

Yapı Bilgi Modellemesi ile Tümlşik Termal Konfor Değerlendirme Sistemi

Deniz ARTAN^{1*}
Işıl TEKÇE²
Neziha YILMAZ³
Esin ERGEN⁴

ÖZ

Termal konfor yapılar da kullanıcı memnuniyetini, sağ lı ğ ını, üretken l i ğ ini ve enerji tüketimini etkilemektedir. Bu çalış mada, ofis binaları için kullanıcı geri bildirimlerinin gerekli bağ lamsal bilgi öğeleriyle (örneğin, bina elemanları ve bina geometrisi) zenginleştirilerek toplanmasını sağ layan ve karar vericilere yapı bilgi modellemesi (BIM) ile entegre şekilde sunan bir termal konfor değerlendirme sistemi geliştirilmiştir. Çalış manın yöntemi, Yapısal Eş itlik Modeli ile termal konfor ölçüm modeli geliştirilmesi ve önerilen BIM ile tümlşik termal konfor değerlendirme sisteminin prototipi oluşturularak bir ofis binasında vaka analiziyle doğrulamasını içerir. Sonuç lar, geliştirilen sistemin kullanıcı geri bildirimlerinin etkin şekilde toplanmasını ve analiz edilmesini sağ lad ı ğ ını göstermektedir. Önerilen sistemin ofislerde enerji tüketimini optimize ederek termal konforu iyileştirmesi ve böylece kullanıcı memnuniyeti, sağ lı ğ ı, üretkenliğine katkıda bulunması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bina performansı, kullanıcı geri bildirimi, termal konfor, tesis yönetimi, yapı bilgi modellemesi (BIM), yapı işletmesi.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 13 Ekim 2025 günü ulaş mıştır. 30 Ocak 2026 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- xx xxxxx xxxxxx gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/>

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
artande@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-4614-3245>

2 Özyeğin Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul, Türkiye
tekce@ozyegin.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-5931-7470>

3 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
yilmaznez@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-9032-9050>

4 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
esin.ergen@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-6413-4647>

* Sorumlu yazar

ABSTRACT

Building Information Modelling (BIM)-Integrated Thermal Comfort Assessment System

Thermal comfort affects occupant satisfaction, health, productivity, and energy consumption in buildings. In this study, a thermal comfort assessment system for office buildings is developed that enriches occupant feedback with necessary contextual information (e.g., building elements and geometry) and presents it to decision-makers integrated with the Building Information Model (BIM). The methodology includes developing a thermal comfort measurement model using Structural Equation Modelling, creating a prototype of the proposed BIM-integrated thermal comfort assessment system, and validating it through a case study in an office building. The results demonstrate that the developed system effectively collects and analyses occupant feedback. The proposed system is expected to optimise energy consumption and improve thermal comfort in offices, and thereby enhance occupant satisfaction, health, and productivity.

Keywords: Building performance, occupant feedback, thermal comfort, facility management, building information modelling (BIM), construction management.

1. GİRİŞ

Ofis binalarında konfor koşullarının çalışanların memnuniyeti [1] sağlığı [2] ve üretkenliği [3, 4] üzerindeki önemli etkileri pek çok araştırmada ortaya konmuştur. Termal konfor; iç hava kalitesi, akustik konfor, görsel konfor gibi diğer fiziksel koşullara kıyasla bina kullanıcılarının memnuniyetini, sağlığını ve üretkenliğini hem genel olarak yapı çevre [5, 6] hem de ofis binalarında [7, 8] daha yüksek derecede etkilediğinden son yıllarda literatürde birçok kullanıcı odaklı termal kontrol sistemi geliştirilmiştir. Diğer taraftan, yapı çevrenin küresel enerji tüketiminin %40'ından fazlasından sorumlu olması [9] ve bina kullanıcılarının davranışlarının enerji tüketimine ve iklim değişikliğine etkisi [10] termal konfor çalışmalarını enerji tasarrufu sağlanması amacıyla da ön plana çıkarmaktadır. Binalarda geri bildirimlerin toplanmasıyla ve kullanıcı odaklı termal konfor kontrol sistemlerinin kullanımıyla termal konfor seviyesi %29.1 ve enerji verimliliği de %22 artırılabilir [11].

Bina tasarımında termal konfor koşullarını belirlemede kullanılan ve ulusal/uluslararası standartların temeli olan geleneksel konfor modelleri (kararlı ve adaptif modeller) düşük tahmin performansları ve memnuniyeti etkileyen bağlamsal verileri (örn, kullanıcı ve bina ile ilgi özellikler) dikkate almamaları nedeniyle eleştirilmektedir [12]. Alternatif olarak geliştirilen kişisel konfor modeli geleneksel modellere göre %20-40 oranında daha iyi tahmin sağlasa da [13] makine öğrenmesi gibi karmaşık algoritmalara dayanan yapısı nedeniyle elde edilen sonuçların yorumlanması neredeyse imkânsız olduğundan bina tasarımı ve tesis yönetimi süreçlerinde yeterince yol gösterici olamamaktadır [7]. Son olarak geliştirilen holistik analitik konfor modeli ise bağlamsal verinin konfor üzerindeki etkisini ortaya koyan çeşitli araştırmaları takiben iklim, zaman, bina özellikleri ve servislerini modellemeye dahil eder [14]. Güncel çalışmalar, bunlardan başka bağlamsal koşulların da termal konfor çalışmalarında dikkate alınması gerektiğini öne sürmektedir [15, 16]. Bu paradigma değişikliği sonucunda araştırmacılar, binalardan toplanan memnuniyet verisinin doğru

yorumlanarak termal konfor tahmin modellerinin iyileştirilebilmesi için, kullanıcı geri bildirimlerinin toplandığı an ve yerdeki bağlamsal verilere olan gereksinim (örn. bina özellikleri, geri bildirim özellikleri, kullanıcı özellikleri) konusunda hemfikiridir [7, 12, 17, 18, 19].

