

Nesnelerin İnterneti Bağlamında Isıl Konfor Uygulamalarının İncelenmesi

Ali SAKİN

Dr. Öğr. Üyesi
İstanbul Gelişim Üniversitesi
Uçak Mühendisliği
İstanbul
asakin@gelisim.edu.tr
orcid: 0000-0001-5883-6335

ÖZ

Bu çalışmada Endüstri 4.0 kapsamında, nesnelerin interneti konusunun ısı konfor alanına getirdiği yenilikler ve klasik yöntemlere göre farklılıkları incelenmiştir. Özellikle nesnelerin interneti gelecek projeksiyon açısından incelenirken, devamında ısı konfor uygulamaları hakkında bilgiler verilmiştir. Nesnelerin interneti, mobil ve giyilebilir teknolojiler, çevresel algılayıcılar ile veri toplanması, klasik ısı konfor ölçekleri ile değerlendirilmesi ve ayrıca kişisel ısı konfor sistemleri çalışma kapsamında incelenmiştir. Verilerin sınıflandırılması ve yeni modellerin oluşturulması için kullanılan makine öğrenme algoritmalarının işleyişi ve sonuçlar üzerindeki etkisi hakkında klasik ısı konfor modelleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Isıl konfor uygulamalarında klasik modellerin belirli bir grup üzerinde sınırlı parametrelerle denemesi, aynı şartlarda farklı kişiler için farklı sonuçlar vermektedir. Giyilebilir ve mobil teknolojiler kullanılarak elde edilen verilerle, makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak oluşturulan modellerde mevcut popülasyonun tercihleri dikkate alındığından belli periyodlarla güncellenebilmekte ve ısı konfor açısından memnuniyet klasik modellere göre yüksek ve sürdürülebilir olmaktadır.

Anahtar Kelimeler

Isıl Konfor, Nesnelerin İnterneti, Makine Öğrenmesi.

A Review of Thermal Comfort Applications as a Part of Internet of Things (IoT)

ABSTRACT

In this study, the innovations and enhancements of thermal comfort which was brought by IoT in scope of Industry 4.0 was introduced and compared with the classical models. Primarily IoT was evaluated in terms of future projection afterwards thermal comfort applications were discussed. IoT, mobile and wearable technologies, data collection with environmental sensors, evaluation of thermal comfort scales and personal thermal comfort systems were also studied within the context of the study. Machine learning algorithms and their effect on the results were evaluated by comparing with the classical thermal comfort models. In thermal comfort applications, testing of classical models with limited parameters on a specific group gives different results for different people under the same conditions. With the data obtained using wearable and mobile technologies, machine learning algorithms can be used to establish a model by considering preferences of current population and they can be updated for certain periods and satisfaction percentage of thermal comfort is high and sustainable in comparison with the classical models.

Keywords

Thermal Comfort, Internet Of Things, Machine Learning.

Geliş Tarihi : 14.09.2018
Kabul Tarihi : 16.11.2018

1. GİRİŞ

Isıl konfor kapsamında iç ortam hava kalitesinin, insanlar için kabul edilebilir seviyede şartlandırılmasına yönelik farklı teknolojiler kullanılarak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Günlük hayatımıza arabadan, toplu taşımaya, evden işyerine kadar birçok alanda ısı konforunun sağlanması mühendislik çalışmalarının başlıca ilgi alanı olmuştur ve olmaya da devam edecektir. Temel ısı konfor modellerinde iç ortam sıcaklığı, ortalama yüzey sıcaklığı, hava hızı, nem, giysi yalıtımı ve metabolik aktivite gibi parametrelerin ısı konforu üzerinde etkileri araştırılırken modellerin geçmişte oluşturulması ve değişikliğe açık olmamasından dolayı farklı parametrelerin (patoji, yaş, cinsiyet vb.) adaptasyonuna olanak sağlayamamaktadır. Yeni gelişen teknolojiler ve cihazların birbiri ile olan etkileşimleri sosyal, sağlık, iş, çevre gibi birçok alanda farklı konseptlerin oluşmasına ve bilinen modellerin yeni parametrelerle tekrar yorumlanmasına sebep olmuştur.

Bu çalışmada öncelikli olarak Endüstri 4.0 kavramı ile birlikte günlük hayatımıza giren nesnelere interneti başlığı, diğer teknolojik gelişmelerle birlikte detaylı olarak incelenecektir. Üçüncü bölümde ise öncelikle ısı konfor alanında nesnelere interneti uygulamalarına olanak sağlayan teknolojiler, devamında ise klasik ısı konfor modeli, nesnelere interneti tabanlı ısı konfor modeli ve kişisel ısı konfor modelleri incelenecektir. Sonuç kısmında ise ısı konfor modellerinde nesnelere interneti kullanımı sayesinde klasik modellere göre oluşturduğu avantajlar tartışılacaktır.

2. ENDÜSTRİ 4.0 ve NESNELERİN İNTERNETİ (INTERNET of THINGS (IoT))

Endüstriyel devrimler, önemli kilometre taşlarına göre sınıflandırılmakta ve oluşturdukları etki ile anılmaktadır. Endüstri 4.0, dokuz ana başlıktan oluşan (Şekil 1), gelecekte endüstriyel alanda temel teşkil edecek uygulamaları içeren bir kavramdır. Endüstri 4.0 kapsamında öne çıkan konulardan biri nesnelere internetidir ve fiziksel nesnelere, aletlerin, araçların, binaların, diğer elektronik devre barındıran nesnelere, yazılımlar ve sensörlerin ağ üzerinden bağlanarak gerçekleştirilen veri alışverişini ifade edilmektedir.



Şekil 1. Endüstri 4.0 temel başlıklar [1].

Gartner, her yıl farklı alanlarda teknoloji trendlerini gösteren ve aynı zamanda yeni gelişmekte olan teknolojilerle ilgili kapsamlı bir rapor hazırlamakta ve ilgili kurumların bilgisine sunmaktadır. Şekil 2'de 2018 Ağustos ayından itibaren gelişmekte olan teknolojilerin gidişatı ve süreci hakkındaki kestirimleri belirtmektedir. Bu grafikteki teknolojinin evrimleşme aşamalarını betimleyen süreçler ve açıklamaları aşağıda belirtilmiştir [2].

- **İnovasyon Tetikleme:** Potansiyel bir teknoloji atılımı işleri tetikler. Kavramın erken dönem kanıtları ve medya ilgisi, önemli bir tanıtım tetiklemektedir. Genellikle kullanılabilir ürünler mevcut değildir ve ticari uygulanabilirliği kanıtlanmamıştır.
- **Şişirilmiş Beklentilerin Zirvesi:** Erken tanıtım, çoğu zaman hatalarla birlikte bir dizi başarı öyküsü üretir. Bazı şirketler harekete geçer bazıları ise herhangi bir aksiyon almaz.
- **Hayal Kırıklığı Çukuru:** Deneysel çalışma ve pratik uygulamaların sonuç vermemesi neticesinde ilgi giderek azalır. Teknoloji üreticisi ya silkinip durumu atlatabiliyor ya da başarısızlığa uğruyor. Yatırımlar, teknolojik gelişmeyi erken benimseyenlerin memnuniyeti sağlandığı sürece devam etmektedir.
- **Aydınlanma Süreci:** Teknolojinin işletmeye nasıl fayda sağlayacağı ile ilgili daha fazla örnek oluşmaya başlıyor ve teknoloji daha geniş anlamda anlaşılabilir hale geliyor. İkinci ve üçüncü nesil ürünler teknoloji sağlayıcıları tarafından üretiliyor ve daha fazla girişim finans ediliyor; korumacı şirketler ihtiyatlı kalıyor.

Günümüzde nesnelerin interneti, klima, kombi, akıllı saat, akıllı ev sistemleri, akıllı binalar ve aletleri gibi birçok uygulamada hayatımıza girmeye başlamıştır. Ayrıca kullandığımız akıllı telefon ve tabletler de yer alan ev uygulaması ile farklı kanallardan veri alışverişinde bulunabilen cihazların tek bir yazılımda toplanması ile ev sistemlerinin yönetimine (akıllı ev sistemleri vb.) başlanmıştır.

Örnek olarak çalışan kişilerin mesai saatleri boyunca evde olmamaları ve evde kısıtlı zaman geçirdiklerinden dolayı uzaktan kontrol edilebilen nesnelere ihtiyaç duymaktadırlar. Endüstriyel kuruluşlar ise hacimlerin daha verimli ve etkili bir şekilde şartlandırılmasını hedef almaktadır. Tüm bu talepler karşısında nesnelerin interneti kapsamında cihazların bir biri ile olan iletişimleri sayesinde hem ısı konforu yüksek hem de daha verimli şartlandırma prosesleri planlanabilmektedir. Ayrıca konut ya da ofislerde kişilerin olmadığı durumda enerji sarfiyatına sebep olan sistemlerin çalıştırılmaması ya da belli bir kısıtlama dâhilinde çalıştırılarak enerji tasarrufu da sağlanabilmektedir.

Isıl konfor modelleri, anket yoluyla sübjektif değerlendirmelerin, ölçülen fiziksel değerlerle korelasyonu sonucu oluşturulmaya çalışılan modellerdir. Ölçüm faaliyeti anket ile yapıldığından kullanıcı geri bildiriminin alınması, özellikle nesnelerin interneti sayesinde daha fazla yöntemle yapılabilmektedir. Örnek olarak herkeste mevcut olan mobil telefonlar, anket tabanlı çalışmalarda verilerin iletilebilmesi için oldukça önemli bir altyapı sağlamak ve aynı zamanda giyilebilir teknolojiler ve mobil cihazların sağladığı diğer veriler sayesinde sadece anket geribildirimleri değil farklı bilgilerde toplanabilmektedir.

3. ISIL KONFOR

Bu bölümde ısı konfor konusu kapsamında öncelikli olarak nesnelerin interneti kullanımının ısı konfor modeline katkı sağladığı çevresel sensörler, giyilebilir teknolojiler ve makine öğrenme algoritmaları incelenecektir. Metabolik ısı üretimi, insan vücudunun termal enerji dengesi ile elde edilmekte ve ısı konfor üzerinde oldukça önemli rol oynamaktadır. Kişinin metabolik olarak ürettiği ısı, terleme ve titreme gibi kişisel denetim mekanizmaları devreye girmeden çevreye olan ısı kaybına eşit olduğu ısı denge pozisyonu, ısı konfor noktasıdır.

İnsanın kor sıcaklığı (core temperature) 37 °C'dir ve hipotalamus (beyinde kor sıcaklığı kontrol eden merkez) dış çevresel koşullarda bir değişim algıladığında vücudun diğer kısımlarına sinyal göndererek titreme ya da terleme yolu ile sıcaklığın düzenlenmesini sağlar. Bütün bu etkileşimler esnasında kişi kendini ısı konfor anlamında konforlu hissetmez.

