamanda suyun pompalama gücü fanların hava üfleme için ihtiyaç duyacağı güce kıyasla daha düşüktür ve enerji tasarrufu sağlar. Böylece hidronik RIS ile ortamdaki hava hareketinin kontrolü daha kolaydır ve yoğuşma ve küf oluşumu riski daha azdır.

Havalandırma sistemlerinin hava kalitesinde kirlilik ve mikrobiyal kontaminasyon gibi nedenlerle meydana getirdiği sorunlar RIS ile söz konusu değildir ve dolayısı ile iç hava kalitesinin korunması daha kolaydır. Aynı operasyonel sıcaklığa ulaşmak için, ortam ısıtması yapan sistemlerde daha yüksek yüzey sıcaklıklarına ihtiyaç duyulması daha yüksek besleme sıcaklığına yol açar ve ısı pompası gibi entegre sistemlerin performansını düşürür. RIS daha düşük sıcaklık farkında çalıştığı için ısı kaynağı seçiminde daha yüksek bir esneklik sunar.

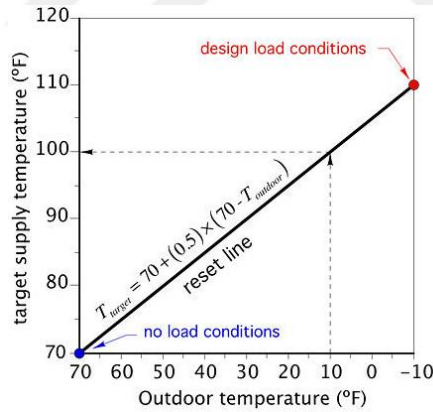
Radyant sistemlerin karmaşık tasarımı ve entegre sistemler ile birlikte kontrol edilmesinin zorluğu, bu sistemlerin uygulamasında ekonomik ve teknolojik engellerle sıkça karşılaşılmasına neden olmasının yanı sıra özellikle termo-aktif yapı elemanlarının ve sistemlerinin kullanımının önünde bilgi eksikliği engelleri de söz konusudur. Bu nedenle, bu sistemlerin yaşam döngüsü boyunda geçerli olacak

kapsamlı tasarım ve işletme kılavuzlarına ihtiyaç duyulmaktadır, bu ve benzeri çalışmaların nicelik ve nitelik bakımından artırılması gerekmektedir.

2.6. Hidronik Radyant Zeminlerin Kontrolü

Bina sakinlerinin termal konforunu sağlamak için çalışma sıcaklığının istenilen seviyede tutulması gerekir. Bunun için de toplam ısı kazançları ile ısı kayıplarının dengede olması gerekir. Ortama olan ısı kazanç veya kayıplarının zamanla birbirinden farklı olması durumunda ortam ısınma veya soğuma meydana gelir. Daha önce de belirtildiği üzere, hidronik ısıtma sistemlerinde suyun debisi ve sıcaklığı iki önemli parametredir ve dolayısı ile ısıtma yüküne bağlı olarak bu parametrelerin sürekli kontrol edilmesi sağlanmalıdır.

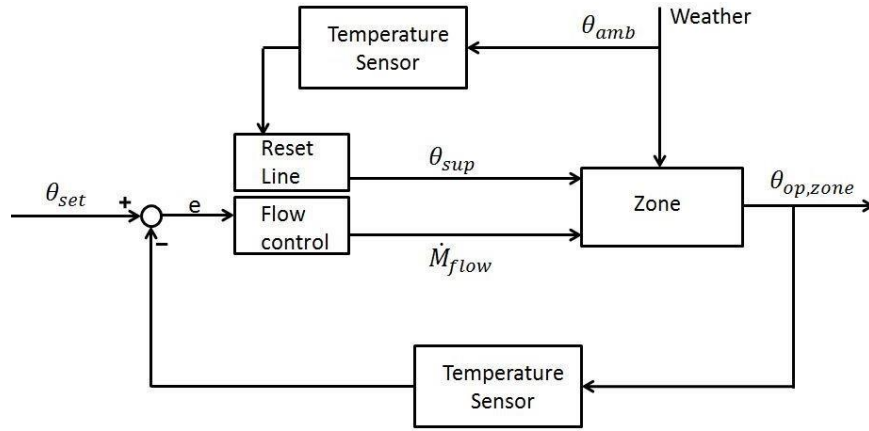
Kapalı bir döngü şeklinde çalışan sistemde, operasyonel sıcaklık ölçümleri kontrol ünitesine sürekli iletilir ve kontrolör, bu ölçüm değerlerini sisteme tanımlanmış olan ayar sıcaklığı ile karşılaştırarak devrenin kesilmesi veya suyun pompalanmaya devam etmesi, ısı girdisi sağlanması gibi kararları alır ve ilgili sistem bileşenlerine iletir.



Şekil 2.6. Radyant zeminlerde besleme sıcaklığı sıfırlama hattı

Öte yandan ısı transfer katsayısı sıcaklık farkının da bir fonksiyonudur ve bu nedenle sıcaklık değiştikçe ısı transfer katsayısı da değişir. Bu nedenle ısı kaybı, ortam sıcaklığı ölçülerek tahmin edilebilir ve kontrol sistemi, operasyonel sıcaklık değişmeden önce ısı yükündeki değişikliklere tepki verir. Bu işlem, dış ortam sıfırlama hattı adı verilen ve besleme sıcaklığının dış ortam sıcaklığına bağlı değişimini veren bir eğri ile tanımlanan bir fonksiyon değerine göre yapılır. Ortam havası ne kadar

soğuk olursa, ısıtma sisteminin besleme sıcaklığı o kadar sıcak olur. Aşağıda Şekil 7’de tipik bir kontrol şeması verilmiştir.



Şekil 2.7. Tipik bir kontrol şeması (Nielsen, 2015)

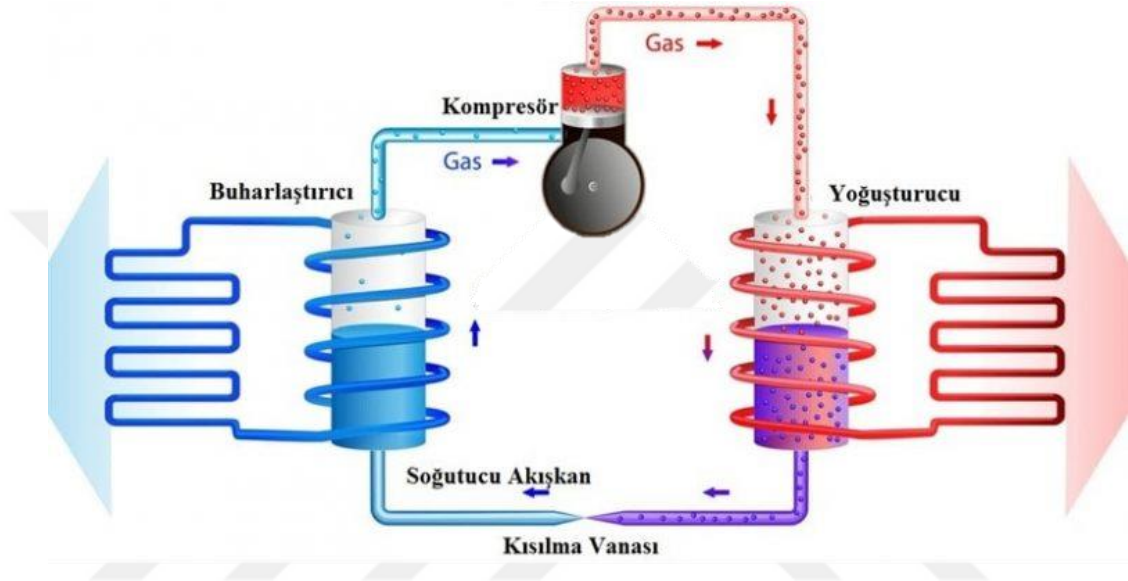
Kontrol sisteminde kullanılacak olan sensörler, valfler, pompalar, anahtarlar, devre kesiciler gibi sistem elemanlarının seçiminde hassasiyet, güç, performans, mekanik dayanım, çalışma prensibi gibi çeşitli alternatifler bulunmakta ve bu sistem elemanlarının seçimine bağlı olarak kontrol ünitesi maliyetleri değişkenlik gösterebilmektedir.

Sistemin tepki süresi, etkinlik süresi, ayar sıcaklığını koruma performansının yanı sıra ısı verimliliği ve performansı da seçilen sistem elemanlarının özelliklerinin bir fonksiyonudur. Sistem elemanlarının maliyetleri yaşam döngüsü analizi içinde sistemin ekonomiklik değerini doğru orantılı etkilemekle birlikte kaliteli ve verimli sistem elemanları sistemin genel verimliliğini artırıcı yönde bir etkide bulunduğundan sistemin geri ödeme, artık değer ve enerji maliyetleri bakımından da avantaj sağlamaktadır. Bu bakımdan gerek kontrol elemanlarının gerekse sistemin diğer bileşenlerinin seçiminde optimum bir denge sağlanmalıdır. Mahal listesi, toplam ısıtma yükleri ve buna bağlı sistem parametreleri hassasiyetle tespit edilmeli ve gereksiz kapasite ve maliyet artışlarından kaçınılmalıdır.

2.7. Isı Kaynağı

Her ısıtma sistemi gibi, RIS’lar da bir ısı kaynağı olmadan çalışmaz. Bu çalışma kapsamında kurulum ve analizleri yapılan hidronik randyant ısıtma sistemine ısı kaynağı olarak dış ortam havasından ısı çekerek onu hidronik sistemin suyuna aktaran hava kaynaklı ısı pompası (ASHP) entegre edilmiştir. Bu tür ısı pompalarına,

kaynak ve yük ortamını belirtmek açısından hava-su ısı pompaları da denir. Yeraltı suyu ısı pompalarının verimleri, daha kararlı bir kaynak sıcaklığı ve daha düşük sıcaklık artışı nedeniyle daha yüksek olmasına rağmen kurulumları için ihtiyaç duyulan kazma, delme gibi hafriyat işleri nedeniyle ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Bu nedenle çalışma kapsamında yapılan yaşam döngüsü maliyet analizi dikkate alındığında hava kaynaklı ısı pompasının daha avantajlı bir tercih olduğu değerlendirilmiştir.

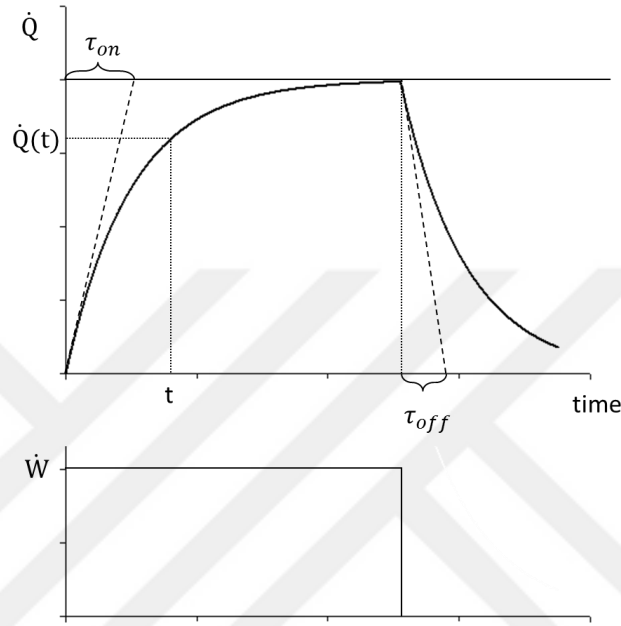


Şekil 2.8. Tipik bir hava-su ısı pompası çevrimi

Isı pompası kendi içinde kapalı bir çevrimdir. Dış ortam havası bir fan yoluyla, kaynak tarafında yer alan evaporatör üzerine zorlanmış dış taşınım ile yönlendirilir ve düşük sıcaklıkta ve sıvı halde bulunan soğutucu akışkanın buharlaşması sağlanır, böylece kaynaktan ısı çekilir. Soğutucu akışkanın faz değişimi sabit sıcaklıkta gerçekleştiği için, evaporatörde gerçekleşen ısı transferi de sabit sıcaklıkta gerçekleşir. Kompresör girişinde yoğunlaşma ve damlacık oluşumunu engellemek için yapılan bir ön ısıtmanın ardından kompresör gazın sıcaklığını ve basıncını yükseltir ve akışkanın depolanan gizli enerjinin hidronik radyant sistemin ısıtma suyuyla aktarılması için kondensere (yoğuşturucu) gönderilir. Yoğuşturucu çıkışında akışkanın sıcaklık ve basıncının düşürülmesi için bir genleşme valfinden geçilir ve çevrim tamamlanmış olur.

Burada dikkat edilmesi gereken husus, ısı pompası çevriminde kullanılan soğutucu akışkanın kaynak yani dış ortam sıcaklığında buharlaşabilen ve ısıtma suyu sıcaklığında yoğunlaşabilen bir akışkan olarak seçilmesidir.

Bir ısı pompasında, kompresöre ve evaporatör fanına elektrik harcanmakta buna karşılık kondenserdeki ısıtma suyuna ısı aktarılmaktadır. Isı pompasının performansı kaynak ve yük arasındaki sıcaklık farkı ile ters orantılıdır çünkü sıcaklık farkı yüksek olduğunda kompresör kondenserde talep edilen ısıyı sağlamak için daha çok çalışmak zorunda kalır ve elektrik tüketimi artar. Ayrıca, ısı pompasının kapanıp açılması bir açma/kapama döngüsü, yani termal atalet oluşturur (Şekil 2.9).

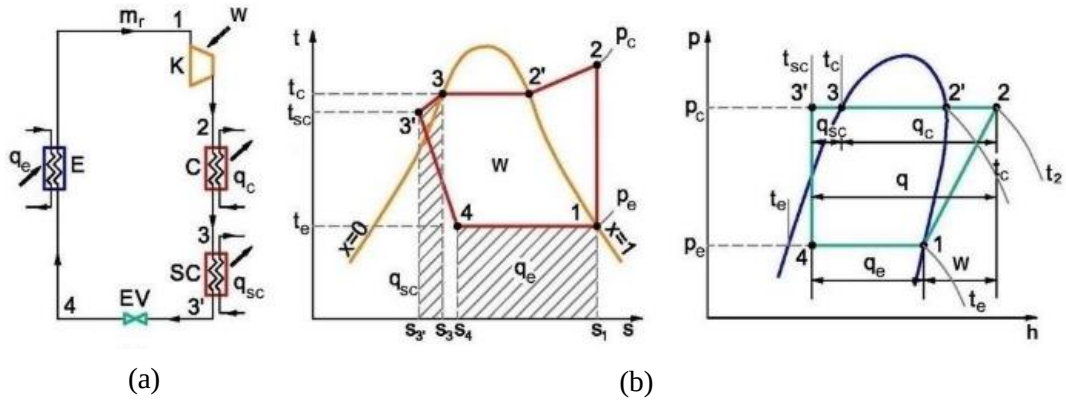


Şekil 2.9. Isı pompalarının açma/kapama döngüsü (Nielsen, 2015)

Ayar noktası sıcaklığına ulaşıldığında ısı pompası kapatılır ve su sıcaklığı yüksek bir diferansyele ulaştığında tekrar çalışır. Isıtma suyunun ayar noktası sıcaklığına ulaşma süresi ısı pompası boyutu ile ilgilidir. Dolayısıyla, ısı pompası ne kadar büyük olursa, açma/kapama döngüsünün frekansı o kadar yüksek olur ve bu da daha büyük döngü kayıplarına neden olur. Bununla birlikte yüksek döngü frekanslarında bileşenlerin ömrü de aşınma ve yıpranma nedeniyle azalmaktadır. Dolayısı ile ısı pompasının ideal bir şekilde seçilmesi, sistemin verimliliği ve ömrü bakımından oldukça önemli ve titizlikle yapılması gereken bir işlemdir.

Isı pompası (HP), ters Carnot termodinamik döngüsüne dayanan bir termal kurulumdur. Mekanik veya elektriksel bir tahrik enerjisini, yani termal etkini üretir. Hava ve toprak kaynaklı HP'ler elektro kompresörlüdür. Düşük sıcaklık ısısını 38°C 'nin üzerine ısıtmak ve iç mekanlara aktarmak, buharlaşma, sıkıştırma, yoğunlaşma ve genleşme döngüsünü içerir (Şekil 2.10-a). HP içinde dolaşan ısı transfer ortamı olarak kloroflorokarbon olmayan bir soğutucu kullanılır. Temel buhar

sıkıştırma döngüsü, sıvının izentropik sıkıştırması ve alt soğutması olan ve buharın aşırı ısınması olmayan bir döngü (Şekil 2.10-b) olarak kabul edilir.



Şekil 2.10. Tek kademeli ısı pompası sistemi (a) Şematik (b) t-s ve p-h diyagramlarında buhar-sıkıştırma prosesleri (Sarbu & Sebarchievici, 2016)

Özgül sıkıştırma işi w , kJ / kg, özgül soğutma gücü q_e , kJ / kg, yoğuştamadaki özgül ısı yükü q_c , kJ / kg, özgül alt soğutma gücü q_{sc} , kJ / kg ve performans COP katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w = h_2 - h_1 \quad (2.1)$$

$$q_e = h_1 - h_4 = h_1 - h_{3'} \quad (0.1)$$

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (0.2)$$

$$q_{sc} = h_3 - h_{3'} \quad (0.3)$$

$$COP = \frac{q_c + q_{sc}}{w} = \frac{h_2 - h_{3'}}{h_2 - h_1} \quad (0.4)$$

Q_{hp} ısı pompasının termal gücü (kapasite), kW olarak şu şekilde ifade edilir:

$$Q_{hp} = m_r (q_c + q_{sc}) \quad (0.5)$$

Burada m_r , kg / s birimiyle soğutucu akışkanın kütle akış hızıdır.

KW cinsinden izentropik sıkıştırma P_{is} için gerekli güç, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$P_{is} = m_r w \quad (0.6)$$

Kompresör milindeki etkili elektrik gücü P daha büyüktür ve şu şekilde tanımlanır:

$$P_{el} = \frac{P_{is}}{\eta_{is}} \quad (0.7)$$

Burada η_{is} izentropik verimliliğidir.

Bir ısı pompasının çalışması, yararlı termal enerji E_t ile elektrik enerjisi tüketimi E_{el} arasındaki oran olarak tanımlanan performans katsayısı (COP) ile karakterize edilir.

$$COP = \frac{E_t}{E_{el}} \quad (0.8)$$

Mevsimsel performans katsayısı ($COP_{seasonal}$) veya ısıtma (soğutma) mevsiminde ortalama COP, genellikle mevsimsel performans faktörü (SPF) olarak belirtilir veya Denklem (0.8)'de bir sezon (bir yıl) boyunca hem kullanılabilir enerjinin hem de tüketilen enerjinin toplamı kullanılırsa yıllık verimlilik elde edilir

Isıtma işletim modunda, ısı pompasının COP değeri aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$COP_{hp} = \frac{Q_{hp}}{P_{el}} \quad (0.9)$$

Burada Q_{hp} , ısı pompasının W cinsinden termal gücüdür; P_{el} , W cinsinden ısı pompası kompresörü tarafından tüketilen elektrik gücüdür.

Bir ısı pompasının yaşam döngüsü verimliliğini etkileyebilecek faktörler (i) yerel elektrik yöntemi üretimi; (ii) yerel iklim; (iii) ısı pompası tipi (toprak veya hava kaynağı); (iv) kullanılan soğutucu akışkan; (v) ısı pompasının boyutu; (vi) termostat kontrolleri ve (vii) kurulum sırasındaki işin kalitesidir.

Isı pompasının ünite verimliliği üzerinde olduğu düşünüldüğünde, tüketilen birincil enerjinin değerlendirilmesi sentetik bir gösterge kullanır (Sarbu & Sebarchievici, 2015):

$$\eta_s = \eta_g COP_{hp} \quad (0.10)$$

$$\eta_g = \eta_p \eta_t \eta_{em} \quad (0.11)$$

Burada η_g küresel verimlilik ve η_p , η_t ve η_{em} sırasıyla elektrik üretimi, ulaşım ve elektromotor verimliliğidir.

Bir ısı pompasının kullanımını haklı göstermek için, sentetik göstergenin $\eta_s > 1$ koşulunu karşılaması gerekir. Ek olarak, bir ısı pompası kullanımı sadece $COP_{hp} > 2.78$ ise dikkate alınabilir.

Bir ısı pompasının maksimum teorik COP değeri, sıcak ortamın sıcaklığı (t_h), K olarak ve soğuk ortamın sıcaklığı (t_i), K olarak ifade edilebilir (Sarbu & Sebarchievici, 2014):

Isıtma modunda:

$$COP = \frac{1}{1 - t_i / t_h} \quad (0.12)$$

Soğutma modunda:

$$COP = \frac{1}{t_h / t_i - 1} \quad (0.13)$$

Formüllerin gösterdiği gibi, bir HP sisteminin COP'si, sistemin çalıştığı sıcaklık farkı ($t_h - t_i$) azaltılarak geliştirilebilir.

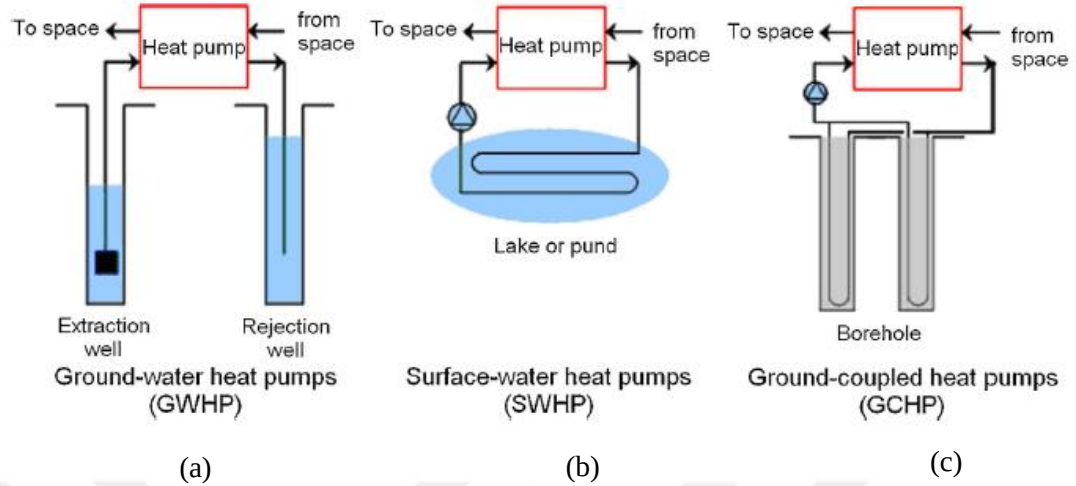
Isı pompaları hava, su, yer ve baca gazı gibi farklı kaynaklardan ısı çekilebilir. Zemin, yazın serin, kışın daha sıcak olduğu için ısı pompalamada havadan daha yüksek enerji verimliliği sunar. Yeraltı suyunu ısı kaynağı olarak kullanan GWHP sisteminin (

Şekil 2.11-a) düşük başlangıç maliyeti ve diğer GSHP sistemlerine göre zemin yüzey alanı için minimum gereksinim dahil bazı belirgin avantajları vardır (Sarbu & Sebarchievici, 2014). Bununla birlikte, yer altı suyunun sınırlı bulunabilirliği ve borulardaki ve ekipmanlardaki kirlenme korozyonu nedeniyle yüksek bakım maliyeti gibi GWHP sistemlerinin geniş uygulamasını ciddi şekilde kısıtlar.

Bir yüzey suyu ısı pompası (SWHP) sisteminde (

Şekil 2.11-b), ısı reddi / ekstraksiyonu, bir göl, gölet, rezervuar veya uygun açık kanallar içinde yeterli bir derinlikte konumlandırılmış yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) borular yoluyla dolaşımdaki çalışma sıvısı ile gerçekleştirilir.

Sistemin en büyük dezavantajı, yüzey suyu sıcaklığının özellikle kışın hava koşullarından daha fazla etkilenmesidir.



Şekil 2.11. Farklı toprak kaynaklı ısı pompası tipleri (Ahmadi vd., 2017)

Toprağa bağlı ısı pompaları (GCHP) (

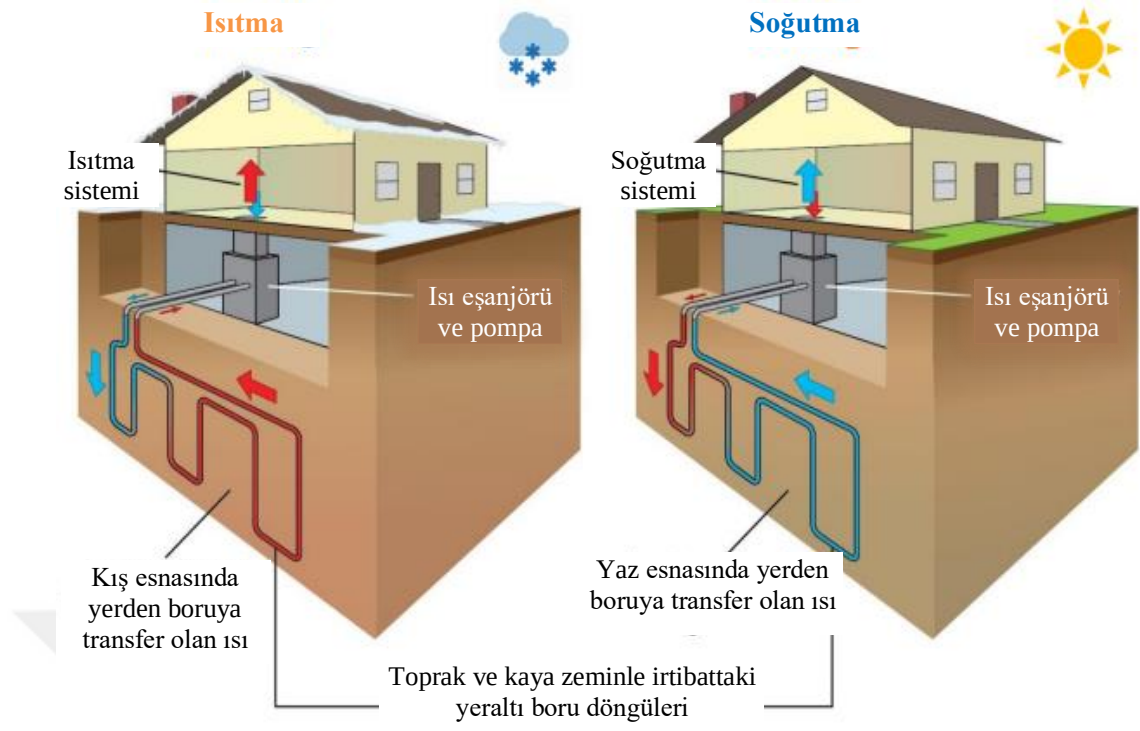
Şekil 2.11-c) (Florides & Å, 2007; Sykulski, 1999), zemini bir ısı kaynağı olarak kullanır. Bir ısı pompası, su ısı eşanjörüne soğutucu akışkan içerebilir veya doğrudan genişleyebilir. Soğutucudan suya ısı eşanjörlü sistemlerde, bir su veya antifriz çözeltisi, zemine gömülü yatay, dikey veya sarmal borular yoluyla pompalanır. Doğrudan genişlemeli toprak bağlantılı ısı pompaları, toprak borusu bobinleri için doğrudan genişlemeli, su basmış veya devridaim evaporatör devrelerinde soğutucu kullanır. Bir GCHP sisteminde ısı, kapalı bir döngü, yani saf su veya antifriz sıvısının dolaştığı kapalı bir döngü, yani toprak ısı eşanjörü (GHE) yoluyla toprağa ekstrakte edilir veya reddedilir. GCHP sistemlerinde yaygın olarak kullanılan GHE'ler tipik olarak ya dikey sondaj deliklerine (dikey GHE denir) veya yatay çukurlara (yatay GHE) monte edilen HDPE borulardan oluşur.

Binaların verimliliğini artırmak için aralıksız araştırma, en düşük enerji tüketimine sahip ısıtma ve iklimlendirme sistemlerinin kullanılmasını gerektirir ve toprak kaynaklı ısı pompaları en verimli ve en sessiz sistemler arasındadır (Montagud vd., 2013). Toprak kaynaklı ısı pompası (GSHP) (Zhai & Yang, 2011), ısı kaynağı olarak hava kullanmadıkları için ve daha yüksek bir çalışma katsayısına (COP) sahip oldukları için hava ve su kaynaklı (Urchueguía ve vd., 2008) diğer ısı pompalarından daha yaygındırlar. Kışın, ısı yerden çıkarılır ve toprak yaz aylarında bir soğutucu görevi görür. GSHP'nin, iklim dengesiz olduğu takdirde toplam jeotermal alanın

ökebilmesinin bir dezavantajı vardır. Yıllar boyunca zemin sıcaklığındaki değışiklikler ve jeotermal çökme olasılığı hakkında herhangi bir sonuç çıkarmak için, uzun bir dönemi kapsayan veriler gereklidir. Bu tür iklimlendirme sistemi oldukça yeni olduğu için, çok yıllı bir analiz içeren az sayıda çalışma vardır (Xi, Lin, & Hongxing, 2011). Isıtma, havalandırma ve klima (HVAC) sistemleri bina enerji tüketiminin %60-%70'ine katkıda bulunur. Toprak kaynaklı ısı pompası (GSHP) sistemi, binaları ısıtmak veya soğutmak için ısı pompası teknolojisini ve yenilenebilir jeotermal enerjiyi kullanan yeni bir HVAC sistem türüdür. GSHP sistemi, geleneksel HVAC sistemi tiplerine kıyasla enerji tasarrufu sağlar ve ayrıca çevre kirliliğini de azaltır (Xing, 2020).

Binaların ağırlıklı olarak ısınmaya ihtiyaç duyduğu soğuk bölgelerde, yıl boyunca enerji gereksinimlerini karşılamak için güneş destekli toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri (SAGSHPS) kullanılır (Trillat-Berdal vd., 2006; E. Wang vd., 2012; Xi vd., 2011). E. Wang vd., (2012) iki GSHP ünitesine karşılık gelen bir sondaj ısı eşanjörü (BHE) ve bir sondaj termal enerji depolama (BTES) tasarlamıştır. SAGSHPS'deki BTES, GSHP'sdeki BHE'den çok farklıdır.

Toprağı bağı ısı pompası (GCHP) sistemleri (Şekil 2.12), binalar için klima ve kullanım sıcak suyu sağlamak için son on yılda Avrupa'da ve Türkiye'de dünyanın geri kalanından daha fazla kullanılan bir tür yenilenebilir enerji teknolojisidir (J. Y. Lee, 2009; Yang vd., 2010). Bu sistemler, hava kaynaklı ısı pompası sistemlerine kıyasla daha yüksek enerji verimliliği sağlayabilir çünkü toprak, havadan daha yüksek ısıtma ve soğutma için daha düşük sıcaklık sağlayabilir (Sarbu & Sebarchievici, 2014). Gözle görülür yüksek verimlilikleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle dünya çapında konutlarda ve ticari binalarda GCHP sistemi kullanılmıştır (Bayer vd., 2012; Self vd., 2013). Yeterli sıcaklıkların elde edilmesinde GCHP'lerin kullanımı birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir.