Kullanıcı geri bildirimleri, etkin olarak toplanıp işlendiğinde binalarda iyileştirme alanlarının belirlenmesi ve daha konforlu bir iç ortam yaratmak amacıyla bina sistemlerinde ve tesis yönetiminde yapılacak düzenlemeler için önemli bir yol göstericidir [20]. Ancak, sektörde kullanıcı geri bildirimleri tesis yönetimi sürecindeki bakım, onarım ve tadilat kararlarında etkin olarak kullanılamamaktadır [20, 21]. Mevcut durumda, binalarda kullanıcı geri bildirimleri çoğunlukla telefon, e-posta ve mesajlar yoluyla yapılandırılmamış bir formatta toplanmaktadır. Bu durumda bilgiler sıklıkla eksiktir, yapılandırılmış bir şekilde kaydedilmemiştir ve tesis yönetimi süreçlerinde manuel işlem yapılmasını gerektirir. Diğer taraftan bina performansı hakkında memnuniyeti ölçmek için periyodik olarak (örneğin yılda bir kez) yürütülen anketler olan Kullanım Sonrası Değerlendirme (Post Occupancy Evaluation - POE) sürecinde de geri bildirimler toplanmaktadır [22]. Bu durumda da bilgiler sürekli olarak toplanmadığından ve geri bildirimin etkili bir şekilde kullanılması için gereken hayati bağlamsal bilgilerden (örn. geri bildirimin konumu veya ilgili bina elemanı) yoksun olduğundan tesis yönetiminde etkin karar verme için yetersiz kalmaktadır. Koch ve diğ. [23], tesis yöneticilerinin zamanlarının %50'sini sorunların konumunu tespit etmeye ve inceleme gerektiren yapı elemanlarını belirlemeye harcadığını belirtmiştir. Geri bildirimlerin toplanmasında kullanılan her iki yöntemde de tesis yönetimindeki karar vericiler kullanıcı geri bildirimlerini geometrik bilgilerle bütünsel olarak görememektedir. Bu durum, incelenmesi gereken yapı elemanlarının hızlı bir şekilde tespit edilmesini veya binadaki sorunların temel nedenlerinin tespit edilmesini engellemektedir. Belirlenen bu eksiklikler, (1) kullanıcı geri bildirimlerinin hayati öneme sahip bağlamsal bilgiler ile birlikte ve sürekli olarak toplanması, (2) toplanan verinin binaların geometrik modellerindeki (örn. BIM) yapı elemanlarıyla ilişkilendirerek ve (3) yapılandırılmış ve kolay erişilebilir bir şekilde saklanması gereğinin altını çizmektedir. Literatürdeki kullanıcı geri bildirimlerinin BIM ile entegre edildiği çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmında kullanıcı memnuniyet oranları veya sorunların sayısı renk kodlaması ile temsil edilmiştir [24, 25, 26, 27, 28, 29]. Bir başka çalışmada, akıllı saatler kullanarak termal konforla ilgili veriler (örneğin, kalp atış hızı ve vücut sıcaklığı) toplanmış ve bu veriler kullanıcı konumlarıyla birlikte BIM'e entegre edilmiştir [30]. Donkers ve diğ. [19] ise kullanıcılardan toplanan görsel, akustik ve hava kalitesi konfor verilerini semantik web ontolojisi kullanarak BIM'e entegre etmiştir. Gray ve diğ. [31] kullanıcı şikayetlerini ve tespit edilen sorunları kullanıcı konumlarıyla birlikte toplamayı hedefleyen bir uygulama geliştirmiştir. Alavi ve Forcada [32], kullanıcı memnuniyet verilerini Bilgisayar Destekli Bakım Yönetim Sistemleri (CMMS) verileri, Bina Yönetim Sistemleri (BMS) verileri ve BIM modeliyle birleştirerek sorunların kök nedenini belirlemeyi amaçlamışlardır. Edirisinghe ve Woo [33] ise kullanıcıların sıcaklık, nem ve hava tazeliği ile ilgili algılarını toplamış ve bunları bir oyun motoruna yüklenen bir modelde temsil etmiştir. Ancak geliştirilen sistemlerde kullanıcı geri bildirimlerinin doğru yorumlanması ve etkin bir karar verme için gerekli olan bağlamsal bilgilerin (örn. bina özellikleri, geri bildirim özellikleri, geri bildirimin konumu veya ilgili bina elemanı, kullanıcı özellikleri) toplanmadığı görülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, ofis binalarında termal konforun iyileştirilmesi için (1) bina kullanıcılarının geri bildirimlerinin gerekli bağlamsal bilgilerle (örn. kullanıcı konumu,

probleme neden olan bina elemanı veya mahali, geri bildirim zamanı) zenginleştirilmiş olarak toplanması ve yapılandırılmasını ve (2) toplanan verinin bina geometrik verisini içeren yapı bilgi modeli (BIM) ile tümleşik olarak tesis yöneticisi ve tüm karar vericilere sunulmasını sağlayan bir değerlendirme sistemi geliştirmektir. Bu bağlamda araştırma, (1) kullanıcı termal konforu parametreleri ve geri bildirim türlerinin neler olduğu ve (2) termal konfor geri bildirimlerinin BIM’de temsili için gerekli bilgi öğelerinin neler olduğu ve nasıl bir sistem mimarisine ihtiyaç bulunduğu sorularına yanıt vermeyi amaçlar. Geliştirilen sistem geri bildirimlerin bina modelinde görselleştirilmesini ve uzay-zamansal sorgular yürütülmesini sağlayarak tesis yönetimi süreçlerinde etkin karar almayı destekler. Akademik olarak ise çalışma, mevcut termal konfor modellerinin iyileştirilebilmesi, doğruluk oranlarının yükselebilmesi ve bina tasarımı ile tesis yönetimi süreçlerinde yol gösterici olabilmeleri için araştırmacılar [7, 12, 17, 18, 19] tarafından gereğine işaret edilen yorumlanabilir ve çok daha fazla sayıda verinin toplanmasını amaçlamaktadır. Geliştirilen BIM ile tümleşik sistem sayesinde, kullanıcıdan toplanan geri bildirimlerin doğru değerlendirilebilmesi için gerekli olan (1) bina verileri (örn. bina geometrisi, ısıtma, soğutma, havalandırma, cephe sistemleri) ve (2) geri bildirimle ilgili bağlamsal veriler (örn. geri bildirimin bina içindeki konumu, zamanı, ilgili mahal veya bina elemanı) yapılandırılmış olarak kayıt altına alınır ve böylece sistem termal konfor araştırmalarına yorumlanabilir veri sağlar.