Tropikal ülkelerde termal konforun iç mekânlarda sağlanması oldukça önemlidir. Bireyler genellikle mevcut hava şartlandırma sistemlerinde minimum sıcaklık, maksimum fan ayarı yaygın olarak kullanılmaktadır fakat bu durum ısı konfor şartlarını sağlamamaktadır ve aynı zamanda insan sağlığı üzerinde negatif etkilere neden olmaktadır [5]. Mevcut iklimlendirme sistemleri ısı konfordan ziyade enerji tüketimi ve regülasyonlar üzerine odaklanmıştır. Binalarda havalandırma kaynaklı elektrik tüketimi, global tüketimin yarısından fazlasını oluşturmakta ve ilerleyen yıllarda bu oran giderek artacaktır [6]. Enerji tüketiminin azaltılması için, binalarda ısı konfor ve bireylerin üretkenliklerinin sürdürüldüğü veya iyileştirildiği etkili stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır. Önceki çalışmalar sonucunda ısıtma, havalandırma ve şartlandırma (HVAC) ve aydınlatma sistemlerinde, her hacimdeki kullanım durumu (occupancy detection) dikkate alınarak yapılan iyileştirme ve optimizasyon neticesinde %30 enerji tüketim tasarrufu sağlanabilmektedir [7,8].

Isıl konfor, ortamdaki kişilerin memnuniyetini [9,10], sağlığını [11,12] ve üretkenliklerini [13-16] etkileyen önemli bir hedeftir. Ijzerman ve Semin [17] ofis ortam sıcaklığının çalışanlar arasındaki yakınlığı ve arkadaşlık ilişkilerini arttırdığını bildirmişlerdir. Ayrıca ofis ortam sıcaklığının ısı konfor açısından optimum düzeyde tutulmasının şirketler açısından rekabetçi bir avantaj sağladığı, personel giderlerinde %12,5'e kadar tasarruf sağlanabileceğini bildirmişlerdir. Hedge ve ark. [18] kadın ofis çalışanlarının sıcaklığın azaltılması ile serin hissettiklerini ve yazım hataları %74 artarken üretkenliğinde %46 azaldığını belirtmişlerdir.

Isıl konfor konusunda, klasik modeller ve nesnelerin interneti tabanlı modeller çalışmanın devamında verilmiştir. Isıl konforda nesnelerin interneti uygulama unsurları ve ısı konfor modelleri olmak üzere iki ana başlıkta incelenmiştir.

3.1. Isıl Konforda Nesnelerin İnterneti Uygulama Unsurları

Isıl konfor uygulamalarında klasik veya nesnelerin interneti tabanlı modellerde ölçümler için farklı sensörler ve teknolojiler kullanılmaktadır. Ayrıca elde edilen verilerin değerlendirilmesi amacı ile makine öğrenme algoritmaları çalıştırılmaktadır.

3.1.1. Çevresel Sistem ve Sensörler

Çevresel sensörler, ortam değişkenlerini kayıt altına alan; sıcaklık, nem, hava hızı değerleri ve kullanım durumu (occupancy detection) algılanması gibi işlevleri yerine getirirler. Sıcaklık, basınç, nem ve ışık sensörleri de kullanım durumunu algılamada kullanılabilir [24]. Bu sensörlerden elde edilen ham data gürültülü sinyal (noisy signal) olacağından özelliklerin belirlenmesi (feature extraction) ve sinyal verisinin tekrar düzenlenmesi gerekmektedir. Düzenlenen sinyal makine öğrenme algoritmaları ile sınıflandırılarak kullanım durumunu algılamada kullanılabilir ve akıllı binaların çoğunda bu sensörler yer almaktadır. Sistemin dezavantajı ise ortam değişimlerinin sensörler tarafından geç algılanması ve dolayısıyla verimdeki düşüş olarak gösterilebilir.

Bina yönetim sistemleri veya akıllı binalar, havalandırma sistemlerini kişilerin olmadığı yerlerde (kullanım olmayan durumda – no occupancy) kapatarak veya hacimdeki kişi sayısına göre havalandırma prosesini ayarlayarak enerji tüketimini azaltarak enerji kullanımını optimize etmektedir [19]. Bunun yanında kalabalık içinde kişi sayımı (crowd counting) ısı konfor ve bina yönetim sistemleri dışında da çeşitli uygulamalarda da faydalanılabilir. Örnek olarak restoran servislerinde, alışveriş merkezlerinde ve ulaşım ağlarında müşteri memnuniyeti kapsamında kullanılacak teknolojiler arasında yer almaktadır. Ayrıca gerçek hayatta, acil durumlarda tahliye prosedürlerinin de iyileştirilmesi gibi hayati noktalarda uygulanabilmektedir.

Pasif Infra-Red (PIR) Sensörler: Günümüzde en yaygın olarak kullanılan algılama sensörü Pasif Infra-Red (PIR) sensörleridir. En büyük dezavantajı, statik haldeki kişileri algılamamasıdır. İkili, algılama sistemlerinden (var/yok) farklı olarak belli bir bölgede kalabalık içindeki kişi sayısını belirleyebilmektedir.

Kamera Tarama: Kamera tarama sistemleri de

kişilerin sayımı konusunda en çok kullanılan yöntemlerden biridir fakat bakış açısı ve yeterli aydınlatma koşulları sistemin doğru işleyişi açısından önemlidir. Yüksek işlemci maliyeti, data işleme ve en önemlisi sürekli kamera ile izleme yapmak kişilerin mahremiyeti açısından dezavantaj teşkil etmektedir.

RFID (Radyo Frekansı Tanımlaması): Bluetooth veya kombinasyonları şeklinde RF (radyo frekansı) ile algılama cihazları kullanım durumunu (occupancy detection) belirlemek için kullanılmaktadır fakat bu durumda kişilerin üzerinde ilgili cihazların veya bu unsurları ihtiva eden teknolojilerin olması gerekmektedir. Bu da geniş ölçekte kişilerin sayımı için elverişli olmamaktadır.

Akıllı Sayaç (Smartmeter): Akıllı sayaç, kullanıcı ile elektrikli aletlerin etkileşimini analiz ederek enerji tüketimini ölçmektedir. Örnek olarak güç verisinin istatistiksel değişimi incelenerek kullanım durumu (occupancy detection) analizi gerçekleştirilebilir [20]. Elde edilen güç-kullanım verisi makine öğrenme algoritmaları kullanılarak, kullanım durumu modeller (pattern) ile sınıflandırılır. Sonuç olarak ikili veri sağlar (kullanım var ya da yok), kişi sayısını tahmin etmek için kullanılamaz.

CO₂ Sensörleri: Belli bir hacmin kullanım durumunun belirlenmesinde kullanılan en etkili yöntemlerden biridir [21]. Weekly ve ark. [22] tarafından kısmi ve adi diferansiyel eşitlik (partial differential equation-ordinary differential equation PDE-ODE) bazlı algoritma kullanarak ortamdaki CO₂ konsantrasyonunu, kişi sayısını ve havalandırma seviyesini belirlemek için model önermişlerdir. Ayrıca Jiang ve ark. [23] dinamik fiziksel modele ilave olarak makine öğrenmesi algoritmaları ile CO₂ seviyesi ve kullanım durumunu (occupancy level) ilişkilendirmişlerdir. CO₂ sensörlerinin en büyük handikabı, CO₂ algılama esnasında geçen zaman ve değişimlere geç cevap vermesidir. Tüm bu gelişmelerden farklı olarak Endüstri 4.0 kapsamında ön plana çıkan makine öğrenmesi (machine learning), derin öğrenme (deep learning) algoritmaları ile farklı fonksiyonları gerçekleştirmek üzere tasarlanmış sistemler farklı olguları algılayacak şekilde farklı işlevler yüklenebilmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde günümüzde hali hazırda kullandığımız birçok sistem veya sensör kendi işlevlerinin dışında farklı fonksiyonları da yerine getirebilme kabiliyeti kazanması muhtemeldir.

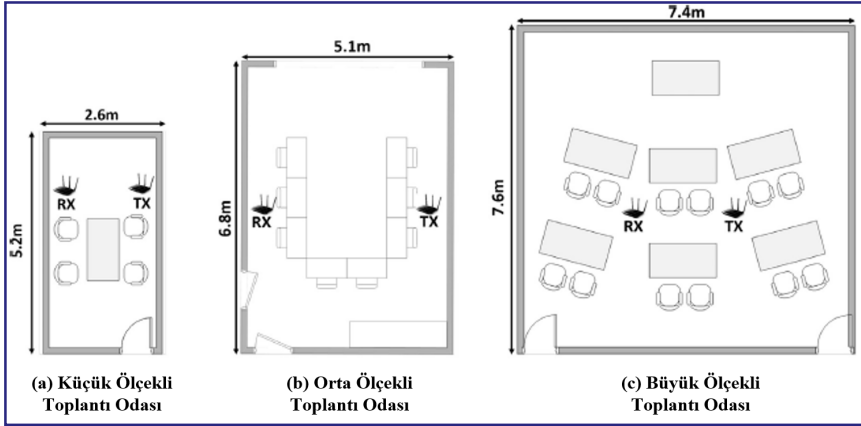
Bluetooth Cihazlar: Mobil cihazların çoğunda bluetooth özelliği mevcuttur ve düşük enerji tüketiminden dolayı tercih edilen iletişim/aktarım uygulamalarındandır. Mobil cihazlardaki uygulamalarla kalabalık sayımı (crowd counting) yapılabilir fakat kişilerin mobil cihazı taşıması ve bluetooth özelliğini aktif konuma almaları gerekmektedir [25].

Kablosuz Ağlar (WiFi): Günümüzde neredeyse her cihazın bir kablosuz ağa bağlı olması, kullanım durumu algılama (occupancy detection) veya kalabalık sayımı (crowd counting) açısından en kullanışlı yöntemlerden biridir. Mevcut cihazlar kullanılarak yapılacak algılama işleminde sonuçlar oldukça net ve kesin bir şekilde elde edilebilir fakat algılanma kullanıcının mobil cihaz taşıması durumunda gerçekleşecektir.

Kablosuz ağları kullanarak pasif algılama işlemi

için Zou ve ark. [19], kablosuz ağ sinyallerinin ortamdaki kişiler tarafından değişimini ortama yerleştirdikleri verici (TX transmitter) ve alıcı (RX receiver) router yardımıyla ölçmeye çalışmışlardır. Bu işlemde alıcı ve verici router arasında durum bilgisi kanalı (Channel state Information (CSI)) kullanılarak, insan hareketi kaynaklı sinyal yayılımının farklı durumları odanın boş olması ve farklı mevcudiyet durumlarına göre sinyal toplayarak analiz etmişlerdir. Elde edilen sinyaller gürültülü (noisy) veri olduğundan, sinyal verisi işlenerek farklı yapılar (pattern) makine öğrenme algoritmaları ile tanımlanmaya çalışılmıştır. Başlangıçta elde edilen veriler, modelin öğretilmesi (training) aşamasında kullanılmıştır.

Alıcı ve verici router yerleştirilen, çalışmada kullanılan odalar Şekil 3'de, veri toplama esnasında oda görüntüsü ve kişilerin hareketi Şekil 4'de gösteril-



Şekil 3. Algılama testlerinde kullanılan oda tipleri ve ölçüleri



Şekil 4. Algılama testlerinde kişilerin hareketleri [19]

miştir. Algılama testlerinde 3 farklı oda tipi için 4,7 ve 11 kişi veri toplama aşamasında görevlendirilmiştir. Farklı iki günde deneyler iki defa tekrarlanarak her kullanım durumu için 21.000 örnekleme yapılmıştır. Sonuç olarak elde ettikleri model ile kullanım durumunu (occupancy detection) %99,1, kalabalık sayımını (crowd counting) ise %92,8 doğruluk ile sağlamışlardır. Sistem belirlenen alanda, kişilerin internete veya ağa bağlı mobil cihaz taşıma zorunluluğu olmadığından pasif algılama sistemi olarak nitelendirilmektedir.