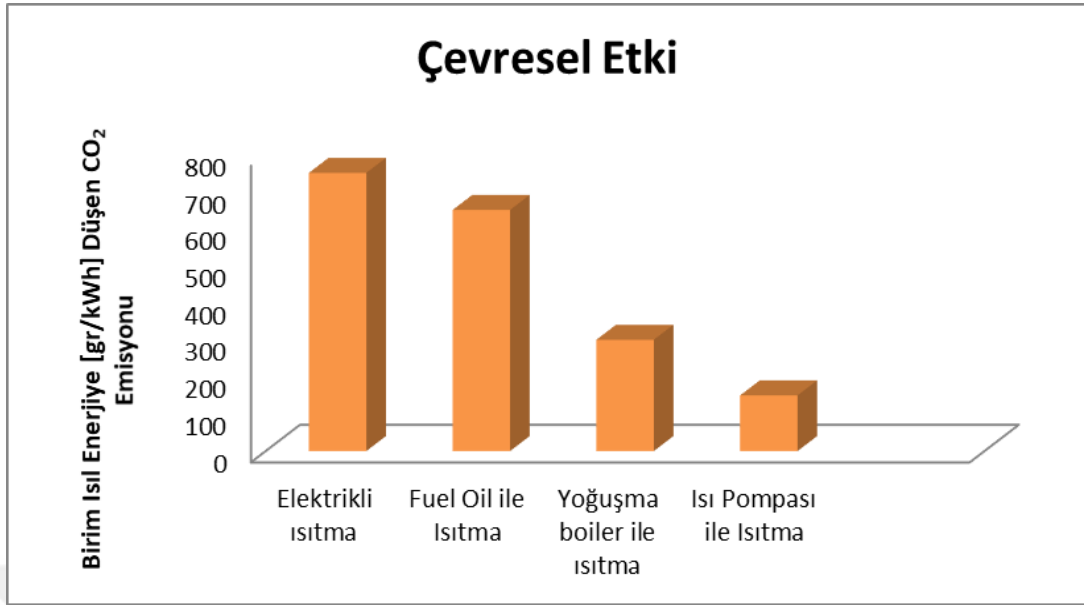


Şekil 2.12. Toprak kaynaklı ısı pompaları (Aydın, 2018)

Tablo 2.1'deki paylaşılan 2020 İstanbul yakıt fiyatları verilerine göre ısı pompası çok ucuz bir ısıtma yöntemi olduğunu kanıtlamaktadır. Enerjinin gün geçtikçe pahalılaştığı Türkiye’de ev ve iş yerlerinin ısıtma ve soğutması için enerji verimliliğinin önemi giderek artmaktadır. Ayrıca ısı pompası enerji verimliliğinin yanısıra çevresel etkiler açısından da diğer ısıtma yöntemlerinin önüne geçmektedir. Şekil 2.13’da görüleceği gibi birim enerji başına CO₂ emisyon oranı cinsinden çevresel etkisi ortaya konulmaktadır.

Tablo 2.1 Yakıt fiyatları karşılaştırılması (“İstanbul Yakıt Fiyatları,” 2020)

Isı Kaynağı	Isı Enerjisi Miktarı	Birim Tutar	Verim	TL/1000 Kcal
Doğal Gaz (Ev)	8250 kcal/m ³	1.0109 TL/m ³	90	0,2051
Linyit (İthal)	6000 kcal/kg	0.7118 TL/kg	65	0,4139
LPG	11000 kcal/m ³	4.4642 TL/m ³	90	0,8917
Elektrik	860 kcal/kWh	0.3104 TL/kWh	100	0,6727
GSHP (COP=4,7)				0.0903



Şekil 2.13. Toprak kaynaklı ısı pompasının diğer ısıtma yöntemleri ile çevresel etki açısından kıyaslanması (Aydın, 2018)

2.8. Isı Pompası Entegreli Radyant Duvar Isıtma Soğutma Sistemi

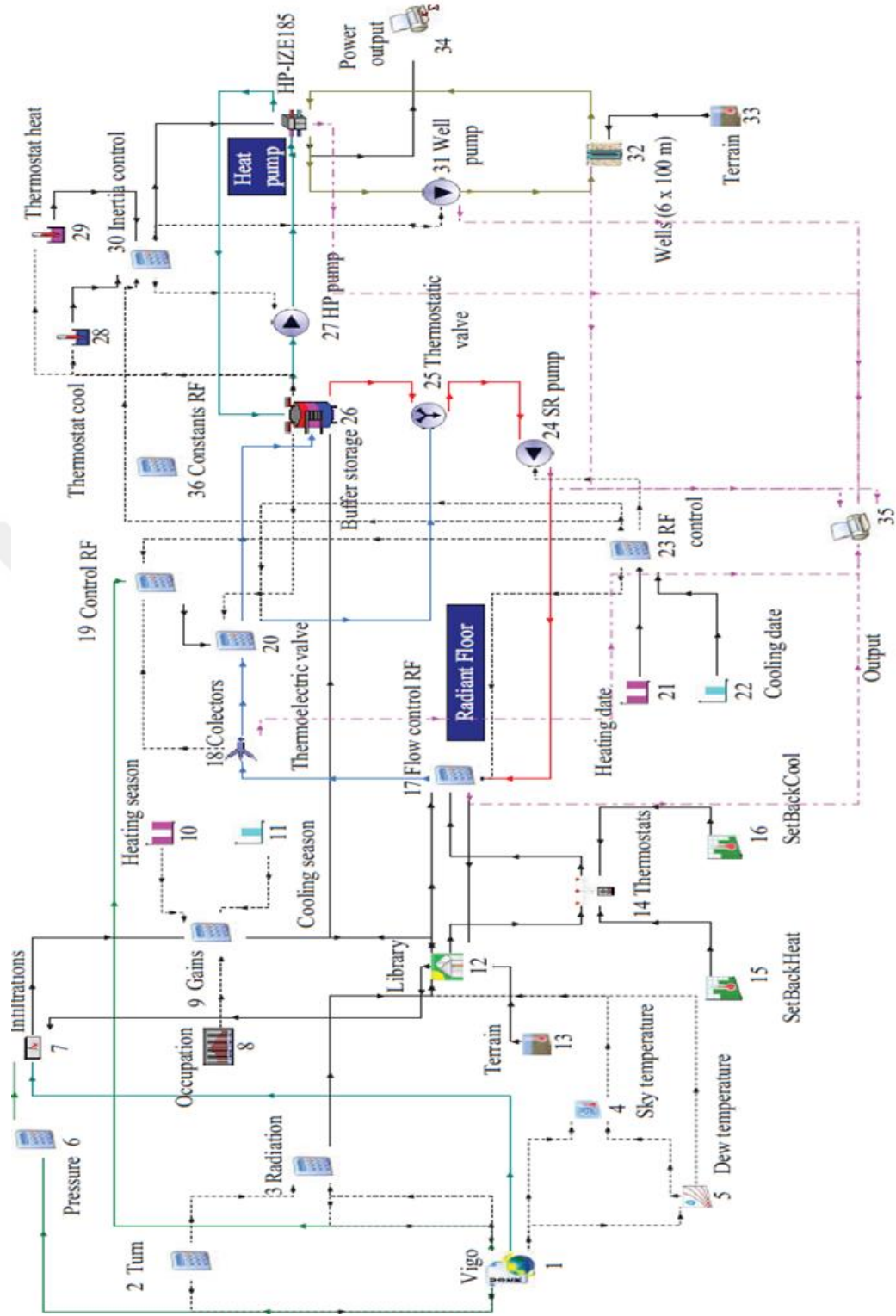
Isı pompalarının ısıtma sistemlerinde tek ısı üretici olarak yaygın kullanımı, temel olarak sınırlı ısı yükleri olan yeni ve oldukça izole binalarda olmuştur. Bu düşük sıcaklık terminal ünitelerinin kullanımı özellikle radyant sistemlerin kullanılmasını mümkün kılmıştır. Polietilen ve PVC boruların kullanılmaya başlanmasından sonra, oda yüzeylerine (yani zeminler, duvarlar ve tavanlar) gömülü borularla su bazlı radyant ısıtma ve soğutma uygulaması dünya çapında önemli ölçüde artmıştır (Sarbu & Sebarchievici, 2016). Bu alt bölümde ısı pompası entegreli ışınlı radyant zemin ısıtma soğutma sistemleri ele alınarak iki düşük enerjili sistemin entegrasyonu ile verimliliğin artırıldığı ve çevresel etkilerinin tartışıldığı literatür çalışmalarına yer verilmiştir.

Enerji tüketimini azaltmak ve çevreyi korumak için bazı çalışmalar literatürde gerçekleştirilmektedir (örneğin, yeni veya yenilenmiş binalar ve pasif enerji binaları için yenilenebilir enerjilerin kullanımı). Avrupa ülkelerinin ve Türkiye'nin, tadilatı geçen mevcut binaların sıfır enerjili binalara (nZEB'ler) dönüştürülmesini teşvik etmesi gerekmektedir. Yer kaynaklı ısı pompalarına ve havadan suya ısı pompalarına dayalı ısıtma ve soğutma sistemlerinin dönüşümü, nZEB gereksinimlerine yaklaşmak için kanıtlanmış bir yöntemdir. Birincil enerji olarak fosil yakıt tüketimini ve ilgili karbondioksit (CO₂) emisyonlarını azaltmaya yönelik iddialı hedefleri

gerçekleştirmek ve Kyoto Protokolü hedeflerine ulaşmak için, iyileştirilmiş enerji verimliliği ve mevcut bina stokunda yenilenebilir enerji kullanımı gerekir. Avrupa Parlamentosu'nun Yenilenebilir Enerji Yönetmeliği 2009/28/EC, ilk kez aero-termal, jeotermal ve hidrotermal enerjiyi yenilenebilir enerji kaynakları olarak kabul etmiştir. Bu yönetmelik, yeni ve mevcut binaların ısıtılması ve soğutulması için ısı pompalarının daha fazla kullanılması için büyük bir fırsat sunmaktadır (Sarbu & Sebarchievici, 2016).

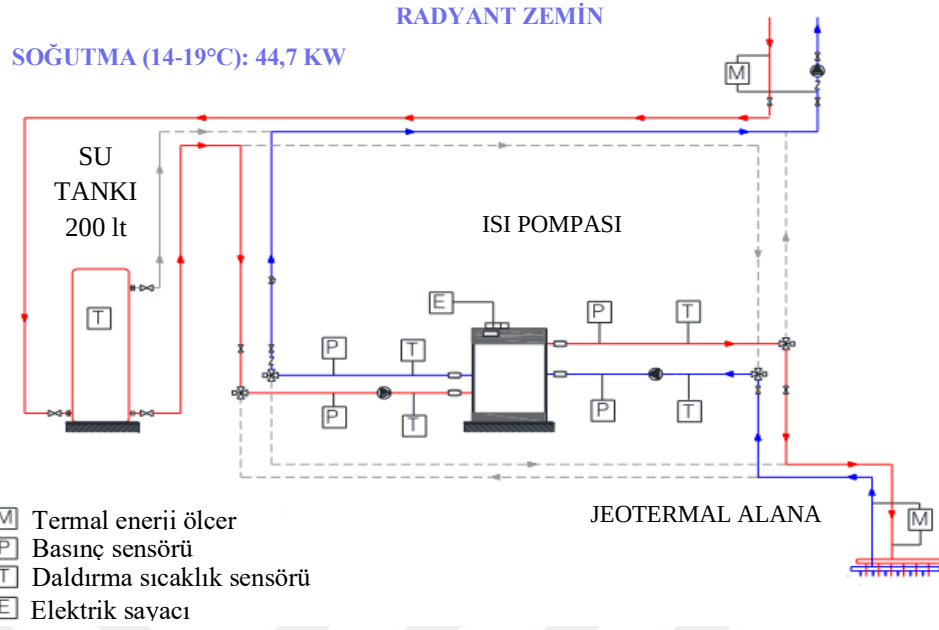
Zeminden beslenen ısı pompalı radyant ısıtma soğutma sistemlerinin kullanıldığı binalarda mahalin ısıtma soğutma performansını sayısal simülasyonlar ile TRNSYS gibi ticari bir program aracılığı ile simüle eden çalışmalar literatürde bulunmaktadır (Cacabelos vd., 2015; Sarbu & Sebarchievici, 2016). TRNSYS programı güneş panelli ısıtma sistemi (Hang vd., 2012) ve solar hidrojen sistemi gibi (Ulleberg & Morner, 1997) farklı HVAC sistemlerinin termal enerjilerini ve performanslarını tahmin etmek için de kullanılmıştır.

Cacabelos ve vd., (2015) TRNSYS kütüphanesinden bileşenler içeren ayrıntılı bir model **(Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.)** kullanan bir simülasyon ve kalibrasyon işlemini gerçekleştirerek ASHRAE standartlarını karşılamak için yeterli olduğunu göstermişlerdir. Bu model, kurulumdan TRNSYS kütüphanesinde temsil edilebilecek ana bileşenleri içerir. Hava, bina, ısı pompası ve jeotermal sondaj kuyuları ve diğer sistemlerden elde edilen tüm veriler bu TRNSYS bileşenlerine dâhil edilmiştir.



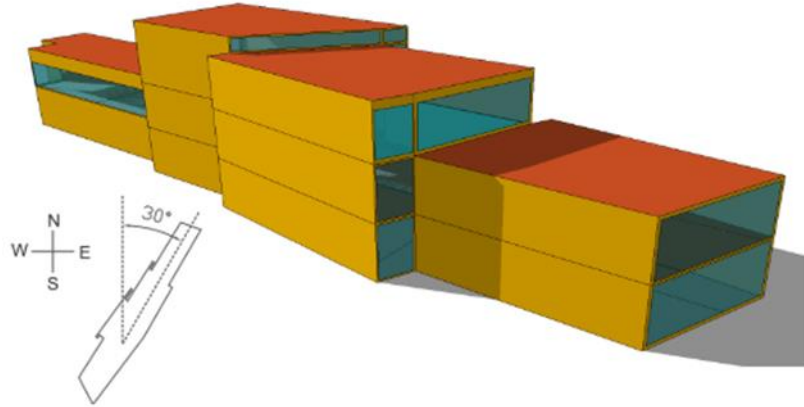
Şekil 2.14. TRNSYS programında sadeleştirilmiş bir toprak kaynaklı ısı pompalı radyant zemin ısıtma/soğutma sistemi modeli (Cacabelos ve vd., 2015)

Tersine çevrilebilir sudan suya ısı eşanjörü boru sisteminin bir diyagramı, sistemin termal ataletini arttırmak için 200 litrelik bir su depolama tankının kullanıldığı **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de verilmiştir.



Şekil 2.15. GSHP system şematığı (Cacabelos ve vd., 2015)

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı. bir şematığı gösterilen 3 katlı bir binada GSHP entegreli radyant ısıtma ve soğutma sistem incelenmiş ve birbirine bağlı termal bölgelerde tabakalaşma olduğu görülmüştür.



Şekil 2.16. Sketchup programında termal modelleme (Cacabelos ve vd., 2015)

Literatürde kalibrasyon kriterleri için standartlar yoktur ve çalışmada kalibrasyon sürecini yarı otomatik hale getiren geçerli bir yöntem açıklamakta ve kullanılmaktadırlar. Çalışma ile esas olarak sistemin enerji tüketimine odaklanarak, kök sapması kare hatasının ortalama sapma hatasını ve %5'in altında değişkenlik katsayısının azaltılması mümkün olmuştur. Doğru bir kalibrasyon elde etmek için, tüm performans verilerini toplamak ve eksik bilgileri tahmin etmek gerekir. Bu çalışmada toprak kaynaklı bir ısı pompası ve bir radyant zeminden oluşan ısıtma ve soğutma

sistemi simüle edilmiştir. Model ASHRAE ve EVO spesifikasyonlarına göre kalibre edilmiştir.

Hava koşulları dışında bina mimarisi, bina simülasyonunun en önemli parçalarından biridir. Genel olarak, bir kamu binasındaki ana talepler ısıtma ve soğutma talepleridir ve bunlar esas olarak inşaat malzemelerine ve cam yüzeyler dahil dış yüzeylere bağlıdır. Bina yüklerini etkileyen diğer önemli faktörler, doluluk ve ışıklar veya elektrikli cihazlar gibi dahili ısı kaynaklarıdır (Cacabelos ve vd., 2015). Isı pompası sistemi en fazla elektriği tüketir. Bu nedenle, nominal kapasitesinin termal yüklerle yeterli olması için ısı pompasının doğru seçilmesi önemlidir; kısmi yükte bir ısı pompası çalıştırmak performans katsayısını (COP) azaltır (Magraner vd., 2010).

Çok yeni bir çalışmaya göre kılcal radyant tavan kullanan hibrit toprak kaynaklı ısı pompası (GSHP) sistemleri, enerji tüketimini azaltırken daha iyi bir bina konforu sağlamayı vaat etmektedir (Xing, 2020). GSHP sistemleri için, ısıtmada yerden çıkardığı ve yere reddettiği ısıyı dengelemek önemlidir ve bu nedenle tipik olarak bir GSHP sistemi yardımcı bir soğutma kaynağına (soğutma kulesi veya diğerleri) veya yardımcı ısıtma kaynağına (güneş kolektörü) bağlanır ve hibrit bir GSHP sistemi haline gelir (Fan vd., 2014).

Birçok araştırmacı (Blarke, 2012; Gracia vd., 2017; H. Mavd., 2016; Mazo vd., 2012; Sebarchievici vd., 2015; Zhao vd., 2016), HVAC sistemlerini radyant terminallerle birleştirmeyi önermektedir. Radyant terminallerin HVAC sistemine bağlanmasıyla, sistem verimliliği ve iç mekân konforu büyük ölçüde artmaktadır. Sistem, pik yükü transfer edebilmekte ve bina enerji tüketimini ve sistem işletme maliyetlerini azaltabilmektedir. Düşük sıcaklıktaki radyant tavan ısıtma sistemlerinin potansiyel uygulamasının deneysel değerlendirmesi, eski ve enerji yenilenmiş binalar için bile oldukça nötr termal his ve tatmin edici iç mekan konforu sağlayabildiğini göstermiştir (Safizadeh vd., 2018).

Ignacio vd., (2017) toprak bağlantılı bir ısı pompası (GCHP), radyant zemin ve mekanik havalandırma dahil bir ofis binası için bir HVAC sistem modeli geliştirmişlerdir; simülasyon modelinde elde edilen değerler, ilgili deney sonuçlarından %2 sapma göstermiştir. Sarbu & Sebarchievici (2016), radyatör ve radyant zemin arasındaki verimliliği karşılaştırmak için GSHP sistemi ile kurulan bir ofisin performansını test etmişlerdir. Ancak, radyatör ısıtma sistemi, aynı çalışma

koşulları altında ışınlı radyant yerden ısıtma sistemine göre %10 daha fazla enerji tüketimi ve CO₂ emisyonu göstermiştir. Ayrıca radyant yerden ısıtma sistemi radyatör ısıtma sistemine göre daha yüksek konfor temin etmektedir.

Binalar tartışmasız en büyük enerji tüketen sektörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, binalar tarafından tüketilen ortalama enerji, dünya çapındaki enerji tüketiminin %30'unu temsil ediyor (Fahmy vd., 2019). Avrupa Birliği (AB) enerji tüketim kalıpları, binaların toplam enerji talebinin yaklaşık % 40'ını kullanarak en büyük enerji tüketicisi olduğunu ve bunu her biri yaklaşık % 30 tüketen sanayi ve ulaşımın izlediğini ortaya koymaktadır (Anisimova, 2011). Binalar, enerji tasarrufu için en büyük ve en uygun maliyetli potansiyeli sunar. Çalışmalar ayrıca enerji tasarrufunun sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltmak için en uygun maliyetli yöntem olduğunu göstermiştir (Sarbu & Sebarchievici, 2016).

3. YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYET ANALİZİ

3.1. LCC Analizi İlkesi

Yaşam döngüsü maliyet (LCC) analizi ile mevcut ve alternatif çözümler arasındaki ekonomik performansın değerlendirilmesi açısından bütünsel bir yaklaşım sunmayı amaçlamaktadır. Çalışmaya konu olan hidronik radyant ısıtma sistemine bağlı tüm maliyetler, sistemin uygulanmasından başlayarak planlanan işletme süresi sona erene kadar devam eden zaman diliminde çeşitli başlıklar altında toplanır. Daha sonra gelecekte farklı zamanlarda gerçekleşen bu maliyetler bugünkü değerlerine indirgenerek sistemin yatırım maliyeti ile toplanır ve böylece yaşam döngüsü maliyeti hesaplanır.

Kısacası, yaşam döngüsü maliyeti, bir sistemin toplam sahip olma maliyetinin tek bir şimdiki değerde ne kadar olduğunu gösterir ve o sistemi farklı teknik çözümler ve alternatifler arasında ekonomik performansı açısından karşılaştırmada etkili bir kriterdir (ASHRAE, 2015).

LCC, bu bakımdan hem tedarikçilere hem de kullanıcılara faydalı bilgiler sunar. Yükleniciler ve danışmanlar, yatırım maliyetlerini en aza indirmek yerine sistem çözümünün kalitesini en üst düzeye çıkarmaya odaklanırken, kullanıcılar uygulamadan sonra sistemin performansını ve süreçlerini sürekli olarak iyileştirmeye motive olurlar. Bu nedenle LCC analizine dayalı sistem çözümlerinde işletme maliyetleri ve hizmet maliyetleri genellikle çok daha düşüktür ve ilk yatırım maliyetinin avantajlı gibi görünen diğer muhtemel alternatiflere nazaran daha büyük olmasına rağmen daha fazla tasarruf ve hizmet kalitesi sağlamaktadır (Laitinen; Nykänen; Paiho, 2010)

3.1.1. Bugünkü Değer Formülü ve Iskonto Oranı

LCC hesaplamalarındaki gelecekteki maliyetler, karşılık gelen bugünkü değerlerine indirgenir ve net bugünkü değer (NBD) aşağıdaki gibi hesaplanır (Ataseven).

$$NBD = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} - c$$

Burada, R değişik zamanlardaki nakit girişlerini, i iskonto oranı ya da sermaye maliyetini, n yatırımın ekonomik ömrünü, c ise yatırımın tutarını göstermektedir.

Paranın zaman değeri, şimdiki zamandaki maliyetlerin, gelecekteki eşit değerdeki maliyetlerden daha yüksek bir değere sahip olduğunu ifade eder. Zira paranın bu zaman dilimi içerisinde potansiyel bir kazanç kapasitesi bulunmaktadır. Bununla birlikte, maliyetler mevcut parayı ve dolayısıyla potansiyel kazançları azaltacağından, erken dönemde ortaya çıkan maliyetler LCC hesaplama sonuçları üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olacaktır.

Öte yandan gelecekteki nakit akışlarının belirsizliği, örneğin enflasyonun veya fiyat seviyesinin gelecekteki değişimi girdi verilerinin öngörülemezliği üzerinde etkilidir. Bu nedenle alıcı tarafından belirlenen bir risk priminin de iskonto oranının hesaplanmasına dahil edilmesi gerekmektedir. Bu genellikle alıcının sermaye yapısını korumak için gerekli getiriler, sermaye maliyeti dikkate alınarak veya yatırımın benzer projelerle karşılaştırılmasıyla yapılır (Berk ve DeMarzo, 2011).

3.2. LCC Analizinde Veri Giriş

3.2.1. Yatırım

Yatırım, bir sistem yaşam döngüsünün başlangıç noktasıdır ve yatırım maliyeti, tüm sistem bileşenlerinin satın alım ve kurulum maliyetlerini içermektedir ve bu maliyetler başlangıçta yani bugünkü değer üzerinden gerçekleştiği için iskonto edilmez. Yatırım maliyeti ile ilgili tahminler benzer sistemlerin kurulum ve tedarik işlerini yürüten kurum veya kişilerden ya da alandaki uzmanlardan bilgi alınarak yapılabilir. Batık maliyet olarak adlandırılan ve yatırım fırsatlarını karşılaştırırken kullanılamayacak olan ve hangi sistemin seçildiğine bakılmaksızın ödenmesi gereken maliyetler de ilk yatırım maliyeti kapsamında değerlendirilmelidir. Sistemin kurulumu için yapılacak olan imalatlar ya da eski var olan sistemin söküm maliyetleri bun tür maliyetler arasında sayılabilir.

3.2.2. İşletme Maliyeti

İşletme maliyeti, sistemin yaşam döngüsü boyunca performansı ve enerji tüketimi hesaplamaları üzerinden tahmin edilen bir maliyettir. İşletme maliyeti, tahmini enerji tüketiminin enerjinin birim maliyeti ile çarpılması ile belirlenir ve

bugünkü değere indirgenir. İşletme maliyetinin hesaplanmasında enerji birim maliyetlerindeki değişimin yanı sıra kurulumun yapıldığı bölgede, bu çalışma kapsamında İstanbul ilinde, yaşam döngüsü boyunca gerçekleşecek olan tüketim seviyelerinin doğru tahmin edilmesine ve ısıtma yükünün ayrıntılı bir şekilde hesaplanabilmesine bağlıdır. Bu bakımdan, İstanbul ili genelinde yıllık dış hava sıcaklığı değerlerinin değişiminin istatistikî meteorolojik veriler yardımı ile elde edilmesi ve hesaplamaların bu çerçevede yapılması önemlidir.

3.2.3. Hizmet Maliyeti

Hidronik randyant ısıtma sisteminin hizmet maliyeti genel olarak aşağıdaki faktörlere bağlı olarak hesaplanmalıdır.

- **Sistemin türü ve bileşenleri.** Farklı sistem bileşenlerinin nitelik ve nicelikleri hizmet maliyetleri üzerinde etkilidir.
- **Sistemin çalışma süresi.** Sistemin ortalama çalışma süresi bakım ve temizlik gibi farklı görevlerin gerçekleştirilme sıklığını belirlediğinden hizmet maliyetinde etkili bir parametredir.
- **Coğrafi konum.** Kurulum yapılan bölgenin iklimi ve altyapısı, özellikle sistemin çalışma süresini doğrudan etkilemek suretiyle hizmet maliyeti üzerinde değişken bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte, özellikle bakım ve servis işleri açısından tedarikçilere ve servis noktalarına yakınlık da kayda değer bir etki gösterebilmektedir.
- **Bileşenlerin ekonomik ömür düzeyi ve yaşı.** Ekipmanların üretim yılları, yani yaşları, onların tasarımında ve imalat teknolojilerinde farklılıklar meydana getirebileceği gibi raf ömrü gibi değişik parametreler üzerinden hizmet maliyetlerini etkilemektedir. Daha eski üretim yılına sahip olan sistemlerin çalışma performanslarının ve çalışma zamanı hatalarının daha yüksek olması beklenen bir durumdur.

Yukarıda anılan tüm parametreleri etkileri dikkate alınarak tahmin edilen hizmet maliyetleri de bugünkü değere indirgenir.

3.2.4. Artık Değer

Sistemde kullanılan bazı bileşenlerin ekonomik ömürlerinin sistemin ekonomik ömründen daha uzun olduğu durumda, bu bileşenlerin, sistem yaşam

döngüsünün sonuna ulaştığında da bir ekonomik değere sahip olacaktır. Dolayısıyla, maliyetlerin tersine, sistemin ömrünü tamamlamasının akabinde ekonomik ömrünü devam ettiren bu tür bileşenlerin pozitif bir ekonomik değeri vardır ve bu değer de LCC hesaplamalarında dikkate alınması gerekir. Artık değerler de bugünkü değere indirgenmek suretiyle hesaplamalara dahil edilmelidir.

3.3. LCC Analizinde Farklı Yaklaşımlar

LCC Analizinde karşılaştırma kriteri olarak kullanılan değer in elde edilmesinde farklı yaklaşımlar ve metotlar bulunmaktadır. Tüm maliyetlerin ve artık değer in bugünkü değere indirgenmesi yöntemine ek olarak, eş değer yıllık maliyet hesaplamasının yapılması ya da geri ödeme süresinin belirlenmesi gibi farklı yöntemler ile LCC analizi yapılabilmektedir.

3.3.1. Bugünkü Değer Yöntemi

Bugünkü değer yönteminde, bir sistemin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan tüm girdi maliyetlerinin ve değerlerinin bugünkü değeri toplanarak yaşam döngüsü maliyeti elde edilir. Buna göre LCC:

$$LCC = Y_{bd} + \dot{I}_{bd} + H_{bd} + P_{bd} - A_{bd} \text{ şeklinde hesaplanır.}$$

Burada yatırım maliyeti Y , işletme maliyeti $\dot{I}$, yıllık hizmet maliyeti H , periyodik hizmet ve bakım maliyeti P ve artık değer A bugünkü değerleri üzerinden hesaplamaya katılır. Elde edilen LCC değerleri tüm alternatifler arasında karşılaştırılır ve en düşük bugünkü değer maliyetine sahip olan sistem tercih edilir. Ancak alternatif sistemlerin toplam ekonomik ömürlerinin eşit olması gerekir çünkü daha uzun ömürlü bir sistemin LCC değeri, pahalılığın ziyade hesaplama katılan zamanın uzunluğundan kaynaklanabilir.

3.3.2. Eşdeğer Yıllık Maliyet Yöntemi

Ekonomik ömürleri farklı olan sistemlerin daha doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi açısından eşdeğer yıllık maliyet yöntemi önemli bir avantaj sağlar. Girdi verilerinin bugünkü değerlerinin eşdeğer yıllık maliyetler şeklinde yeniden hesaplandığı bu yöntemde eşdeğer yıllık maliyet (EYM):

$$EYM = NBD / 1/r [(1 - 1/(1+r)^n)] \text{ şeklinde bulunur.}$$

Burada r iskonto oranı ve n ise ekonomik ömrü göstermektedir.

Bu yöntemde önemli bir husus, tüm hesaplamalar için aynı iskonto oranının kullanılması gerekliliğidir. Dolayısıyla, seçeneklerin karşılaştırılabilmesi için eşit risklere sahip olması gerekir.

3.3.3. Geri Ödeme Yöntemi

Geri ödeme yöntemi ise bir yatırımın maliyetini geri kazanmak için gerekli süreyi hesaplama yaklaşımıdır. LCC analizi bağlamında, geri ödeme süresi, bir ekonomik seçeneğin alternatifine kıyasla daha düşük kümülatif maliyete sahip olması için geçen süreyi gösterir. Bazı durumlarda yatırımın geri ödemesi için önceden belirlenmiş azami süreler olabilir, bu durumda en ekonomik seçeneğin geri ödeme süresinin bu değerden kısa olması gereklidir. Diğer yöntemlere göre çok basit gibi görünse de paranın zaman değerini hesaba katmaması ve toplam azami süreye odaklanmak suretiyle esasen geri ödeme süresinden sonraki dönemde bir seçeneği diğerlerinden daha avantajlı hale getirebilecek olan yıllık faydayı göz ardı etmesi bakımından tek başına kullanılması uygun olmayan bir LCC yöntemidir (Berk ve DeMarzo, 2011).