2. LİTERATÜR ANALİZİ

2.1. Termal Konfor ve Kullanıcı Memnuniyeti

Termal konfor 'termal ortamdan memnuniyeti ifade eden ve öznel olarak değerlendirilen zihin durumu' olarak tanımlanmaktadır [34] ve memnuniyet konforun önemli bir özelliğidir. İç mekanlarda termal konforu etkileyen faktörler dinamik ve mekanla etkileşime giren çeşitli fiziksel olguları bütünleştirir. Termal hissi etkileyen altı temel faktör olan hava sıcaklığı, ortalama radyant sıcaklık, hava hızı, nem, metabolizma hızı ve giysiler [34] ya çevresel ya da kişisel parametrelerdir. Son termal konfor standartları, klimalı binalar için Fanger’in PMV modeline ve doğal havalandırmalı binalar için adaptif modellere dayanmaktadır [18, 35] ve Tahmini Ortalama Oy (PMV) termal konfor endeksleri arasında en yaygın kullanılan yöntemdir. Temel olarak kararlı durum fizyolojik modeli, ASHRAE ölçeğinde konfor puanı elde etmek için dört parametreden (radyant sıcaklık, hava sıcaklığı, nem ve hava hareketi) türetilen bir konfor puanı değeri içerir. Standart 55, metabolizma hızı, giysi yalıtımı, hava sıcaklığı, radyant sıcaklık, hava hızı ve nem faktörlerini ele alarak termal konfor sağlamaya yöneliktir [34]. Standartlar bir mekânda yaşayanların çoğunluğu için kabul edilebilir termal çevre koşulları üretmek amacıyla kişisel ve çevresel faktörlerin kombinasyonlarını belirlemek için kullanılır. Konforlu olarak deneyimlenen ortamların aralığı ASHRAE standardında yedi puanlık konfor ölçeğine dayanmaktadır. ISO 7730 standardı ise, termal ortamı dört fiziksel değişkenin (hava sıcaklığı, ortalama radyant sıcaklık, bağıl hava hızı ve hava nemi) ve insanlarla ilgili iki değişkenin (aktivite seviyesi ve kıyafet) bir fonksiyonu olarak tanımlamaktadır [36]. Sonuç olarak, uluslararası standartlar, yapı çevresinde insan kullanımına yönelik termal gereksinimleri belirlemek için PMV (Tahmini Ortalama Oy) modelini ve adaptif modeli temel olarak kabul etmektedir. Geleneksel konfor modelleri çok sayıda faktör üzerine yapılan ampirik araştırmalara dayanan, insanların termal konfor algısının analitik temsilleridir. Ancak termal algı çoğu

zaman deterministik bir sabit durum ısı dengesinin sonucundan daha fazlasıdır [37]. Bazı çalışmalar, davranışsal ayarlamalar (örneğin giysilerinin yalıtım değerini değiştirerek), beklentilerin gevşemesi ve maruz kaldıkları koşullara alışma yoluyla insanların termal ortama uyum sağlayabileceklerini varsayar [5]. Diğer taraftan laboratuvar temelli araştırma yaklaşımlarında, konfor standartlarına sıkı sıkıya bağlı kalınması, iklimlendirme ihtiyacında önemli faktörler olan kişisel tolerans, kültürel ve sosyal farklılıkları göz ardı etmektedir [38]. Bu eksikliği gidermek için konfora yönelik araştırmalarda adaptif termal konfor modeli ve davranışsal yaklaşım giderek artan bir kabul görmektedir [39]. Adaptif model psikolojik, davranışsal ve fizyolojik olmak üzere birbiriyle ilişkili üç unsura dayanmaktadır [40]. Cabanac [41] tarafından önerilen ve de Dear [42] tarafından yeniden ele alınan "belirli bir dış uyarının vücudun içinden gelen sinyallere bağlı olarak hoş ya da kötü olarak algılanabileceği" şeklinde tanımlanan alliestezi kavramı, adaptif yöntemin fizyolojik ve davranışsal yönlerini savunmak için kullanılmıştır. Termal alliestezi ve termal adaptasyon fenomenlerine odaklanarak psiko-fizyolojik mekanizmaları daha iyi açıklayabilen daha doğru bir öngörücü termal konfor modeli oluşturmaya yönelik çalışmalar gelecek çalışma alanlarıdır. Adaptif davranış (pencere açma, kıyafet değişikliği, ısıtma ve soğutma ekipmanlarının adaptasyonu vb) üzerine odaklanan çalışmalar [43, 44] davranışsal adaptasyonların ve bina kullanıcılarının bina ile etkileşimlerinin önemini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Kim ve diğ. [13], verilerin yığıldığı mevcut yaklaşımları eleştirerek, tanımlanmış faktörlerinin ötesinde bağlamsal özellikler gibi girdi değişkenlerini içermemelerini önemli bir kısıt olarak tespit etmiştir. Kişisel Termal Konfor Modelleri ise kullanıcı grubunun ortalama tepkisini tahmin eden genel modeller yerine, bireyin termal konforunu tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Ancak, bu yaklaşım da özellikle öngörü modelleme süreç detayları bağlamında, halen kapsamlı incelemelerden yoksundur [45].

Kullanıcıların ortamın termal koşullarından memnuniyetini ifade eden termal konfor, bina performans değerlendirmesinin de temel unsurlarından biridir [46]. Konfor algısı bir iklimten diğerine farklılık gösterir ve kültürden de etkilenir [47]. Örneğin, doğal havalandırılmalı konutlarda yaşayanların yazın daha yüksek, kışın ise daha düşük iç ortam sıcaklıklarını kabul ettikleri ve ayrıca daha geniş sıcaklık aralıklarını da tolere edebildikleri belirlenmiştir [5]. Bu bulgular, de Dear ve Brager [40] tarafından önerilen adaptif termal konfor modeli ile uyumludur. Bireysel tercihlerin konfor üzerindeki etkileri, termal konfor sistemlerinin yalnızca standartlara ve fiziksel ölçümlere dayalı olarak tasarlanması ve kullanılmasının yetersiz kalmasına neden olmaktadır [48]. Termal konforu düzenlemek için geliştirilen sistemler, termal konforun bina kullanıcılarının memnuniyeti, sağlığı ve üretkenliği üzerindeki etkilerinin yanı sıra küresel iklim değişikliği ve binaların enerji tüketimindeki yüksek payları nedeniyle giderek daha önemli hale gelmektedir. Binalarda planlanan ve gerçekleşen enerji performansı arasındaki farkın %80'i bina kullanıcılarının termal konfor sistemleri de dahil olmak üzere bina sistemleri ile etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır [49]. IPEEC 2019 raporunda enerji performans farkının oluşmasında kullanıcı kaynaklı sebepler; kullanıcı tutum ve davranışları, kullanıcıların sosyal ve kişisel karakteristikleri, kullanıcılar arasındaki etkileşim, kullanıcıların konfor tercihleri ve kontrol sistemlerine ilişkin bilgileri olarak sıralanmıştır [50]. Termal rahatsızlık, yorgunluk, konsantrasyon kaybı ve üretkenlik düşüşüne yol açarak çalışanların moralini olumsuz etkiler [4]. Araştırmalar, soğuk ofislerin üretkenliği %4, sıcak ofislerin ise %6 oranında azalttığını göstermektedir. Wyon [51], termal koşulların ofis çalışanları üzerindeki etkilerini dikkat dağınıklığı, aktivasyonda azalma, hasta bina sendromu, bilişsel ve el becerisi zayıflamaları,