Sıcaklık: Çalışmalarda sıcaklık ölçümü için farklı tipte cihazlar kullanılmıştır.

- NEST Termostat (NEST learning thermostat): NEST API üzerinden NEST hesabı ile erişilmektedir.
- Omega iSD-TC: Endüstriyel termokupl.
- DHTII: Arduino platformu için sıcaklık ve nem sensörü

Nem: Nem ölçümünde Nest Learning Thermostat ve DHTII Arduino sensörleri sıcaklıkla beraber nem ölçümü de yapabilmektedir. Bu sensörler odanın farklı lokasyonlarına yerleştirilmek suretiyle havalandırma sisteminin (HVAC) ürettiği ısı kaynaklı bağıl nem gradyanını algılayabilmektedir.

Hava Hızı: İç ortam ısı konfor anemometreleri ile ölçülür.

Ağ ve Bağlanabilirlik: Cihazlardaki veriler, kablolulu veya kablosuz olarak farklı iletişim kanalları ile (WiFi, RFID, Bluetooth, Cellular, Ethernet) su-

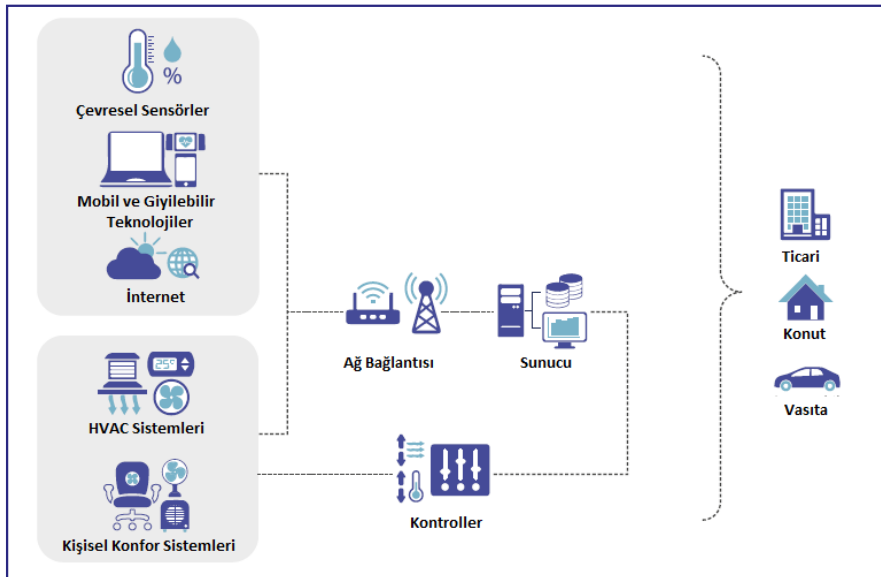
nucu ya da yerel ağa veri olarak aktarılabilir.

Merkezi Sunucu: Merkezi sunucu sırasıyla aşağıdaki görevleri yerine getirmektedir.

- Veri Depolama:** Geçmiş ve gerçek zamanlı verilerin toplanmasını sağlar.
- Hesaplama (Analytics):** Isıl konforun iyileştirilmesi için gerçek zamanlı veri modelini sentezleyerek hangi kontrollerin yapılacağı belirlenir.
- Optimizasyon:** Bir önceki basamaktan farklı olarak diğer hedeflerin (enerji verimliliği, enerji tasarrufu) birleştirilmesi sağlanır.
- Komutların Harekete Geçirilmesi:** Kontrol üniteleri ile ilgili komutların gönderilmesi ve işlemin başlatılması aşaması gerçekleştirilir.

Şekil 5'de kişisel ısı konfor sisteminin yapısı gösterilmiştir. Çevresel sensörler, giyilebilir teknolojiler ve diğer bilgiler, nesnelerin interneti yardımıyla sunucuya ilettikleri veriler değerlendirildikten sonra havalandırma sistemi ya da kişisel ısı konfor unsurlarındaki bileşenleri harekete geçirerek kullanıcı için en uygun konfor noktası ayarlanabilmektedir.

Kişisel ısı konfor sistemleri, cihazlarla ısıtma ya da soğutma yaparak bireylerin lokal ısı çevresini kontrol ederek ısı konfor gerekliliklerini veya taleplerini karşılamaktadır [28,29]. Kişisel ısı konfor cihaz uygulamaları içeren bir ofis koltuğu Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. Kullanıcı odaklı çevresel kontrol sistem mimarisi [26]



Şekil 6. Kişisel ısı konfor sistemleri içeren ofis koltuğu, bu koltuktaki ısıtıcı şeritler ve fanların kontrol edilmesinde kullanılan kontrol ünitesi [27]

3.1.2. Giyilebilir Teknolojiler

Giyilebilir teknolojiler; akıllı telefonlar veya saatler, üzerlerindeki biyolojik sensörler sayesinde nabız sayısı, stress indeksi, oksijen saturasyonu, uyku saatleri, adım sayısı gibi bilgiler ölçülebilmektedir. Nabız sayısı, ivmelenme gibi değerleri ölçen çok sayıda giyilebilir sensörler mevcuttur. Akıllı bileklik (Şekil 7) üzerindeki sensörler ile; nabız sayısı, deri sıcaklığı, ortam ışığı, galvanik deri sıcaklığı, atmosfer basıncı, yükseklik, adım sayısı, ivmelenme, jiroskop, mesafe ölçümü, kalori ve UV ışın ölçümü yapabilmektedir. Ayrıca açık API üzerinden, bileklikte yer alan tüm sensörlere ait veri erişimi sağlanabilmekte ve iç algoritma sayesinde sinyal üretmek için kullanılmaktadır. Bu bileklikler ofis içi ısı konfor optimizasyonu için oldukça uygundur. Cep telefonlarının IoT özelliği giriş (gateway) olarak kullanılarak ve ses tanıma özelliği ile kullanıcıların durumlarını çok soğuk, soğuk, konforlu, ılık, sıcak veya çok sıcak şeklinde geri bildirimler olarak alınabilmektedir.



Şekil 7. Akıllı bileklik

3.1.3. Makine Öğrenme Algoritmaları

Nesnelerin interneti tabanlı ısı konfor modelinde elde edilen verilerin sınıflandırılması ve değerlendirilmesi aşamasında makine öğrenme algorit-

malarından faydalanılmaktadır ve bu algoritmalar klasik ısı konfor modellerinden büyük oranda ayrışmayı sağlayan en önemli unsurlardan biridir.

Regresyon Algoritmaları: Cevap değişkenlerini, farklı değişkenler arasında matematiksel ilişki kurarak tahmin eder. En küçük kareler yöntemi, lineer ve lojistik regresyon örnek olarak verilebilir. Regresyon algoritmalarının hassasiyeti, kurulan matematiksel modelin gerçeği ne kadar yansıttığına bağlıdır.

Karar Ağaçları Algoritmaları (Decision Trees): Elde edilen verilerden karar ağacı oluşturarak model kuralı belirlenir ve mevcut veriler bu kurala göre analiz edilerek sonuç elde edilir. Sınıflandırma ve regresyon ağacı ve şartlı karar ağaçları (Conditional Decision Trees), en yakın K komşusu (k nearest neighborhood) örnek olarak verilebilir. Hem nümerik hem de kategorik yaklaşımlar için kullanılabilir, algoritma büyük kapsamda veri ile çalışmaya uygun ve aşırı uygunluk (over fitting) durumuna yatkındır. Dolayısıyla Rastgele Orman (Random Forest) ya da Gradyan Arttırma (Gradient Boosted Trees) kullanılarak aşırı yatkınlık (overfitting) riski azaltılabilir.

Bayesian Algoritmalar: Önceki, olayların olasılığına dayanarak Bayes teoremini uygular. Naive Bayes ve Bayesian Network örnek olarak verilebilir. Bayes' teoremi bütün giriş özelliklerinin birbirinden bağımsız olduğunu kabul eder. Bayes algoritmaları oldukça hassas ve büyük veri grupları çalışması için uygundur. Hem sayısal hem de kategorik veriler için uygundur.

Kernel Algoritmaları: Kernel algoritmaları giriş verisi, çok boyutlu vektör uzayında pattern veya

non lineer bağıntılar modeller. Destek vektör makinaları (Support Vector Machines), radyal tabanlı yapay sinir ağları (Radial Basis Function), Gaussian Prosesi ve Linear Diskriminant analizleri örnek olarak verilebilir. Kompleks problemlerin modellenmesinde kullanımları uygundur fakat sayısal hesaplama maliyetleri yüksektir. Kategorik ve sayısal veri için uygundur.

3.2. Isıl Konfor Modelleri ve Uygulamaları

Kabul edilebilir iç ortam koşullarının sağlanması, çalışanların memnuniyeti ve üretkenlikleri açısından önemlidir. EN ISO 7730 [30] Standardı'nda ısı konfor "Isıl olarak memnuniyet verici ortam koşullarının hazırlanması" veya ASHRAE 55 [31] normunda ise "Öznel değerlendirme sonucunda ısı çevreden memnun olma durumu" olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlara dikkat edilirse memnuniyet kişiden kişiye değişebilen öznel bir olgu olduğundan, ısı konfor objektif olarak ölçülebilen bir nicelik değildir.

Isıl konfor uygulamaları fonksiyonel olarak çalışan memnuniyeti üzerine odaklanmış gibi görünse de aynı zamanda ısı konfor ihtiyaçlarının doğru bir şekilde belirlenmesi ve kaynakların verimli bir şekilde kullanımı açısından enerji tüketimi konu-

sunda verimlilik sağlamaktadır. Isıl konfor, özellikle havalandırma (HVAC) sistemlerinin operasyonlarında önemli rol oynamaktadır ve gelişmiş ülkelerde havalandırma sistemleri bina kaynaklı enerji tüketiminin %50'sini oluşturmaktadır[32]. Nesnelere interneti tabanlı modellerde, ısı konfor anketi sonuçlarının HVAC sistemine geri bildirim vererek ısı konfor alanı doğrultusunda çalışmasını sağlaması hem konfor hem de enerjinin verimli kullanımını açısından farklı bir yaklaşım sunmuştur. Bu bölümde klasik ısı konfor modelleri, nesnelere interneti tabanlı ısı konfor ve kişisel ısı konfor modelleri detaylı olarak incelenecektir.

3.2.1. Klasik Isıl Konfor Modelleri

Tahmini Ortalama Oy Modeli (PMV)

Isıl denge teorisini kullanarak, kişinin çevresi ile etkileşiminden kaynaklı ısı konforunu belirlemek için PMV yaklaşımı Fanger [32] tarafından geliştirilmiştir. Fanger, kişinin ısı konforunu belirleyen altı parametreyi; operatif sıcaklık, bağıl nem, hava hızı, ortalama ışınım sıcaklığı, giysi yalıtımı ve metabolik oran olarak belirtmiştir.

Fanger, PMV endeks değerlerinin anket yolu ile subjektif olarak ölçülmesinde Tablo 1'de verilen 7 kademeli ölçek kullanmıştır. Bu ölçeğe göre soğuk

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - P_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (1)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - l_{cl} \cdot (3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)) \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \sqrt{v_{ar}} & 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} f_{cl} = 1,00 + 1,290 l_{cl} & l_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ f_{cl} = 1,05 + 0,645 l_{cl} & l_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (4)$$

Bu denklemlerde,

M	metabolik oran (W/m ²)
W	efektif mekanik güç (W/m ²)
l _{cl}	giysi yalıtımı (m ² K/W)
f _{cl}	giysi alan faktörü
t _a	hava sıcaklığı (°C)
\bar{t}_r	ışınım sıcaklığı (°C)
v _{ar}	hava hızı (m/s)
P _a	su buharının kısmi basıncı (Pa)
h _c	ısı taşınım katsayısı (W/(m ² K))
t _{cl}	giysi yüzey sıcaklığı (°C) olarak tanımlanmaktadır.