3.3.4. Duyarlılık Analizi ve Senaryo Analizi

LCC hesaplamalarındaki girdi verilerinin tahminlere dayanması yanlış sonuçlara yol açabilir. Dolayısı ile seyrek verilerden tahmin üretmek veya fiyat düzeyindeki ve enflasyondaki gelecekteki gelişmeleri öngörememek elde edilecek sonuçların duyarlılığı üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Girdi verilerindeki değişikliklerin ve bunların gelecekteki artışlarının, sonuçları nasıl etkilediğini belirlemek ve LCC analizinde çıkarılan güvenilirliğini değerlendirmek için bir duyarlılık analizine ihtiyaç duyulmaktadır. Duyarlılık analizi bir parametrenin hesaplanan sonuçlar üzerindeki etkilerini araştırarak hangi parametrelerin daha önemli olduğu ve doğru sonuçlar elde etmek için daha fazla araştırılması gerektiğini ortaya çıkarır. Senaryo analizi ise genellikle en iyi ve en kötü durum senaryoları oluşturarak, birden çok parametrenin farklı tahmin değerleri ile elde edilecek LCC sonuçlarının karşılaştırılmasını sağlar (Berk ve DeMarzo, 2011).

3.4. Yaşam Döngüsü Maliyetinin Değerlendirilmesi

Literatürde bu başlık altında, sistemin sürdürülebilirliği, çevre üzerindeki etkisi ve karbon emisyonları gibi konular incelenmiştir. Termal ölçümlerin alınacağı yeni hibrid iklimlendirme sistemi düşük sıcaklıkta çalıştığından, bu bağlamda çevresel verimliliği artırır. Bu çalışmada Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) yapılmamış olsa da, kısır döngüye neden olan verimsiz kullanımı en aza indirmek ve özellikle Türkiye'deki radyant duvar sistemleri için farkındalığı artırmak hedeflenmiştir. Tek bir cihazla verimlilik sağlamak yerine, bir yapıya hibrid ısıtma ve soğutma sistemi olarak birden fazla ekipman uygulayıp sinerji elde ederek iklimlendirme sektöründe bir açığın doldurulması amaçlanmaktadır. Yürütülen bu çalışma, gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturarak bazı sürdürülebilir sistemlerin eklenmesiyle de geliştirilebilir. Örneğin, fotovoltaik paneller elektrik üretiminde kullanılabilir ve ısı pompasını besleyebilir. Bu sistemlerin LCA analizleri yapılarak çevreye olan etkileri belirlenebilir.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), endüstriyel kuruluşlar, çevreciler, hükümetler, araştırmacılar ve ticari kuruluşlar tarafından tam bir yaşam döngüsü boyunca endüstriyel süreçlerle ilişkili kümülatif çevresel yükleri tanımlamak ve ölçmek için kullanılan bir tekniktir. Bir LCA ekonomik (veya sosyal) parametreleri içermez, ancak yalnızca şekilde özetlendiği gibi enerji tüketimi, hammadde kullanımı ve atık üretimi açısından önemli değişiklikler yaratabilecek fiziksel olayları dikkate alır (Durante vd., 2015).

4. DENEY SİSTEMİ VE DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada yaşam döngüsü maliyeti (LCC) hesaplaması amacıyla yaklaşık 2500 m² alana sahip gerçek bir ofis binasına ısıtım soğutma sistemi ve hava kaynaklı ısı pompası gerçek ölçekli olarak uygulanmıştır. Çalışmanın çıktılarının önerilen sistemin yaygınlaşmasına katkı sağlaması ve karar verme mekanizmasında kullanılabilmesi amacıyla ilk yatırım maliyeti detaylı olarak hesaplanmış, işletme maliyetleri (ısı pompası elektrik tüketimi), ısı pompasının performansı (COP) ve bina ısı kaybı/kazancı deneysel olarak ölçülerek teyit edilmiştir. Seçilen hava kaynaklı ısı pompası entegreli hibrit radyant ısıtma soğutma sisteminin birebir ölçekli olarak kurulu olduğu bir ofis binasında termal ve ekonomik ölçümler gerçekleştirilmiştir.

4.1. Hipotez ve Yöntem

Günümüz dünyasında, enerji kaynaklarının verimli kullanımı her zamankinden daha önemli hale gelmiştir. Tarih boyunca büyüyen nüfusun ek yükünü karşılamak için birçok farklı enerji kaynağı kullanılmıştır. Sınırlamaları giderek artan bu talep, çeşitli kaynakların sinerjik birleşimine yol açmaktadır. Yenilebilir enerji kaynakların ilk yatırım maliyetinin yüksek olması sebebiyle kullanımı yaygınlaşmamıştır. Bu yüzden yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımın yaygınlaşması için, ilk yatırım maliyetlerinin azaltılması ve verimliliklerinin artırılması (işletme giderlerinin düşürülmesi) gerekmektedir. Bunun için bütüncül bir bakış açısıyla enerji üretici yenilebilir enerji sistemleriyle uyumlu ve verimliliklerini arttıracak şekilde ısı yayıcı sistemlerin seçilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında ısı yayıcı sistem olarak, düşük sıcaklıkta ısıtma, yüksek sıcaklıkta soğutma yapabilen ısıtım esaslı ısıtma-soğutma sistemiyle, hava kaynaklı ısı pompası entegrasyonunun termo-ekonomik incelemesi yapılmıştır. ısıtım esaslı ısıtma-soğutma sisteminin entegrasyonu ile ısı pompasının performansı (COP) artacak ve dolayısıyla ısıtım esaslı ısıtma-soğutma sistemi ve ısı pompasının entegrasyonu ile oluşacak sinerji sayesinde, ısı pompasının kompresör kapasitesi, diğer bir deyişle ilk yatırım maliyeti ve sağlanacak enerji verimliliğinden dolayı işletme maliyeti düşecektir. HVAC sistemleri tasarlanırken/seçilirken genellikle, yaşam döngüsü maliyeti dikkate alınmamaktadır. Bunun yerine ilk yatırım maliyeti üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır. Fakat özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinin enerji-ekonomik performansları

değerlendirilirken sistem yaşam döngüsü maliyeti (LCC) dikkate alınması gerekmektedir. Gerçekçi bir LCC analizi yapıldığında, yenilebilir enerji sistemlerinin uzun vadede hem daha ekonomik hem de daha çevreci olduğu görülecektir. İlk yatırım maliyeti detaylı olarak hesaplanarak, işletme maliyetleri (ısı pompası elektrik tüketimi), ısı pompasının performansı (COP) ve bina ısı kaybı/kazancı deneysel olarak ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm verileri kullanılarak önerilen sistem için LCC analizi yürütülmüştür.

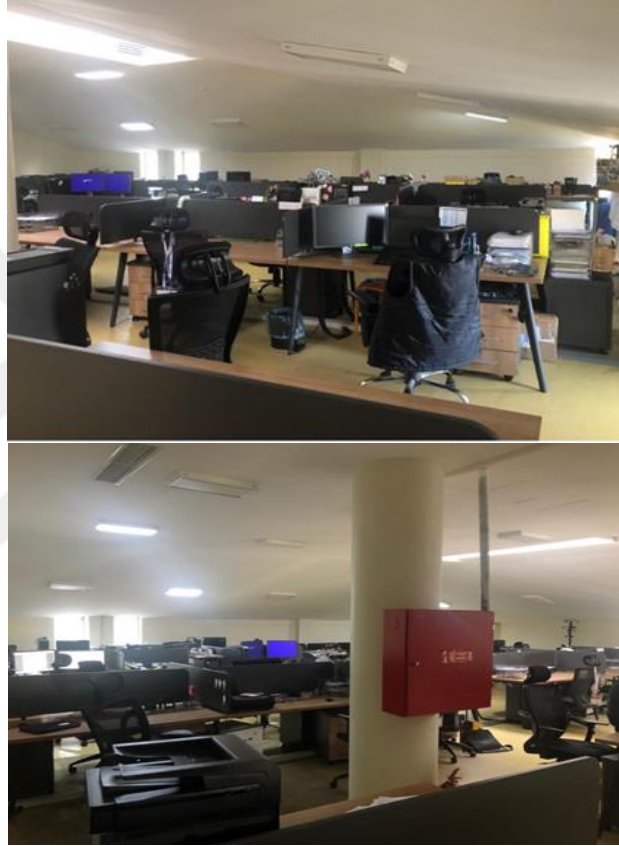
LCC çerçevesinde yeni bir hibrit radyant ısıtma ve soğutma sisteminin teorik ve deneysel olarak termal-ekonomik analizi için biri radyant (hibrit) duvar sistemi diğeri ısı pompası olmak üzere iki element içeren hibrit bir hidronik ısıtma sisteminin tüm konut ve ofis yapılarında kullanılabileceği şekilde tasarlanması ile sinerji yoluyla çok önemli bir enerji verimliliği elde edilip edilmeyeceğinin tespiti amacıyla bir ofis binasına uygulanmıştır. İlk maliyete rağmen, geleneksel HVAC sistemlerine kıyasla yeni bir iklimlendirme sistemi olan hava kaynaklı ısı pompası entegreli ısıtım panel duvar ısıtma-soğutma sisteminin daha yüksek konfor ve performansı uzun vadede daha ekonomik olarak sağlayacağı öngörülmektedir. Bunun için deneylerden alınan sonuçlar ile LCC analizleri ile bu hipotezimizin ispat edilmesi amaçlanmaktadır.

Hidronik radyant panel iklimlendirme sistemindeki tüm enerji harcayan bileşenlerinin aylık ve yıllık kullandığı enerji miktarı 1 yıl boyunca saatlik bazda alınacak ölçümlerle elde edilmiştir. Deneysel çalışma kısmında her bir komponentin giriş ve/veya çıkışında sıcaklık, debi, ısı akısı, harcanan enerji gibi gerekli parametrelerin elde edilmesi için doğru cihazların seçimi, sonrasında ölçüm için gerekli sayaç, temokupl ve datalogger cihazlarının bir adet bilgisayara bağlanarak verilerin bir yazılım arayüzü vasıtasıyla otomatik olarak kaydedilebileceği şekilde deney düzeneği kurulmuştur.

Doğrulama grafikleri için deneysel en az 3 günlük ölçümler kullanılmıştır. Sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalamadan sapmanın en az olduğu ardışık en soğuk günler tercih edilmiştir. Deney ve teorik modelden elde edilen sonuçlar ve enflasyon, birim enerji maliyeti, komponent alım, kurulum maliyeti ve iskonto gibi ekonomik parametreler kullanılarak hava kaynaklı ısı pompası entegresi ile performansı artarken enerji maliyeti azaltılacağı tahmin edilen bir hibrit radyant duvar panel iklimlendirme sistemi için geniş kapsamlı LCC analizi yapılmıştır.

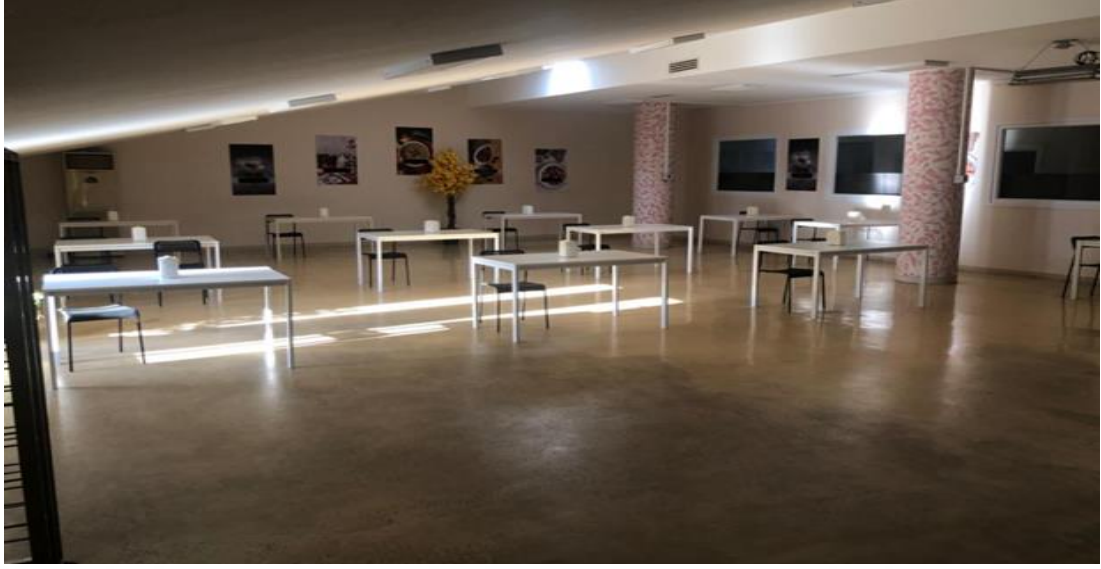
4.2. Bina Yerleşimi ve Mahal Listesi

Deney için kullanılan bina yaklaşık 780 m² lik bir alan üzerine 3 katlı olacak şekilde inşa edilmiştir. Binanın ilk katında 3 adet imalat atölyesi bulunmaktadır; ikinci katında kimya, ısı ve akışkan birimi laboratuvarları, numune üretim laboratuvarları ve seminer salonları yer almaktadır. En üst katta yönetici odaları, açık ofis, arşiv, depo, yemekhane ve bir imalat atölyesi mevcuttur. Çatıda ise ısı pompası ve diğer cihazların yer aldığı makineler ve taşınmaz havalandırma cihazları konumlandırılmıştır.



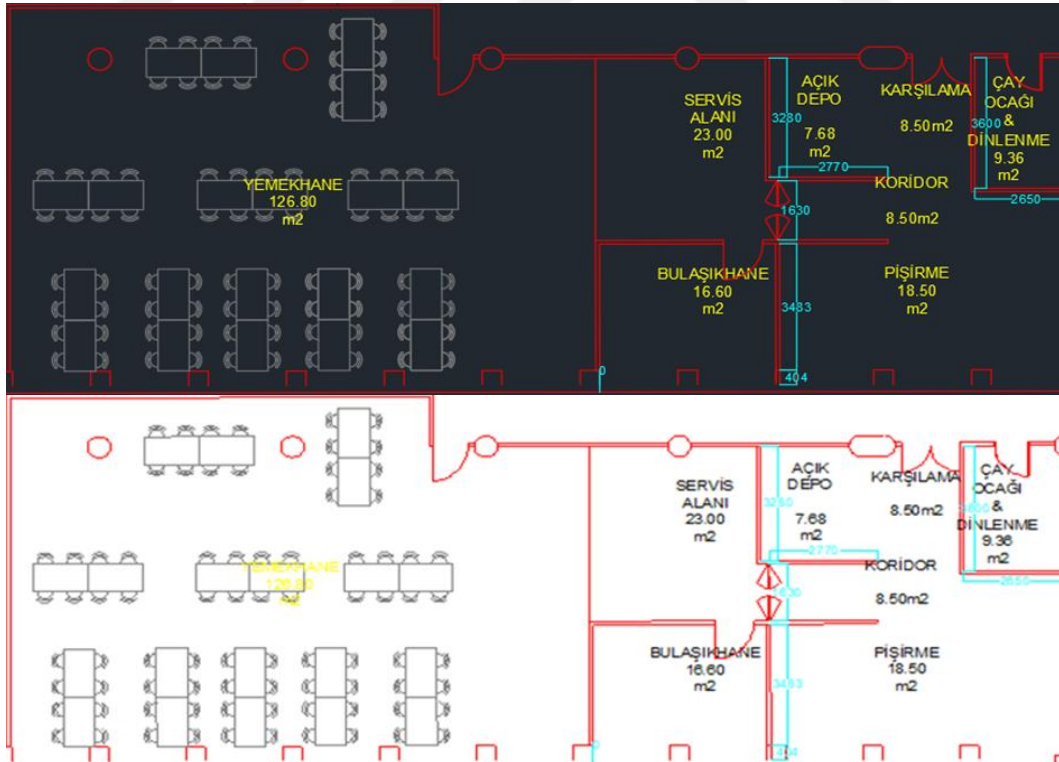
Şekil 4.1. Açık ofisten geniş açılı perspektifler

Yukarıdaki şekillerde açık ofis görünümü paylaşılmıştır. Ofis 138 m²'lik kullanım alanına sahiptir ve 40 m²'lik ofise açılan koridor mevcuttur. Ofis kapasitesi 40 kişiliktir.



Şekil 4.2. Yemekhaneden bir görünüm

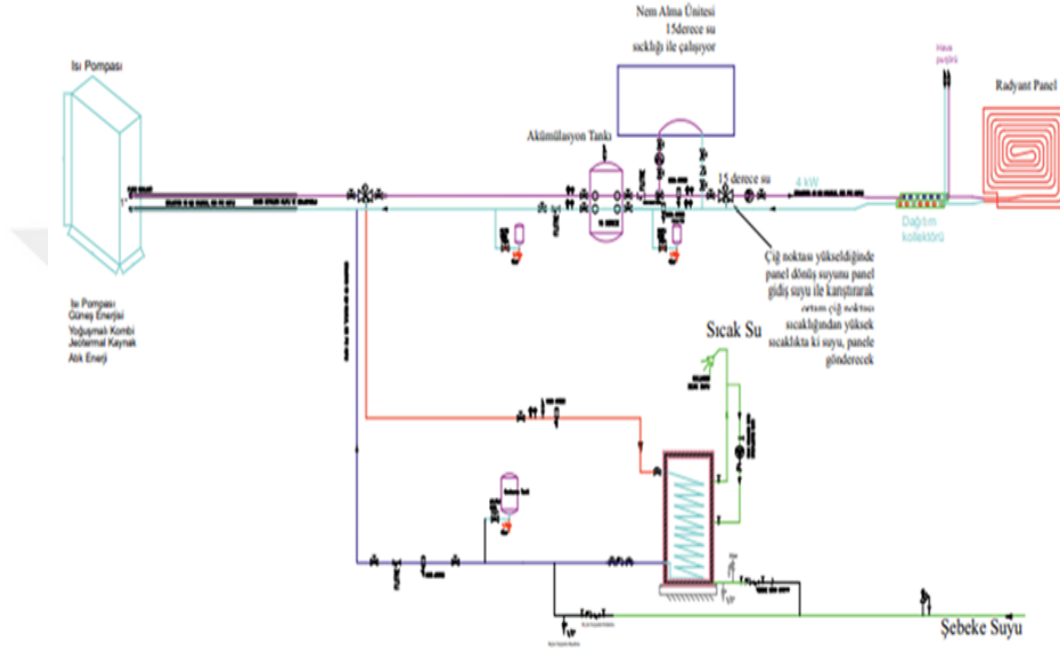
Şekil 4.2’de yemekhanenin bir fotoğrafı, Şekil 4.3’te teknik resmi paylaşılmıştır. Yemekhane 126,8 m²’dir ve 50- 60 kişilik kapasiteye sahiptir. Ayrıca mutfak bölümlerinden 23 m²’lik servis alanı ve 16,6 m²’lik bulaşıkhanesi 7,68 m² açık depoya, 8,50 m²’lik koridora, 18,50 m²’lik pişirme alanına bağlıdır.



Şekil 4.3. Yemekhanenin teknik resmi

4.3. Mekanik Sistem ve Bileşenler

Çatı katında bir adet makine odası bulunmaktadır ve bu odaya hibrit sistem taşınmaz cihazları yerleştirilmiştir. Odanın nem, aşırı soğuk ve aşırı sıcak havalara karşı içerisindeki tüm cihazları koruması için inşa edilmiştir. Makine dairesi içerisinde mevcut cihazlar ve bağlantı elemanları şöyle sıralanabilir: akümülayon tankı, kombiler, sirkülayon pompaları, genleşme tankı, otomasyon sistemi ve kollektörler.



Şekil 4.4. Radyant sistem tesisat görseli

Şekil 4.4'te gösterilen şema ile hibrit sistem tanımlanabilir. Hibrit sistem, iki ısı kaynağının entegre bir şekilde kullanılması olarak düşünülebilir. Bu figürde ısı kaynağı olarak ısı pompası ve ısı dağıtıcı olarak radyant sistemin kullanımı söz konusudur. Isı pompasında ısınan su akümülayon tankına gönderilerek orada depolanır ve pompalar sayesinde radyant sisteme aktarılır; dönüş yolunda ise radyant sistemde dolaştırılan su önce akümülayon tankına gelerek depolanır (bu süreçte sıcaklığı bir miktar stabilize edilir) ve ısı kaynağına gönderilerek ısınır. Böylelikle yapının ihtiyacı olan sıcak su döngüsü sağlanır. Isı pompasından elde edilen suyun bir kısmı ise şebeke suyuna bağlanarak sıcak su kullanımı için kullanılmaktadır. Hibrit sistemdeki elemanlardan kombi, genleşme tankı ve valfler sistemin sıcaklık ve basınç dengesini sağlamakta önemli rol oynamaktadır.

Sistemdeki cihazlar ve mekanik elemanlar şu şekilde sıralanabilir:

Kombi

Isı Pompası

Radyant Sistem

Akümülayon Tankı

Sirkülayon pompaları

Genleşme Tankı

Kollektörler



Şekil 4.5. Cihaz odasından bir tesisat görüntüsü

Şekil 4,5'te akümülayon tankı, 4 adet pompa ve genleşme tankı yer almaktadır. Tesisat boruları ise ısı kayıp kazancını önlemek için yalıtım malzemesi ile kaplanıp sabitlenmiştir. Tesisat borularının üzerinde göstergeler mevcuttur ve bu göstergeler su basıncını belirlemek için yerleştirilmiştir. Pompa giriş çıkışlarına ikişer adet, genleşme tankına ise iki adet eklenmiştir.



Şekil 4.6. Cihaz odasından bir tesisat görüntüsü

Şekil 4.6’da 2 adet kombi ve akümülayon tankı (turuncu renkli cihaz) yer almaktadır. Kombiye bağı vanalardan sonra boru bağılantıları yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Yalıtım malemesinin diğeri bir etkisi de ısı kayıp kazançlarındaki artışı önlediğı için cihazların daha sağılıklı ve verimli kullanılması sağılamasıdır.



Şekil 4.7. Göstergeler ve vana elemanları

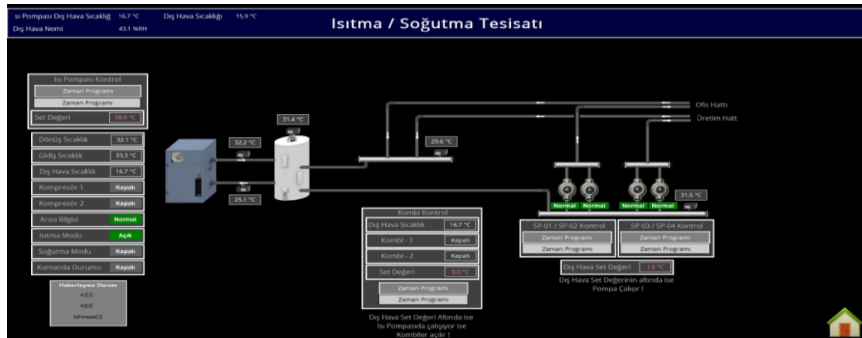
Şekil 4.7’ de belirtildiği gibi göstergeler mekaniktir ve kısılma vanalarının aralarına eklenmiştir. Bunun nedeni, her kısılma valfinin etkisini inceleyebilmek ve radyant sisteme giden suyun basınçlarını net bir şekilde görebilmektir.

Ölçüm için gerekli gerçek ölçekli deneysel kurulum için sayaç ve temokupl ve datalogger cihazlarının 1 adet bilgisayara bağlanarak verileri bir yazılım arayüzü vasıtasıyla otomatik olarak kaydedebilecek şekilde kurulmuştur. Yaşam döngü maliyeti hesaplaması aşamasında deney ve teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ve enflasyon, birim enerji maliyeti, komponent alım, kurulum maliyeti ve iskonto gibi ekonomik parametreler kullanılarak hava kaynaklı ısı pompası entegrasyonu ile performansı artarken enerji maliyeti azaltılacağı tahmin edilen hibrit bir radyant duvar panel iklimlendirme sistemi için geniş kapsamlı LCC analizi yapılmıştır.

Şekil 4.8-10’da gösterilen iklimlendirme sistemi kontrol ve takip yazılımı kullanılarak deneyler esnasında verilen devre şemalarındaki komponentlerin ve bunlara bağlı termostat, elektrik ve debi ölçerlerin kullanılması ile hem sıcaklık ve nem takip kayıtları hem de kullanılan enerji miktarlarının kayıtları gerçekleştirilmiştir. Böylece hem termal hem harcanan enerji miktarları ve maliyetleri tespit edilip hesaplanarak termo-ekonomik ölçümler gerçekleştirilmiştir.

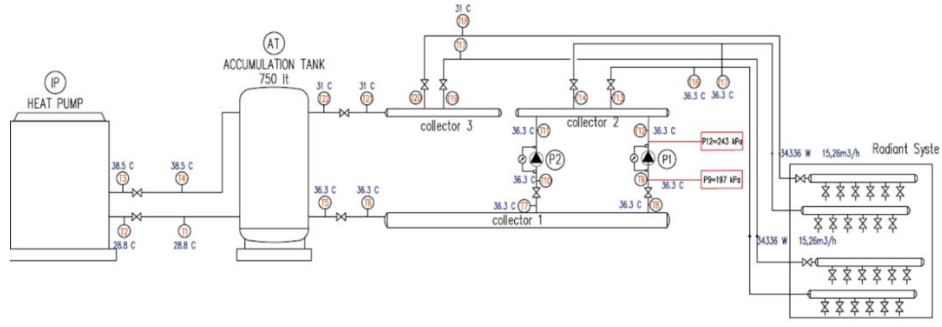


(a)

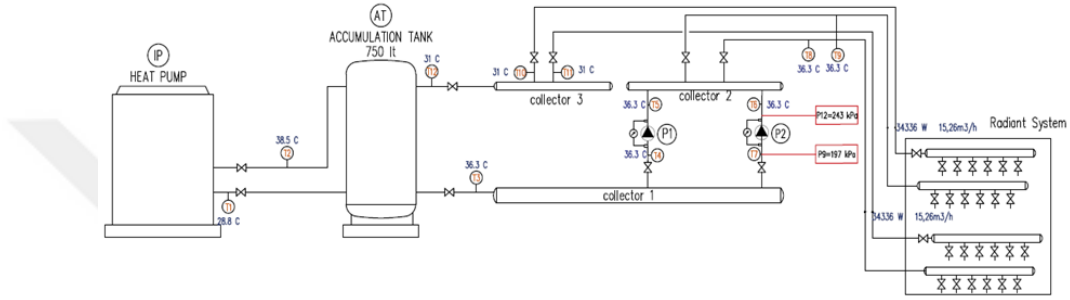


(b)

**Şekil 4.8. Hibrit radyant panel ısıtma soğutma sisteminin (a) fiziksel kurulumu
(b) devre şeması**



Şekil 4.9. İndirgenmemiş baz alınmış ısı pompası içeren sistem



Şekil 4.10. İndirgenmiş baz alınmış ısı pompası içeren sistem

Takip eden alt bölümlerde deneylerin yapılacağı ofis binasının ölçümler süresince ısıtılması ve soğutulmasında kullanılacak olan iklimlendirme sisteminde kullanılan ısıtma-soğutma sistemlerinin açıklamaları ve teknik özellikleri bulunmaktadır.

4.3.1. Klima Santrali (Air Handling Units)

ALKS 4050 model bir klima santrali tercih edilmiştir. Bu klima santralinde,

- Dişli mekanizmalı, aerodinamik kanatlı alüminyum profil mamul hava damperi
- Geriye eğik kanatlı fanlar
- Bilgisayar destekli ısıtıcı ve soğutucu
- Enjekte alüminyumdan mamul damla tutucular
- Su akış eğimli özel dizayn paslanmaz saç yoğunlaşma tavası ve toplu tip sifonu mevcuttur. Seçilen klima santrali sınıfı ve tipine ait hava debisi ve diğer teknik değerler Tabloda verilmektedir.

Tablo 4.1. Klima santrali unite seçimi ve serpantin yüzeyindeki hava hızlarına göre debi değerleri

Sınıf	Unite tipi	Panel kalınlığı (mm)	Hava debisi (m ³ /sa)	Serpantinli alın kesiti (m ²)	Serpantin yüzeyindeki hava hızları (m/s)				
					Hava debisi (m ³ /sa)				
					2	2,5	2,7	3	3,5
ALKS 4050	RE 035	40	4700	0,38	2,765	3,456	3,732	4,147	4,838
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	Fan tipi	Fan devri (d/d)	Maks. Fan devri (d/d)	Motor gücü (kW)	Maks. Akım (A)	Maks. Soğutma Kapasitesi (kW)	Çalışma sıcaklığı (°C)	Faz / Voltaj (V) / Frekans (Hz)	Motor devri (d/d)
860	NPL 355	2457	3825	2,2	5	29	-20 / 85	3 / 420 / 50	2840

Klima santralinde (Şekil 4.11) bulunan ısıtıcılar ve soğutucular, alüminyum lamelli, çelik kollektörlü, galvanizli sac çerçeveli olup dikişsiz bakır boru ve buharlı ve elektrikli olabilmektedirler. Boşaltma ve hava tahliye düzenleri bulunmaktadır. Klima santralinde ayrıca çift emişli santrifüj gövdesi ve çapraz akışlı plakalı (maks. çalışma sıcaklığı 200 °C), döner tamburlu (maks. çalışma sıcaklığı 80 °C) ve serpantinli (maks. çalışma sıcaklığı 120 °C) olmak üzere farklı tiplerde ısı geri kazanımları (eşanjörleri) mevcuttur. Bu deneyde döner tamburlu ısı kazanımlı klima santrali kullanılmaktadır. Isı geri kazanım santrali durum takip yazılımı ile yaz ve kış set sıcaklıkları ayarlanarak yaz ya da kış modu seçimiyle fanlardaki debi, dönüş ve üfleme sıcaklık ile dönüş ve üfleme nem değerleri takip edilebilmektedir. Aynı zamanda dış hava sıcaklığı ve nem değerleri de takip edilebilmektedir. Isıtıcı modülü 6kW kapasiteli elektrikli dir.



Şekil 4.11. Deneylerde kullanılan ısı geri kazanım santrali görseli

4.3.2. Hava Kaynaklı Isı Pompası

Deney için binanın iklimlendirilmesinde teknik özellikleri verilmiş olan Canovate marka (Air to water) A/W 75 E model hava kaynaklı ısı pompası (Şekil 4.12) kullanılmıştır. Isıtma modu için, dış ortam sıcaklığı 7°C , su çıkış sıcaklığı 35°C ; soğutma modu için, dış ortam sıcaklığı 35°C , su çıkış sıcaklığı 7°C 'dir. Verimlilik ve uygulanabilirlik bir arada 7°C 'ye kadar soğuk su üretebilir. Neme bağlı olarak dış hava sıcaklığı -20°C 'ye kadar düşen bölgelerde de çalışmaktadır. Opsiyonel olarak dış hava sıcaklığı -24°C 'ye kadar düşen bölgelerde de çalışmaktadır ve 80°C sıcak su üretilmektedir.



Şekil 4.12. Hava kaynaklı ısı pompası A/W 75 E

Isıtma durumundaki ısı pompası için ısı kapasitesi 80 kW, güç tüketimi 20,5 kW ve COP'si 3,90'dır. Pompanın soğutucu akışkanı olarak R 410 A akışkanı kullanılmıştır.

Soğutma durumundaki ısı pompasının kapasitesi 68,8 kW, güç tüketimi 21,2 kW, verim katsayısı ise 3,25 olarak tespit edilmiştir.