hava kalitesinde düşüş ve baş ağrısı olarak tanımlamıştır. Optimum termal konfor sağlanan ofisler, üretkenliği artırırken çalışanların sağlık ve refahını da destekler. Frontczak [52] ve Huang ve diğ., [53] termal konforun, görsel ve akustik konfor ile hava kalitesinden daha önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Yapısal eşitlik modeli (YEM), gizil yapıları ve aralarındaki ilişkileri modellemek için istatistiksel bir araç olarak hizmet eder ve değişkenler arasındaki doğrudan ve dolaylı etkilerin ölçülmesini sağlamaktadır [54, 55]. Özellikle termal konfor araştırmalarında YEM, termal duyum değişkenleri ile genel konfor algısı arasındaki nedensel yapıları ortaya çıkararak geleneksel regresyon ve birleşik analiz yöntemlerine göre açık bir üstünlük göstermiştir [56]. İlk YEM uygulamaları, vücut termal duyumlarının tüm vücut konforunu etkileyen gizil faktörler olarak modellenebileceğini ortaya koymuş ve yöntemin alternatif istatistiksel yaklaşımlara göre en iyi nedensel açıklamayı sunduğunu kanıtlamıştır [55]. Son dönem çalışmalar YEM'in uygulamasını farklı bağlamlara ve ölçeklere genişletmiştir. Açık kentsel alanlarda YEM, geleneksel termodinamik modellerin ve makine öğrenimi yaklaşımlarının yeterince ortaya çıkaramadığı mikroiklim parametreleri, kentsel morfolojik özellikler ve psikolojik faktörler arasındaki gizil ilişkileri başarıyla yakalamaktadır [57]. Konut termal konfor araştırmalarında da bina özelliklerini kullanıcı uyum davranışı ile bütünleştirmek için YEM kullanılmış ve zayıf ancak anlamlı ilişkilerin bile etkili bir şekilde modellenebileceği gösterilmiştir [58]. Ayrıca, fizyolojik, psikolojik ve tutumsal faktörleri içeren hiyerarşik termal konfor indeksleri geliştirmek için YEM uygulanmış ve yapısal ilişkiler aracılığıyla karmaşık termo-adaptif modeller doğrulanmıştır [59, 60]. Termal konfora odaklanan çalışmaların ötesinde, YEM çok boyutlu kullanıcı konforu ve iç mekan çevre kalitesinin modellenmesi araştırmalarında da kullanılmıştır. Ofis ortamı çalışmalarında da bağlamsal, termal, görsel ve akustik faktörleri eşzamanlı olarak incelemek için YEM kullanmış ve uzun süreli anket ve sensör verisi entegrasyonu yoluyla kullanıcı verimliliği üzerindeki etkileşimli etkileri ortaya çıkarmıştır; burada farklı konfor alanlarının birbirini nasıl etkilediği modellenebilmiştir [61]. Kullanım sonrası değerlendirme araştırmalarında, ofis binalarında kullanıcı memnuniyetini inceleyen bir YEM modeli, bina ve çevre kalitesi faktörleri ile genel memnuniyet arasındaki güçlü ilişkileri göstermiştir [62]. YEM'in öznel kullanıcı algılarını nesnel çevresel ölçümlerle entegre ederek tek kaynaklı modellere kıyasla geliştirilmiş açıklayıcı güç sağladığı gösterilmiştir [63, 64]. Bu çalışmada da termal konfor ölçüm modelinin geliştirilmesinde, termal konfor ile parametreleri arasındaki nedensel yapıları araştırmak için YEM yönteminden yararlanılmıştır.

Termal konfor çalışmalarındaki en büyük zorluk, iç mekan konforunu korurken enerji verimliliğini artırmaktır. Bu dengeyi sağlamak için bina kullanıcılarının sistemlerle etkileşimi ve geri bildirimleri dikkate alınmalı, beklentileri doğru değerlendirilerek uyum iyileştirilmelidir. Bu bağlamda pek çok araştırmacı kullanıcı geri bildirimlerinin toplanmasının, bina performansının değerlendirilmesi, kullanıcı memnuniyetinin ve enerji verimliliğinin artırılmasında önemini vurgulamıştır [52, 65, 66]. Kullanıcı geri bildirimleri, tesis performansını zenginleştirir ve Bina Otomasyon Sistemi (BAS) verilerinden daha değerli kabul edilir [67]. BAS yanıtıcı veriler üretebilir [67, 68] ve bu nedenle kullanıcı geri bildirimlerinin kitle kaynak kullanılarak toplanması, arıza tespit ve teşhis yöntemlerini iyileştirmektedir [69]. Kullanıcı şikayetleri ve bakım talepleri analiz edilirken, tesis yöneticilerinin şikâyet kaynağını hızlı tespit edebilmesi için hayati bağlamsal bilgilere (örneğin, ilgili bina elemanları ve bina geometrisi) ihtiyaç duyulmaktadır [70] ancak bu bilgilerin mevcut uygulamalarda yeterli seviyede toplanmadığı görülmektedir.