(-3), nötr (0) ve sıcak (3) değerleri arasında denekler ısı hissiyatlarını ifade etmişlerdir.

Tablo 1. PMV Endeks Değerleri

Ölçek	Isıl Konfor Durumu
-3	Soğuk
-2	Serin
-1	Biraz Serin
0	Nötr
1	Biraz ılık
2	Ilık
3	Sıcak

Adaptif Model

PMV modeli kişinin ısı hissiyatını, insan vücudu ve çevresi arasındaki ısı transferinin bir çıktısı olarak kabul eder. Buna karşın adaptif modeller insanın kendi içinde var olan değişken koşullara uyum sağlama yeteneğini, iç ortam konfor koşullarını meteorolojik verilerden elde edilen dış ortam sıcaklığı arasında lineer bir ilişki kurarak hesaba katmaktadır. İki farklı adaptif yöntem mevcuttur, ASHRAE 55 adaptif modeli Dear ve Brager [33] tarafından, EN15251 adaptif modeli Nicol ve Humphreys [34] tarafından önerilmiştir.

Nicole ve Humphreys [34] tarafından EN15251 normunda doğal havalandırma şartlarında konfor sıcaklığı tanımı Eşitlik 5'de verilmiştir. Farklı kategoriler (Tablo 2) için maksimum ve minimum operatif ısı konfor sıcaklığı ± 2 ila 4 arasında değişmektedir.

Tablo 2. EN15251 Adaptif Model Kategori Açıklamaları

Kategori	Açıklama
I	Ortamdaki kişilerin kırılğan, oldukça hassas, çok genç veya yaşlıların yer aldığı, ısı konfor açısından beklentilerin yüksek olduğu durum
II	Yeni binalar veya tadilatlar için normal seviyedeki beklentiler
III	Mevcut binalar için kullanılabilen ortalama kabul edilebilir beklentiler
IV	Yukarıdaki kategorilerin dışındaki değerler için yılın sadece belli zaman dilimlerinde kullanılabilir

Dear ve Brager [33] tarafından tanımlanan ASHRAE 55 normunda adaptif model alt ve üst limitleri maksimum ve minimum değerleri Eşitlik 6 ve 7'de verilmiştir. Eşitlik 5-7'de T_{comf} operatif sıcaklığı, T_{rm} ise ortalama dış ortam sıcaklığını °C olarak ifade etmektedir.

$$T_{comf} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 + \Delta tol \quad (\text{Kategori tipine göre } \Delta tol = \pm 2,3,4)$$

$$T_{comf} = 0,31 \cdot T_{rm} + 21,3 \quad (\%80 \text{ kabul edilebilirlik üst limit})$$

$$T_{comf} = 0,31 \cdot T_{rm} + 14,3 \quad (\%80 \text{ kabul edilebilirlik alt limit})$$

İki farklı modellerin (PMV ve adaptif) uluslararası standartlarda tanımlanmasına rağmen binalarda ısı konfor yönetimi açısından kendilerine özgü limitleri vardır. PMV modelinin uygulanması için gerekli spesifik değişkenler nedeni ile PMV modellerinin tam uygulaması oldukça maliyetli ve güçtür. Özellikle ortama ilgili hava hızı ve ışınlam sıcaklığı tipik olarak monitörize edilen veriler değildir ve ölçümleri (özellikle hava hızı) maliyetli cihazlarla gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında iki bireysel parametre olan giysi yalıtımı ve metabolik oran ölçümlerinin otomatik olarak ölçülemeyen ya da basitleştirilmeyen parametrelerdir ve modelin tahmin doğruluğunu olumsuz etkilemektedir [35].

Tüm verilerin doğru bir şekilde elde edilmesine rağmen, her iki modelde bireyler üzerinde farklı sonuçlar vermektedir [36,37]. Çünkü bu modeller geniş bir kitlenin ortalama ısı konfor algısını tahmin etmek için geliştirilmişlerdir ve dolayısıyla bireylerin ısı konfor için verdikleri cevapların geniş bir dağılımda gerçekleşmesi model hassasiyetini azaltmaktadır. Aynı zamanda bu modeller adapte edilemez veya tekrar öğrenme uygulamalarını gerçekleştiremezler. Model parametreleri açısından bu modeller geliştirilmeye açık değildir, sadece mevcut parametrelerle ısı konfor algısı tahmin edilebilmektedir. Yeni parametrelerin (cinsiyet, vücut kitle endeksi, günün zamanı, yaş, sağlık durumu vd.) eklenmesi ve adaptasyonu için uygun değildir.

3.2.2. Nesnelerin İnterneti Tabanlı Isıl Konfor Modelleri ve Uygulamaları

Nesnelerin interneti ile cihazların bir biri ile olan bağlantılarının artması ve iletişim protokollerinin ortaklaşması sonucunda, ısı konfor modellerinde çevresel parametreleri ölçen sensörler aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Giyilebilir teknolojile-

rinde kullanıldığı sistemlerde, farklı kaynaklardan elde edilen verilerin zaman serisinde açılımları ile makine öğrenme algoritmaları kullanılarak klasik ısı konfor modellerinden çok daha iyi sonuç veren modeller oluşturulmuştur. Bu bölümde değerlendirme ölçęği Tablo 1’de verilen PMV modeli ile aynı olan fakat PMV modelinde ölçümü zor olan ve sabit kabuller yapılan değerler yerine, sensörler yardımı ile ölçülebilen değerler hesaba katılarak modellenmeye çalışılmıştır. Burada en önemli noktalardan biri PMV anketinin cihazlarla gerçek zamanlı gerçekleştirilmesi ve algoritma yardımıyla bu değerlerin baz alındığı bir ısı konfor modeli geliştirilmesidir.

Laftchiev ve Nikovski [38] nesnelere interneti ve giyilebilir teknolojileri kullanarak, kişiselleştirilmiş makine öğrenmesi modellerini (Machine Learning Models) ısı konfor anlayışına uyarlamışlardır. Çalışmalarında akıllı bileklik kullanarak nabız sayısı, deri sıcaklığı gibi biyometrik ölçümler yaparken aynı zamanda oda ölçümleri kapsamında oda sıcaklığı, nem, hava hızı ölçümlerini günün zamanı, mevsim, gün uzunluğu gibi ortama bağlı olmayan parametrelerle kombine etmişlerdir. Kişisel ısı konfor modelinin giyilebilir teknolojilerden elde edilen verilerle oluşturulması, ısı konforu termodinamik perspektif ya da iç veya dış ortam sıcaklıklarını kullanarak oluşturan modellerden ayrılmaktadır. Akıllı bileklik tarafından elde edilen veriler cep telefonu bağlantısıyla kablosuz ağ üzerinden aktarılmıştır. Giyilebilir teknoloji ve cep telefonu kullanımının entegrasyonu günün belirli saatlerinde verilerin toplanması ve belli aralıklarla cihazların aktif olmasından dolayı şarj kullanımını olumlu yönde etkilemektedir. Bu çalışmada kullanılan ses tanıma özelliği ile kullanıcılara anket cevaplarını çok soğuk, soğuk, serin, konforlu, ılık, sıcak, çok sıcak şeklinde sesli yanıtlarla da cevaplama seçeneği sunulmuştur.

Yöntemde elde edilen veriler makine öğrenmesi modelinin kalibrasyonu için geribildirim olarak değerlendirilmiştir. PMV modelinde, ısı konforun hesaplanabilmesi için metabolik oran, vücut tarafından üretilen efektif mekanik güç, giysi yalıtımı, vücut yüzey alanı, ortalama ışıyım sıcaklığı, hava hızı, nem, konvektif ısı transferi ve giysi yüzey sıcaklığı bilgileri gerekmektedir. Bu değerler kabul yapıp ya da iteratif olarak çözülebilmektedir. Bu kabuller Fanger’in [32] deneysel çalışmasında odaklandığı kısıtlı ölçekteki Kuzey Avrupa erkek-

lerinden elde ettiği bulgulara dayanmaktadır. Bu modeldeki kritik eleştirilerden biri, bu grubun metabolik hızlarına yönelik olmasıdır.

Çalışmada veri toplamak için sensörler kullanılarak sıcaklık, nem, hava hızı ve kullanım durumu (occupancy) olmak üzere dört farklı ölçüm yapılmıştır. Sıcaklık ölçümü için 3 sensör farklı lokasyonlarda sıcaklık gradyanı oluşumlarını algılayacak şekilde konumlandırılmıştır. Makine öğrenmesi sayesinde algoritmada yazın güneş ışınlarının ısınmaya etkisi ya da kışın pencerelerin soğutma etkisi gibi ilave değişkenler incelenmiş ve deneyde 530 veri değerlendirilmiştir. Veriler pasif olarak termostat kontrollü oda sıcaklığı aktif durumda iken oda sıcaklığı ve nem ayarı değiştirilerek kullanıcı geri bildirimleri elde edilmiştir.

Tüm makine öğrenme yaklaşımlarında kullanılan modeller ile Fanger modeli hatalarının ortalama karekökü Tablo 3’de verilmiştir. Modellerin performansı karşılaştırıldığında en iyi sonuç veren makine öğrenmesi yönteminin doğruluğu Fanger yöntemine göre %50 daha yüksektir. Şekil 8’de kırmızı bar modellerin hatalarının ortalama karekökünü göstermektedir. Örnek olarak Fanger modelinde 1,15 değeri %33 memnuniyetsizliğe tekabül etmektedir. En iyi makine öğrenmesi metodu Destek Vektör Makinesi (SVM) 0,56 hata payı ile %11,5 memnuniyetsizliğe tekabül etmektedir. Bu durum Fanger modeli referans alındığında hataların kare ortalamalarının köküne göre %50, memnuniyetsizlik oylarında ise ofis çalışanları açısından %21,5 düşüş sağlamaktadır. Bu fark Fanger modelinin insan vücudunun, çevre ile olan etkileşimine dayalı bir ısı transfer modeli olarak geliştirilmesi ve modelde bazı değerlerin sabit olarak kabul edilmesi sonucundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca Fanger modeli IoT alt yapısından yararlanamamaktadır. Örnek olarak nabız sayısı, metabolik hızla ilişkilendirildiğinde makine öğrenme yönteminde daha doğru şekilde tahmin edilmiştir. Sonuç olarak IoT tabanlı kişisel ısı konfor modelinin geliştirilmesi ile klasik modellere göre %50 iyileştirme sağlandığı ve bu çalışmanın ofislerin ısı konfor probleminin çözümüne uyarlanabileceği belirtilmiştir.