Su debisi 13,76 m³/h ve bağlantı çapı 3 inçtir. İç tesisatta 2 adet kompresör ve 4 adet fan bulunmaktadır.

Tablo 4.2. Geriye eğimli yuvarlak kanal fan teknik özellikleri

Model kodu	Debi (m ³ /sa)	Devir (d/d)	Koruma sınıfı	Voltaj (V)	Güç (W)	Frekans	Yalıtım sınıfı
MLKT 200-B	1000	2550	IP X2	230	110	50	CLF

Tablo 4.3. Hava kaynaklı ısı pompası teknik özellikleri

Sınıf	Unit e tipi	Performans (Isıtma)				Dış ortam hava (ısıtma) sıcaklığı ¹ (°C)	Volta j (V)	Maks. Basınç (Bar)
		Kapasite (kW)	Güç Tüketim i (kW)	COP verim katsayısı	Soğutucu akışkan			
Air to Water	A/W 75 E	70	16,1	3,90	R 407 C	-5 / 35	400	29
Su debisi (m ³ /sa)	Fanlar		Performans (Soğutma)			Dış ortam hava (ısıtma) sıcaklığı ¹ (°C)	Akım (A)	Maks. Başlama Akımı (A)
	Adet	Hava debisi (m ³ /sa)	Kapasite (kW)	Güç Tüketim i (kW)	EER verim katsayısı			
13.76	4	36000	50,1	21	3,25	15 / 40	30,5	63.5

4.3.3. Dış Ünite Isı Pompası Sistemi

Bu çalışmanın deneysel kurulumunda KXZ Serisi VRF Klima Sistemleri kullanılmaktadır ve teknik özellikleri verilmiştir. Böylece verimlilik ve çeşitlendirilmiş operasyonel kontroller sayesinde yüksek enerji tasarrufu sağlanması planlanmaktadır.

KXZ ısı pompası 2 borulu sistem yalnız ısıtma ya da yalnız soğutma gerektiren VRF uygulamaları için yüksek performans sunar; Geniş uygulama alanları için idealdir

- 29 iç ünite ve %130 kapasiteye kadar bağlantı imkânı.
- Yüksek verimlilik ile 3.9'e varan COP değerleri (Soğutmada)
- KXZ'da sadece DC inverter kompresör bulunur
- 1000 m'ye kadar toplam borulama ve 160 m maksimum boru uzunluğu imkânı sağlar

VRF sistem, yani Değişken Soğutucu Debili Sistem (Variable Refrigerant Flow), günümüz akıllı binalarının ihtiyacını karşılamak amacıyla bir dış ünite ile gaz

akış dağıtıcıları yardımıyla birden çok iç ünitenin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebildiği direkt genleşmeli klima sistemleridir. VRF klima sistemi ile bu deneysel çalışmada kurulumun ve ölçümlerin gerçekleşeceği ofis binasının bağımsız havalandırma uygulamalarında kullanılmıştır.

Tablo 4.4. VRF dış ünite ısı pompası sistemi teknik özellikleri

Sınıf	Unite tipi	Kapasite (HP)	Kompresör motor (kW)	Soğutma	Isıtma	Çekilen güç	
						(Soğutma) (kW)	(Isıtma) (kW)
KX VRF	FDC280KXZE1	10	4.76	28	31,5	7,24	7.28
Elektriksel özellikler				Soğutucu Akışkan Miktarı (R410 A) (kg)	Bağlanabilir iç ünite sayısı	EER	COP
Başlangıç iç akımı (A)	Güç tüketimi Soğutma / Isıtma (kW)	Çalışma Akımı Soğutma / Isıtma (A)	Güç Ünitesi Performans				
8	7,24 / 7,28	11,9 / 12,0	380-415V / 3N / 50-60Hz	11	24	3,87	4,33

Yüksek verim elde etmek için ısı değiştirici ve kompresördeki iyileştirmeler sonucunda, KXZ Serisi % 40 daha yüksek soğutma verimi (EER) ve yaklaşık % 8 daha yüksek ısıtma verimine (COP) sahip bir model tercih edilmiştir. Mitsubishi Heavy VRF Klima KXZ Serisi daha geniş bir çalışma sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Ayrıca her oda için gerçek ısı talebine dayalı tedarik kapasitesini optimize ederek daha fazla enerji tasarrufu sağlamakta olduğu öngörülmektedir. Sistemde bulunan kapasite kontrol yöntemi bireysel odalar ve kullanıcılar için enerji tasarrufu ve konfora katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

4.3.4. Yoğuşmalı Kombi

Kombinin (Şekil 4.16) asıl amacı ısı pompasının suyu ısıtmadaki performansının konvansiyonel bir parça olan kombi ile mukayesesinde kullanılacak oluşudur. Yakıtı doğalgazdır ve doğalgaz yanması sonucu çıkan enerjiyi suya aktarır. Tam yanma gerçekleşmesi durumu, 3-20 mbar arasında değişen gaz basınçlarında ve gaz kaynağına bağlı wobble sayısı değişikliklerinde olur. (Wobble sayısı: gaz ısıtma değerinin özgül ağırlığına oranıdır. Belirli bir açıklıktan belirli bir basınçta cihaza

verilecek ısı girdisinin ölçüsüdür. Gaz kaynağına göre bölgeden bölgeye değişiklik göstermektedir.)

Kombinin çalışacağı su basınçları 0,5-3 Bar arasındadır, bu değerlerin dışına çıkan basınçlarda kombi çalışmayı durdurarak cihazı korumaya alır. Kombi, bulunduğu bölgenin iklimine göre ayarlanarak verimli çalışma sağlanabilir. Su sirkülasyonu otomatik by-pass sistemi ile yapılır. Elektronik kartın manyetik dalgalardan korunmasını sağlayan bir EMC filtresi mevcuttur. Brülörde yanmayı denetleyen ve verimli hale getirilmesini sağlayan iyonizasyon elektrodu vardır.

Suyun borularda sıkışma yapmasını önlemek için pompa ve 3 yollu vana blokaj sistemi her 24 saatte 1 kez pompayı çalıştırır. Sistemi aşırı ısınmaya karşı koruyan emniyet termostatu, suyun sıcaklığı kaynama noktasına gelince sistemi çalıştırmayı durdurur. Cihaz içindeki diğer bir termostat ise limit termostattır ve suyun eşanjörden çıkış sıcaklığını 105 C ile sınırlandırır. Cihazın hava emiş emniyeti ile yanma sırasında yeterli hava emilmediğinde cihazı kapatıp korumaya alır.

Kombinin tesisat borusu bağlantı elemanları ölçüsü aşağıda verilmiştir:

Gaz bağlantı çapı: 3/4"

Isıtma giriş çapı : 3/4"

Isıtma dönüş çapı: 3/4"

Drenaj borusu çıkışı: 1/2 "

Soğuk suyun giriş çapı: 1/2"

Sıcak suyun çıkış çapı: 1/2"

Emniyet ventili çıkışı: 1/2"



Şekil 4.16. Yoğuşmalı kombi görselleri

Kombinin maksimum ısıtıcı gücü 24,10 kW iken minimum ısıtıcı gücü 4,15 kW 'tır. Kombinin farklı sıcaklıklar bandındaki ısıtıcı güçleri ise sıcaklık düşüşüne göre değişmektedir: 80/60°C sıcaklığında maksimum ve minimum ısıtıcı güçler 23,29 kW ve 4,10 kW 'tır; 50/30°C 'de ise maksimum ve minimum ısıtıcı güçler sırasıyla 24,72 kW ve 4,30 kW 'tır.

Isıtma anında 80/60°C sıcaklığında elde edilecek verim %97,82 ve 50/30°C' de ise %108,34 'tür. Kombinin genel çalışma sıcaklık aralığı 30 °C- 85 °C, çalışma basıncı 3 bar ve bu şartlarda çalıştırıldığında yoğunlaşan su miktarı ise 1,5 l/d ır. Kombinin genişleme tankı kapasitesi ise 7 litredir.

Tablo 4.5. Kullanım Suyu Özellikleri

Özellik	Değer
Maks. ısıtıcı güç	25,60 kW
Maks. su debisi	12 L/dak
Min. su debisi / $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$	2 L/dak
Çalışma sıcaklığı	30-65°C
Maks. su basıncı	8 bar
Min. su basıncı	0,2 bar
Ortl. baca sıcaklığı	55°C

Hava basınç sensörü ile ideal yanma için optimum hava miktarını ayarlayarak verimin o koşulda yüksek olması hedeflenmektedir. Otomatik kontrollü pompa, kolektördeki debi ve basıncı kontrol eder. Kombinin ısıtma metodu, suyun gizli ısıtısını da kullanarak çıkabileceği maksimum verimliliğe çıkabilmektedir. Bu gizli ısıtım daha fazla suyu ısıtmada kullanılabilir ve böylece yakıt kullanımı azalır. Kombi sıcaklık sensörleri, 0.5°C hassasiyette bir sıcak suyun kontrolünü sağlar. Yanmanın şartı olan gerekli hava miktarını ayarlamak için de sensörler bulunmaktadır, bu sensörler rüzgârlı havalarda karbonmonoksit zehirlenmelerine karşı da koruma sağlamış olur.

Otomatik su takviye sistemi, güvenilirliği artırırken su sızıntı detektörü kombinin su sızıntısı sırasında zarar görmesini engeller.

Çok soğuk havalarda pompa ve kombi donmaya karşı sürekli koruma altındadır.

Limit termostatu off iken sıcaklık aşırı arttığında fan çalışmaya başlar ve sıcaklığı 80°C'nin altına düşene kadar çalışmaya devam eder.

Kombi 24 saatten fazla çalışmadığında pompa sıkışmasının önüne geçebilmek için fan ve pompa 1 kez 30 saniye kadar çalışır. Kombin bulundğı ortama adaptasyon doğrudan dış hava sensörü ile sağlanır.

Sistemdeki hava giriş filtresi, hava emişi sırasında yabancı maddeler yüzünden oluşabilecek kararsız ve verimsiz yanma durumlarının önüne geçer.

Kombinin gaz sarfiyatını azaltacak yöndeki bir özelliğı de elektronik ateşlemeli olması ve pilot alevi olmadığı için ek gaz ihtiyacının olmamasıdır.

Isıl gücü 7 Kw ~ 30 Kw olan kombinin 80/60 °C' deki ısı gücü 6,8 ~ 29,4 Kw iken, 50°C - 30°C'deki ısı gücü ise 7,5 Kw ~ 32 Kw olarak belirlenmiştir. Evsel kullanım suyu üretimi (30°C sıcaklıkta) 17,6 Lt/dk'dır. En yüksek ısıtma basınç değeri 3 bar, kullanım suyu en yüksek basınç değeri ise 10 bardır. Güç tüketimi 130 W, çalışma anında gaz basınç değeri ise 20 mbar olarak tespit edilmiştir.

Kombinin elektrik beslemesi 230 V, 50 Hz iken gaz tüketim değeri maksimumda 3,214 m3/s, minimumda 0,750 m3/s olarak hesaplanmıştır.

Sistemdeki kombilerin çalışma sıcaklığı -10 C ile +10 C arasında iken 80 C, +10 C ve +20 C arasında 70 C dir.

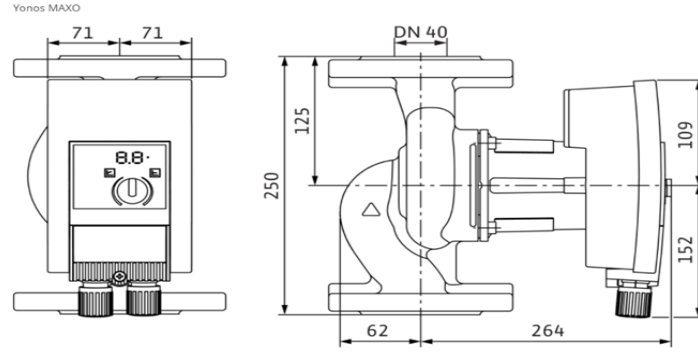
4.3.5. Sirkülasyon Pompaları

Sirkülasyon pompası kapalı bir sistemde suya gerekli ve yeterli basınç verilerek sistem içerisinde sirküle edilmesini sağlayan alçak basınçlarda çalışabilen elemanlardır. Genellikle ısıtma/soğutma sistemlerinde depodan aldıkları suyu sistem içindeki dirençleri aşarak ısı yayıcılarına dağıtma görevini üstlenmektedir.

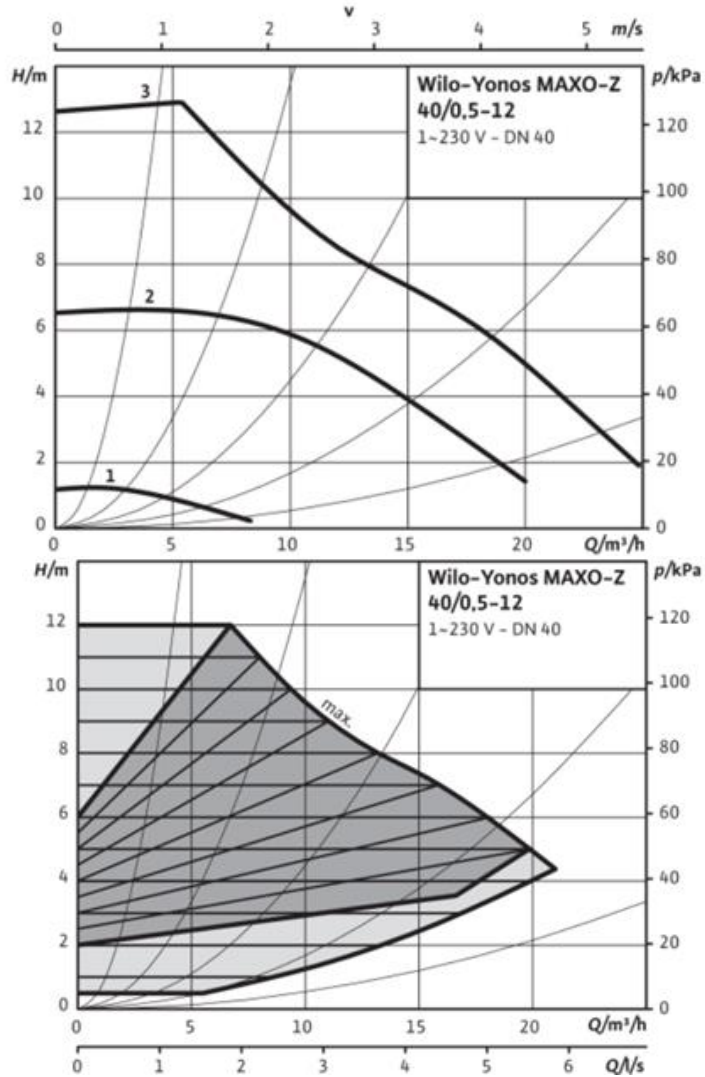
Kapalı ısıtma sistemlerinde kullanılan sirkülasyon pompaları santrifüj pompalarından biri sayılır. Küçük sistemlerde pompanın boyutu ve basma gücü de küçük iken, büyük tesislerde basma gücü artmaktadır. Pompa elektrik ünitesi ve pervanenin bulunduğu pompa gövdesinden oluşur. Pompalar sisteme boru flanşları sayesinde bağlanır.

Hibrit sistemde toplamda dört adet pompa bulunup bunların iki tanesi yedektir, gerekli pompalama gücünü sağlamak için ise değişimli olarak ikili çalıştırılmaktadırlar. Böylelikle elektrik tüketiminde azalma ve pompaların arızalanmasını önlemek hedeflenmektedir.

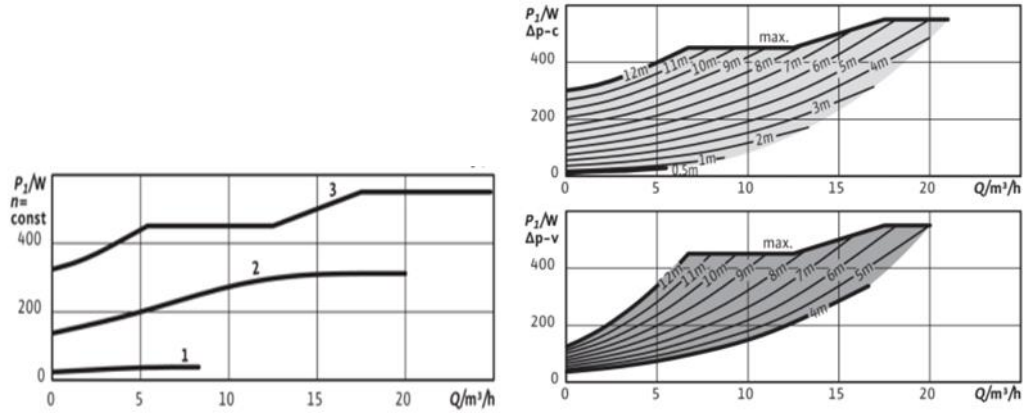
Çalışma kapsamında kullanılan pompaların özellikleri aşağıdaki Şekil 4.17-19 ve Tablo 4.6'Da verilmiştir. Sirküle edilen akışkanın sıcaklığı 20C ile 100 C arasında olup işletme basıncı 10 bar'dır, Devir hızı ayarı frekans konvertörü ile sağlanmaktadır.



Şekil 4.17. Pompanın yandan ve önden görünüşleri



Şekil 4.18. Pompa Basma Debisi ve Basma Yüksekliği



Şekil 4.19. Pompa minimum güç tüketimi-debi grafiği

Tablo 4.6. Sistemde kullanılan pompaların özellikleri

Özellik	Değer
Tip	Islak Rotorlu Pompa
Marka	Wilo
Çap	DN40
Anma Akımı	2,4A
Anma Gücü	0,45 kW
Maksimum Güç Tüketimi	550 W
Minimum Güç Tüketimi	15W
Basma Yüksekliği	13 m
Nominal Maksimum Çıkış Debisi	24,8 m ³ / sn
Devir Hız Aralığı (Min – Maks)	950 dev/dak – 4600 dev/dak
Enerji Verimliliği Endeksi	0.2

Sistemde kullanılan pompa, ıslak rotorlu pompa olarak adlandırılmaktadır. Bu pompalar genellikle sıcak sulu ısıtma sistemleri için tercih edilmektedir. Islak rotorlu pompalarda, basınçlandırılan suyun rotor içerisinden rotor çevresini dolaşmasında ve karbon yatakları ıslatmasına izin verilir. Bu pompa motorlarının üzerinde soğutmayı sağlayacak geniş kanatçıklar ve soğutma fanı bulunmamaktadır. Pompada salmastra bulunmaması da ek bakım maliyetini ortadan kaldırır.

4.3.6. Akümülayon Tankı

Aküümülayon tankları, ısı yayıcıları aktarılabacak suyu bünyesinde depolayıp gerektiğinde suyu ısıtan ve depolamaya yarayan cihazlardır. Isıtma işlemlerini gerçekleştirmek için yapılarında eşanjör bulunur, eğer ısı pompasından gelen sıcak su, yeterince sıcak değilse akümülayon tankı suyu ısıtarak depolamayı sağlar. Kış aylarında ısı yayıcılardan dönen soğumuş suyu ısıtmak için akümülayon tankı tercih edilmektedir çünkü akümülayon tankı yüksek su sıcaklığı için idealdir. Isı

kaynaklarından yeterince yüksek verim alabilen akümülayon tankları, sistemdeki ısı pompasının da verimini artırarak tasarruf sağlamaya yardımcı olur.



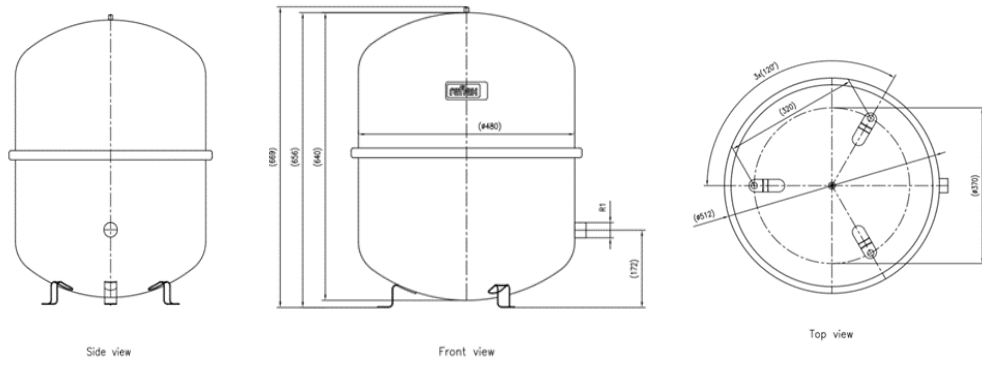
Şekil 4.20. Çift serpantinli akümülayon tankı

4.3.7. Genleşme Tankı

Genleşme tankı, (Şekil 4.21) kapalı ısıtma çevrimlerinde sıcaklıktan dolayı genleşen suyun sistem içerisinde buhar basıncı oluşturarak sistem elemanlarına zarar vermemesi için tasarlanmış bir cihazdır. Bu cihaz sistem içerisindeki basınç artışlarını gidererek sistemdeki suyun sızıntı yapmasını engeller. Ayrıca basıncı düşürdüğü için ısı artışını da kontrol altına almakta ve olası tehlikeleri gidermektedir. Tankın çalışma prensibi şu şekildedir: tankın içinde hareketli bir diyafram vardır ve sistemde basınç artışı olduğu zaman diyafram aşağı inerek hacim artırılır. Böylelikle tanktaki hava sıkışır ve su girişi için hacim artmış olur, hacim artışı ise basınç düşüşünü sağlar.

Genleşme tankları su, basınç, sulama, ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılır.

Hibrit sistemde kullanılan genleşme tankının nominal hacmi 100 lt, kullanılabilen maksimum hacmi 90 lt, optimum çalışma sıcaklığı 70°C, maksimum çalışma sıcaklığı 120°C, izin verilen en yüksek basıncı 6 bar ve gaz giriş basıncı ise 1,5 bar olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.21. Genleşme tankının teknik resmi (sol görünüş-ön görünüş- üst görünüş)

4.3.8. Dağıtım Sistemi ve Kolektörler

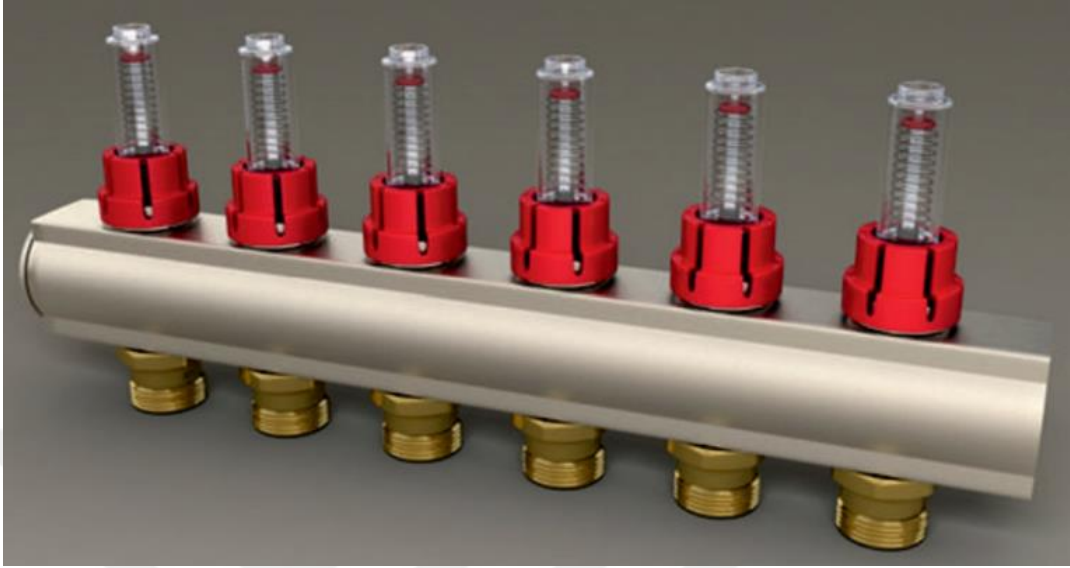
Kolektörler, ünitelerden gelen suyu döşenen borulara dağıtıp, borulardan toplanan suyu ise ünitelere gönderen tesisat elemanıdır. Amacı, gidiş ve dönüş suyunun debisini, basınçlarını ve ısılarını ayarlamaktır. Bu parametreler üzerinde rol oynadığı için radyant sistem elemanlarının ömrü ve enerji verimliliği üzerinde etkisi vardır.

Belirlenen bir bölgedeki kullanım koşulları düşünülerek boru döşeme ve gruplandırma işlemleri yapılır. Daha sonra seçilen başlangıç noktasına kolektör monte edilerek, boru ağzları kolektöre bağlanır. Seçilen kolektördeki gidiş ve dönüş vanaları, uygulanan bölgedeki boru grubu sayısı kadar olacaktır. Karışım vanası sayesinde ısı kaynağından istenilenden yüksek dereceli su geldiğinde de ortam sıcaklığının öngörülen değerin üzerine çıkması engellenmekte; karışım vanası vasıtası ile sıcak su tekrar ısı kaynağına gönderilerek hem ortam sıcaklık dengelenmekte hem de ısı kaynağının sık sık devreye girerek boş yere enerji sarf etmesi önlenmektedir. Pompa sayesinde, borularda devir daim yapan suyun basınç kayıpları telafi edilerek tüm gruplarda eşit debi sağlanarak homojen ısı dağılımı gerçekleştirilmektedir.

Elektrik otomasyonuna sahip kolektörler ortam istenilen sıcaklığa ulaştığında devri daimi kontrol eder, gerektiğinde akımı keser ve suyun sürekli ısıtılmasını durdurmuş olur; bu işlevde yine enerji tasarrufu ve ortam ısısının dengede tutulmasını sağlamaktadır. Enerji tasarrufu, güvenlik ve ısı konforu üzerinde etkilidir.

Kolektörlerde hassas ayar vanaları, debi reglajlı termostak vana başlığı, küresel kesme vanaları, prüjörlü/boşaltmalı kolektör uç parçası, ses yalıtım tamponlu galvanizli konsollar, debi ölçer, mevcuttur.

Kollektörlerin gidiş ve dönüş vanaları bulunmakta ve her iki vana tek boru hattını beslemektedir. Kollektörler çok girişli olabilmekte ve çoklu boru hatlarını tek materyalüzerinden kontrol edebilmektedir.



Şekil 4.22. Sistemde kullanılan kolektör ve özellikleri

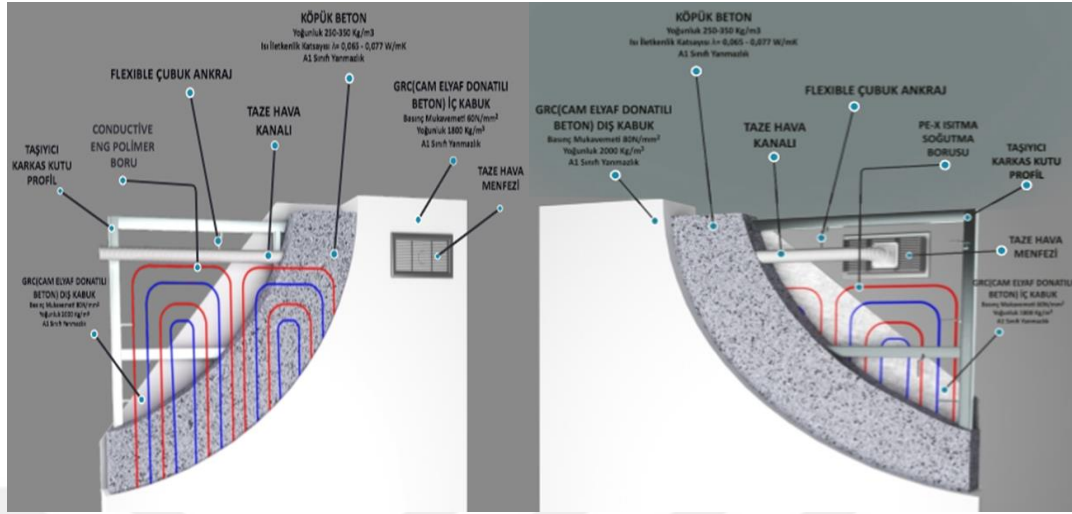
4.3.9. İklimlendirme Sistemi – Isı Yayıcı

En önemli özelliği ışınlama ile ısı transferinden yararlanarak ve bu sayede homojen ısı dağılımı sağlayarak termal konfor şartlarını yakalayan bir sistem olması sebebiyle günümüzde kullanımı artmaktadır. Termal konfor, insan fizyolojisinin gereksinimi olan optimum iklimlendirme koşullarının baz alınarak tasarlanmış bir ısıtma-soğutma sistemi olarak düşünülebilir. Sıcaklık farkları çok yüksek olmadığından ve konvansiyonel ısıtma sistemlerinde olduğu gibi yüksek sıcaklık bantlarında çalışmayan bu sistem yüzeylerde sıcak-soğuk durumu oluşturmaz. Konvansiyonel sistemler ısı transferini çoğunlukla taşınım ile gerçekleştirmektedir ancak radyant sistemin esas ısı transferi ile ısı transferine bağlıdır.

Sistemin çalışma sıcaklığı 16-35 °C olarak değişmektedir. Isıtma ve soğutma yapılmak istendiği zaman insan vücudunun sıcaklığına yakın değerler baz alındığı için sistemin çalışma sıcaklıkları da düşüktür.

Radyant sistemin ısı kaynağı olarak hava, su veya toprak kaynaklı olan ısı pompaları ile entegre bir şekilde çalışması düşük enerji maliyetine sebep olur. Isı pompalarının çalışma sıcaklıklarının birbirine yakın olması sayesinde pompa verimi

yükselir. Performans katsayısı (COP) pompa düşük sıcaklıklarda çalıştıkça ve suyun sıcaklık farkları düştükçe artmaktadır.



Şekil 4.23. Işınım panel duvar/yer/çatı iklimlendirme sisteminin kesit görünüşleri

Cihazın ömrünü de uzatan bu özellik sayesinde sürdürülebilirliğin önü açılmıştır. Işınımsal etkinin de hesaba katılarak ısıtma yapıldığı düşünülünce termal konforun 2-3 °C daha düşük/yüksek sıcaklıklarda sağlandığı ve binanın ısı kaybı/kazancı %15'e kadar azaldığı görülmüştür.

Yukarıda komponentleri ve tesisat şeması paylaşılan radyant panel iklimlendirme sistemi şu komponentlerden meydana gelmektedir:

Çelik karkas

Panel sistemi içinde kullanılan ve panelin dış yüklere karşı dayanımını sağlayan, binaya bağlanmasında kullanılan karkas sistemidir.

Gömülü bağlantılar (ankraj)

GRC malzemedeki bağlantı fonksiyonunu üzerine alan ankrajların taşıyıcılık kapasitesi, strüktürel analiz yapılmasını gerektirir. Özel olarak katmanlaştırılmış çelik parçalar (köşebentler, L-bağlantılar, yerçekimi bağlantıları), dübeller ve dişli soketler (somon-cıvata) ve katmanlaştırılmış çelik parçalardan oluşmaktadır.