2.2. Bina Kullanıcılarından Termal Konfor Geri Bildirimlerinin Toplanması

Kullanıcıların konfor koşullarına ilişkin geri bildirimin tesis yönetimi uygulamalarına dahil edilmesi, termal konforu iyileştiren, üretkenliği ve refahı artıran ayarlamalar yapılmasına imkân tanır. Termal konfora yönelik kullanıcı merkezli yaklaşımlarla birlikte, uyarlanabilir termal konfor modelleri enerji tüketiminin yönetilmesinde ve konfor seviyelerinin korunmasında daha önemli hale gelmektedir [71]. Tesis yöneticileri ve bina tasarımcıları bu geri bildirimleri dikkate alarak ofis binalarında bireysel konfor ihtiyaçlarını karşılamak ve enerji tüketimini azaltmak için kişisel kontrol seçenekleri sunmak ve uyarlanabilir konfor ilkelerini kullanmak gibi stratejiler benimsemelidir [72]. Literatürde, Kullanım Sonrası Değerlendirme (Post Occupancy Evaluation - POE) araçları aracılığıyla toplanan verilerin eksiklikleri ve bu eksikliklerin giderilmesine yönelik çalışmalar önem arz etmektedir. POE araçları aracılığıyla toplanan veriler, sürekli olarak toplanmamaktadır ve geri bildirimlerin kullanımını etkin bir şekilde değerlendirmek için gerekli olan önemli bağlamsal bilgilerin (örneğin, ilgili bina elemanları ve bina geometrisi) eksikliği nedeniyle sınırlıdır. Ayrıca, POE araçları karar vericilerin kullanıcı geri bildirimlerini geometrik bilgilerle birlikte görüntülenmesine olanak tanımamaktadır [73]. Tesis yönetimi aşamasında hayati önem taşıyan kullanıcı termal konfor geri bildirimlerinin toplanmasında birçok geleneksel yöntem ve ileri teknolojiler kullanılmaktadır. Geri bildirimlerin toplanmasında farklı yaklaşımlar bulunmakla birlikte kullanıcılar, anında geri bildirimi mümkün kılan basit arayüze sahip çözümleri tercih etmektedirler [74]. Konfor kavramı, öznel bir değerlendirme olduğundan [75, 76], iç mekanlarda termal konforun incelenmesi, kullanıcı memnuniyetinin ölçülmesi ve düzenli olarak kullanıcı geri bildirimlerinin toplanması için genellikle anketler, soru formları ve gözlem formları gibi yöntemler kullanılmaktadır [77, 78]. Ayrıca, farklı bağlamlarda adaptif termal konforun değerlendirilmesi için alan çalışmaları ve anketler yapılmıştır [79, 80, 81]. Ancak, anketler detaylı bilgilerin toplanmasında yetersiz kalmaktadır [25, 82], zira kullanıcı geri bildirimleri ancak belli dönemlerde toplanmakta ve sürekli bir bilgi akışı sağlanamamaktadır [82, 83, 84]. Bunun dışında, e-postalar, anlık mesajlar ve telefon aramaları da şikâyet ağırlıklı kullanıcı geri bildirimlerini toplamak için kullanılabilir [22, 85, 86], ancak bu yöntemler genellikle manuel veri girişi gerektirir ve verilerin işlenmesi çok daha zordur [23, 87]. Arşivlenen veriler genellikle analiz edilmez ve karar alma süreçlerinde kullanılmaz [67].

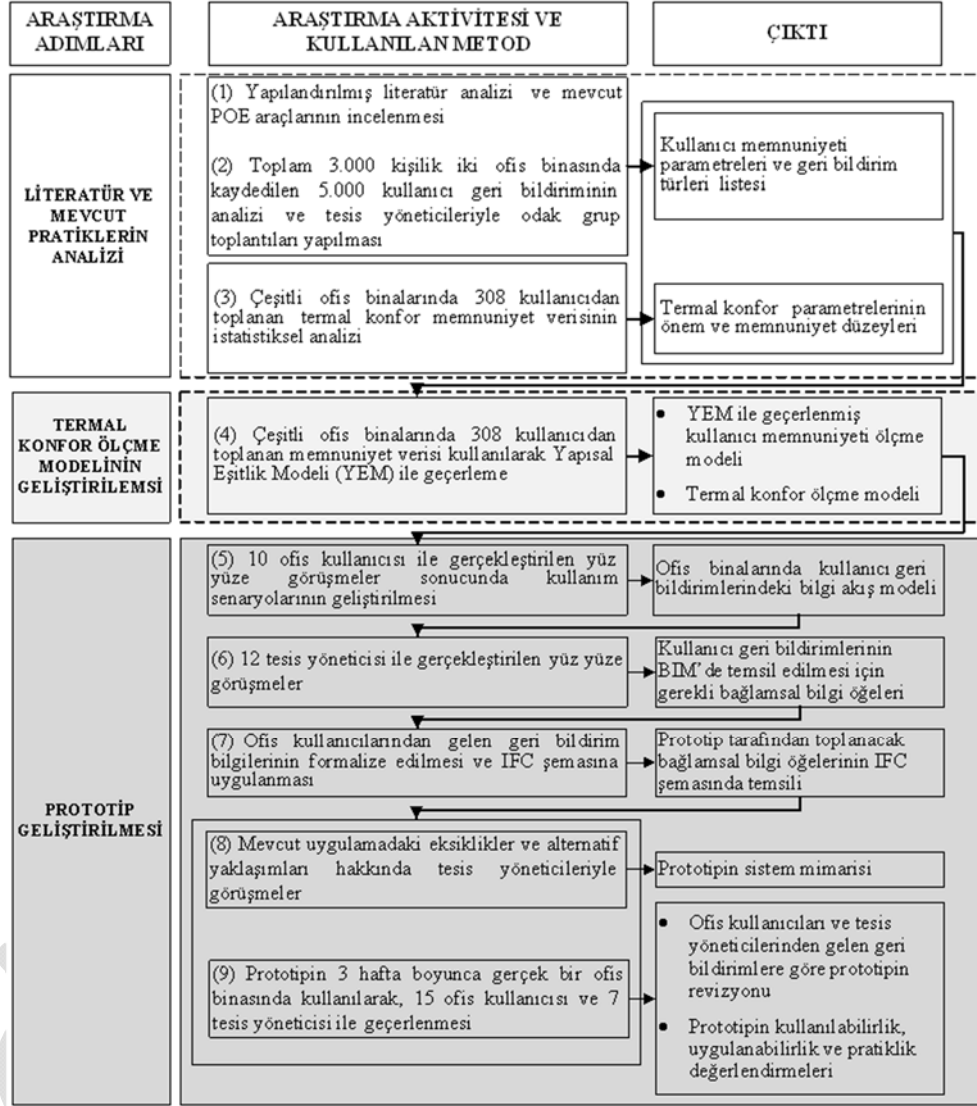
Son dönemde kullanıcı geri bildirimlerinin anlık ve yapılandırılmış olarak toplanmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Son on yılda yapılan çalışmalar incelendiğinde kullanıcı geri bildirimlerinin toplanması amacıyla (1) mobil uygulamaların [22, 69, 88, 89, 90], (2) kullanıcıların dijital bilgilerle fiziksel nesneler aracılığıyla etkileşime girebildiği cihazların (örneğin dokunmatik ekranlar, hareket algılayıcılar) [91, 92] ve (3) web tabanlı uygulamaların [93, 94] kullanıldığı görülmektedir. Bunların çoğu kullanıcı memnuniyetini genel olarak ölçmeye odaklı (tercih oyları veya termal his vb.) ve kullanıcı geri bildirimleriyle ilgili bağlama dair bilgileri toplamayan çalışmalardır. Örneğin, mobil uygulamalar, iklimlendirme sistemi için uygun bir sıcaklık ayarlamayı hedefleyerek kullanıcının termal konforuyla ilgili verileri toplamak için kullanılmıştır [22, 82, 88, 95, 96]. Kullanıcı geri bildirimlerinin toplanmasında bir diğer yöntem olarak giyilebilir cihazlarla entegre edilmiş sensörler öne çıkmaktadır. Örneğin, Abdallah ve diğ. [97]'nin çalışmasında, giyilebilir cihazlarla iç mekanlarda termal konforun ölçülmesi ve izlenmesi amaçlanmıştır. Toplanan veriler arasında hava sıcaklığı, konum, göreceli nem, terleme oranı, kalp atış hızı ve cilt sıcaklığı bulunmaktadır. Benzer şekilde, Barrios ve Kleiminger [98]'in çalışmasında