Park ve Rhee [39], çalışmalarında akıllı binaların, nesnelere interneti tabanlı cihazların birbiri ile olan bağlantısının ısı konfor üzerine uygulamalarını incelemişlerdir. Akıllı binalara, iletişim altyapısı ile birlikte HVAC sistemleri, aydınlatma, perde

Tablo 3. Laftchiev ve Nikovski [38] Çalışmasında Kullanılan Sapma Oranı 0,6'dan Az Olan Yöntemler Ve Fanger Modeli İçin Hataların Ortalama Karekökü Değerleri

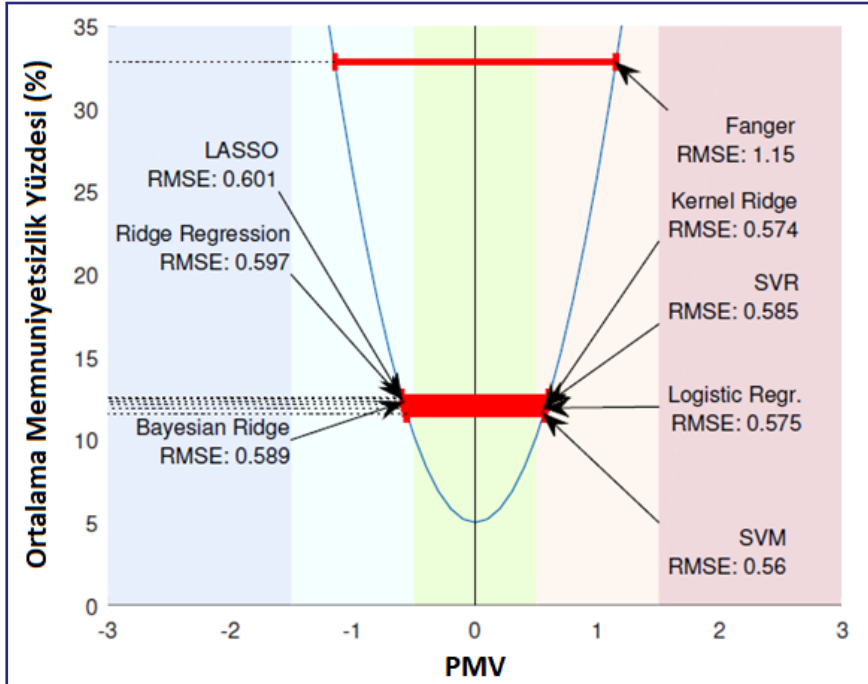
Yöntem	Hataların ortalama karekökü (RMSE)
Destek vektör makineleri (SVM)	0,560
Kernel ridge regresyonu	0,574
Lojistik regresyon	0,575
Destek vektör regresyonu (SVR)	0,585
Bayesian ridge resgresyonu	0,589
Ridge regresyonu	0,597
LASSO	0,601
Fanger Yöntemi	1,15

(shading) sistemleri, cam açma-kapama, asansör, hava kalite kontrol ve diğer elektrikli aletler ve uygulamalar dahil edilmiştir. Fakat bu sistemlerde farklı iletişim protokolleri kullanıldığından birbirleri ile direk iletişimleri mevcut değildir. Bu durumun çözülmesi için protokollerin standartlaştırılması ve aynı platformda entegre edilmesi açısından birçok girişim gerçekleştirilmiştir. Nesnelerin interneti ile birçok cihazın ortak platformlara bağlanması veya kendi içlerinde bağlanabilmesi sayesinde iletişim protokollerinden kaynaklı problemlerin birçoğu çözümlenmiştir. Akıllı bina-

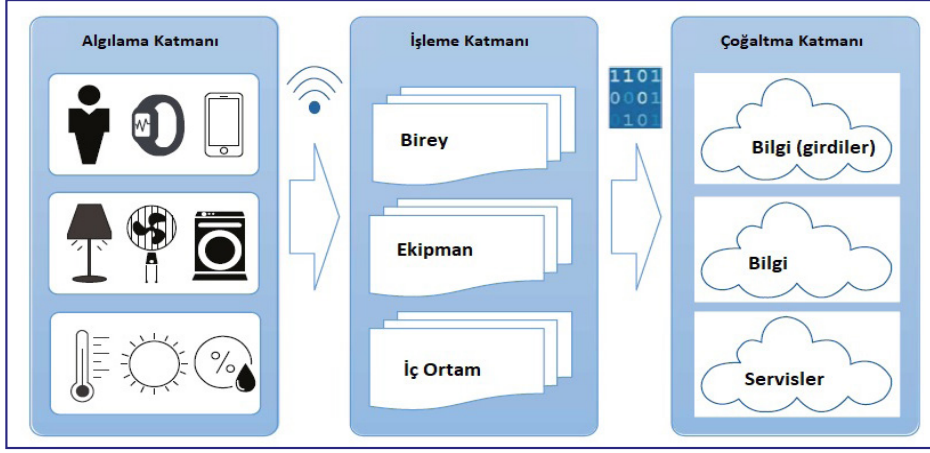
lar, kullanıcılara bağlanarak, kullanıcı taleplerine anlık ve hızlı bir şekilde cevap verebilmektedir. Bu mimarinin 3 katmanlı şematik gösterimi; algılama, işleme ve çoğaltma katmanları olmak üzere Şekil 9'da verilmiştir.

Algılama katmanında toplanan veriler, kullanıcıların bireysel şartları, cihazların ve ekipmanların operasyonel durumu, sıcaklık, aydınlık ve nem gibi iç ortam değerlerinden oluşmaktadır. Bu veriler internet bağlantılı geçit (gateway) ile aktararak büyük veri bulutlarında (big data cloud) saklanmaktadır. Veri işleme katmanında, veriler binadaki ya da sistemdeki cihazların operasyonel durumlarını kontrol etmek için sınıflandırılır ve işlenir. Isıl konfor ile ilgili aktüatörler (HVAC sistemindeki aktüatörler), ışıklandırma sistemi ve diğer sistemlerin bireyler tarafından kullanımı değerlendirilir. Çoğaltma (türetme) aşamasında ise sınıflandırılmış ve işlenmiş veri cihaz ile kullanıcı arasında ilişkilendirilerek tekrar türetilir ve veri, zaman serileri olarak kayıt edilir. Bu veri kullanıcıların bilgisine dönüşür ve kullanıcılar için daha iyi bir servis sağlarken aynı zamanda daha yararlı ve verimli çalışacak şekilde sistemi bilgilendirir.

Bina koşulları, binanın dış ortam ve diğer alt sistemlerle olan etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Aktüatörlerin, ısıl konfor odaklı olarak çalıştırıl-



Şekil 8. Isıl konfor modellerinde ortalama hataların kare ortalamalarının kökünün (RMSE), Fanger modelinin PPD değerleri le karşılaştırılması [38]

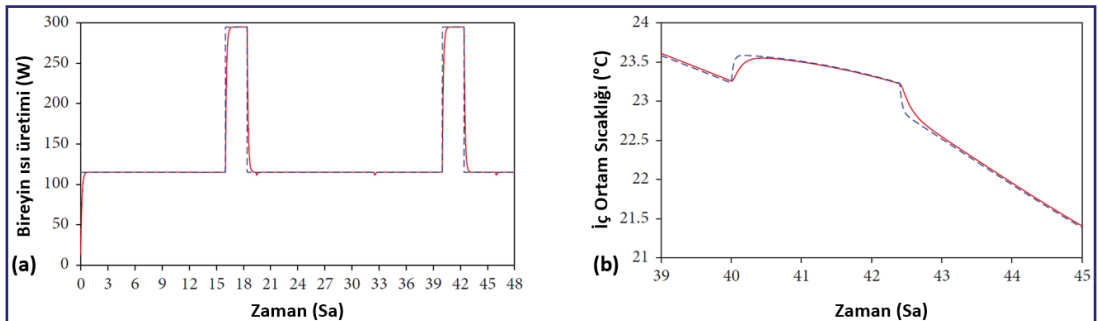


Şekil 9. Akıllı binalarda nesnelerin interneti tabanlı platform mimarisi [39]

ması için kullanıcı aktiviteleri ve bu aktivitelerin bina koşullarına etkisi gibi ilave veriler gerekmektedir. Park ve Rhee [39] çalışmalarında, temel olarak klasik ısıl konfor modelini ele almışlardır ve konfor şartlarını ISO EN 7730 [30] normunda yer aldığı şekilde kategori A sınıfında belirtilen beklentilerin yüksek olduğu hassas ve kırılğan bireyler sınıfını baz alarak PMV değerlerini -0.2 ile 0.2 arasında belirlemişlerdir. Isıl konfor modelinde yer alan altı parametreden, metabolik aktivite hariç diğerlerini Fanger modelinde olduğu gibi ölçümleyerek ya da kabul ederek almıştır. Bu çalışmada bireyin aktivitesinin iç ortam sıcaklığına etkisi statik ve dinamik model olmak üzere iki farklı yaklaşımla hesaplanmıştır. Kişi odada günün büyük bir kısmını dinlenme durumunda 115 W metabolik ısı yayılımı yaparak geçiriyor ve saat 16:00 ile 18:40 arasında 2 saat 40 dakika kollarını ve ellerini kullanarak çalışıyor. Bu aktivite sonucunda metabolik ısı yayılımı 295 W olarak artış gösteriyor. Park ve Rhee [39], MATLAB/Simulink yazılımını kullanarak statik ve dinamik model olmak üzere iki

farklı model geliştirerek dinamik modelde insan vücudunun global ısıl direncini 30 W/mK ve global ısıl kapasitesini 3770 J/kg/K olarak almışlardır.

Şekil 10-a'da bireyin ısı üretimi zaman aralıklarına göre, Şekil 10-b'de ise bireyin ısı üretiminin oda sıcaklığına etkisi verilmiştir. Şekil 10-b'de zaman aralığı 40:00 ile 42:40 veya 16:00 ile 18:40 arasında iç ortam sıcaklığı aktiviteden dolayı artış göstermiştir ve genel düşüş trendinden çıktığı görülmektedir. Statik model, bireyin ısı üretimini sadece aktif ve dinlenme durumu olmak üzere iki değerle sürekli rejimde ifade ederken, dinamik model bireyin ısıl direncini ve ısıl kapasitesini hesaba kattığından dolayı sürekli ve geçici rejim koşullarında değerleri hesaplamaktadır. Çalışmada, PMV tabanlı algoritma, öncelikle ortam kullanım durumunu sensörler yardımıyla algılamakta ve kullanım olması durumunda HVAC sistemi devreye girmekte ve PMV ölçülen ve kabul edilen değerler üzerinden hesaplanmaktadır. Bu aşamada bireyin metabolik ısı yayılımı tavsiye edilen dinamik termal model ile hesaplanmakta ve sistem kontrol



Şekil 10. Bireyin ısı yayılımı (a), ısı yayılımının oda sıcaklığına etkisi (b) [39], mavi kesik çizgi statik modeli, kırmızı çizgi ise dinamik modeli temsil etmektedir

edilmektedir. Örnek olarak kış mevsiminde hesaplanan PMV değeri 0,2 olduğunda, ısıtma sistemine “1” şeklinde sinyal gitmekte ya da diğer durumda “0” olarak sinyal gitmektedir. Çalışma sonucunda oluşturulan yeni termal model ile birlikte PMV değeri hesaplanarak gerçekleştirilen şartlandırma işleminde PMV değeri -0,2 ile 0,2 arasında olacak şekilde sağlanmaktadır.

Salamone ve ark. [40], ısıl konfor alanında gerçekleştirdikleri saha çalışmalarında PMV modelini anketlerde geribildirim için kullanmışlardır. Çalışmada nem, hava sıcaklığı, ortalama ışıyım sıcaklığı ve hava hızı ölçülmüştür. Akıllı bileklik (Class II medikal amaçlı cihaz) kullanılarak; fotoplestigmografi (PPG) sensörü ile nabız ölçümü, elektroderma (EDA) sensörü ile aktivite, infrared sensörle deri sıcaklığı ve 3 eksenli ivme ölçer ile hareket durumu ölçülmüştür. Clo değeri için EN ISO 7730 [30] normu referans alınmıştır ve metabolik oran için tüm kullanıcılar için klavyede yazma işlemi referans alınmıştır.