Çimento

Beyaz Portland Çimentosu, yüksek mukavemet değerleri sebebiyle tercih edilmiştir. Yapısında yüksek oranda C3 A ve C3 S bileşiklerini içermesi sebebiyle hidrolik olarak çok reaktif bir bağlayıcıdır.

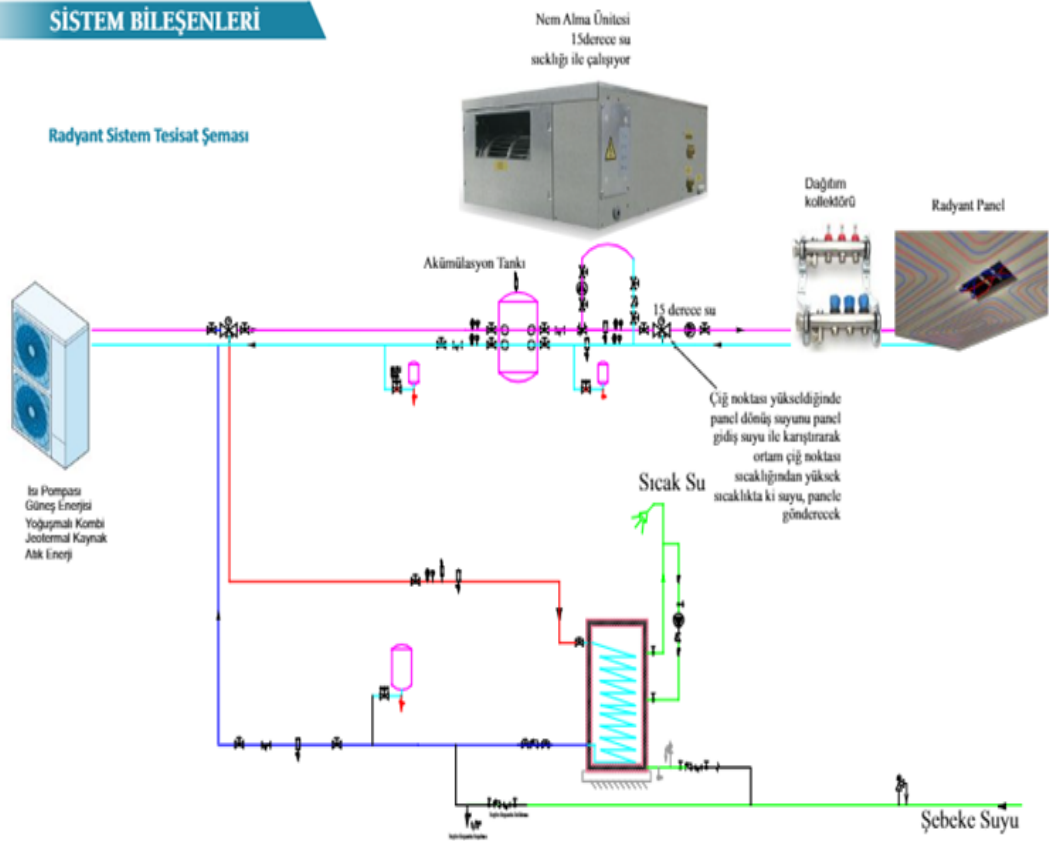
Cam elyaf

GRC (cam elyaf takviyeli beton), yüksek performanslı çimento bazlı bileşimin “alkali dayanımlı cam elyafı” ile takviye edilmesiyle oluşur. AR (alkali dayanımlı) cam elyafı üzerindeki zirkonyum (ZrO_2) sayesinde, çimento içeriğindeki alkali ve asit direncine karşı mukavemet sağlayarak çimento içerisinde erimeden donatı vazifesi görür.

GRC (Cam elyaflı beton) üretimi için kum ve diğer katkı maddeleri

İyi kalitede GRC üretimi için Kum / Agregas seçimi çok büyük önem taşır. Agreganın gerekli granülometrede sert, dayanıklı ve temiz olması gerekir. Beton karışımında, işlenebilirliği arttırmak, kür süresini azaltmak, yüksek mukavemet ve iyi bir beton kalitesi elde edebilmek amacıyla uygun bir süper akışkanlaştırıcı ve uygun katkıları kullanılmıştır.

SİSTEM BİLEŞENLERİ



Şekil 4.24. Isı Pompası Entegreli Radyant Sistem Tesisat Şeması

Duvarlarda Kullanılan radyant sistem şeması

Radyant sistem tesisat döşemesi duvarlara, tavana ve tabana (zemine) yapılabilir. Binada sistem boruları tavana ve yan duvarlara konumlandırılacak şekilde döşenmiştir.

Tablo 4.7. Kolektörlerin bulunduğu mahaller ve beslenen panel sayıları

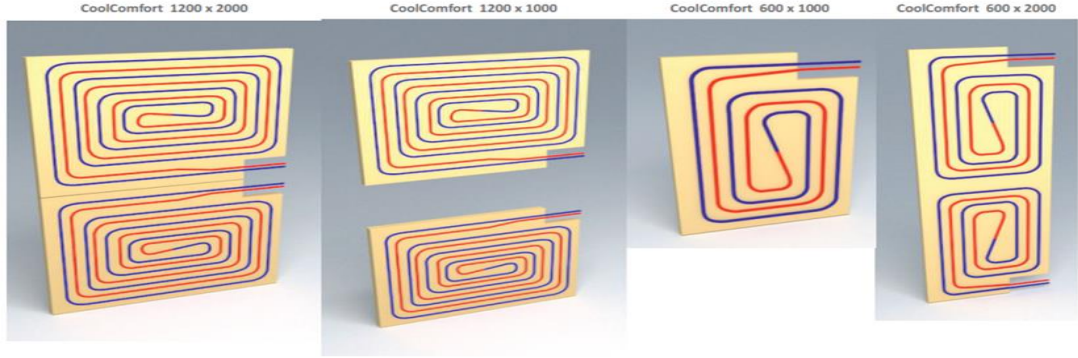
	Konum şartlı	Beslenen Panel Sayısı		
		Duvar	Tavan	Toplam
1. Kolektör	Büyük ofis Duvar+Tavan	17	33	50
2. Kolektör	Büyük ofis + Yönetici Ofisi 1, Duvar+Tavan	27	22	49
3. Kolektör	Yönetici Ofisi 2 Duvar+Tavan	5	15	20
4. Kolektör	Geniş Ofis Tavan+Duvar, Yemekhane Tavan	0	37	37
5. Kolektör	Geniş Ofis Tavanı, Yemekhane Tavanı, Yönetici Ofisi 3 Duvar+Tavanı	5	44	49
6. Kolektör	Yemekhane+Yönetici Ofisi 4 Duvar+Tavan	13	36	49
7. Kolektör	Yönetici Ofisi 5 Duvar+Tavan, Depo Tavanı	9	39	48
8. Kolektör	Yönetici Ofisi 4 Tavan, Koridor Tavan, Yemekhane Duvar+Tavan	9	51	60
9. Kolektör	Koridor Tavan + Depo Tavan	0	55	55
10. Kolektör	Mutfak+Bulaşık Makinesi+Çay Evi Tavanı	0	47	47
11. Kolektör	İmalathane Duvar+Tavan	6	25	31
12. Kolektör	İmalathane Duvar+Tavan	12	46	58
13. Kolektör	İmalathane Duvar+Tavan	12	36	48
14. Kolektör	İmalathane Duvar+Tavan	12	33	45
15. Kolektör	İmalathane Duvar+Tavan	12	30	42
16. Kolektör	İmalathane Duvar+Tavan	12	46	58
17. Kolektör	İmalathane Duvar+Tavan	12	34	46
18. Kolektör	İmalathane Duvar+Tavan	12	42	54
19. Kolektör	İmalathane Duvar+Tavan	24	21	45

Tablo 4.8. Toplam alan ve panel sayısı

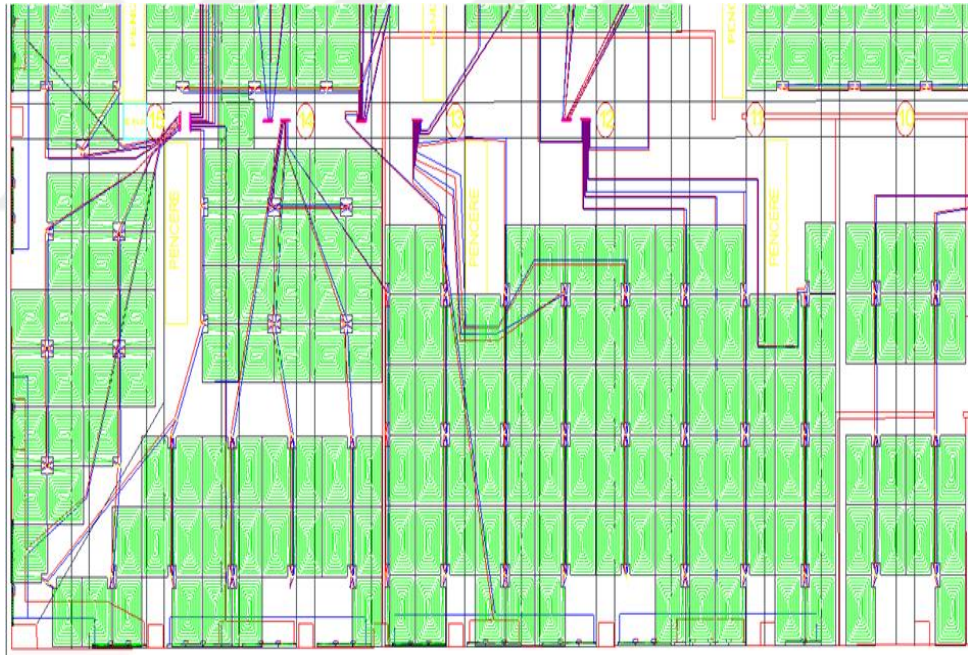
	1. Kat	2. Kat	3. Kat
Toplam ısıtma yüzey alanı, m ²	199	692	891
Toplam Borulama, m	2,985	10,380	13,365

Sistemde Kullanılan Panel Çeşitleri

Yüzeyden ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılmak için geliştirilmiş tavan panelleri 15 mm 'lik alçı levha içerisine gömülmüş 10 mm PEX-B borularından ve 30 mm yalıtım tabakasından oluşur. Farklı mahallerin ihtiyaçlarının giderilmesi açısından 4 farklı boyutta tasarlanmıştır.



Şekil 4.25. Radyant boruların yerleşim şekilleri



Şekil 4.26. Radyant sistemde kullanılan döşeme blokları için teknik resimden elde edilen bir görüntüsü

4.3.10. Ölçüm Cihazlar, Veri Toplama ve Kayıt Sistemi

Sistemde, mekanik sayaçlardan çok daha hassas olan ATLAS UKM-50 © ultrasonik kalorimetre kullanılmıştır (Şekil 4.26). UKM-50 0.15 m³/h kadar düşük debilerde ölçüm yapabilme özelliğine sahiptir ve lineer ölçüm yapabilen bir çift ısı sensörü yardımıyla minimum 0,1°C sıcaklık farkı ile ölçüme başlar. Atlas UKM-50,

debimetrenin akışkanın sıcaklığını okumasını ve kendisini buna göre ayarlamasını sağlayan en çok tercih edilen devre elemanları arasında yer alan 2 adet PT100 sıcaklık sensörü ile birlikte gelir. Kalorimetrenin tam özellikleri Tablo 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.27. Atlas UKM-50 ultrasonik akış ölçer ve kalorimetre

Tablo 4.9. Sistemde kullanılan pompaların özellikleri

Özellik	Değer
Marka Tipi	ATLAS UKM-50
Boyutlar	200 mm x 165 mm x 165 mm
Çap	DN50
Montaj yeri	Dönüş hattı
Minimum ölçüm başlangıç Δt	0.1 C
Sıcaklık ölçüm aralığı	5C - 90C
Maksimum uygulanabilir basınç (MAP)	16 bar (PN16)
Nominal debi (q_p)	15 m ³ / saat
Minimum debi (q_i)	0.15 m ³ / saat
Maksimum debi (q_s)	30 m ³ / saat
Doğruluk sınıfı	2
Güvenlik sınıfı	IP54
Isı Sensörü Tipi / Sayısı	PT100 / 2 adet

İşletme maliyetlerinin hesaplanmasında yapılan tüm ölçümlerde akış ve sıcaklık sensörlerinden alınan sinyaller bir veri toplama sistemine (DAS) gönderilmiştir. DAS tarafından sayısallaştırılan sinyaller ve ölçümler bir bilgisayara aktarılarak excel dosyasına kaydedilmiştir. Ortam havasını ve dış hava sıcaklıklarını ölçmek için gerekli mahallere ve ölçüm belirsizliklerini minimize edecek şekilde sıcaklık sensörleri yerleştirilmiştir. Su giriş ve çıkış sıcaklığı, akışla birlikte ölçülmüştür. Ölçülen giriş sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve su akışı değerleri gerekli ölçüm

ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Böylece LCC için gerekli maliyet hesaplamaları ilgili formüller üzerinden hesaplanmış ve LCC modeline dahil edilmiştir.



Şekil 4.28. Kullanılan kontrol sistemi ve güç analizörü

Ayrıca elektrik enerjisinin sürekli izlenmesini ve ölçüm verilerinin kaydedilmesini sağlayan ve bu verileri bir yazılım ve bağlantı ara yüzü aracılığıyla bilgisayara iletebilen bir enerji analizörü yardımıyla enerji tüketimi anlık ve toplamalar şeklinde elde edilmiştir. Enerji analizörünün kullanılmasının bir diğer nedeni ise, elektrik şebekesinde meydana gelebilecek ve tüm ekipmanlarda bulunan elektrikli cihazların ve elektronik kartların arızalanmasına neden olan anlık yükselme ve düşmeleri ölçmek ve kaydetmektir. Cihaz üzerinde bulunan çip ve flash bellek sayesinde ölçülen parametreler gerçek zamanlı olarak elde edilmiş ve Modbus TCP protokolü üzerinden bilgisayara aktarılmıştır.

5. SİSTEMİN YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYET ANALİZİ

Bu çalışmada, Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) çerçevesinde yeni bir hibrid radyant ısıtma sisteminin ekonomik ve ısı performansını değerlendirilmiştir. Verimlilik ve insan konforu ve sağlığı açısından sistem bileşenlerinin sahip olduğu önemli avantajlar ile ilgili olarak literatür taraması yapılmıştır. Günümüz dünyasında, enerji kaynaklarının verimli kullanımı her zamankinden daha önemli hale gelmiştir. Tarih boyunca büyüyen nüfusun ek yükünü karşılamak için birçok kaynak türü kullanılmıştır. Giderek artan bu talep karşısında çeşitli kaynakların sinerjik birleşimine duyulan ihtiyaç da artmıştır. Bu bağlamda, bu çalışmada hibrit bir hidronik radyant sisteminin tüm konut ve ofis yapılarında kullanılabileceği şekilde tasarlanarak sinerji yoluyla önemli bir enerji verimliliği elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu sistem, biri radyant (hibrit) duvar sistemi diğeri ısı pompası olmak üzere iki alt sisteme sahiptir. Hibrit sistem nihayetinde birlikte uyum ve sinerji yaratmak için bir ofis binasına uygulanmıştır. İlk maliyeti yüksek olmasına rağmen, geleneksel HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) sistemlerine kıyasla uzun vadede çok daha fazla termal konfor ve genel ekonomik verimlilik sağlayarak daha ekonomik bir seçenek sunacağı LCC analizi ile ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada yaşam döngüsü maliyeti ile optimum kurulum, işletme ve enerji maliyetleri ile ekonomik bir sistem olması için radyant panel ısıtma soğutma sisteminin teorik sayısal hesaplamalar ve deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre tasarımsal optimizasyonu ile geliştirmelerin yapılması amaçlanmıştır. Yeniden kullanma değeri (Glick vd., 2010), fosil yakıt kullanımı ve zararlı emisyon değerleri de (Kilkis, 2006) bu yaşam döngüsü maliyetine dahil edilmelidir. Bir ürünü elde etme maliyeti toplam sahip olma maliyetinin %30'u kadardır. Yüzde yetmişlik kısım işletme, bakım, yedek parça ve finans maliyetleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Gündoğdu, 2013). Buradan çıkarmamız gereken sonuç bir ürün veya bir sistem alırken, tesis ederken odaklanmamız gereken yer ilk kurulum maliyetinden ziyade kurulum sonrası, yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkacak giderler ve onların kestirilebilir olmasıdır. Ürün geliştiricilerinin birbirleriyle olan rekabetleri, üstünlükleri yaşam boyu maliyetlerin minimize edilmesi yönündedir. Bu noktada, bir ürünün yaşam boyu bakım ve işletme maliyetlerinin kontrolünde yaşam döngüsü maliyeti kavramı öne çıkmaktadır. Bir ürünü alırken kazanmak kavramı en ucuz olanı

almak değil toplam sahip olma maliyetlerini hesaba katarak en ekonomik olanı almak olarak düşünülmelidir. 2013 yılı Ağustos ayında Kamu İhale Kanununda yapılan değişiklikle ekonomik olarak en uygun teklifin belirlenmesinde; işletme ve bakım maliyeti, maliyet etkinliği, verimlilik, kalite ve teknik değer gibi fiyat dışındaki unsurlar dikkate alınarak ekonomik açıdan en avantajlı teklifin belirlenmesine izin verilmiştir (Akçay & Manisalı, 2007). Dolayısıyla; yapım ve mal alım ihalelerinde toplam elde etme maliyetinin dikkate alınması, en uygun teklifin belirlenmesinde idarelere ciddi bir kazanç sağlayacak ve uzun vadede şu ana kadar bu noktada pek fazla dikkate alınmayan kaynak israfının önüne geçilmesine ya da en azından azaltılmasına imkân verecektir. Bu çalışmada, radyant panel sistemi ısı pompası entegreli bir hibrit radyant panel iklimlendirme sistemine dönüştürülmüş ve gerekli tasarım modelleri ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sadece satın alma ve kurulum maliyeti yönüyle değil işletme esnasındaki termal ve ekonomik parametrelerin yılın en sıcak ve en soğuk dönemlerinde yapılan uzun süreli deneysel ölçümlerle bir yaşam döngüsü maliyeti (LCC) analizi gerçekleştirilmiştir.

5.1 Deneysel Ölçümler Öncesi Yapılan Çalışmalar

5.1.1. Kalibrasyon Çalışmaları

Ölçüm değerlerinin doğruluğunu temin etmek üzere, sistemde bulunan tüm ölçüm cihazları ve sensörler kalibre edilmiştir. Gerekli durumlarda kalibrasyon sertifikası bulunmayan ekipmanlar kalibrasyon ve test merkezlerine gönderilerek kalibre edilmeleri sağlanmıştır.

5.1.2. Ölçümlerin Tekrarlanabilirliği

Tekrarlanabilirlik bir ölçümün ya da araştırma sonucunun güvenilirliğini gösteren en önemli faktörlerden birisidir. Ölçüm ve deneylerin tekrarlanabilir olduğunu göstermek için aynı ölçüm ve deney genellikle çok kez tekrarlanarak elde edilen sonuçlar üzerinde istatistiksel bir analizin yapılması gerekir. Bunun için yapılan ölçümlerin ortalamaları, standart sapmaları ve standart sapmanın ölüm veya tekrar sayısının kareköküne oranı ile elde edilen ortalamanın standart sapmalarının hesaplanması ve değerlendirilmesi gereklidir (Harper, 1994). Çalışma kapsamında ölçümlerin tekrarlanabilirliği hem aynı koşullarda, aynı ortamda ve aynı ölçü aletlerini kullanılarak yapılan çoklu ölçümlerin yukarıda anılan istatistiki değerleri üzerinden

karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Yapılan ölçümlerin tekrarlanabilirlik değeri r , 0.92 olarak bulunmuştur ve tekrarlanabilirliğinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

5.1.3. Belirsizlik Analizi

Akış ve sıcaklığı ölçümleri tipik olarak çeşitli hatalar içermektedir. Sensörlerin ölçüm hassasiyetine ilişkin sınırlılıklar, veri toplama hataları, insan hataları, ortalama alma hatası gibi çeşitli hata faktörleri ölçüm değerlerinde belirsizliğe neden olmaktadır. Belirsizlikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilecek faktörlerden birisi de binanın güneş enerji kazanımına ilişkin ölçümlerin belirsizliğidir. Öte yandan türbülanslı koşullar altındaki akış kararsızlıkları, ortamdaki hava hareketlerinden veya aydınlatmalardan gelen ışıının sıcaklık üzerindeki etkilerinin belirsizliği önemli derecede etkili olabilmektedir. Bu tür belirsizliklerin etkilerini minimize etmek adına, sıcaklık sensörleri, pencerelere ve yapay ışık kaynaklarına çok yakın olmayacak şekilde ve dış duvardan yaklaşık 1 metre uzakta doğrudan güneş ışığı almayan gölge bir bölgede ve zeminden yaklaşık 1,5 metre yüksekliğe yerleştirilmiştir. Sistemde yer alan akış sensörlerinin ölçüm hassasiyetleri üretici tarafından belirtilen katalog değerleri çerçevesinde kabul edilmiştir.

Ölçüm belirsizliklerini minimize ettikten sonra elde edilen deneysel ölçümlerin ayrıca bir belirsizlik analizi yapılmamıştır. Çünkü bu deneysel ölçümler neticesinde elde edilen değerler çalışma konusu Yaşam Döngüsü Maliyet analizi içerisinde işletme maliyetleri kısmında görece düşük bir etkiye sahiptir, ayrıca bu maliyetlerin gelecekteki farklı zaman dilimlerinde gerçekleşmesi ve bugünkü değerlerine indirgenirken kullanılan iskonto oranı risk primi gibi bugünkü değer yaklaşımının doğasında bulunan hatalar yanında önemsiz kalacağı değerlendirilmektedir.

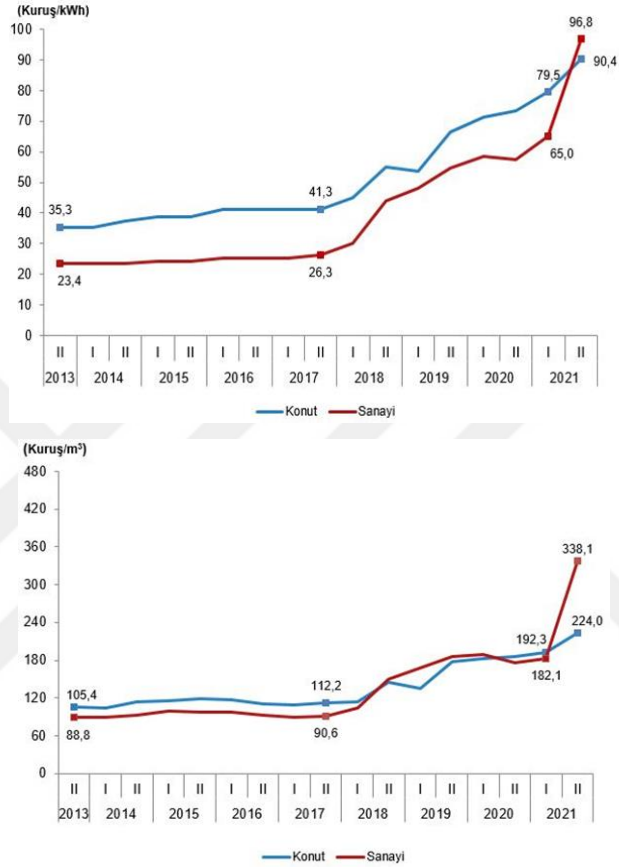
5.2. LCC Analizi Modeli

Çalışma kapsamında seçilen örnek ofis binasının ısıtma sistemi performansının verimli bir şekilde araştırılmasına ve kurulan hidronik radyant ısı sisteminin performansının gerçek sistem üzerinden değerlendirilerek Microsoft Excel’de oluşturulan bir model kullanılarak yaşam döngüsü maliyet analizi gerçekleştirilmiştir.

LCC analizi, temel verilerin girilmesi, bileşen verilerinin girilmesi, işletme verilerinin girilmesi, performans analizi ve karşılaştırma gibi adımların titiz bir şekilde yapılması ile sonuçlandırılmıştır.

5.2.1. Temel Veriler

Temel veriler, örnek ofis binası hakkındaki ısıtma yükü ve enerji kaynağı maliyeti gibi genel girdi verilerini içermektedir. Bu veriler karşılaştırması yapılan gaz yakıtlı kazan sistemi ve hava kaynaklı ısı pompası entegreli hidronik radyant ısıtma sisteminin işletme maliyetleri ve performans hesaplamalarında kullanılmıştır.



Şekil 5.1. 2013-2021 yılları arasında enerji kaynaklarının birim fiyatları

TÜİK verilerine göre, konut ve sanayi tüketiminde elektrik birim fiyatlarının değişimi görülmektedir. 2013-2018 yılları arasındaki dönemlerde nispeten yatay seyreden fiyatlar, küresel enerji piyasalarındaki dalgalanmalar ve döviz kurunda yaşanan hareketlilik nedene ile önemli bir artış göstermiştir.

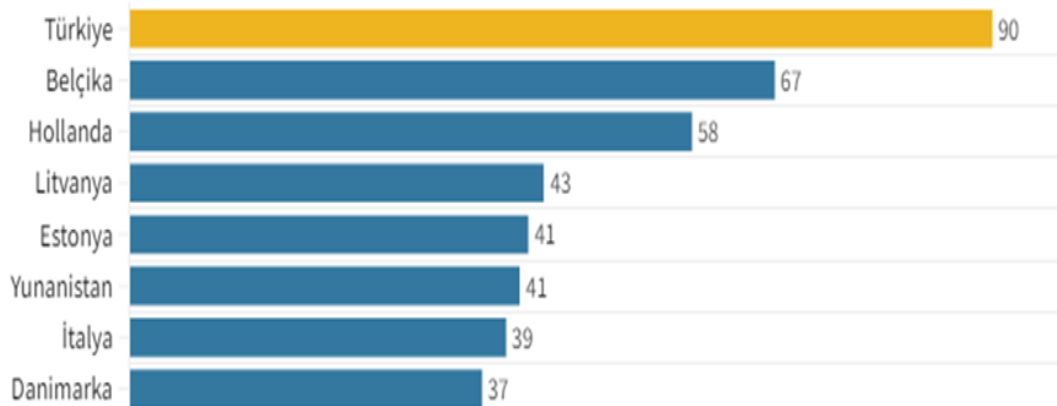
Tablo 5.1. Enerji ortalama birim fiyatlarının 2021 Temmuz-Aralık döneminde değişimi

(Kuruş/kWh)					
	2020		2021		Bir önceki döneme göre değişim (%)
	I. Dönem	II. Dönem	I. Dönem	II. Dönem	
Sanayi	58,6	57,3	65,0	96,8	48,9
Konut	71,2	73,5	79,5	90,4	13,7
Elektrik ortalama birim fiyatı; sanayi ve konut tüketicilerinin altı aylık dönemde, tüm vergiler dahil olmak üzere, 1 kWh elektrik için ödediği ortalama değerdir.					

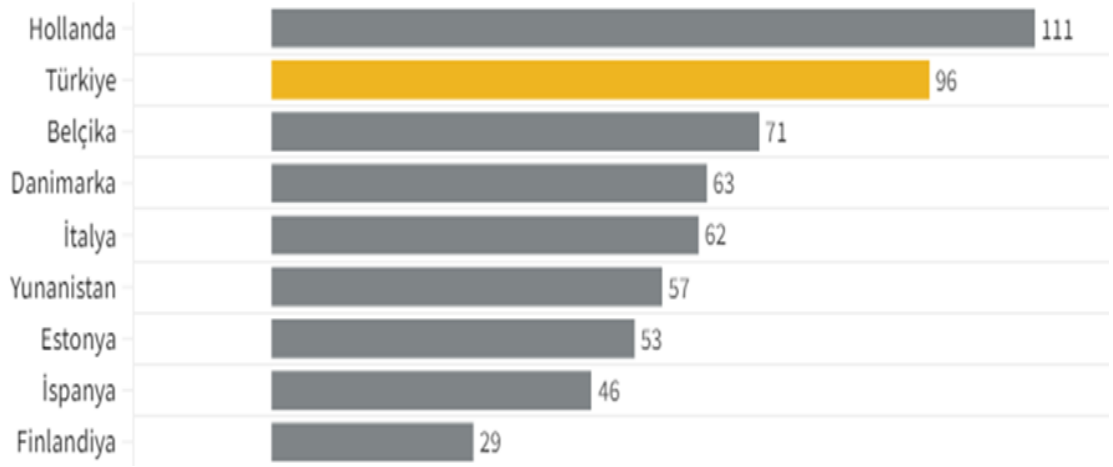
(Kuruş/m ³)					
	2020		2021		Bir önceki döneme göre değişim (%)
	I. Dönem	II. Dönem	I. Dönem	II. Dönem	
Sanayi	189,0	175,5	182,1	338,1	85,7
Konut	182,6	186,2	192,3	224,0	16,5
Doğal gaz ortalama birim fiyatı; sanayi ve konut tüketicilerinin, tüm vergiler dahil olmak üzere, altı aylık dönemde 1 m ³ doğal gaz için ödediği ortalama değerdir.					

Görüldüğü üzere, giriş verileri, bir çalışma yılı bazında verilmekle birlikte talepler ve birim maliyetler yılın belirli dönemlerinde diğer dönemlere göre önemli ölçüde dalgalanabilmektedir. Bu nedenle, daha gerçekçi bir analiz sonucu elde edebilmek için kullanılabilir olduğu durumlarda aylık değerlerin ayrı ayrı toplamaları yıllık giriş olarak kullanılmaktadır.

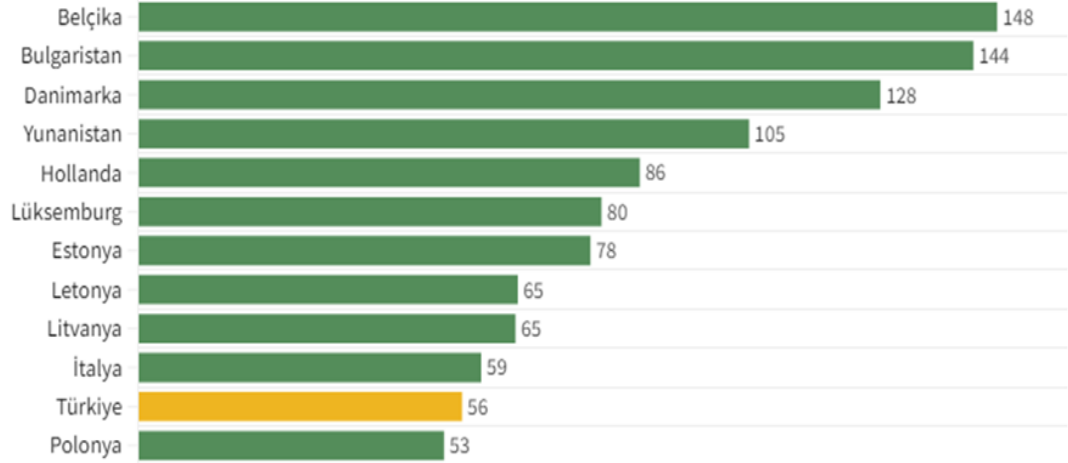
Yıllık enerji enflasyonu (Ocak 2022)



Elektrikte yıllık enflasyon (Ocak 2022)



Yıllık doğal gaz enflasyonu (Ocak 2022)



Küresel enerji krizinin de etkisi ile Ocak 2022 itibari ile Türkiye’de yıllık bazda elektrik enflasyonu %90, doğalgaz enflasyonu %56, enerji enflasyonu ise %111 olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, elektrikli ısıtma sistemlerinden kaynaklanan yük artışının üretim ve dağıtım maliyetlerini daha da artırması muhtemeldir. Ayrıca, artan akaryakıt maliyetlerinin, elektrik yükü artışının devam etmesini kaçınılmaz kılmaktadır.