kalp atış hızı verilerini akıllı saat ve uyumlu bir göğüs bandından toplayan, sıcaklık, nem gibi çevresel verileri de giyilebilen sensörlerden toplayan bir mobil uygulama geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda termal konforun ölçümüne odaklanılmış ve giyilebilir cihazlarla entegre sensörler ve çevresel sensörlerle gerekli veriler toplanmıştır. Ancak, bu çalışmalarda termal konforu iyileştirmeye yönelik bağlamsal bilgi toplanmamıştır. Kullanıcı memnuniyeti ile ilgili toplanan veriyi daha etkin bir şekilde analiz edebilmek için yapı bilgi modeliyle (BIM) entegre eden çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmında kullanıcı memnuniyet puanları veya sorun sayıları bina mekanlarında renk kodlaması ile temsil edilmiştir [24, 25, 26, 27, 28, 29]. Bir başka çalışmada, akıllı saatler kullanarak termal konforla ilgili veriler (örneğin, kalp atış hızı ve vücut sıcaklığı) toplanmış ve bu veriler kullanıcı konumlarıyla birlikte BIM'e entegre edilmiştir [30]. Donkers ve diğ. [19] ise kullanıcılardan toplanan görsel, akustik ve hava kalitesi konfor verilerini semantik web ontolojisi kullanarak BIM'e entegre etmiştir. Gray ve diğ. [31] kullanıcı şikayetlerini ve tespit edilen sorunları kullanıcı konumlarıyla birlikte toplamayı hedefleyen bir uygulama geliştirmiştir. Alavi ve Forcada [32] kullanıcı memnuniyet verilerini Bilgisayar Destekli Bakım Yönetim Sistemleri (CMMS) verileri, Bina Yönetim Sistemleri (BMS) verileri ve BIM modeliyle birleştirerek sorunların kök nedenini belirlemeyi amaçlamışlardır. Edirisinghe ve Woo [33] ise kullanıcıların sıcaklık, nem ve hava tazeliği ile ilgili algılarını toplamış ve bunları bir oyun motoruna yüklenen bir modelde temsil etmiştir.

Sonuç olarak literatürde, bina kullanıcılarından termal konfora yönelik değerlendirmelerini mobil uygulamalar, giyilebilir sensörler veya akıllı cihazlarla anlık olarak toplayarak bina modelinde görselleştirmeyi amaçlayan çalışmalar bulunmakla birlikte, bu çalışmalarda kullanıcı geri bildirimleri BIM'de yapılandırılarak temsil edilmemiştir (örneğin, bina elemanları ile ilişkilendirilmemiştir veya bildirim zamanı gibi bilgileri içermez). Bu eksik, geri bildirimler üzerinde uzay-zamansal sorgular yürütülmesini engeller ve tesis yönetimi süreçlerinde etkin karar almayı sınırlandırır. Bu çalışmada geliştirilen BIM ile tümleşik sistem sayesinde, kullanıcıdan toplanan geri bildirimler, bina bilgileri ve geri bildirimle ilgili bağlamsal verilerle (örn. geri bildirimin bina içindeki konumu, zamanı, ilgili mahal veya bina elemanı) ilişkilendirilerek kayıt altına alınır, görselleştirilir ve böylece tesis yönetimi süreçlerinde etkin karar almayı destekler.

3. YÖNTEM

Çalışmanın yöntemi (1) bina kullanıcılarından geri bildirimlerin toplanması konusundaki literatür ve sektördeki mevcut pratiklerin incelenmesi, (2) Yapısal Eşitlik Modeli ile termal konfor ölçüm modeli geliştirilmesi ve (3) BIM ile tümleşik termal konfor değerlendirme sisteminin geliştirilmesi ve prototipinin oluşturularak bir ofis binasında gerçekleştirilen vaka analiziyle doğrulamasını içeren üç ana adımdan oluşmuştur (Şekil 1). Birinci adımda, prototipte kullanılan kullanıcı memnuniyeti parametreleri ve geri bildirim türlerinin belirlenmesi için yapılandırılmış literatür analizi gerçekleştirilmiş ve mevcut Kullanım Sonrası Değerlendirme (POE) araçları ile içerdikleri parametreler incelenmiştir. Buna ek olarak, toplam 3000 kişinin çalıştığı iki ofis binasında tesis yönetim sistemlerinde kayıtlı bulunan yaklaşık 5000 adet kullanıcı geri bildirim kaydı analiz edilmiş ve bu kayıtlarla ilgili detaylar tesis yöneticileriyle gerçekleştirilen odak grup toplantısı ile tartışılmıştır. Belirlenen parametrelerde ofis binası kullanıcılarının memnuniyetini ve bu parametrelere verdikleri önemi araştırmak amacıyla çeşitli ofis binalarında toplam 308 bina kullanıcısı ile anket



Şekil 1 - Çalışmanın yöntemi

yapılarak toplanan veri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İkinci adımda, toplanan anket verisi ile Yapısal Eşitlik Modeli (YEM) kullanılarak termal konfor ölçüm modeli oluşturulmuştur. Üçüncü adım, BIM ile tümleşik termal konfor değerlendirme sisteminin geliştirilmesi için alan çalışmalarını içerir. Bu kapsamda, ofis binalarında kullanıcı geri bildirimlerinin toplanması ve değerlendirilmesinde mevcut pratiklerin analiz edilmesi amacıyla 10 ofis kullanıcısı ile gerçekleştirilen yüz yüze görüşmeler sonucunda 13 adet kullanım senaryosu geliştirilmiş ve kullanıcı geri bildirim sürecindeki bilgi akışı Birleşik