Isıl performans değerlendirmesi için, kullanıcılardan bilgi toplama işleminde Google forms kullanılmış ve sonuçları Google tablosunda toplayarak, Ladybug araçlarını kullanarak ısıl konforu PMV, PPD ve grafik metodu temel olarak değerlendirmişlerdir. Verilerin değerlendirilmesinde, mevcut toplanan verinin %80’i modelin kurulması ve %20’si ise modelin doğrulaması için kullanılmıştır. Değerlendirme sonuçlarını lineer (lojistik regresyon, linear diskriminant analizi) ve lineer olmayan (K en yakın komşu, sınıflandırma ve regresyon ağaçları, Gaussian Naive Bayes ve destek vektör makineleri) farklı makine öğrenme algoritmaları ile test ederek en az sapmanın sınıflandırma ve regresyon ağaçları (Classification and Regression Tress (CART)) yönteminde gerçekleştirdiğini bildirmişlerdir.

Salamone ve ark. [40] çalışmada kullanıcı geri bildirimlerinin nesnelere interneti yaklaşımı ile parametrik modellerin fonksiyonelliği kombine edilerek klasik ısıl konfor modellerindeki enerji dengesi denklemindeki kısıtların önüne geçmişlerdir.

3.2.3. Nesnelere İnterneti Tabanlı Kişisel Isıl Konfor Modeli Uygulaması

Kim ve ark. [27] bireylerin cevaplarına göre belli bir kitlenin ortalamasını baz alan ısıl konfor model-

lerine yeni bir yaklaşım getirerek kişisel ısıl konfor yaklaşımını geliştirmişlerdir. Bireylerin ısıtma ve soğutma davranışları konusundaki geribildirimleri kişisel ısıl konfor sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Kişisel konfor modeli geniş bir kitlenin ortalamasına göre değil, bireyin ısıl konforunun tahmin edilmesine dayanmaktadır. Bu modelin kurulmasındaki önemli hususlar;

1. Kitle veya grup yerine, bireyin kendisinin analizde birim olarak yer alması,
2. Bireyin geri bildirimlerinin direkt kullanımı (ısıl konfor algısı, memnuniyet) ayrıca bazı parametrelerin ilave edilerek (kişisel, çevresel ve teknolojik) modelin denenmesi,
3. Maliyet ve elde edilebilirlik açısından verinin önceliklendirilmesi,
4. Veri güdümlü model kullanımı, farklı modelleme yöntemleri ve potansiyel açıklayıcı değişkenlerin örnek olarak test edilmesine olanak sağlanması,
5. Modele yeni bir parametrenin uyarlanmasına olanak sağlanması

olarak sıralanabilir. Ayrıca kişisel konfor modelleri, binaların dışında araç, uçak gibi farklı sistemlerde de ısıl konfor memnuniyeti ve enerji verimliliğini arttırmak için kullanılabilir. Geçmişte kişisel konfor modelleri için farklı çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları veri güdümlü olarak modellenip, kitlelerin ısıl konforunu tahmin etmeye çalışmışlardır [41-45]. Bazıları ise bireylerin ısıl performansını belirlemek için model verilerini, bireylerin geri bildirim sonuçlarında elde edilen verilerle eş zamanlı olarak kullanmışlardır [46-49].

Kişisel konfor modelinin oluşturulması aşamaları Şekil 11’de verilmiştir ve bu aşamalar;

Veri Toplama: Makine öğrenme algoritması için temel teşkil edecek verilerin ve bu verilerin nasıl toplanacağını belirlenmesi,

Veri Hazırlama: Toplanan verilerin model için hazır duruma getirilmesi, işlenmesi ve hazırlanması,

Model Seçimi: Toplanan veriler ve uygulama hedefleri açısından en uygun makine öğrenmesi algoritmasının belirlenmesi,

Model Değerlendirmesi: Modelin tahmin performansı ve uygulama hedeflerine yönelik olarak değerlendirilmesi,

Sürekli Öğrenme: Toplanan yeni verilerle modelin güncellenmesi, doğruluğunun test edilmesi,

olarak tanımlanabilir. Bireylerin ısı konforunun modellenmesi için bireylerin ısı konfor algılarının ifade edilmesi ve bu algıyı etkileyen faktörlerin belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 4’de kişisel ısı konfor modelinin geliştirilmesinde toplanacak verilerin kategorik dağılımı ve türleri verilmiştir.

Isıl konfor, anket yardımıyla ısı hissiyat, kabul edilebilirlik, tercih, memnuniyet veya kombinasyonları şeklinde değerlendirilebilir. Elde edilen algısal veriler zaman ekseninde fiziksel verilerle eşleştirilir. Isıl hissiyat, PMV modeli ile ilişkisinden dolayı ısı konfor uygulamalarında en çok kullanılan parametrelerden biridir ve nötr duruma göre izafi olarak ısı hissiyat değerlendirmesi yapılıır. Kabul edilebilirlik, bireyin ısı konfor açısından kendisini nötr duruma yakın hissedebilir veya tolere

edilebilir bir aralıkta olduğunu belirtebilir. Tercih ise bireyin ısı konforunun sağlanması için havalandırma sistemlerinin hangi doğrultuda çalışması gerektiğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Isıl memnuniyet ise mevcut koşulun memnuniyet açısından ne kadar uygun olduğunun belirlenmesinde kullanılmaktadır. Tablo 5’de ısı konfor anketinde kullanılan ölçekler verilmiştir.

Isıl hissiyatın belirlenmesinde değerlendirme ölçeği, mevcut standart referans alınarak sıcak ve soğuk arasında 7 noktalı ölçek kullanılmıştır. Isıl tercih için 3 noktalı (Daha Sıcak/Nötr/Daha soğuk) ölçek kullanılmıştır. Kişinin 5 ila 7 noktalı bir ölçeklendirme üzerinde daha sağlıklı karar verebilirken 7 nokta üzerinde ise karar verme yeteneğinde önemli derecede düşüş olduğu gerçek-



Şekil 11. Kişisel konfor modeli oluşturma aşamaları [26]

Tablo 4. Kişisel Konfor Modelleri İçin Veri Tipleri Ve Toplama Yöntemleri [26]

Kategori	Veri Türü
Isıl konfor algısı ¹	Hissiyat, tercih, kabul edilebilirlik, memnuniyet
Kişisel faktörler	
Fizyolojik	Deri sıcaklığı ² , nabız sayısı ² , metabolik aktivite
	Giysi yalıtımı
	Cinsiyet, yaş, vücut kitle indeksi, sağlık durumu
Davranışsal	Isıtıcı ya da fan açıp/kapama, termostat ayarlama, cam açma/kapama
Çevresel faktörler	
İç ortam ³	Hava sıcaklığı, ortalama yüzey sıcaklığı, operatif sıcaklık, bağıl nem, hava hızı
Dış ortam ⁴	Hava sıcaklığı, ortalama dış ortam sıcaklığı, nem, ortalama yağış, iklim, mevsim
Diğer faktörler	Zaman, lokasyon, ortam (ev, ofis, araba, dış ortam), kullanım durumu (özel veya paylaşımlı)
	Isıl geçmiş, kültürel beklentiler (ör: kılık kıyafet yönetmeliği vb.)
	Mekanik sistem ayarları (termostat ayar noktaları), kullanım durumu kontrolleri

*Sıklıkla kullanılan veri toplama metotları; ¹anket, ²giyilebilir teknolojiler, ³çevresel sensörler, ⁴meteoroloji istasyonları, ⁵bina otomasyon sistemleri, vb.

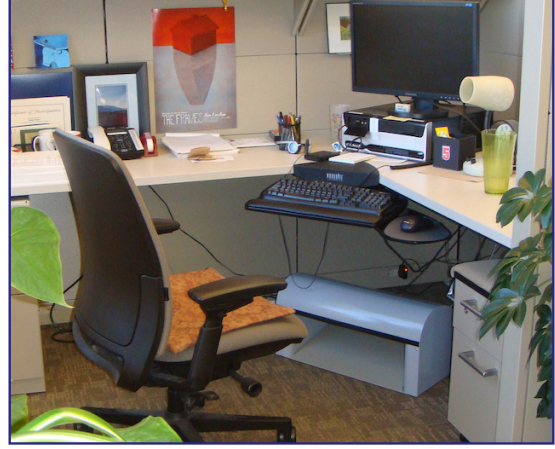
Tablo 5. Isıl Konfor Ölçekleri (ISO 10551’den Uyarlanmıştır [50])

Isıl Hissiyat	Kabul Edilebilirlik	Isıl Tercih	Isıl Memnuniyet
Sıcak	Kesinlikle kabul edilebilir	Daha sıcak	Oldukça memnun
Ilık			Kısmen memnun
Biraz ılık	Kabul edilebilir		Memnun
Nötr		Nötr	Nötr
Biraz serin	Kabul edilemez		Memnun değil
Serin			Kısmen memnun değil
Soğuk	Kesinlikle kabul edilemez	Daha soğuk	Hiç memnun değil

leştirilen çalışmalarda belirlenmiştir [51]. Yapılan çalışmalarda kişisel ısı konfor modeli kullanımında bireylerin ısı konfor hissiyatı sadece bireylerin anket sonucunda geri bildirim ile ölçülebiliyordu. Bu durum veri toplanmasında gün boyu yorgunluk, günlük olarak katılım sayısının değişkenliği gibi faktörlerden etkilenmektedir. Ayrıca anket yöntemi bireyin ısı konfor tercihlerinin belirlenmesinde müdahaleci bir yöntemdir. Bunun dışında bireysel ısı konfor sistemlerinde bireyin ısı konfor hissiyatının sadece anket sonucu geri bildirim olarak değil, aynı zamanda havalandırma sıcaklığında yaptığı değişiklik, pencere açma kapama, ofis koltuğundaki fan ve/veya ısıtıcıların ayarlarındaki değişiklikler gibi ısı konfor davranışını müdahale olmadan veri toplanabilmektedir. İlave olarak kişilerin taktığı bileklik ya da akıllı saatler yardımı ile bireyin fizyolojik koşulları hakkında da veriler toplanabilmektedir.