Tablo 5.2. Temel veri girişinde enerji kaynağı maliyetleri

Tüketici	Enerji Kaynağı	
	Elektrik (Kr/kWh)	Doğalgaz (Kr/kWh*)
Konut	90,4	21,05
Ticari	96,8	31,77

*1 m³ = 10,64 kWh kabul edilmiştir.

Buna göre enerji kaynaklarının birim fiyatları 2021 yılının 2. dönemi için yukarıdaki tabloda verilmiştir. İşletme maliyetlerinin hesaplanmasında bu veriler dikkate alınmıştır.

5.2.2. Bileşen Verileri

Bileşen verileri, sistemin oluşturan her türlü malzeme, ekipman ve yan sistemlerin sermaye maliyetlerinden ve yine bu sistemlerin periyodik bakım ve servis maliyetlerinden oluşmaktadır. Ekipman sermaye maliyetleri LCC hesaplamalarında doğrudan kullanılmaktadır. Isı pompası entegreli hidronik randyant ısıtma sistemi için bileşen verileri modül bazında elde edilmiş ve hesaplanmıştır. İlk yatırım maliyeti kapsamında değerlendirilen sermaye maliyetleri, satın alma, nakliye ve kurulum ve işçilik maliyetleri gibi alt bileşenlere sahiptir. Tüm maliyet bileşenlerinin toplamı, LCC analizlerinde toplam yatırım maliyeti olarak kullanılmıştır.

LCC hesaplamalarında ayrı bir parametre olarak alınan hizmet maliyetleri ise yıllık ve dönemsel maliyetler olarak gruplandırılmıştır. Arıza onarım ve düzenli bakım maliyetlerinden oluşan yıllık tahmini bir toplam hizmet maliyetinin elde edilmesinde servis ve bakım prosedürleri ve ilgili maliyetleri yetkili servis ve teknisyenlerden faydalanılmıştır.

Bu kapsamda bileşen verileri aşağıdaki tablolarda (Tablo 5.3-5.4-5.5) verildiği gibidir.

Tablo 5.3. Isı pompası, klima ve havalandırma sistemlerine ilişkin veriler

Açıklama	Miktar	Birim	Birim fiyat	İşçilik Birim Fiyat	Toplam
Nem Alma Ünitesi ve Klima Santrali	1	ad	56.196 ₺	1.500,00 ₺	57.697,00 ₺
Isı Pompası	1	ad	46.729,3 ₺	2.500,00 ₺	49.230,30 ₺
Klima santrali montajı	1	ad		2.500,00 ₺	2.500,00 ₺
Dikdörtgen havalandırma kanalı					
0,60 mm	50	m ²	28,00 ₺	12,00 ₺	2.000,00 ₺
0,75 mm	40	m ²	30,00 ₺	12,00 ₺	1.680,00 ₺
Dairesel havalandırma kanalı					
Ø 300 mm	24	m	46,40 ₺	12,00 ₺	1.401,60 ₺
Ø 350 mm	24	m	55,10 ₺	12,00 ₺	1.610,40 ₺
Ø 400 mm	20	m	63,80 ₺	12,00 ₺	1.516,00 ₺
Dairesel havalandırma kanalı montaj ekipmanları					
Ø 300 mm kapak	4	ad	21,75 ₺	12,00 ₺	135,00 ₺

Ø 300 mm kelepçe	8	ad	23,20 ₺	6,00 ₺	233,60 ₺
Ø 350 mm kelepçe	8	ad	27,84 ₺	6,00 ₺	270,72 ₺
Ø 400 mm kelepçe	8	ad	31,32 ₺	6,00 ₺	298,56 ₺
Ø 300 mm manşon	4	ad	22,33 ₺	12,00 ₺	137,32 ₺
Ø 350 mm manşon	4	ad	23,78 ₺	12,00 ₺	143,12 ₺
Ø 400 mm manşon	4	ad	29,29 ₺	12,00 ₺	165,16 ₺
Ø 350-Ø 300 mm redüksiyon	4	ad	40,02 ₺	12,00 ₺	208,08 ₺
Ø 400-Ø 350 mm redüksiyon	4	ad	44,66 ₺	12,00 ₺	226,64 ₺
Ø 450-Ø 400-Ø 400 mm te	1	ad	121,80 ₺	12,00 ₺	133,80 ₺
Dikdörtgen kanal ısı izolasyonu	200	m²	16,00 ₺	8,00 ₺	4.800,00 ₺
Dikdörtgen kanal gofraj yapılması	200	m²	64,00 ₺	12,00 ₺	15.200,00 ₺
Esnek bağlantı malzemesi temin ve montajı	20	m	24,00 ₺	12,00 ₺	720,00 ₺
3'lü Jet nozul grubu	24	grup	285,00 ₺	75,00 ₺	8.640,00 ₺
Emiş menfezi					
800x800 (izoeli plenum kutulu)	2	ad	102,00 ₺	50,00 ₺	304,00 ₺
Volum damper Ø 400 mm	4	ad	72,00 ₺	25,00 ₺	388,00 ₺
Motor uyumlu damper ve yay geri dönüşlü damper motoru					
1000x500	2	ad	1.216,00 ₺	100,00 ₺	2.632,00 ₺
Vinç bedeli	1	grup	3.000,00 ₺	1.000,00 ₺	4.000,00 ₺
Devreye alma	1	grup	1.000,00 ₺	500,00 ₺	1.500,00 ₺
2 borulu kasetli döşeme tipi fancoil	1	ad	1.580,00 ₺	300,00 ₺	1.880,00 ₺
Akümülayşon tankı*	1	ad	2.500,00 ₺	2.500,00 ₺	5.000,00 ₺
Büzüşme tankı*	1	ad	342,00 ₺	500,00 ₺	842,00 ₺
Emniyet ventili	1	ad	100,00 ₺	50,00 ₺	150,00 ₺
Frekans konvertörlü sirkülasyon pompası*	3	ad	1.744,00 ₺	350,00 ₺	6.282,00 ₺
Sirkülasyon pompası*	1	ad	968,00 ₺	300,00 ₺	1.268,00 ₺
4" Kollektör	18	m	300,00 ₺	150,00 ₺	8.100,00 ₺
Termometre	2	ad	24,00 ₺	20,00 ₺	88,00 ₺
Manometre	2	ad	22,00 ₺	20,00 ₺	84,00 ₺
Otomatik purjör	6	ad	25,00 ₺	20,00 ₺	270,00 ₺
1/2"	6	ad	8,00 ₺	25,00 ₺	198,00 ₺
1"	29	ad	18,00 ₺	30,00 ₺	1.392,00 ₺
11/4"	10	ad	34,00 ₺	35,00 ₺	690,00 ₺
11/2"	6	ad	38,00 ₺	40,00 ₺	468,00 ₺
Kelebek vana 21/2"	6	ad	235,00 ₺	50,00 ₺	1.710,00 ₺
Çekvalf (dikey tip) 1"	1	ad	12,00 ₺	30,00 ₺	42,00 ₺
Çekvalf (dikey tip) 11/4"	5	ad	16,00 ₺	35,00 ₺	255,00 ₺
Çekvalf (dikey tip) 11/2"	3	ad	24,00 ₺	40,00 ₺	192,00 ₺
Çekvalf (dikey tip) 1"	1	ad	12,00 ₺	30,00 ₺	42,00 ₺
Çekvalf (dikey tip) 11/4"	5	ad	18,00 ₺	35,00 ₺	265,00 ₺
Fan coil bağlantı flexi 3/4"- 40 cm	2	ad	30,00 ₺	30,00 ₺	120,00 ₺
Soğutma kollektörü montaj işleri	10	ad		250,00 ₺	2.500,00 ₺
1" 2 yollu motorlu vana ve motoru	11	ad	810,00 ₺	80,00 ₺	9.790,00 ₺
1" Dikişli siyah borular	54	m	5,28 ₺	10,00 ₺	825,12 ₺
11/4" Dikişli siyah borular	36	m	7,20 ₺	13,00 ₺	727,20 ₺
11/2" Dikişli siyah borular	48	m	8,40 ₺	13,00 ₺	1.027,20 ₺
2" Dikişli siyah borular	24	m	12,00 ₺	13,00 ₺	600,00 ₺
21/2" Dikişli siyah borular	30	m	14,80 ₺	13,00 ₺	834,00 ₺
Boru boyanması	192	m	5,00 ₺	5,00 ₺	1.920,00 ₺
Boru izolasyonları	192	m	10,00 ₺	5,00 ₺	2.780,00 ₺
Devreye alma	1	grup	2.500,00 ₺	2.500,00 ₺	5.000,00 ₺
11/4" Kalorimetre	5	ad	3.000,00 ₺	50,00 ₺	15.250,00 ₺
Otomasyona uyumlu elektrik sayacı	5	ad	2.752,00 ₺	80,00 ₺	14.160,00 ₺
Toplam					242.522,82 ₺

Tablo 5.4. Hidronik radyant ısıtma sistemlerine ilişkin veriler

Bileşen	Miktar	Birim	Temel Maliyet	Sermaye Maliyeti
Yoğuşmalı kombi	1	lot	20700	20700
Kombi borulaması ve müştemilatları	2	adet	1300	2600
Muhafaza boruları	30	adet	47	1410
Bağlantılar	2	adet	100	200
Baca imalatları	1	adet	3700	7400
Kontrol paneli	1	adet	3700	3700
Birincil borular, pompalar ve eklentiler	2	adet	9700	19400
İkincil pompalar	2	adet	4700	9400
İkincil borular ve ek parçalar (makine dairesi)	1	lot	13800	13800
Hidronik boru devresi	1	lot	52000	52000
Radyant ısı bölgesi vanaları ve manifoldları	13	adet	1300	16900
Radyant döşeme boruları	8	m	72	576
HRV ısıtma bobin bransman hattı	1	lot	9200	9200
Hava fanı ısıtma bobini bransman hattı	1	lot	9200	9200
Sıcak su pompa ve boru tesisatı	2	adet	4800	9600
Testler, ölçümler ve işletmeye alma	1	kalem	22000	22000
Kontrol sistemi	1	kalem	25000	25000
Genel giderler ve yüklenici kar payı		yüzde	25%	25675
Değişken piyasa koşulları ve hesap hata payı		yüzde	15%	12865
Toplam				262326

Örnek binada yer alan mevcut ısıtma gaz yakıtlı ısıtma sistemine ilişkin veriler aşağıdaki tablodaki gibidir.

Tablo 5.5. Gaz yakıtlı ısıtma sistemine ilişkin veriler

Bileşen	Miktar	Birim	Temel Maliyet	Sermaye Maliyeti
Yoğuşmalı kombi 120 kW	1	adet	23550	23550
Kombi borulaması ve müştemilatları	650	m	120	78000
Radyatörler	125	m	800	100000
Baca imalatları	1	adet	17400	17400
Toplam				218950

Ayrıca sistem bileşenlerinin sistemin yaşam döngüsünün sonunda bir artık değeri olması durumunda bu değerleri dikkate alarak elde edilen ve LCC analizinde kullanılan artık değer de bileşen verilerinden faydalanarak türetilmektedir.

5.2.3. İşletme Verileri

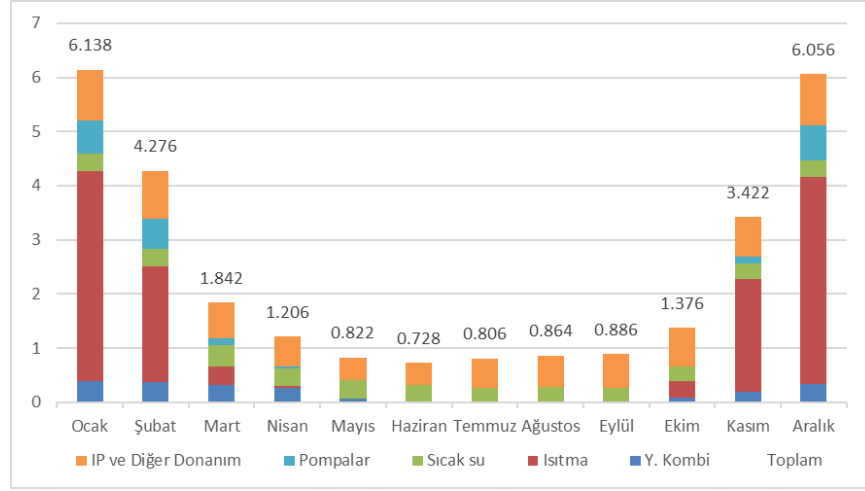
Bir sistem çözümünün teknik performansı, ısıtma taleplerinin yerel koşulları ve bölgesel iklimi de hesaba katarak bir yılı için hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar LCC analizi dışında, benzer sistemlerin analiz verileri ve katalog verileri üzerinden mühendislik hesaplamaları ile elde edilebileceği gibi, yıllık olarak yapılan tam zamanlı ölçüm değerlerine de dayanabilir.

İşletme verilerinin aylık değerler olarak elde edilmesi enerji tüketiminde ve birim enerji maliyetinde meydana gelebilecek anlık ve dönemsel periyodik dalgalanmaların etkilerinin toplam işletme maliyeti üzerindeki etkilerini daha iyi yansıtılmasını sağlar. Böylece, toplam yıllık işletme maliyetlerinin doğru tahmin edilmesi ve LCC analizinin daha gerçekçi ve doğru sonuçlar vermesi sağlanır. Yıllık enerji tüketimi hesaplandıktan sonra, enerji maliyetleri ile çarpılmak suretiyle ortalama yıllık işletme maliyetleri hesaplanır ve LCC hesaplamalarına dahil edilir.

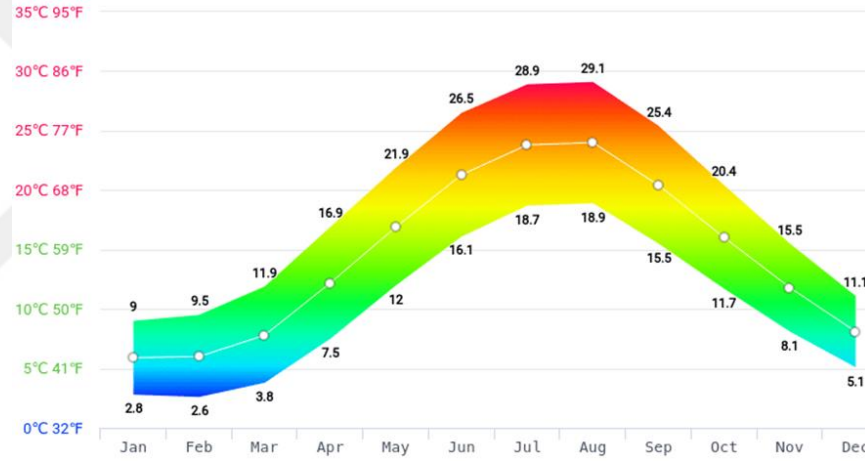
Tablo 5.6. İstanbul ili genelinde hava kaynaklı ısı pompası sisteminin aylık enerji tüketim değerleri (10^3 kWh)

Sistem	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
Y. Kombi	0,39	0,37	0,32	0,27	0,06	-	-	-	-	0,09	0,19	0,34	0,62
Isıtma	3,87	2,14	0,34	0,02	0	0	0	0	0,02	0,29	2,09	3,82	12,59
Sıcak su	0,334	0,326	0,388	0,336	0,338	0,308	0,262	0,28	0,246	0,272	0,282	0,312	3,684
Pompalar	0,6	0,55	0,13	0,04	0	0	0	0	0	0	0,12	0,64	2,08
IP ve Diğer Donanım	0,944	0,89	0,664	0,54	0,424	0,42	0,544	0,584	0,62	0,724	0,74	0,944	8,038

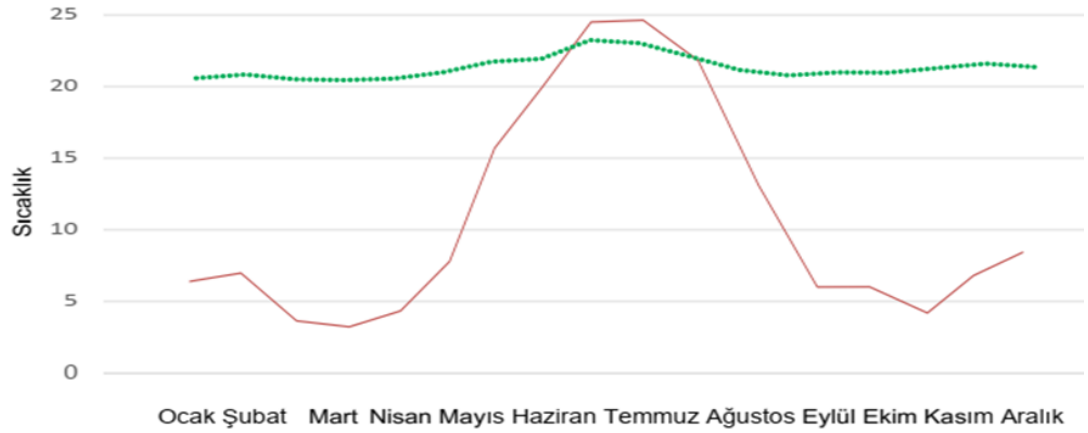
Toplam	6,138	4,276	1,842	1,206	0,822	0,728	0,806	0,864	0,886	1,376	3,422	6,056	27,012
---------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------



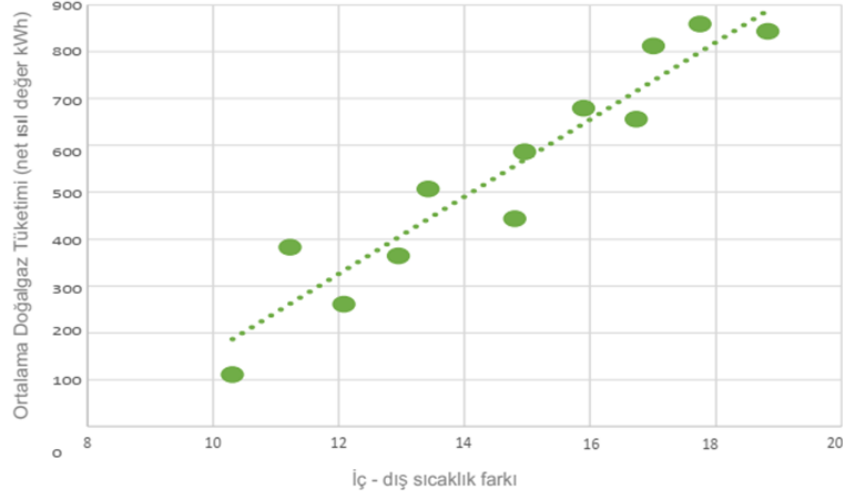
Şekil 5.2. Sistemin aylara göre çeşitli donanımlar için elektrik enerjisi tüketimi



Şekil 5.3. İstanbul'da dış hava sıcaklıklarının aylık değişimi



Şekil 5.4. İstanbul'da ortalama dış hava ve iç ortam sıcaklıklarının aylara göre değişimi



Şekil 5.5. Örnek bina durumunda sıcaklık farklarına göre aylık doğal gaz tüketimi

Örnek bina durumunda, İstanbul ili genelinde dış hava sıcaklıklarının değişimi ve iç ortam sıcaklıkları ile farkları göz önüne alındığında gaz yakıtlı sistem tarafından karşılanması gereken sıcaklık farkları dönemsel olarak 8 derece ile 19 derece arasında değişmektedir. Bu bağlı olarak ısıtma yükü 50 ila 430 kWh arasında değişmektedir. Yıl boyu gerçekleşen doğalgaz tüketimi dikkate alındığında yıllık ortalama doğalgaz tüketimi aşağıdaki tablodaki gibidir.

Tablo 5.7. Gaz yakıtlı ısıtma sisteminin aylık enerji tüketim değerleri (10³ kWh)

Sistem	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
Doğalgaz	20,36	19,16	16,77	14,37	8,38	1,20	0	0	1,10	7,19	10,78	17,96	117,27
Elektrik	0,56	0,47	0,42	0,36	0,19	0,03	0,03	0,03	0,19	0,42	0,43	0,45	3,58
Toplam	20,92	19,63	17,19	14,73	8,57	1,23	0,03	0,03	1,29	7,61	11,21	18,41	120,85

İşletme verileri istatistiki veriler ve katalog değerleri üzerinden hesaplanmakla birlikte, hidronik radyant sistemin ısı kaynağı olması bakımından özellikle ısı pompasının performansı Mart ve Nisan aylarında yapılan ölçüm ve hesaplamalar kullanılarak test edilmiştir. Bu kapsamda 18 Mart ve 21 Nisan 2021 tarihleri arasında örnek bina da yapılan ölçümler ile ısı pompası sistemin performans analizi yapılmıştır.

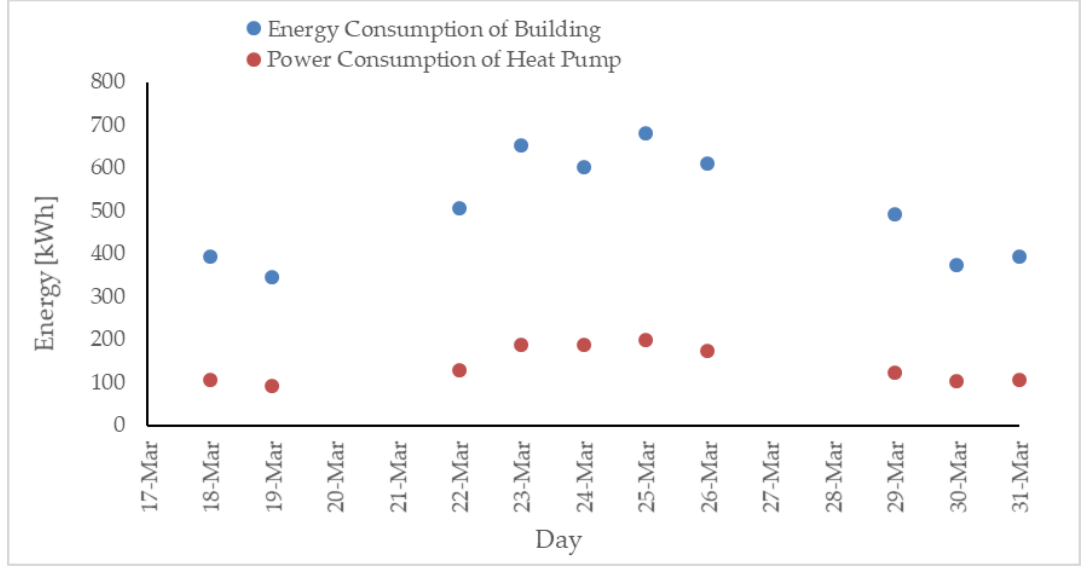
Deneyler sırasında ortam sıcaklığı 8 ile 18.6 °C arasında değişmiştir. Isı pompasının ve tüm sistemin COP değerleri, verimliliğin değerlendirilmesi için önemlidir. Tipik ölçüm verileri (Dış Hava Sıcaklığı, HP Besleme Suyu Sıcaklığı, HP Dönüş Suyu Sıcaklığı, Birikim Tankı Su Sıcaklığı, Besleme Suyu Kütle Debisi, Binanın Enerji Tüketimi, HP kompresör ve yardımcı ekipmanlarının Enerji Tüketimi, Günlük ortalama COP ısı pompası ünitesi), çalışmada kullanılan ısı pompası sistemine ait sıcaklık değişimi ve enerji tüketimi 18 Mart – 21 Nisan tarihleri arasında hafta içi için aşağıdaki tablo ve şekillerde verilmiştir.

Tablo 5.8. Mart ve Nisan aylarında hafta içi sistemin çalışma verileri ve COP

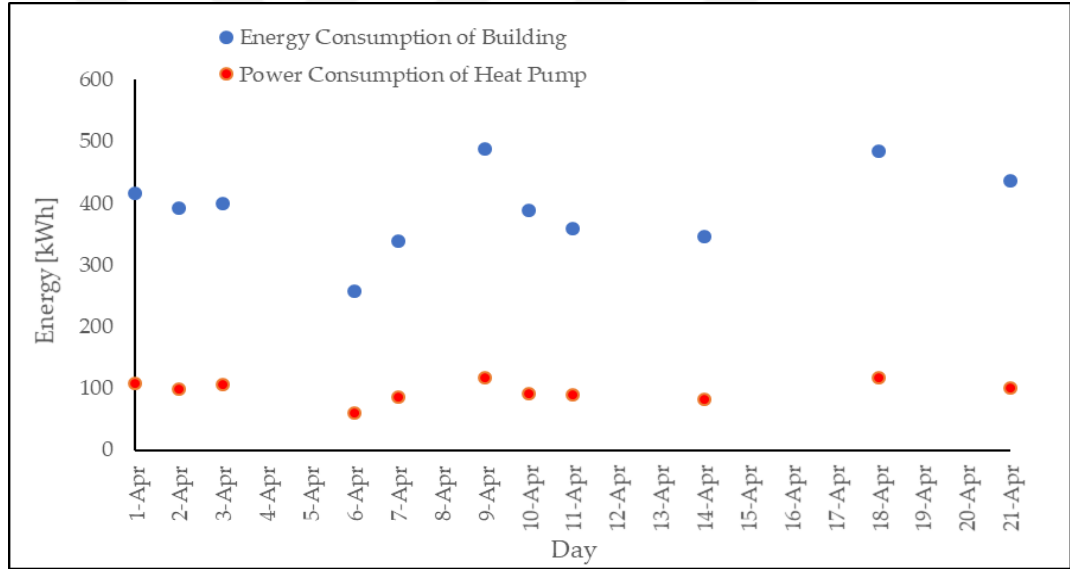
Tarih	Sıcaklık, °C				Besleme Suyu Debisi m ³ / sa	Enerji Tüketimi kWh		Günlük Ortalama HP COP'si
	Dış Hava	Besleme suyu	Dönüş Suyu	Birikim Tankı		Bina	HP	
18.Mart	8	33.1	31.8	34.8	44.90	393.8	107	3.68
19.Mart	9.4	34.3	31.7	35.0	19.54	345.9	92	3.76
22.Mart	10.5	34.8	30.9	33.6	19.88	505.7	130	3.89
23.Mart	6.2	32.3	30.2	33.4	47.85	652.4	188	3.47
24.Mart	4.8	32.6	29.7	32.4	30.94	602.1	187	3.22
25.Mart	5.9	33.7	30.7	33.0	33.65	680.6	199	3.42

26.Mart	7.5	33.6	30.6	32.4	30,30	609.8	173	3,53
29.Mart	11.5	35.1	31.6	34.3	21.30	491.7	122	4.03
30.Mart	7.9	34.4	31.1	34.3	16.94	373.9	103	3.63
31.Mart	9.8	34.2	31.0	34.3	18.77	394.3	106	3.72
1-Nisan	10.1	34.7	31.6	34.4	19.87	415.5	108	3.85
2 Nisan	10.6	33.3	31.2	34.4	28.97	393.1	100	3.93
3-Nisan	8.1	34.3	31.1	35.0	18.67	399.9	107	3.74
6-Nis	16.3	34.1	30.7	34.5	11.34	257.7	61	4.23
7-Nis	9.3	34.0	31.2	34.8	18.24	338.0	87	3.89
9-Nis	14.8	36.2	31.0	35.3	14.36	487.3	118	4.13
10-Nis	16.9	32.2	30.0	33.7	27.09	388.1	92	4.22
11-Nis	14.3	34.6	31.0	35.8	15.02	359.1	90	3.99
14-Nis	14.9	35.4	30.8	32.2	11.34	345.7	83	4.17
18-Nis	14.6	34.4	31.3	34.3	23.45	484.9	118	4.11
21-Nis	18.6	36.1	31.0	34.0	13.07	436.4	101	4.32

18 Mart ve 21 Nisan döneminde binanın ve ısı pompasının enerji tüketiminin değişimi, binanın toplam enerji tüketimi ile uyumludur. Enerji tüketiminde zirvelerin hafta içi olduğu ve hafta sonları nispeten daha düşük değerler gözlendiği görülüyor (hafta sonları için veriler çizelgeye dahil edilmedi). Saha ölçümüne göre tepe talep değeri 680 kWh'ye ulaşırken, ısı pompasının karşılık gelen enerji tüketimi 199 kWh'ye ulaştığı görülmüştür.