Modelleme Dili (Unified Modeling Language -UML) diyagramları ile modellenmiştir. Kullanıcı geri bildirimlerinin tesis yönetiminde etkin olarak kullanılabilmesi için geri bildirim sürecinde toplanması gereken bağlamsal bilgi öğeleri 12 tesis yöneticisi ile gerçekleştirilen yüz yüze görüşmeler sonucunda belirlenmiştir. Belirlenen bilgi öğeleri, BIM’de veri alışverişi için önde gelen standart olan IFC’de temsil edilerek önerilen sistemin BIM ile entegre edilmesi sağlanmıştır. Prototipin mimarisinin geliştirilmesinde kullanılan sistem gereksinimleri, tesis yöneticileri ile gerçekleştirilen görüşmelerde mevcut uygulamalardaki eksikler ve alternatif yaklaşımlar hakkında edinilen bilgiler ile oluşturulmuştur. Son olarak geliştirilen prototip, üç hafta boyunca gerçek bir ofis binasında kullanılmış, bu süreçte 15 ofis kullanıcısı ve yedi tesis yöneticisinden gelen geri bildirimlerle prototipte revizyonlar yapılmıştır. Bu süreçte prototipin kullanılabilirlik, uygulanabilirlik ve pratiklik değerlendirmeleri tamamlanmış ve önerilen sistemin doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

4.1. Termal Konfor Parametreleri ve Geri Bildirim Türlerinin Belirlenmesi

Termal konfora ilişkin kullanıcı geri bildirimlerinin toplanabilmesi ve analiz edilebilmesi için öncelikle termal konforu etkileyen parametrelerin ve her bir parametre için olası geri bildirim türlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda ilk olarak, literatür bölümünde sunulan termal konfor modelleri, termal konfor standartları, bilimsel araştırmalarda yer verilen sınıflandırmalar ve mevcut Kullanım Sonrası Değerlendirme (POE) araçları manuel olarak entegre edilerek bu çalışmada geliştirilen termal konfor değerlendirme sisteminde kullanılacak parametreler “Ortam Sıcaklığı [99, 100], Işınsal Sıcaklık [101], Bağıl Nem [102], Sıcaklık Değişimleri [103] ve Hava Akışı [104, 105]” olarak belirlenmiştir. İkinci aşamada, tesis yönetimi yazılımları ile iş emri arşivleri incelenerek her bir termal konfor parametresi kapsamında kayıt edilmiş olan termal konfor geri bildirim türleri (şikayetleri) aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

- Ortam Sıcaklığı parametresi için çok soğuk, çok sıcak, dengesiz sıcaklık, pencere veya cepheden hava sızıntısı, düşey sıcaklık farkı ve pencere kenarı-iç taraf sıcaklık farkı,
- Işınsal Sıcaklık parametresi için cepheden doğrudan güneş ışığı ve ısı kaynağıyla doğrudan temas,
- Bağıl Nem parametresi için çok kuru ve çok nemli,
- Sıcaklık Değişimleri parametresi için hızlı sıcaklık değişimi ve yavaş sıcaklık değişimi,
- Hava Akışı parametresi için havalandırmadan gelen hava akışı ve pencere veya kapıdan gelen hava akışı.

Binalarda kullanıcı geri bildirimlerini yapılandırılmış bir biçimde ve bağlamsal bilgilerle zenginleştirilmiş olarak toplayabilmek için hiyerarşik bir yapıya ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için termal konfor parametreleri (örn., “Ortam Sıcaklığı” parametresi) ve onların altında yer alan geri bildirim türleri (örn. ortam sıcaklığı parametresinde “Çok soğuk” geri bildirimi) bu hiyerarşik yapıyı oluşturmaktadır. Termal konfor parametreleri ve geri bildirim

türlerinden oluşan bu yapı, takip eden bölümlerde sunulan ve 308 kişiyle gerçekleştirilen alan çalışmasından elde edilen veriler kullanılarak Yapısal Eşitlik Modeli (YEM) ile valide edilmiştir. Kullanıcı memnuniyetini tanımlayan altı gizil değişkenden biri olan termal konfor ölçme modeli, Doğrulayıcı Faktör Analizi (DFA) ile test edilerek içerik ve yapı geçerliliği doğrulanmıştır. Böylece çalışmada seçilen termal konfor parametrelerinin kullanımının istatistiksel olarak uygun olduğu belirlenmiştir. Bu tür bir sınıflandırma, kullanıcılar tarafından iletilen verilerin eksiksiz ve yapılandırılmış olarak toplanmasını ve tesis yöneticilerinin kullanıcılar tarafından iletilen geri bildirimleri manuel olarak veri işlemeye gerek kalmadan doğrudan analiz edebilmelerini sağlar.

4.2. Ofis Binalarında Termal Konfor Memnuniyetinin Analizi

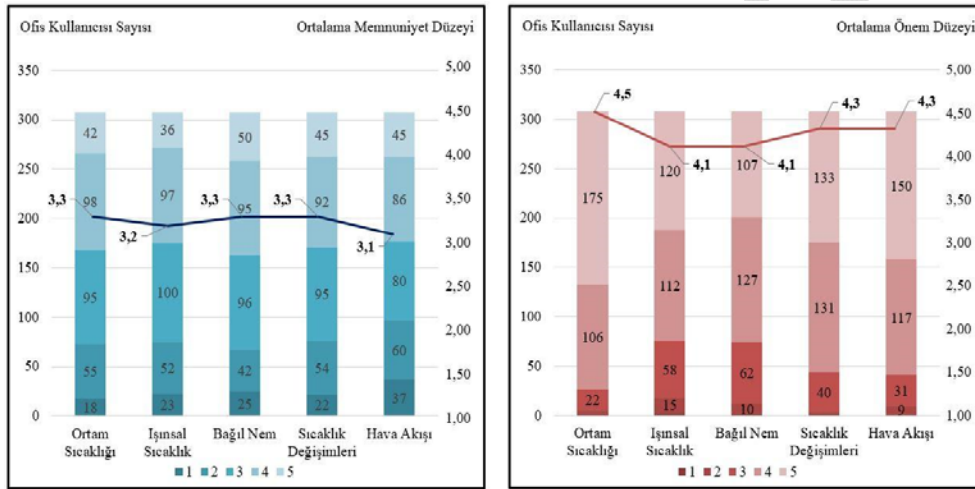
4.2.1. Termal Konfor Parametreleri Önem ve Memnuniyet Düzeyleri