Kişisel ısı konfor sistemleri, kişisel fanlar (masaüstü, kule tipi vb.), kişisel ısıtıcılar (konvektif, radyan ısıtıcılar vb.) ve ısıtmalı veya soğutmalı ofis koltuk sistemlerini içermektedir. Bu cihazlar ısı konfor açısından hassas bölgelere yönlendirilerek kişisel ısı konforun iyileştirilmesini sağlamaktadır. Kim ve ark. [27] çalışmalarında Kuzey Kaliforniya'da yer alan ofis binasında 2016 yılında Nisan ve Ekim ayları arasında yapılan saha çalışmalarında kişisel ısı konfor sistemli ofis koltukları kullanan 38 bireyden ısı konforu algılarını veri olarak toplamışlardır. Çalışmada kaydedilen veriler;

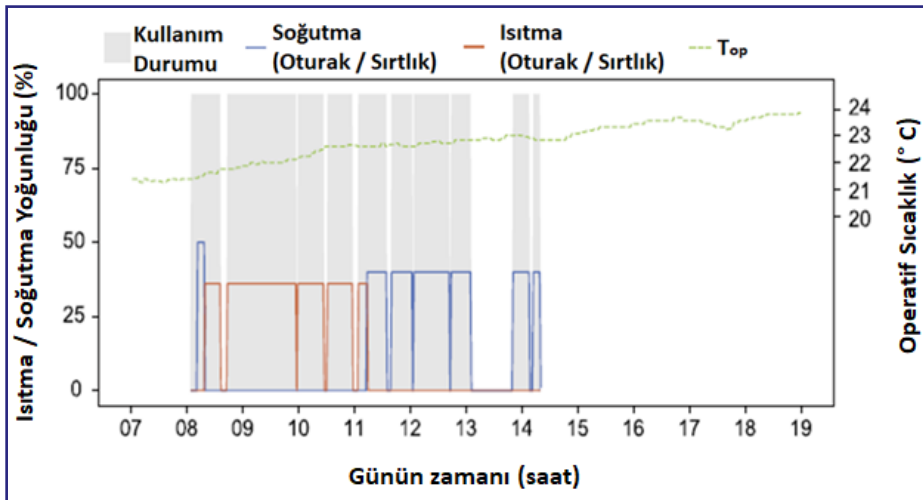
- Kişisel ısı konfor sistemli ofis koltuğu verileri (Şekil 12): Isıtma veya soğutma yoğunluğu



Şekil 12. Kişisel ısı konfor sistemli ofis koltuğu [52]

(ölçek %0-100) ve ısıtma/soğutma lokasyonu (koltuk oturak bölgesi/sırt bölgesi), koltuk kullanım durumu, 20 s aralıklarla hava sıcaklığı ve bağıl nem. Şekil 13'de kişisel ısı konfor sistemli ofis koltuğu ile elde edilen veriler belirtilmiştir.

- HOB0 data toplayıcılar hava sıcaklığı, bağıl nem, ortam sıcaklığını her 5 dakikada bir kaydetmektedir.
- Anket verisi için günde üç kez ısı performans tercihi ve giysi yalıtımı bilgileri toplanmaktadır.
- Havalandırma sistemi verisi (HVAC data): Değişken hava hızı ve termostat ayarları her 5 dakikada bir kaydedilmektedir.
- Hava durumu bilgisi: Meteoroloji istasyonundan her saat veriler kaydedilmektedir.



Şekil 13. Kişisel ısı konfor sistemli ofis koltuğu veri grafiği [27]

Kişisel ısı konfor sistemi, binada tek bir sıcaklık ayarının korunabilmesi açısından sistem vücudun ısı olarak hassas noktalarına; yüz, baş, torso ve ayaklar kısmına odaklanmıştır. Ortalamada, kişisel ısı konfor, 2 watt soğutma ve ısıtma için 40 watt kullanmaktadır (geleneksel elektrikli ısıtıcılar 1500 Watt'dır). Komple sistem tekrar şarj edilebilir lityum ferrosülfat (ferrophosphate) pil ile çalışmakta ve çalışan masayı terk ettiğinde sistem otomatik olarak kapanmaktadır [52].

Şekil 13'de kişisel ısı konfor sisteminin bir parçası olan ofis koltuğuna ait veriler sergilenmiştir. Öncelikli olarak sistem koltuğun kullanım durumunu (occupancy detection) ve beraberinde kullanıcının diğer ısı konfor davranışlarının kablosuz ağ üzerinden sisteme aktarmaktadır. Grafikte koltuktaki ısıtma ve soğutma kullanım durumu gösterilirken iç ortam sıcaklığının değişimi de aynı grafikte verilmiştir. Bu grafiğe göre sabah saatlerinde ısıtma gerçekleşirken öğleden sonra ise soğutma işlemi

ofis koltuklarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanıcılardan, havalandırma sistemi ve diğer sistemlerden elde edilen verilerin detayı Tablo 6'da kategorik olarak birimleri ile verilmiştir.

Tablo 6'da belirtilen veriler toplandıktan sonra, tüm veriler, kullanılacak model için uygun duruma getirilir ve normal aralıkların dışında gerçekleşen veriler filtre edilerek veriler hazır duruma getirilir. Kim ve ark. [27] çalışmalarında 6 farklı makine öğrenmesi algoritmasını elde ettikleri veriler ile deneyerek, kalan verilerle de doğrulamasını gerçekleştirmişlerdir. Bu algoritmalar;

1. Sınıflandırma Ağacı (Classification Tree)
2. Gaussian Sınıflandırması (Gaussian Process Classification)
3. Gradyan Arttırma (Gradient Boosting Method)
4. Çekirdek Vektör Makinesi (Kernel Vector Machine)

Tablo 6. Kişisel Konfor Modeli İçin Toplanan Veriler ve Tanımları [27]

Kategori	Özellik	Birim	Tip ^a
Anket	Isıl tercih	daha sıcak / nötr / daha soğuk	C
	Giyisi yalıtımı seviyesi	clo	N
KKS ^b Kontrol Davranışı	Kontrol bölgesi	oturak / sırtlık / ikisi / hiç biri	C
	Kontrol yoğunluğu	%	N
	X geçmişteki kontrol sıklığı (x=1, 4 saat, 1 gün, 1 hafta)	kullanım sayısı	N
	Kullanım durumu	koltuk dolu / boş / bilinmiyor	C
	X geçmişteki kullanım sıklığı (x=1, 4 saat, 1 gün, 1 hafta)	kullanım sayısı	N
	X geçmişteki kontrol süresinin kullanım süresine oranı (x=1, 4 saat, 1 gün, 1 hafta)	%	N
Zaman	Saat	saat (0-23)	N
	Gün	gün (0-6)	N
İç Ortam	Hava sıcaklığı	°C	N
	Operatif sıcaklık	°C	N
	Bağıl nem	%	N
	Hava sıcaklığındaki meyil	°C/sa	N
Dış Ortam	Dış ortam sıcaklığı	°C	N
	Gökyüzü durumu	açık / kapalı	C
	Aylık ağırlıklı ortalama sıcaklık	°C	N
	Yağış	var / yok	C
HVAC	Oda sıcaklığı	°C	N
	Hava debisi	ft3/dak	N
	Damper pozisyonu	%	N
	Isıtma	%	N
	Deşarj edilen hava sıcaklığı	°C	N

^a C: Kategorik, N: Nümerik veriyi, ^b KKS: Kişisel konfor sistemini ifade etmektedir.

5. Rastgele Orman Algoritması (Random Forest)
6. Düzenlenmiş Lojistik Regresyon (Regularized Logistic Regression)

olarak özetlenebilir. Çalışma sonucunda Rastgele Orman (Random Forest) algoritmasının 0,71 doğruluk oranı ile en iyi sonucu verdiğini tespit etmişlerdir.

Şekil 14-a'da kişisel konfor modelinin oluşturulmasında kullanılan ve veri olarak toplanan değişkenlerin farklı kombinasyonları ile hesaplandığında, kombinasyonların tahmin doğruluğuna etkisi verilmiştir. Bu durumda kişisel konfor davranışı tek başına ortalama %69 tahmin doğruluğu sağlayabilmektedir ve tüm değişkenler dikkate alındığında %73 ortalama tahmin doğruluğu sağlanabilmektedir. Sistemdeki tüm değişkenlerin hesaba katıldığı durumda kişisel konfor sistemi ile elde edilen doğruluk değerine %4 katkı sağlanabilmektedir ve dolayısıyla kişisel konfor sistemi, ısı konforun tahmin edilmesi açısından değerlendirildiğinde, sistemin en önemli parçasını oluşturmaktadır.

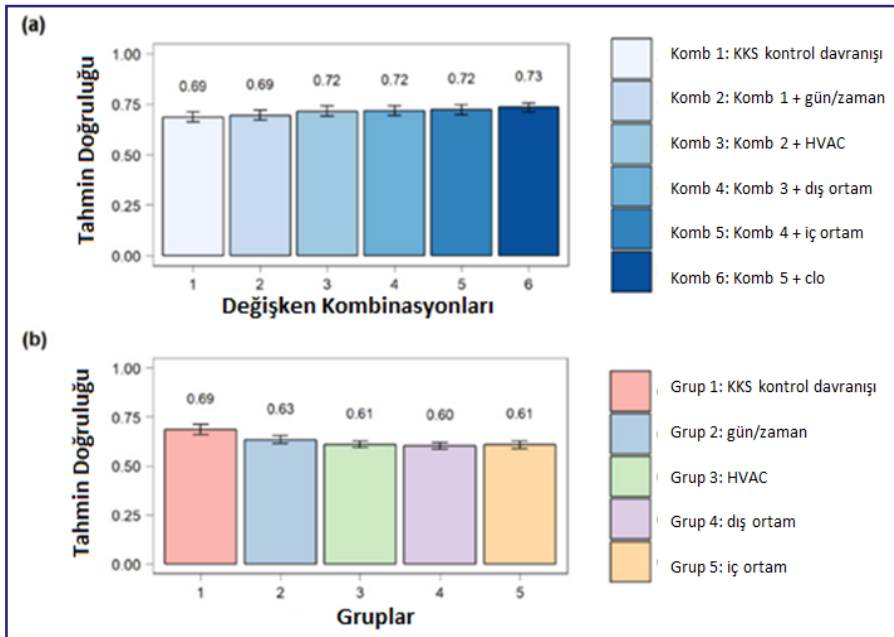
Şekil 14-b'de kişisel ısı konfor sistemi tahmin doğruluğu açısından en iyi sonucu verirken, dış ortam koşullarının tahmin doğruluğuna etkisi %60 olarak en az seviyede gerçekleşmiştir. Klasik ısı konfor modellerinde dış ortam sıcaklığı tahmin doğruluğu üzerinde oldukça önemli etkiye sahipken bu

modelde en az derecede etkiye sahiptir. Kişisel ısı konfor sisteminde, tahmin edilen ortalama hassasiyet 0,73 olarak hesaplanırken geleneksel ısı konfor modelinde 0,51 olarak hesaplanmıştır.

Kişisel ısı konfor modellerinde birey sayısı artırılarak, model güncellenebilir ve tahmin doğruluğu artırılabilir hatta derin öğrenme (deep learning) ile sistem sürekli olarak kendini güncelleyebilir. Bu çalışmaya ilave olarak kişisel ısı konfor sistemine bağlı cihazların sayısı artırılarak tahmin doğruluğu artırılabilir. Örnek olarak havalandırma sisteminin termostati kişisel konfor sistemine bağlanarak kontrol edilebilir ve bireylerin ısı konforu üzerinde etkisi incelenebilir.