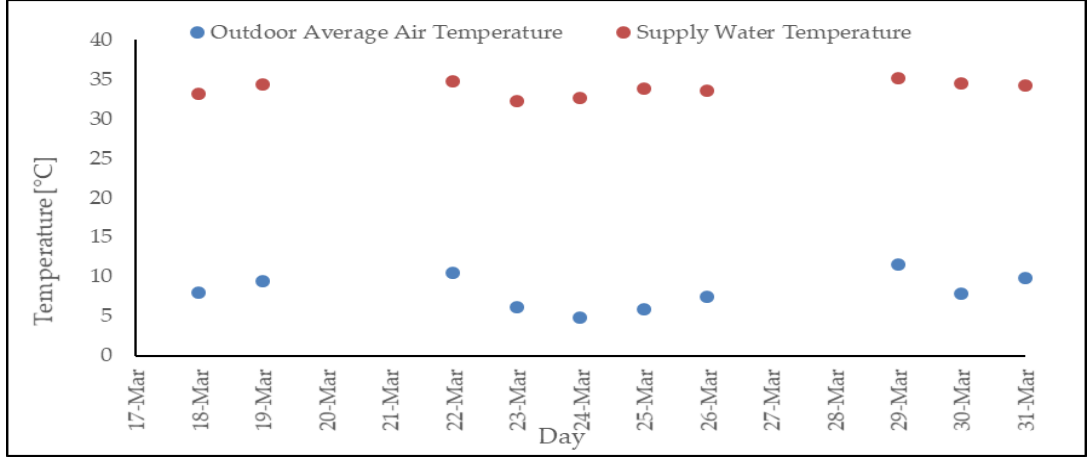


Şekil 5.6. Binanın ve ısı pompasının 18 Mart ile 31 Mart tarihleri arasındaki enerji tüketimi

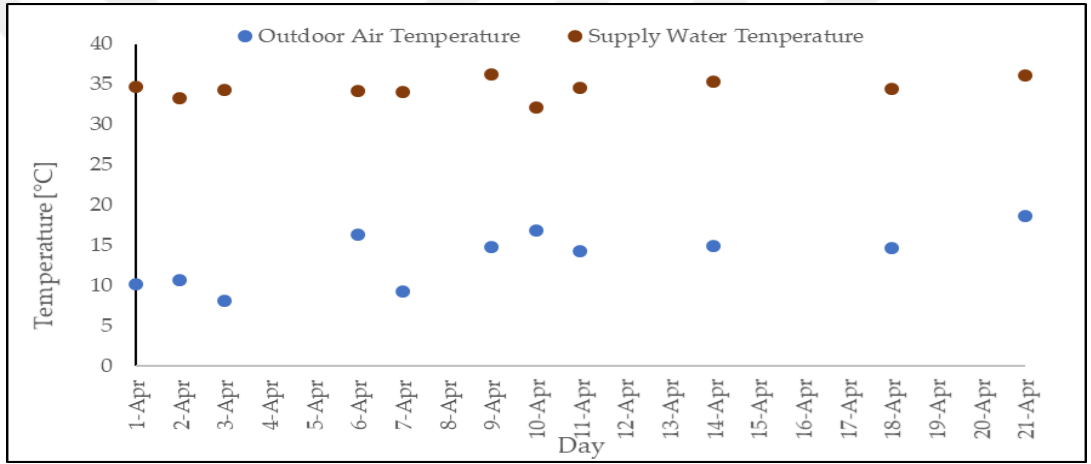


Şekil 5.7. Binanın ve ısı pompasının 1 Nisan ile 21 Nisan arasındaki enerji tüketimi

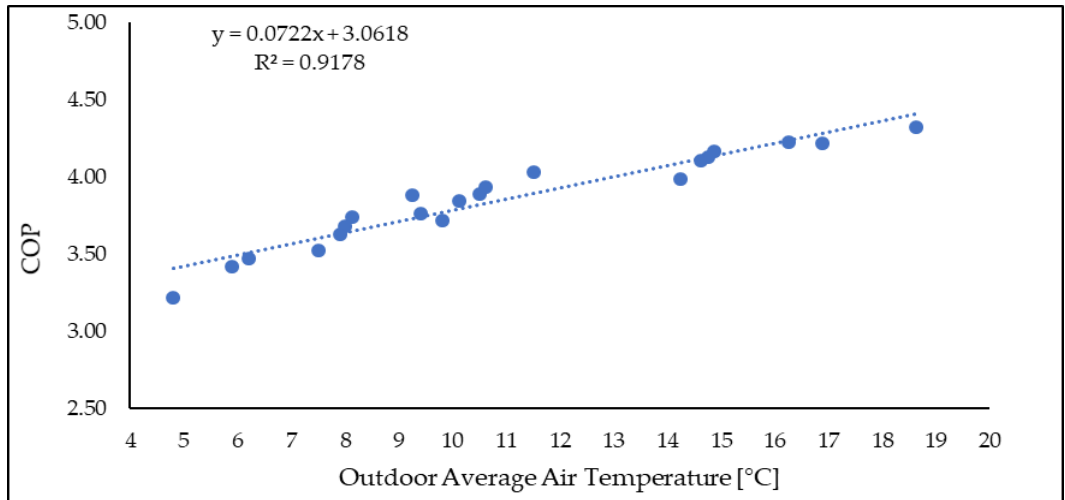
18 Mart ile 21 Nisan tarihleri arasındaki hafta içi ortalama hava sıcaklıkları ve besleme suyu sıcaklıkları verilmiştir. Depolama tankındaki suyun sıcaklığı farklı günlerde 32 ile 36 °C arasında değişmektedir. Böylece besleme suyunun sıcaklığı sirkülasyon pompasının hız ayarına ve dış hava sıcaklığına göre değişir. Başka bir deyişle, besleme suyunun sıcaklığı dış sıcaklığa göre değişir. Besleme suyu sıcaklığındaki artış, bina ortam sıcaklığında kademeli artışlara neden olur, dolayısıyla ısı pompası üzerindeki ısıtma yükünün de kademeli olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.8. 18 Mart ile 31 Mart arasında ortalama dış hava sıcaklığı ve HP besleme suyu sıcaklığı



Şekil 5.9. 1 Nisan ile 21 Nisan arasında ortalama dış hava sıcaklığı ve HP besleme suyu sıcaklığı



Şekil 5.10. Dış hava sıcaklığına sahip ısı pompasının COP varyasyonları

Şekil 5.10, İncelenen ısıtma mevsimleri boyunca ısı pompasının COP değerlerini göstermektedir. Şartlandırılmış odayı aynı sıcaklıkta tutmak için daha fazla elektrik kullanmamız gerekir, dolayısıyla dış sıcaklık düştükçe ASHP tarafından kullanılan elektrik miktarı artar. Görülebileceği gibi, COP değerleri deney süresi boyunca biraz dalgalanma göstermekle birlikte büyük farklılıklar görülmemiştir. COP değerleri saatlik olarak ölçülmekle birlikte günlük ortalama değerler kullanılmıştır. Sonuçlara göre, ısı pompası sisteminin COP'si 3,22 ile 4,32 arasında değişirken, dış ortam sıcaklığı 4.8°C ile 18,6 °C arasında değişmektedir. Dış hava sıcaklığı ile COP arasında güçlü bir korelasyon vardır; bu, kaynak sıcaklığındaki (bu örnekte, dış hava sıcaklığındaki) değişikliklerin gözlemlenen dalgalanmaya önemli bir katkıda bulunduğu anlamına gelir. Ortalama dış hava sıcaklığı arasındaki ampirik ilişki ve COP değeri aşağıda verilmiştir:

$$COP=0.0722 \times (T_{o,ave}) + 3.0618$$

Elde edilen değerler ve sonuçlar doğrultusunda sistemlerin bileşen verilerinin LCC analizinde hesaplanacak yatırım maliyeti ve işletme maliyetlerinin hesaplamalarında kullanılabilirliğinin kabul edilebilir düzeyde değerlendirilmiştir. Buna göre, hidronik radyant sistem ve gaz yakıtlı ısıtma sistemlerinin maliyet hesapları aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

5.2.4. Yatırım Maliyeti

Her iki ısıtma sistemi farklı imalatlar ve enerji yönetim sistemlerine yatırım yapılmasını gerektirmektedir. Alternatif sistemlere uygunluk bakımından, yatırım bölgesi, yatırım zamanı, bina altyapısı gibi çeşitli faktörler ilk yatırım için yapılması gereken imalatların nitelik ve niceliğinde önemli yer tutabilmektedir. Örneğin yeni bir makine dairesi inşaatının gerekli olabileceği durumlarda ilk yatırım maliyetleri büyük farklılıklar gösterebilir. Örnek bina durumunda bu tür ilk yatırım maliyetleri ile karşılaşılmamıştır.

Yukarıda verilen bileşen verileri her sistem çözümü için yatırım ve kurulum maliyetleri, projelerin gözden geçirilmesi ve tedarikçilerden ve uzman danışmanlardan bilgi alma suretiyle derlenmiş ve bu doğrultuda toplam ilk yatırım maliyetleri aşağıdaki tabloda (Tablo 5.9) verildiği gibi elde edilmiştir.

Tablo 5.9. Sistemler için toplam ilk yatırım maliyetleri

	Isı Pompası Sistemi	Gaz yakıtlı kazan sistemi
Sermaye maliyeti	504.848,82 ₺	218.950,00 ₺

5.2.5. İşletme Maliyeti

Örnek bina durumunda normal bir yıl boyunca toplam enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan elektrik ve doğalgaz tüketimleri, dış hava sıcaklığı ve bina ihtiyacına göre aylık olarak hesaplanmış ve birim enerji fiyatları ile çarpılarak işletme maliyetlerinin her iki sistem için bütünsel bir resmini elde etmek üzere işletme maliyetleri (Tablo 5.10) elde edilmiştir.

Tablo 5.10. 2021 verilerine göre sistemlerin Yıllık Enerji Tüketimleri ve İşletme Maliyetleri

Sistem	Toplam Enerji Tüketimi		Birim Enerji Maliyeti		Birim Enerji Maliyeti		Toplam Yıllık Maliyet
	Elektrik	Doğalgaz	(₺/kWh)	(₺/kWh)	(₺/kWh)	(₺/kWh)	
IP + Hidronik Radyant Sistem	26,50	0,62	0,689 ₺	0,926 ₺	18.259 ₺	574 ₺	18.833 ₺
Gaz Yakıtlı Isıtma Sistemi	3,58	117,27	0,689 ₺	0,926 ₺	2.467 ₺	108.592 ₺	111.059 ₺

İşletme verilerinin hesabında sisteme doğrudan entegre olan makine ve teçhizatın doğalgaz ve elektrik tüketimleri hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu makine ve teçhizatın elektrik tüketimleri hesaplanırken, katalog değerleri ve çalışma döngüleri dikkate alınmıştır. Elde edilen veriler önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlarla ve benzer sistemlerin kurulu olduğu bina ve işletmeler ile kıyaslanarak teyit edilmiştir.

5.2.6. Hizmet Maliyeti

Ele alınan iki farklı sistem çözümü için analizde kullanılabilecek hizmet maliyeti tahminlerinin üretmek için mevcut gaz yakıtlı kazan sistemi ve yeni kurulan hava kaynaklı ısı pompası entegreli hidronik randyant ısıtma sistemi için geçmiş yıl verileri, analiz ve ölçümlerle sonucunda yapılan hesaplamalarla elde edilen değerler ve üretici servis ve bakım kılavuzlarında öngörülen servis ve bakım işlemleri için maliyetler mevcut piyasa koşulları ve uzman bilgileri doğrultusunda toplanmıştır.

Buna göre çeşitli sistem bileşenleri için ayrı ayrı ve bütün olarak her iki sistem için elde edilen yıllık bakım ve hata servis maliyetleri aşağıdaki tabloda (Tablo 5.11) verilmiştir.

Tablo 5.11. Yıllık periyodik bakım ve hata servis maliyetleri

Sistem	Üretim Türü	Yıllık Bakım Maliyeti ₺	Toplam
IP + Hidronik Radyant Sistem	Isı pompası	3000	11.050
	Yoğuşmalı Kombi	1000	
	Radyant Sistem	5000	
	Akümülayon Tankı	400	
	Genleşme tankı	250	
	Sürkülasyon pompası	800	
	Kolektör	600	
Gaz Yakıtlı Sistem	Kombi	2000	5100
	Radyatörler	2000	
	Kollektör	600	
	Bacalar	500	

Tabloda verilen değerler büyüklükleri ve toplam hizmet maliyeti üzerindeki etkileri hakkında genel bir fikir vermek için periyodik hizmet maliyetlerinin yıllık eşdeğer maliyetleri üzerinden hesaplanan değerlerdir.

5.2.7. Artık Değer

LCC analizinde her bir sistem çözümünün ekonomik ömrü 20 yıl olarak belirlenmiştir. Bu, yaşam döngülerinin sonunda artık değerlerinin olmadığı anlamına gelir. Ancak, sistem çözümlerinde daha kısa ömürlü ve sistemler kullanımdayken değiştirilmesi gereken birkaç büyük bileşen vardır. Bu eylemler, her bir hizmetin sıklığının tedarikçilerden ve alandaki uzmanlardan toplandığı, daha önce açıklanan planlı periyodik hizmetlerin bir parçasıdır. Bir sistem yaşam döngüsünün sonunda bir bileşenin kalan ekonomik değeri, LCC hesaplamalarında artık değer olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 5.12. Kanunların belirlediği ekipman ömürleri (birim: yıl)

Ekipman	Kore	Japon	ABD (ASHRAE)
Kazan (Boiler)	15	15	24
Chiller	20	13-15	20
Soğutma kulesi	17	15	20
HVAC	20	15	17
Pompa	15	15	17

Tablo 5.12’de çeşitli ekipmanların farklı ülkelerde ve ilgili standartlara göre ekonomik ömürleri verilmiştir. Ancak, literatürde benzer LCC çalışmalarında tüm ekipmanların ekonomik ömürleri 20 yıl olarak kabul edilmiş ve analizler bu çerçevede yapılmıştır. Dolayısı ile bu çalışmada da tüm sistemler için ekonomik ömür 20 yıl olarak kabul edilmiştir.

5.3. Sistemin Bugünkü Değer Yöntemi ile LCC Analizi

Çalışma kapsamında, gerek satın alma ve kurulum maliyetleri gerekse yapılan deneysel ölçümlerle işletme zamanındaki termal ve ekonomik parametreler göz önünde bulundurularak bir yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmıştır. Mir Holding ile iş birliği içinde yapılmış olan bu çalışmada 2021 yılı içerisinde Mir Holding’e ait ofis binasında deneysel bir kurulumla ölçümler yapılmıştır. Elde edilen veriler aşağıda daha detaylı bilgilerin paylaşıldığı “Yaşam Döngüsü Maliyeti” analizi ile incelenmiştir.

Kümülatif nakit akışı analizi, ofis binasının enerji tüketimi ile ilgili faturalar incelenerek yapılmaktadır. Isı pompasının ve radyant ısıtma ve soğutma sisteminin enerji tüketimi üzerindeki etkileri ve dolayısıyla malzeme giderleri finansal olarak gözlemlenebilmektedir. LCC analizi aracılığı ile geleneksel sistemler olan kombi radyatörler ve iklimlendirme sistemleri ile veri karşılaştırması yapılarak radyant duvar panel iklimlendirme sistemlerinin üstün yanları ortaya konulmaya çalışılmıştır. Türkiye’de yeni bir örnek olan hibrit sistemin yarattığı sinerji nedeniyle önemli bir fark elde edilebileceği gösterilmiştir. Sistemin LCC analizi ile bu çalışmanın tüm konut ve iş binalarında iklimlendirme sistemi seçimi hususunda ışık tutacağı değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, düşük kullanım ömrü maliyeti, optimum kurulum, işletme ve enerji maliyetleri ile ekonomik bir sistem olabilmesi için radyant panel ısıtma ve soğutma sisteminin gerektirdiği tasarım iyileştirmelerinin yapılması arzu edilmektedir.

Hurda maliyeti (Glick ve vd., 2010), fosil yakıt kullanımı ve zararlı emisyon değerleri de (Kilkis, 2006) bu yaşam döngüsü maliyetine dahildir. LCC, belirli bir çalışma dönemi boyunca (genellikle projenin ömrü ile ilgili) bina sistem (ler)ine sahip olma, işletim, bakım ve (sonunda) elden çıkarma toplam maliyetidir. Paranın zaman değerini yansıtmaktadır (Glick ve vd., 2010). Yazarlar ayrıca geri dönüşüm değerini LCC hesaplamasına dahil etmişlerdir.

Bir ürün edinme maliyeti, toplam sahip olma maliyetinin %30'udur. Yüzde yetmişi işletme, bakım, yedek parça ve finansal maliyetlerdir (Gündoğdu, 2013). Buradan çıkarmamız gereken sonuç, bir ürün veya sistem satın alırken, kurulum sırasında odaklanmamız gereken sorun, kurulumdan sonra ilk kurulum maliyeti yerine yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkacak maliyetlerdir. Ürün geliştiricilerinin birbirleriyle rekabet ve üstünlükleri, yaşam boyu maliyetlerin en aza indirilmesine yardımcı olur. Bu noktada, bir ürünün ömür boyu bakım ve işletme maliyetlerinin kontrolünde yaşam döngüsü maliyeti (LCC) kavramı ön plana çıkmaktadır. Bir ürünü satın alırken kazanma kavramı, toplam sahip olma maliyetini göz önünde bulundurarak en ekonomik yerine en ucuz olarak kabul edilmemelidir.

Son yıllarda, radyant sistemlerle ilgili patent ve yayın çalışmaları (Bedir, 2012; Kanbur vd., 2013) ülkemizde önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Bununla birlikte, sistemin termal konforu ve enerji verimliliğini artırmak için tasarımda geliştirilmesi gereken yönleri hala vardır. Ayrıca, ısı pompalı düşük entalpili hibrit radyant duvar ve zemin ısıtma soğutma sistemleri, ekonomik parametreleri açısından yaşam döngüsü maliyetleri analizi ile ve çevresel açıdan yaşam döngüsü değerlendirmesi analizi ile kapsamlı bir şekilde analiz edilmelidir.

Isı pompaları veya jeotermal enerji maliyet etkinliği ile ilgili olmasa da (Leckner & Zmeureanu, 2011) bu enerji kaynaklarını kullanmanın performans katsayısı (COP) değerleri nedeniyle muhtemelen daha verimli olduğunu belirtmektedir. LCC analizine benzer şekilde, finansal geri ödemeyi anlamak için belirli bir evde kullanılan bir HVAC ürününün yaşam döngüsü boyunca kümülatif nakit akışını (CCF) izleyen Leckner ve Zmeureanu (2011) sonunda sistemin pahalı olduğu, finansal olarak asla amorti olamadığı sonucuna varmışlardır. Ölçümlerin yapıldığı yerde güneş enerjisi teknolojilerinin yüksek maliyeti ve düşük elektrik maliyetleri (Montreal, Quebec, Kanada), bu sonuca ulaşmalarına sebep olan etkenlerdir.

Daha da ilginç olan bir çalışma, Kanada, Montreal (Quebec) 'de (Cheng Hin & Zmeureanu, 2014) tarafından sunulan bir çalışmadır. Bu çalışmada üç analizin birleşimi yapılmıştır: yaşam döngüsü enerjisi (LCE) (S. Lee vd., 2015) ve yaşam döngüsü ekserjisi (LCX) ve bir güneş enerjisinin optimizasyonu için LCC kombi-sistemi analizleri yapılmış ve bu sonuçlar bulunmuştur: kullanılan objektif fonksiyona bağlı olarak dört farklı optimal konfigürasyon. Optimizasyonlar, temel kombi sistemine kıyasla, kombi sistemin yaşam döngüsü maliyetinin %19'u, yaşam döngüsü enerji kullanımının %34'ü, yaşam döngüsü ekserjisini %33 ve %24 oranında yok etmektedir.

Denklem (1.14) güncel değeri (PW) ve enflasyon oranı, iskonto oranı, elektrik fiyatı (ayda ortalama 1000 kW saat kullanan müşteriler için ortalama elektrik fiyatı), elektrik fiyatı (2006-2010 yılları arasında Quebec'te elektrik fiyatlarındaki ortalama artış oranı) hesaba katmaktadır.

$$LCC = \text{İlk Maliyet} + PW_{\text{değişim}} + PW_{\text{enerji}} \quad (1.14)$$

Kombi-sistemi evde konforlu sıcaklıklarda tutmak için, ısıtma ayar noktasının (HUSP) altında saatlerce yeni bir ölçüm de dikkate alınmıştır. Bunun için, çalışma havası sıcaklığı her bir alanda izlenir, her bir odadaki saat sayısı HUSP sıcaklığı ısıtma mevsimi boyunca sayılır ve gerileme sıcaklıkları etkili olmaz. HUSP, her bir bölgenin yıl boyunca ısıtma ayar noktası altında geçirdiği toplam saatlerin toplamıdır. Gerileme sıcaklığı artık etkisiz kaldıktan hemen sonra ayar noktası sıcaklıklarındaki ani değişiklik nedeniyle, ısıtıcı kapasitesine bağlı olarak belirli bir HUSP miktarı doğaldır. HUSP, diğer faktörlerle birlikte, sistemin ev sakinleri uyandığında sıcaklıkları ne kadar hızlı bir şekilde rahat seviyelere yükseltebildiğini dikkate alır. Optimizasyon amacıyla, kabul edilebilir HUSP sayısı 550'ye çıkarılmıştır. Bu değer, kombi sistemin yeterli termal konfor performansı için bir temel olarak kullanılır. Objektif fonksiyonu, 550'den fazla HUSP'ye izin veren herhangi bir tasarımın atlanacağı şekilde değiştirmek için objektif fonksiyona, düşük performans konfigürasyonunun asla seçilemeyecek şekilde objektif fonksiyon değerine keyfi olarak büyük bir miktar ekleyen bir ceza fonksiyonu eklenmiştir. Sonuç olarak optimal LCC objektif fonksiyonu (Denk. 1.15) aşağıdaki gibi değiştirilmiştir:

$$LCC = \text{Toplam İlk Maliyet} + PW_{\text{repl.cost}} + PW_{\text{Energy-cost}} + It(550, HUSP) \cdot 200.000 \quad (1.15)$$

Burada litre (550, HUSP) fonksiyonu, 550 HUSP'den küçükse 1, aksi takdirde 0 değerine döndürür.

Binalar, inşaat, işletme ve bakım ve yıkım aşamalarının yaşam döngülerinden geçerken enerji ve kaynakları tüketir (S. Lee vd., 2015). Sonuçlar, TFP'nin LCE verimliliğini ve kurulum, bakım ve çalıştırma için gerekli LCC'yi içerir. Bu çalışmada doğrulanan TFP, LCE / LCC, apartman binalarının LCC'sini tatmin edecek, enerji tüketimini en aza indirecek, malzeme gelişimini teşvik edecek ve yakın gelecekte aşırı enerji ve kaynak tüketen inşaat teknolojilerini geliştirecektir. S. Lee ve vd. (2015) denklem (1.14)'e benzer şekilde yaşam döngüsü enerji ve maliyet analizi için inşaat aşamasındaki kurulum maliyeti, bakım aşamasındaki bakım maliyeti ve işletme aşamasındaki enerji tüketimi kullanmışlardır. Yaşam döngüsü maliyeti denklem (1.16)'de gösterildiği gibi kurulum maliyeti, bakım maliyeti ve işletme enerji maliyetinden oluşur.

$$M_{yaşam} = M_{kurulum} + M_{bakım} + M_{enerji} \quad (1.16)$$

Ekipmanın ömrü, faiz oranı (iskonto oranı) ve enflasyon, klima sisteminin LCC analizine değişkenler olarak dahil edilmiştir. Faiz oranı ve enflasyon, zaman içindeki değeri etkiler. Özellikle enflasyon, artan fiyatlar, şehir suyu maliyeti, kanalizasyon suyu maliyeti, enerji maliyeti ve sigorta olmak üzere ikiye ayrılır. Genel olarak, bugünkü değer gelecekteki değere dönüştürüldüğünde faiz oranı kullanılır ve tersi durum için iskonto oranı kullanılır. Ekipmanların ömrü, LCC analizinin süresi anlamına gelir. Bu değişkenler, uygun varsayılan iyon değerlerinin ve önceki verilerin ortalama değerlerinin genellikle LCC analizinde tahmin için temsilci ve nominal oranlar olarak kullanıldığı anlamına gelir. Bu çalışmada, LCC analiz süresi Tablo 5.12'de gösterildiği gibi Kore, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki minimum ekipman ömrü olan 15 yıl olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada bugünkü değer yöntemi seçildiği için LCC analizine iskonto oranı uygulanmıştır. Klima ekipmanlarının iskonto oranı genellikle inşaat alanında kredi faizi olarak kabul edilir. Böylece, önümüzdeki 15 yılın faiz oranı, son 15 yılın ortalama faizi ile hesaplanmıştır. Söz konusu çalışmada 2006-2021 yılları arasında faiz analizi yapılmış ve 15 yıl sonraki 15 yıl için öngörülen faiz oranı %5,23 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle önümüzdeki 15 yıl için iskonto oranı ortalama değerin %5'i olarak alınmıştır.

Tüm maliyetlerin bugünkü değere dönüştürülmesi (Mevcut Değer Yöntemi), yıllık değer (Yıllık Değer Yöntemi) ve gelecekteki değerlere (Gelecek Değer Yöntemi) dönüştürülmesi gibi dönüşüm noktalarına göre LCC'nin dönüştürülmesi için üç yöntem vardır. Bu çalışmada Na ve arkadaşları (2010) tarafından kullanılan, LCC analizi baz alınarak, tasarım aşamasında alternatiflerin karşılaştırılmasında ağırlıklı olarak kullanılan mevcut değer yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Enflasyon dahil yinelenen maliyetler Denk. (1.17) ile bugünkü değerlere ve enflasyon hariç yinelenen maliyetler Denk. (1.18) ile bugünkü değerlere çevrilir.

$$P = A \times \frac{\left[\frac{1+e}{1+i} \right] \times \left[\left[\frac{1+e}{1+i} \right]^n - 1 \right]}{\left(\frac{1+e}{1+i} \right) - 1} \quad (1.17)$$

$$P = A \times \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (1.18)$$

P : Mevcut (güncel) değer,

A : n yıllık bir vade sonunda ödenecek normal tutar,

i : iskonto oranları,

e : enflasyon ve

n : analiz dönemidir.

Gelecekte oluşan tekrar etmeyen maliyet Denk. (0.14) ile bugünkü değere dönüştürülür.

$$P = F \times \frac{1}{(1+i)^n} \quad (0.14)$$

F : n yılın sonunda ödenecek tutardır (Na vd., 2010).

Küresel olarak, inşaat sektörü, enerji tüketiminin %30'unu ve hammadde tüketiminin %40'ını oluşturan muazzam miktarda enerji ve kaynak tüketmektedir (S. Lee vd., 2015). Sanayi ve ekonominin hızlı gelişimi ile Türkiye'de CO2 emisyonları hızla artmaktadır. Ayrıca, petrolün tamamına yakını (ana enerji ısıtma kaynağı) ithal edilmektedir. Bu nedenle, inşaat endüstrisinde ısıtma enerjisini azaltmak için bir plan

tartışılmalıdır. Bu çalışma, maksimum enerji verimliliği için geliştirilmiş zeminli bir binanın LCE'sini ve maliyetini analiz etmeyi amaçlamaktadır.

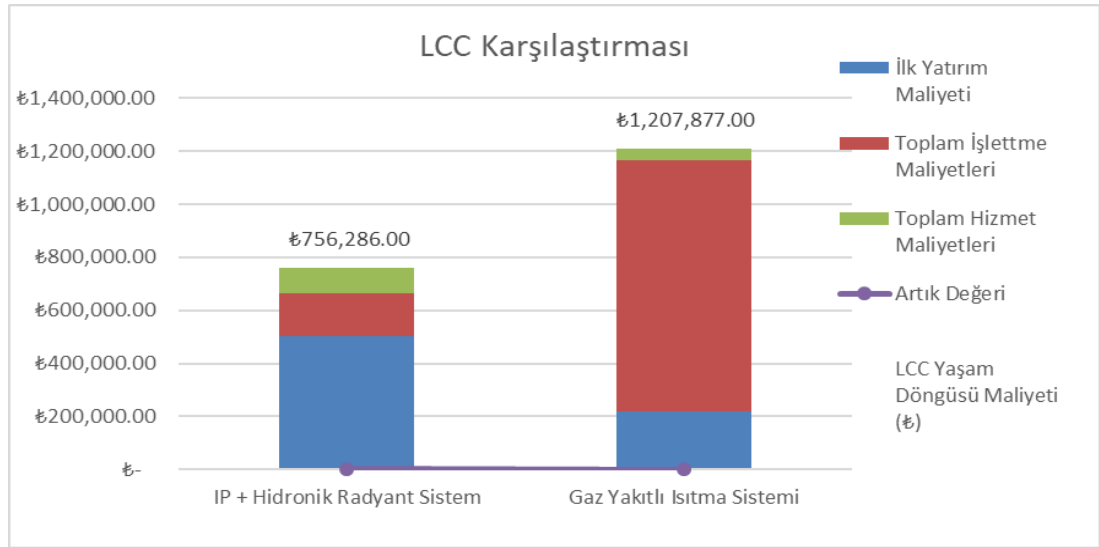
Çalışmada daha önce açıklanan girdi verilerine dayalı olarak bir LCC analizi yapılmıştır. Hangi sistem çözümünün en uygun olduğuna dair geniş bir bakış sağlamak amacıyla her bir sistemin finansal performansını bugünkü değer yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, sonuçların güvenilirliğini test etmek ve ekonomik görünümdeki değişikliklerin her bir sistemin finansal performansını nasıl etkileyeceğini görmek için hesaplamalar bir duyarlılık ve senaryo analizinden geçirilmiştir (Şekil 5.13).

Bugünkü değer yöntemi, her bir sistem çözümünün yaşam döngüsü boyunca meydana gelen tüm maliyetlerinin bugünkü değerlerinin toplamını hesaplar ve ortaya çıkan toplam, toplam yaşam döngüsü maliyeti olarak adlandırılır ve ekonomik ömrün sonuna kadar her şeyi kapsayan genel bir tutar olarak yorumlanabilir. Aşağıda tablo 5.13'te ilgili maliyetlerin ve yaşam ömrünün sonunda sistemlerin sahip olduğu artık değerlerin bugünkü değerleri verilmiştir.

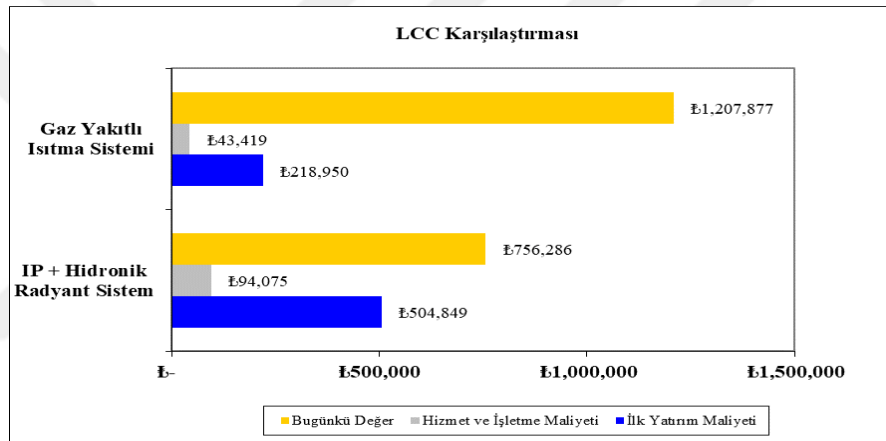
Tablo 5.13. İlk yatırım, işletme ve hizmet maliyetlerinin net bugünkü değerleri

Sistem	İlk Yatırım Maliyeti	Bugünkü Değerler			LCC Yaşam Döngüsü Maliyeti
		Toplam İşletme Maliyetleri	Toplam Hizmet Maliyetleri	Artık Değeri	
IP ⁺ Hidronik Radyant Sistem	504.848,82₺	160.336,00₺	94.075,00₺	2.973,00₺	756.286,00 ₺
Gaz Yakıtlı Isıtma Sistemi	218.950,00₺	945.508,00₺	43.419,00₺	0 ₺	1.207.877,00 ₺

* iskonto oranı %10 olarak alınmıştır.

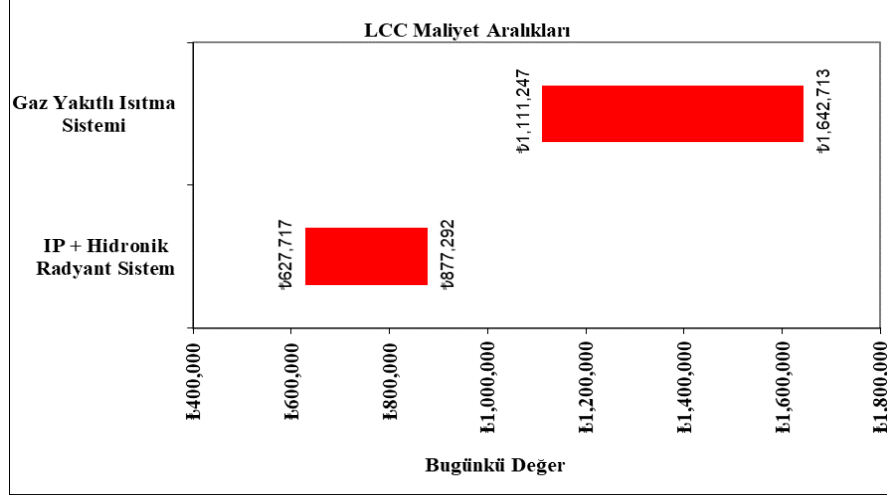


Şekil 5.11. Sistemlerin LCC karşılaştırması



Şekil 5.12. Sistemlerin LCC karşılaştırması

Tablo 5.13 ve Şekil 5.12-13'te görülebileceği gibi, gaz yakıtlı ısıtma sisteminin nispeten düşük yatırım ve hizmet maliyetlerine rağmen işletme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle ısı pompası destekli hidronik radyant ısıtma sisteminin toplam yaşam döngüsü maliyeti %50 dolayında daha düşük olduğu ve bu nedenle kesinlikle tercih edilmesi gerektiği dolayısı ile ekonomik ömrü boyunca bu sistemin çok daha iyi bir performans gösterdiği açıktır.



Şekil 5.13. Sistemlerin LCC duyarlılık analizi ve maliyet aralığı karşılaştırması

Ekonomik göstergeler ve piyasa koşullarında yaşanabilecek gelişmeler ve maliyet tahminlerinde yapılan hataların standart sapmaları dikkate alınarak yapılan duyarlılık analizinde de ısı pompası entegreli hidronik radyant sistemin LCC maliyet aralığı gaz yakıtlı ısıtma sisteminin maliyet aralığından daha dar bulunmuştur. Böylece, 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca özellikle enerji piyasalarında meydana gelebilecek dalgalanmalardan etkilenme riskinin radyant sistem için daha düşük olduğu değerlendirilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı incelendiğinde, özellikle ısı pompalarının çevre dostu ve ekonomik olmaları nedeniyle büyük ilgi gördüğü görülmektedir. Ancak, yüksek ilk yatırım maliyeti nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaşmamıştır. Bu nedenle, ilk yatırım maliyetlerini azaltmak ve/veya verimliliklerini artırmak (örneğin işletme maliyetlerini azaltmak) gereklidir. Bu amaçla bütüncül bir bakış açısıyla ısıtma sistemlerinin seçimi yenilenebilir enerji kaynakları ile çalışan enerji üretim sistemleri ile uyumlu olmalı ve verimleri artırılmalıdır. Bu amaçlar için hava kaynaklı ısı pompası sistemi ile entegre bir radyant ısıtma sistemi deneysel olarak incelenmiştir. Isı pompasının (COP) performansı, çeşitli dış ve besleme havası sıcaklıkları (kaynak ve havuz sıcaklığı) için deneysel olarak hesaplanmıştır. Daha sonra ASHP sisteminin yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmış ve sonuçlar bu gaz yakıtlı kazanlarla karşılaştırılmıştır.

Test, İstanbul, Türkiye’de 2500 m² alana sahip gerçek bir ticari binada gerçekleştirildi. ASHP, radyant sistemin ana performans özelliği olan COP ile birleştiğinde deneysel olarak incelenmiştir. Termal ve ekonomik parametrelere ait verilerin elde edilmesi için önceden gerekli olan sayaç ve termokupl sensörleri gibi ekipmanlar temin edilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Araştırmanın deneysel bölümünde, her bir bileşenin giriş ve/veya çıkışındaki sıcaklık, akış hızı, ısı akısı ve enerji tüketimi gibi ilgili parametreler için ölçüm verilerini elde etmek için uygun cihazlar seçildikten sonra tüm ölçüm cihazları kontrol edilmiştir. Bir yazılım arayüzü üzerinden bilgisayara bağlı bir datalogger’a bağlı ve deneysel veriler kaydedilmiştir. Sistemin COP’si 3,22 ile 4,32 arasında değişirken, ortam sıcaklığı 5,9 ile 18,6 °C arasında ve besleme suyu sıcaklığı 33,1 ile 36,1 °C arasında değişmektedir, deneysel verilere göre. Ayrıca Mart ve Nisan aylarında toplam 20 gün boyunca ısı pompasının günlük toplam ısı üretimi 295 kWh - 300 kWh, ortalama COP 4,22 olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda, ortalama dış hava sıcaklığı arasındaki ampirik ilişki ve düşük sıcaklıklı radyant ısıtmanın ASHP sistemi ile entegrasyonu için COP değeri önerilmiştir.

Girdi verileri çeşitli kaynaklardan toplanmış ve teyit edilmiş ve böylece maliyet bileşenlerinin mümkün olan en etkin şekilde belirlenmesi sağlanmıştır. Duyarlılık ve senaryo analizi ile hem girdi verilerinin kalitesi değerlendirilmiş hem de

analiz edilen sonuçların güvenilirliği teyit edilmiştir. Ayrıca, mevcut gaz yakıtlı kazan sisteminin hizmet maliyetlerinin ilerleyen yıllarda önemli ölçüde artması ihtimali de yeni bir sistemin uygulanmasının mali avantajlarının LCC analizi ile gösterilenden daha büyük olabileceğini göstermektedir. İstanbul ikliminin nispeten ılıman olması ve kış sezonu dışındaki zamanlarda binanın ısı ihtiyacının entegre edilen yoğunlaşmalı kombi sisteminin desteğine ihtiyaç duymaksızın karşılanabilir nitelikte olması önerilen sistemin avantajlı olduğunu gösteren diğer bir husustur.

LCC analizinde, tüm sistemin ömrü, yıllık enflasyon oranı dikkate alınarak yıllık enerji maliyeti ve cari yenileme maliyetleri bazında her bir bileşenin ömrü dikkate alınarak hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan ısı pompasının yıllık maliyeti hesaplanmış ve gaz yakıtlı kazan sistemleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre gaz yakıtlı kazanın yıllık işletme maliyeti ASHP sistemine göre yaklaşık %64 daha yüksektir. 20 yıllık dönem için toplam maliyet dikkate alındığında bu çalışmada kullanılan ASHP'nin gaz yakıtlı kazan sistemine göre daha avantajlı olduğu ve çevre kirliliği açısından da daha avantajlı olduğu görülmüştür. ASHP sisteminin NPV'si 20 yıl için ₺756.286 iken, gaz yakıtlı kazan sisteminde bu değer yaklaşık ₺1.207.877 olarak elde edilmiştir.

Bu bağlamda, yukarıda açıklanan LCC analiz sonuçlarına dayanarak, mevcut gaz yakıtlı kazan sisteminin yeni hava kaynaklı ısı pompası entegreli hidronik radyant ısıtma sistemi ile değiştirilmesinin ekonomik açıdan doğru bir karar olduğunu sonucuna varılmıştır.

Ayrıca basit açma/kapama termostat devreleri kullanmak suretiyle radyant zeminler ucuz ve etkili bir şekilde kontrol edilebilmektedir, dolayısı ile termal konfordan ödün vermeden her bölgede bu sistemlerin kullanılabilmesi mümkündür. Bununla birlikte sıcaklık kontrolünün yüksek hassasiyetle yapılması gereken durumlarda PI (proportional-integral) kontrol sistemleri de kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Ahmadi, M. A., Sadaghiani, M. S., Ghazvini, M., Shahriar, S., & Alhuyi Nazari, M. (2018). Ground source heat pump carbon emissions and ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings: A review. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(4), 1241-1265.

Ahn, B. C., & Song, J. Y. (2010). Control characteristics and heating performance analysis of automatic thermostatic valves for radiant slab heating system in residential apartments. *Energy*, 35(4), 1615–1624. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.007>

Akçay, C., & Manisalı, E. (2007). 4734 Sayılı Kamu İhale Kanunu ve 4735 Sayılı Kamu İhale Sözleşmeleri Kanununun, AB Uygulamaları Çerçevesinde Uygulamada Karşılaşılan Sorunlar Açısından İncelenmesi. 4. İnşaat Yönetimi Kongresi, Bildiri Kitabı, 13-26.

Anisimova, N. (2011). The capability to reduce primary energy demand in EU housing. *Energy and Buildings*, 43(10), 2747–2751. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.029>

Arteconi, A., Costola, D., Hoes, P., & Hensen, J. L. M. (2014). Analysis of control strategies for thermally activated building systems under demand side management mechanisms. *Energy and Buildings*, 80, 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.053>

Ataseven, E., Yatırım Kararları ve Politikası Ders Notları.

Aydın, M. (2018). GROUND SOURCE HEAT PUMPS Informative Brochure. Retrieved from <https://web.itu.edu.tr/murataydin/GSHP-public-brochure.pdf>

Batista, G., Gaspar, P. D., & Silva, P. D. (2013). Control, regulation and command system of hydronic radiant floors heating by wireless and energy harvesting sensors and actuators. *Key Engineering Materials*, 543, 389–392. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.543.389>

Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L., & Blum, P. (2012). Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2), 1256–1267.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>

Bean, R., Olesen, B., & Kim, K. (2010 a). History of Radiant Heating and Cooling Systems (part 1). ASHRAE Journal, 40–47.

Bean, R., Olesen, B. W., & Kim, K. W. (2010b). Part 2 history of radiant heating & cooling systems. ASHRAE Journal, 52(2), 50–55.

Bedir, K. (2012). Radyant Isıtma ve Soğutma Sistemlerinin Isıl Konfor ve Enerji Verimliliğinin Sayısal Analizi. Istanbul Teknik Üniversitesi.

Bichiou, Y., & Krarti, M. (2011). Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings. Energy and Buildings, 43(12), 3373–3382.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.031>

Blarke, M. B. (2012). Towards an intermittency-friendly energy system: Comparing electric boilers and heat pumps in distributed cogeneration. Applied Energy, 91(1), 349–365. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.09.038>

Braun, J. E. (2003). Load control using building thermal mass. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 125(3), 292–301.
<https://doi.org/10.1115/1.1592184>

Braun, J. E., Montgomery, K. W., & Chaturvedi, N. (2001). Evaluating the performance of building thermal mass control strategies. HVAC and R Research, 7(4), 403–428. <https://doi.org/10.1080/10789669.2001.10391283>

Cacabelos, A., Eguía, P., Míguez, J. L., Granada, E., & Arce, M. E. (2015). Calibrated simulation of a public library HVAC system with a ground-source heat pump and a radiant floor using TRNSYS and GenOpt. Energy and Buildings, 108, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.006>

Cai, J., Braun, J. E., Kim, D., & Hu, J. (2016). General approaches for determining the savings potential of optimal control for cooling in commercial buildings having both energy and demand charges. Science and Technology for the Built Environment, 22(6), 733–750. <https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1197716>

Cheng Hin, J. N., & Zmeureanu, R. (2014). Optimization of a residential solar combisystem for minimum life cycle cost, energy use and exergy destroyed. Solar Energy, 100, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.001>

Cho, S. H., & Zaheer-Uddin, M. (1999). An experimental study of multiple parameter switching control for radiant floor heating systems. *Energy*, 24(5), 433–444. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00101-7](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00101-7)

Christensen, C., Courtney, A., Horowitz, S., Givler, T., & Barker, G. (2005). Beopt: Software for identifying optimal building designs on the path to zero net energy. *Proceedings of the Solar World Congress 2005: Bringing Water to the World, Including Proceedings of 34th ASES Annual Conference and Proceedings of 30th National Passive Solar Conference*, 1, 55–60.

Cox, S. J., Kim, D., Cho, H., & Mago, P. (2019). Real time optimal control of district cooling system with thermal energy storage using neural networks. *Applied Energy*, 238 (December 2018), 466–480. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.093>

Crawley, B. D. B., Pedersen, C. O., Lawrie, L. K., & Winkelmann, F. C. (2000). A S H R A E EnergyPlus: *ASHRAE Journal*, (April), 49–56.

Dermardiros, V., Vallianos, C., Athienitis, A. K., & Bucking, S. (2017). Model-Based Control of a Hydronic Radiant Slab for Peak Load Reduction. In *Proceedings of the 15th IBPSA Conference* (pp. 1815–1823). San Francisco, CA: International Building Performance Simulation Association. <https://doi.org/https://doi.org/10.26868/25222708.2017.486>

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2008). *Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla*. 5 Baskı. İzmir, Türkiye, İzmir Güven Kitap Evi.

Çengel, Y. A. (2015). *Isı ve kütle transferi: esaslar ve uygulamalar*. Palme Yayıncılık.

Çolak, A., & Ayık, M. *Isı Tekniği Ders Notları*.

Dong, H., Yan, X., Chao, F., & Li, Y. (2008). Predictive control model for radiant heating system based on neural network. *Proceedings - International Conference on Computer Science and Software Engineering, CSSE 2008*, 1, 45–48. <https://doi.org/10.1109/CSSE.2008.490>

Durante, S., Comoglio, M., & Ridgway, N. (2015). *Life Cycle Assessment in Nanotechnology, Materials and Manufacturing*. Micromanufacturing Engineering and

Technology: Second Edition (Second Edi). Yi Qin. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31149-6.00034-7>

Energietechnik, T. (2012). Trnsys3d Tutorial.

Energy, U. S. D. of. (2020). EnergyPlus Manual. Quick Hits for New Faculty: Successful Strategies by Award-Winning Teachers, (March), 4–6. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44397-1_3

Eripci Çelik, S. N., Zorer Gedik, G., Parlakyildiz, B., Koca, A., Çetin, M. G., & Gemici, Z. (2016). The performance evaluation of the modular design of hybrid wall with surface heating and cooling system. A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture, 13(2), 31–37. <https://doi.org/10.5505/itujfa.2016.48658>

Fabrizio, E., Corgnati, S. P., Causone, F., & Filippi, M. (2012). Numerical comparison between energy and comfort performances of radiant heating and cooling systems versus air systems. HVAC and R Research, 18(4), 692–708. <https://doi.org/10.1080/10789669.2011.578700>

Fahmy, A., Abdou, A., & Ghoneem, M. (2019). Regenerative Architecture as a Paradigm for Enhancing the Urban Environment. Port-Said Engineering Research Journal, 23(2), 11-19.

Fan, R., Gao, Y., Hua, L., Deng, X., & Shi, J. (2014). Thermal performance and operation strategy optimization for a practical hybrid ground-source heat-pump system. Energy & Buildings, 78, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.041>

Fiedrich, J. (1992). US00519988A. ABD.

Fiedrich, J. (1996). US005579996A. ABD.

Fiedrich, J. (1996). US5292065. ABD. Retrieved from <http://www.google.com/patents/US5579996>

Fiedrich, J. (1999). US005931381A. ABD. Retrieved from US005931381A

Fiedrich, J., & Robert, L. (1999). CA2236560A1. CANADA.

Florides, G., & Å, S. K. (2007). Ground heat exchangers — A review of systems, models and applications, 32, 2461–2478. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>

Gholamibozanjani, G., Tarragona, J., Gracia, A. de, Fernández, C., Cabeza, L. F., & Farid, M. M. (2018). Model predictive control strategy applied to different types of building for space heating. *Applied Energy*, 231(April), 959–971. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.181>

Glick, S., Ap, L., & Guggemos, A. (2010). Life-cycle assessment and life-cycle cost as collaborative tools in residential heating system selection. *Journal of Green Building*, 5(3), 107–115. <https://doi.org/10.3992/jgb.5.3.107>

Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). Genetic Algorithms and Machine Learning. *Machine Learning*, 3(4), 95–99. <https://doi.org/10.1177/0954408914531118>

Gracia, A. De, Romani, J., & Gabriel, P. (2017). Experimental evaluation of a heating radiant wall coupled to a ground source heat pump, 105, 520–529. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.087>

Gündoğdu, F. (2013). Yaşam Boyu Maliyetlerin Kontrolünde LCC Yaklaşımı. Kayseri Ulaşım A.Ş., Kayseri, e-mail: feygun@kayseriulasim.com. <https://www.kayseriulasim.com/images/menudosya/985025964209400.pdf>

Gwerder, M., Lehmann, B., Tödtli, J., Dorer, V., & Renggli, F. (2008). Control of thermally-activated building systems (TABS). *Applied Energy*, 85(7), 565–581. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.08.001>

Hang, Y., Qu, M., & Zhao, F. (2012). Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States. *Energy and Buildings*, 45, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.057>

Harper, D. G. (1994). Some comments on the repeatability of measurements.

Henze, G. P., Felsmann, C., & Knabe, G. (2004). Evaluation of optimal control for active and passive building thermal storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(2), 173–183. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2003.06.001>

Huang, H., Chen, L., & Hu, E. (2015). A new model predictive control scheme for energy and cost savings in commercial buildings: An airport terminal building case study. *Building and Environment* (Vol. 89). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.037>

Hudson, G., & Underwood, C. P. (1999). A SIMPLE BUILDING MODELLING PROCEDURE FOR MATLAB / SIMULINK, 1–7.

Ignacio, J., Villarino, A., & Ángel, F. (2017). Experimental and modelling analysis of an office building HVAC system based in a ground-coupled heat pump and radiant floor, 190, 1020–1028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.152>

Istanbul Yakıt Fiyatları. (2020). Retrieved from <https://www.igdas.com.tr/yakit-fiyatlari-karsilastirmasi/>

Joe, J., & Karava, P. (2019). A model predictive control strategy to optimize the performance of radiant floor heating and cooling systems in office buildings. *Applied Energy*, 245(April), 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.209>

Joe, J., Karava, P., Hou, X., & Hu, J. (2016). Model Predictive Control of a Radiant Floor Cooling System in an Office Space. *International Compressor Engineering, Refrigeration and Air Conditioning, and High Performance Buildings Conferences*, 1–10.

Kanbur, B. B., Calikiran, C., & Kaya, K. (2013). Farklı Radyant Panel Konfigürasyonlarına Göre Elde Edilen Panel Isı Akılarının İncelenmesi. *Tesisat Mühendisliği*, Mayıs/Haziran (135), 14–25. Retrieved from http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/7b768e3b5f1af5f_ek.pdf?dergi=1352

Kang, C. S., Hyun, C. H., & Park, M. (2015). Fuzzy logic-based advanced on-off control for thermal comfort in residential buildings. *Applied Energy*, 155, 270–283. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.119>

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. In *IEEE 1995 Conference Proceedings of ICNN'95- International Conference on Neural Networks* (pp. 1942–1949). <https://doi.org/10.1109/TST.2016.7442504>

Khorasanizadeh, H., Sheikhzadeh, G. A., Azemati, A. A., & Shirkavand Hadavand, B. (2014). Numerical study of air flow and heat transfer in a two-dimensional enclosure with floor heating. *Energy and Buildings* (Vol. 78). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.007>

Kilkis, B. I. (2006). Cost optimization of a hybrid HVAC system with composite radiant wall panels. *Applied Thermal Engineering*, 26(1), 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.04.017>

Kilkis, B. I., Heat, A., Nikolaidis, Y., Pilavachi, P. A., Chletsis, A., Kanbur, B. B., ... Zhang, Q. L. (2010). Farklı Radyant Panel Konfigürasyonlarına Göre Elde Edilen Panel Isı Akılarının İncelenmesi. *ASHRAE Journal*, 52(3), 14–25. <https://doi.org/10.3390/buildings8050069>.

Kim, Kwang Woo, and Bjarne W. Olesen. "Radiant heating and cooling systems: part one." *Ashrae Journal* 57.2 (2015): 28-36.

Koca, A. (2018). Experimental examination of heat transfer performance of the heated radiant wall system. *Journal of Thermal Engineering*, 4(6), 2394–2407. <https://doi.org/10.18186/thermal.465641>

Koca, A., & Cetin, G. (2017). Experimental investigation on the heat transfer coefficients of radiant heating systems: Wall, ceiling and wall-ceiling integration. *Energy and Buildings*, 148, 311–326. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.027>

Koca, A., Gemici, Z., Bedir, K., Böke, E., Kanbur, B. B., & Topaçoğlu, Y. (2014). Thermal Comfort Analysis of Novel Low Exergy Radiant Heating Cooling System and Energy Saving Potential Comparing to Conventional Systems. *Progress in Exergy, Energy, and the Environment*, 435–445. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04681-5>

Kong, Qiongxiang, and Bingfeng Yu. "Numerical study on temperature stratification in a room with underfloor air distribution system." *Energy and Buildings* 40.4 (2008): 495-502.

Kuboth, S., Heberle, F., König-Haagen, A., & Brüggemann, D. (2019). Economic model predictive control of combined thermal and electric residential building energy systems. *Applied Energy*, 240(December 2018), 372–385. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.097>

Lagios, K., Niemasz, J., & Reinhart, C. F. (321AD). Animated Building Performance Simulation (Abps) – Linking Rhinoceros/Grasshopper With Radiance/Daysim. *SimBuild 2010*, 321–327. Retrieved from <http://www.ibpsa.us/pub/simbuild2010/papers/SB10-DOC-TS06A-03-Lagios.pdf>

Leckner, M., & Zmeureanu, R. (2011). Life cycle cost and energy analysis of a Net Zero Energy House with solar combisystem. *Applied Energy*, 88(1), 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.031>

Lee, J. Y. (2009). Current status of ground source heat pumps in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 1560–1568. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.10.005>

Lee, K. ho, & Braun, J. E. (2008). Model-based demand-limiting control of building thermal mass. *Building and Environment*, 43(10), 1633–1646. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.009>

Lee, S., Joo, J., & Kim, S. (2015). Life cycle energy and cost analysis of thin flooring panels with enhanced thermal efficiency. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 14(1), 167–173. <https://doi.org/10.3130/jaabe.14.167>

Lehmann, B., Dorer, V., Gwerder, M., Renggli, F., & Tödtli, J. (2011). Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system. *Applied Energy*, 88(1), 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.08.010>

Lehmann, B., Gyalistras, D., Gwerder, M., Wirth, K., & Carl, S. (2013). Intermediate complexity model for Model Predictive Control of Integrated Room Automation. *Energy and Buildings*, 58, 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.007>

Li, S., Joe, J., Hu, J., & Karava, P. (2015). System identification and model-predictive control of office buildings with integrated photovoltaic-thermal collectors, radiant floor heating and active thermal storage. *Solar Energy*, 113, 139–157. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.11.024>

Liu, S., & Henze, G. P. (2006). Experimental analysis of simulated reinforcement learning control for active and passive building thermal storage inventory: Part 1. Theoretical foundation. *Energy and Buildings*, 38(2), 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.002>

Liu, X., Paritosh, P., Awalgaonkar, N. M., Bilonis, I., & Karava, P. (2018). Model predictive control under forecast uncertainty for optimal operation of buildings with integrated solar systems. *Solar Energy*, 171(January), 953–970. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.038>

Ma, H., Li, C., Lu, W., Zhang, Z., Yu, S., & Du, N. (2016). Investigation on a solar-groundwater heat pump unit associated with radiant floor heating, (February). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.077>

Ma, P., Wang, L. S., & Guo, N. (2013). Modeling of TABS-based thermally manageable buildings in Simulink. *Applied Energy*, 104, 791–800. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.006>

Magraner, T., Montero, Á., Quilis, S., & Urchueguía, J. F. (2010). Comparison between design and actual energy performance of a HVAC-ground coupled heat pump system in cooling and heating operation, 42, 1394–1401. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.008>

Mazo, J., Delgado, M., Marin, J. M., & Zalba, B. (2012). Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool : Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump. *Energy & Buildings*, 47, 458–466. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.022>

Mendes, N., Oliveira, G. H. C., Araújo, H. X., & Coelho, L. S. (2003). A MATLAB-based simulation tool for building thermal performance analysis. Eighth International IBPSA Conference, 855–862.

Mir, H. W. (2020). Hybrid wall MIR hybrid wall solutions precast radiant heating cooling. Retrieved June 14, 2020, from <https://mirhybridwall.com/hybrid-wall/>

Mirakhorli, A., & Dong, B. (2018). Model predictive control for building loads connected with a residential distribution grid. *Applied Energy*, 230(April), 627–642. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.051>

Montagud, C., Corberán, J. M., & Ruiz-Calvo, F. (2013). Experimental and modeling analysis of a ground source heat pump system. *Applied Energy*, 109, 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.025>

Na, Y. J., Nam, E. J., & Yang, I. H. (2010). Life cycle cost analysis of air conditioning systems in a perimeter zone for a variable air volume system in office buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 9(1), 243–250. <https://doi.org/10.3130/jaabe.9.243>

Nathan Mendes, G. H. C. O. A. H. X. D. A. (2001). Building Thermal Performance Analysis By Using Matlab/Simulink. Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro Brazil, 473–480.

Nielsen, L. (2015). Analysis of the radiant heating and cooling System in the Green Energy Laboratory (Master's thesis, NTNU).

Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C. N., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., ... Morari, M. (2012). Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, 45, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.022>

Park, S. H., Chung, W. J., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2014). Evaluation of the thermal performance of a Thermally Activated Building System (TABS) according to the thermal load in a residential building. *Energy and Buildings*, 73, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.008>

Peronato, G., Kämpf, J. H., Rey, E., & Andersen, M. (2017). Integrating urban energy simulation in a parametric environment: A Grasshopper interface for CitySim. *Proceedings of 33rd PLEA International Conference: Design to Thrive, PLEA 2017*, 2(2009), 2124–2131.

Prívara, S., Šíroký, J., Ferkl, L., & Cigler, J. (2011). Model predictive control of a building heating system: The first experience. *Energy and Buildings*, 43(2–3), 564–572. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.022>

Rad, F. M., Fung, A. S., & Leong, W. H. (2013). Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump systems in cold climate, Canada. *Energy and Buildings*, 61, 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.036>

Rao, C. V., & Rawlings, J. B. (2000). Linear programming and model predictive control. *Journal of Process Control*, 10(2), 283–289. [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(99\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(99)00034-7)

Rawlings, J. B., Patel, N. R., Risbeck, M. J., Maravelias, C. T., Wenzel, M. J., & Turney, R. D. (2018). Economic MPC and real-time decision making with application to large-scale HVAC energy systems. *Computers and Chemical Engineering*, 114, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.10.038>

Rhee, K. N., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2011). Evaluation of the control performance of hydronic radiant heating systems based on the emulation using hardware-in-the-loop simulation. *Building and Environment*, 46(10), 2012–2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.012>

Riederer, P., Vaezi-Nejad, H., Huseinidee, A., & Bruyat, F. (2001). Development and Quality Improvement of Hvac Control Systems in Virtual Laboratories. *Building Simulation* 2001, 881–888. Retrieved from http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2001/BS01_0881_888.pdf

Roudsari, M. S., & Pak, M. (2013). Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 3128–3135.

Safizadeh, M. R., Schweiker, M., & Wagner, A. (2018). Experimental Evaluation of Radiant Heating Ceiling Systems Based on Thermal Comfort Criteria, (October). <https://doi.org/10.3390/en11112932>

Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy & Buildings*, 70, 441–454. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>

Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2015). Ground-Source Heat Pumps: Fundamentals, Experiments and Applications. *Ground-Source Heat Pumps: Fundamentals, Experiments and Applications*. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01812-3>

Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2016). Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room connected to a ground-coupled heat pump. *Energies*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/en9040228>

Sastry, G., & Rumsey, P. (2014). VAV vs. Radiant. *ASHRAE Journal*, 56(5), 17–24.

Schmelas, M., Feldmann, T., & Bollin, E. (2015). Adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS) based on a multiple regression algorithm. *Energy and Buildings*, 103, 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.012>

Sebarchievici, C., Dan, D., & Sarbu, I. (2015). Performance assessment of a ground-coupled heat pump for an office room heating using radiator or radiant floor heating systems, 118, 88–100. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.407>

Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101, 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>

Sourbron, M., Verhelst, C., & Helsen, L. (2013). Building models for model predictive control of office buildings with concrete core activation. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(3), 175–198. <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.680497>

Strand, R. K., & Pedersen, C. O. (2002). Modeling radiant systems in an integrated heat balance based energy simulation program. *ASHRAE Transactions*, 108 PART 2, 979–987.

Sykulski, J. R. (1999). *Building Services Engineering Research and Technology*. <https://doi.org/10.1177/014362449902000304>

Thieblemont, H., Haghighat, F., Ooka, R., & Moreau, A. (2017). Predictive control strategies based on weather forecast in buildings with energy storage system: A review of the state-of-the art. *Energy and Buildings*, 153, 485–500. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.010>

TRANSSOLAR Energietechnik, Library, S. C., TRANSSOLAR Energietechnik, Transsolar, د. غسان, Library, A., ... Coordinator, T. (2017). *Trnsys 18*, 3, 49–50. Retrieved from <http://sel.me.wisc.edu/trnsys%0Ahttp://software.cstb.fr%0Ahttp://www.tess-inc.com>

Trillat-Berdal, V., Souyri, B., & Fraisse, G. (2006). Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors. *Energy and Buildings*, 38(12), 1477–1484. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.04.005>

Turner, W. J. N., Walker, I. S., & Roux, J. (2015). Peak load reductions: Electric load shifting with mechanical pre-cooling of residential buildings with low thermal mass. *Energy*, 82, 1057–1067. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.011>

Ulleberg, O., & Morner, S. O. (1997). TRNSYS Simulation Models for Solar Hydrogen Systems. *Solar Energy*, 59(4), 271–279.

Urchueguía, J. F., Zacarés, M., Corberán, J. M., Montero, Á., Martos, J., & Witte, H. (2008). Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast. *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2917–2923. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.03.001>

Váňa, Z., Cigler, J., Šíroký, J., Žáčeková, E., & Ferkl, L. (2014). Model-based energy efficient control applied to an office building. *Journal of Process Control*, 24(6), 790–797. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.01.016>

Viot, H., Sempey, A., Mora, L., Batsale, J. C., & Malvestio, J. (2018). Model predictive control of a thermally activated building system to improve energy management of an experimental building: Part II - Potential of predictive strategy. *Energy and Buildings*, 172, 385–396. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.062>

Wang, E., Fung, A. S., Qi, C., & Leong, W. H. (2012). Performance prediction of a hybrid solar ground-source heat pump system. *Energy and Buildings*, 47, 600–611. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.035>

Wang, S., & Ma, Z. (2008). Supervisory and optimal control of building HVAC systems: A review. *HVAC and R Research*, 14(1), 3–32. <https://doi.org/10.1080/10789669.2008.10390991>

Xi, C., Hongxing, Y., Lin, L., Jinggang, W., & Wei, L. (2011). Experimental studies on a ground coupled heat pump with solar thermal collectors for space heating. *Energy*, 36(8), 5292–5300. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.037>

Xi, C., Lin, L., & Hongxing, Y. (2011). Long term operation of a solar assisted ground coupled heat pump system for space heating and domestic hot water. *Energy and Buildings*, 43(8), 1835–1844. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.033>

Xing, L. (2020). Indoor and Built Simulation of hybrid GSHP systems utilizing radiant ceiling terminal and system evaluation with analytic hierarchy process method. <https://doi.org/10.1177/1420326X19898235>

Yang, W., Zhou, J., Xu, W., & Zhang, G. (2010). Current status of ground-source heat pumps in China. *Energy Policy*, 38(1), 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.021>

Yu, Byeong Ho, et al. "Influences of different operational configurations on combined effects of room air stratification and thermal decay in UFAD system." *Energy and Buildings* 176 (2018): 262-274.

Zhai, X. Q., & Yang, Y. (2011). Experience on the application of a ground source heat pump system in an archives building. *Energy and Buildings*, 43(11), 3263–3270. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.029>

Zhao, M., Gu, Z. L., Kang, W. B., Liu, X., Zhang, L. Y., Jin, L. W., & Zhang, Q. L. (2016). Experimental investigation and feasibility analysis on a capillary radiant heating system based on solar and air source heat pump dual heat source. *Applied Energy*, 185, 2094–2105. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.043>