SONUÇ

Isıl konfor modelleri uzun zamandır çalışılmaktadır. Isıl denge kabulüne dayanan klasik modellerde, ısı konforun hesaplanmasında belirli bir popülasyonun tercihlerinin dikkate alınması ve ölçülmesi zor olan parametrelerin sabit alınarak hesaba katılması, ısı konfor memnuniyeti açısından önemli sapsmalara neden olmaktadır. Endüstri 4.0 kapsamında yaygınlaşan nesnelerin interneti ve yapay zeka algoritmaları sayesinde makine mühendisliği ve bilgisayar biliminin birleşmesi sonucunda daha hassas ve daha kullanışlı modellerin oluşturulması imkan bulmuştur. Klasik ısı konfor modellerinin



Şekil 14. Farklı değişken kombinasyonları için tahmin doğruluğunun değişimi (a), farklı değişkenlerin tahmin doğruluğuna etkisi (b) [27]

sadece belli bir topluluğu referans alması ve yeni parametrelerin adaptasyonuna açık olmamasından dolayı, nesnelerin interneti bazlı ve daha çok kullanıcı odaklı olan ısı konfor modellerine göre ısı konfor memnuniyetini tahmin etme performansı yeni modellere kıyasla oldukça düşüktür. Ayrıca kişisel ısı konfor sistemleri ile bireyin yakın çevresindeki unsurlarla etkileşiminin ısı konfor modeline dahil edilmesiyle ısı konfor memnuniyet yüzdesinin arttığı gösterilmiştir. Bunun yanında kişisel ısı konfor sistemleri iç ortam sıcaklığı sabit iken düşük enerjili çevre birimler ile bireylerin ısı performansını lokal olarak iyileştirmeye çalıştığından enerji kullanımında da tasarruf sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] http://www.mpc.gov.my/wp-content/uploads/2017/09/Paper-6_2017-09-13-Industry-4.0-Restructuring-existing-workforce-MPC.pdf (Son erişim tarihi: 26.10.2018)
- [2] <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle> (Son erişim tarihi: 26.10.2018)
- [3] <https://www.ledgerinsights.com/gartner-blockchain-hype-cycle> (Son erişim tarihi: 26.10.2018)
- [4] https://www.gartner.com/imagesrv/books/iot/iotEbook_digital.pdf (Son erişim tarihi: 26.10.2018)
- [5] Yi, C.S., Shukor, S.A. A., Rahim, N.A., Kohlhof, K., Jamal, Z.A.Z., “Internet-of-Things (IoT) for Human Thermal Comfort: A Simulative Investigation”, *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 10:1-14, 119-123, 2018.
- [6] Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y., Mourad, Y., “Energy Consumption and Efficiency in Buildings: Current Status and Future Trends”, *Journal of Cleaner Production*, 109:118–130, 2015.
- [7] Zou, H., Zhou, Y., Jiang, H., Chien, S.C., Xie, L., Spanos, C.J., “Winlight: A Wifi-Based Occupancy-Driven Lighting Control System for Smart Building”, *Energy Buildings*, 158: 924–938, 2018.
- [8] Yang, J., Santamouris, M., Lee, S.E., “Review of Occupancy Sensing Systems and Occupancy Modeling Methodologies for the Application in Institutional Buildings”, *Energy Buildings*, 121:344–349, 2016.
- [9] Wagner, A., Gossauer, E., Moosmann, C., Gropp, T., Leonhart, R., “Thermal Comfort and Workplace Occupant Satisfaction - Results of Field Studies in German Low Energy Office Buildings”, *Energy Buildings*, 39: 758–769, 2007.
- [10] Frontczak, M., Schiavon, S., Goins, J., Arens, E., Zhang, H., Wargocki, P., “Quantitative Relationships Between Occupant Satisfaction and Satisfaction Aspects of Indoor Environmental Quality and Building Design”, *Indoor Air*, 22:119–131, 2012.
- [11] Fisk, W.J., Rosenfeld, A.H., “Estimates of Improved Productivity and Health from Better Indoor Environments”, *Indoor Air*, 7:158–172, 1997.
- [12] Allen, J.G., Macnaughton, P., Laurent, J.G.C., Flanagan, S.S., Eitland, E.S., Spengler, J.D., “Green Buildings and Health”, *Current Environmental Health Reports*, 2:250–258, 2015.
- [13] Leaman, A., Bordass, B., “Productivity In Buildings: the ‘Killer’ Variables”, *Building Research and Information*, 27:4–19, 1999.
- [14] Wargocki, P., Wyon, D. P., Sundell, J., Clausen, G., Fanger, P., “The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity”, *Indoor Air*, 10:222–236, 2000.
- [15] Wyon, D.P., “The Effects of Indoor Air Quality on Performance and Productivity”, *Indoor Air*, 14:92–101, 2004.
- [16] Tham, K.W., Willem, H.C., “Room Air Temperature Affects Occupants’ Physiology, Perceptions and Mental Alertness”, *Building and Environment*, 45:40–44, 2010.
- [17] Ijzerman, H., Semin, G.R., “The Thermometer of Social Relations Mapping Social Proximity on Temperature”, *Psychological Science*, 20(10):1214–1220, 2009.
- [18] Hedge, A., Wafa, S., Anshu, A., “Thermal Effects on Office Productivity”, in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 49(8):823–827, 2005.
- [19] Zou, H., Zhou, Y., Yang, J., Spanos, C.J., “Device Free Occupancy Detection and Crowd Counting in Smart Buildings with WIFI-enabled IoT” *Energy & Buildings*, 174: 309-322, 2018.
- [20] Chen, D., Barker, S., Subbaswamy, A., Irwin, D., Shenoy, P., “Non-Intrusive Occupancy Monitoring Using Smart Meters”, *Proceedings*

- of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings, ACM, 1-8, 2013.
- [21] Candanedo, L.M., Feldheim, V., “Accurate Occupancy Detection of an Office Room from Light, Temperature, Humidity and Co2 Measurements Using Statistical Learning Models”, *Energy and Buildings*, 112:28–39, 2016.
- [22] Weekly, K., Bekiaris-Liberis, N., Jin, M., Bayen, A.M., “Modeling and Estimation of the Humans’ Effect on the Co2 Dynamics Inside a Conference Room”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(5):1770–1781, 2015.
- [23] Jiang, C., Masood, M.K., Soh, Y.C., Li, H., “Indoor Occupancy Estimation from Carbon Dioxide Concentration”, *Energy and Buildings*, 131:132–141, 2016.
- [24] Weekly, K., Jin, M., Zou, H., Hsu, C., Soyza, C., Bayen, A., Spanos, C., “Building-in-Briefcase: A Rapidly-Deployable Environmental Sensor Suite for the Smart Building”, *Sensors (Basel)*, 18(5), 1381, 2018.
- [25] Zou, H., Jiang, H., Luo, Y., Zhu, J., Lu, X., Xie, L., “Bluedetect: An Ibeacon-Enabled Scheme for Accurate and Energy-Efficient Indoor-Outdoor Detection and Seam-Less Location-Based Service”, *Sensors*, 16(2), 268, 2016.
- [26] Kim, J., Schiavon, S., Brager, G., “Personal Comfort Models – A New Paradigm in Thermal Comfort for Occupant Centric Environmental Control”, *Building and Environment*, 132, 114-124, 2018.
- [27] Kim, J., Zhou, Y., Schiavon, S., Raftery, P., Brager, G., “Personal Comfort Models: Predicting Individuals’ Thermal Preference Using Occupant Heating and Cooling Behavior and Machine Learning”, *Building and Environment*, 129, 96-106, 2018.
- [28] Vesely, M., Zeiler, W., “Personalized Conditioning and Its Impact on Thermal Comfort and Energy Performance – A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 401–408, 2014.
- [29] Zhang, H., Arens, E., Zhai, Y., “A Review of the Corrective Power of Personal Comfort Systems in Non-Neutral Ambient Environments”, *Building and Environment*, 91, 15–41, 2015.
- [30] EN ISO 7730:2005, Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, International Standard Organization, Geneva, CH, 2005.
- [31] ANSI/ASHRAE, ANSI/ASHRAE 55–2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, US, 2013.
- [32] Fanger, P., “Thermal comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering”, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- [33] De Dear, R.J. Brager, G.S., “Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference”, *ASHRAE Transactions*, 104, 145–167, 1998.
- [34] Nicol, J.F., Humphreys, M.A., “Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings”, *Energy and Buildings*, 34, 563–572, 2002.
- [35] D’ambrosio Alfano, F.R., Palella, B.I., Riccio, G., “The Role of Measurement Accuracy on the Thermal Environment Assessment by Means of PMV Index”, *Building and Environment*, 46, 1361–1369, 2011.
- [36] Van Hoof, J., “Forty Years of Fanger’s Model of Thermal Comfort: Comfort For All?”, *Indoor Air*, 18, 182–201, 2008.
- [37] Auffenberg, F., Stein, S., Rogers, A., “A Personalised Thermal Comfort Model Using a Bayesian Network”, *Proceedings of the Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI*, 2015.
- [38] Laftchiev, E., Nikovski, D.N., “An IoT System to Estimate Personal Thermal Comfort TR2016-161”, *Mitsubishi Electric Research Laboratories Inc.*, Cambridge, Massachusetts, 2016.
- [39] Park, H., Rhee, S., “IoT-Based Smart Building Environment Service for Occupants’ Thermal Comfort”, *Journal of Sensors*, Vol. 2018, 1-10, 2018.
- [40] Salamone, F., Belussi, L., Currò, C., Danza, L., Ghellere, M., Guazzi, G., Lenzi, B., Megale, V., Meroni, ”Integrated method for personal thermal comfort assessment and optimization through users’ Feedback, IoT and Machine Learning: A Case Study”, *Sensors*, 1602, 1-18, 2018.
- [41] Vissers, D.R., “The Human Body as Sensor for Thermal Comfort Control”, *Master Thesis Eindhoven University of Technology*, 2012.
- [42] Chen, X., Wang, Q., Srebric, J., “A Data-Driven State-Space Model of Indoor Thermal Sen-

- sation Using Occupant Feedback for Low-Energy Buildings”, *Building and Environment*, 91, 187–198, 2015.
- [43] Farhan, A.A., Pattipati, K., Wang, B., Luh, P., “Predicting Individual Thermal Comfort Using Machine Learning Algorithms”, *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (IEEE CASE 2015)*, 708–713, 2015.
- [44] Ghahramani, A., Castro, G., Becerik-Gerber, B., YU, X., “Infrared Thermography of Human Face for Monitoring Thermoregulation Performance and Estimating Personal Thermal Comfort”, *Building and Environment*, 109, 1–11, 2016.
- [45] Dai, C., Zhang, H., Arens, E., Lian, Z., “Machine Learning Approaches to Predict Thermal Demands Using Skin Temperatures: Steady-State Conditions”, *Building and Environment*, 114 (2017) 1–10, 2017.
- [46] Choi, J.H., Yeom, D., “Study of Data-Driven Thermal Sensation Prediction Model as a Function of Local Body Skin Temperatures in a Built Environment”, *Building and Environment*, 121, 130–147, 2017.
- [47] Ari, S., Wilcoxon, P., Khalifa, H.E., Dannenhoffer, J.F., Isik, C., “A Practical Approach to Individual Thermal Comfort and Energy Optimization Problem”, *NAFIPS 2008 - 2008 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*, 1–6, 2008.
- [48] Bermejo, P., Redondo, L., De La Ossa, L., Rodríguez, D., Flores, J., Urea, C., Gámez, J.A., Puerta, J.M., “Design and Simulation of a Thermal Comfort Adaptive System Based on Fuzzy Logic and on-Line Learning”, *Energy and Buildings*, 49, 367–379, 2012.
- [49] Peng, B., Hsieh, S.J., “Data-Driven Thermal Comfort Prediction with Support Vector Machine”, *ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing*, American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- [50] ISO, ISO 10551:1995, *Ergonomics of the Thermal Environment – Assessment of the Influence of the Thermal Environment Using Subjective Judgement Scales*, International Standard Organization, Geneva, 1995.
- [51] Miller, G.A., “The Magical Number Seven, plus or minus two: some limits in our capacity for processing information”, *Psychological Review*, 63, 81-97, 1956.
- [52] <https://www.zdnet.com/article/slash-office-energy-use-with-personal-comfort-systems/> (Son erişim tarihi : 26.10.2018)