Bu bölümde termal konforu belirleyen parametrelerin geliştirilecek sistem kapsamında önemleri, kullanıcılar açısından memnuniyet dereceleri sorgulanmıştır. Kullanıcılarının termal konfor memnuniyetleri ile ofislerinden genel memnuniyetleri arasında bir ilişkiye ilişkin hipotez, güvenilirlik, normallik değerlendirmeleri ile analiz edilerek test edilmiş ve alan çalışması verilerine dayalı tanımlayıcı istatistikler elde edilmiştir. Termal konfora ait parametreler ve geri bildirimler belirlendikten sonra 308 ofis kullanıcısının dahil edildiği anket yapılmıştır. Kullanıcıların ofis binalarına yönelik memnuniyet düzeyleri, belirlenen termal konfor parametreleri ve geri bildirim türleri temel alınarak değerlendirilmiştir. Veri seti, kullanıcı memnuniyeti parametrelerinin önem seviyelerini, bu parametrelerde kullanıcıların memnuniyet derecelerini belirlemek amacıyla tanımlayıcı istatistik yöntemleri ile incelenmiştir.

Anket, 35 farklı ofis binasında 60 farklı şirkette çalışan 650 ofis çalışanından oluşan bir örnekleme gönderilmiş ve 308 yanıt elde edilerek 0,47'lik bir geri dönüş oranı elde edilmiştir. Kayıp değerler, aykırı değerler ve ölçülen tüm değişkenlerin dağılımı, verileri saflaştırmak için incelenmiştir. Kayıp veriler için geleneksel çözümlerden biri, kayıp verilerin modelden çıkarılmasıdır [106]. 308 anketten eksik veri içeren sekiz tanesi analizde kullanılmamıştır ve toplam 300 katılımcı verisi analize dahil edilmiştir. Analizler SPSS ve EQS versiyon 6.3 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ankete %56'sı (171 kişi) kadın, %44'ü (137 kişi) erkek toplam 308 kişi katılmıştır. Kullanıcılara termal konfor parametreleri açısından memnuniyetlerini belirlemede geri bildirim türlerinin önem dereceleri (1: Hiç önemli değil - 2: Önemli Değil - 3: Nötr - 4: önemli 5: Çok önemli) ve memnuniyet düzeyleri (1: Hiç memnun değilim - 2: Memnun değilim - 3: Nötr - 4: Memnunum - 5: Çok memnunum) sorgulanmıştır. Ayrıca kullanıcıların memnuniyet seviyelerini etkileyen geri bildirim türlerinin de tespit edilmesi amaçlandığından, belirlenmiş olan termal konfor parametreleri ile ilgili muhtemel geri bildirim türleri sunularak anket kapsamında kullanıcılardan ofislerinin termal konforu ile ilgili şikayetleri de toplanmıştır. Kullanıcılara son olarak ofislerinden genel memnuniyet düzeyleri sorulmuştur.

Araştırmada elde edilen termal konfor parametreleri önem ve memnuniyet yanıtlarının güvenilirlik düzeylerinin incelenmesinde ise Cronbach's alpha (α) iç tutarlılık istatistikleri analiz prosedürü uygulanmıştır ve $\alpha=0,879$ değeri ile yüksek derecede güvenilir sonucu elde edilmiştir [107]. Şekil 2'de termal konfor parametrelerinin önem ve memnuniyet değerlendirmeleri ve ortalamaları gösterilmiştir. Önem ve memnuniyet yanıtlarını içeren

verilerinin normal dağılımda olup olmadığının kontrolü için Kolmogorov - Smirnov Normallik Testi ($p < 0,05$) yapılmıştır ve normal dağılmadığı belirlenmiştir. Bunun sonucunda “Ofis kullanıcılarının termal konfor memnuniyetleri ile ofislerinden genel memnuniyetleri arasında pozitif korelasyon vardır.” ($H_1 : \rho_1 \neq \rho_2$) (çift kuyruk testi) hipotezini test etmek için parametrik olmayan iki değişken arasındaki ilişkinin gücünü ölçmek için kullanılan Spearman’s rho testi yapılmıştır. $\rho = 0,633$, $p = 0,000$ $p < 0,05$ bulunarak hipotez kabul edilmiştir. Sonuç olarak, ofis kullanıcılarının termal konfor memnuniyetleri ile ofislerinden genel olarak memnuniyetleri arasında pozitif orta düzeyde güçlü bir korelasyon gözlenmiştir.



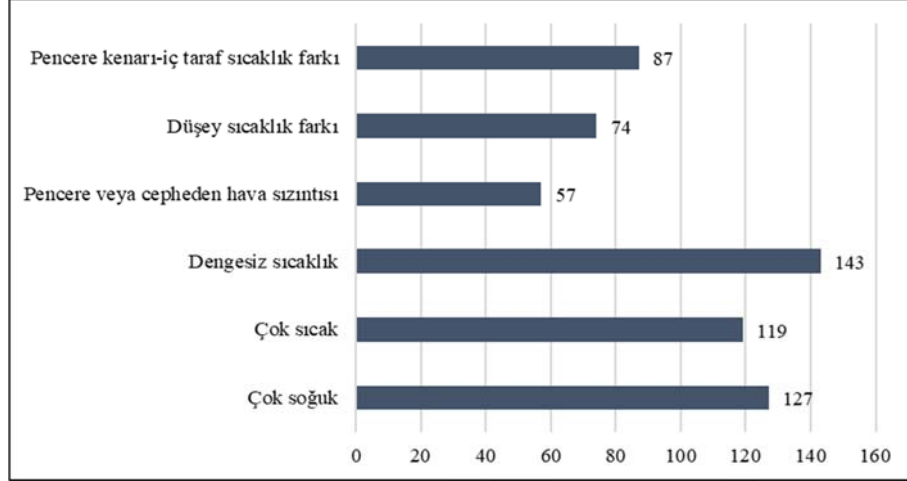
Şekil 2 - Termal konfor parametrelerinin ortalama memnuniyet ve önem düzeyi değerleri

Ofis kullanıcıları, en önemli unsur olarak “Ortam Sıcaklığı”nı (4,5) belirlemişler, bunu sırasıyla “Sıcaklık Değişimleri” (4,3), “Hava Akışı” (4,3), “İşinsal sıcaklık” (4,1) ve “Bağıl Nem” (4,1) takip etmiştir. Tüm parametrelerde ortalama önem düzeyi 4,36’dır. Öte yandan, kullanıcılar çalıştıkları ofislerde en çok “Sıcaklık Değişimleri”, “Bağıl Nem” ve “Ortam Sıcaklığı” (3,3) parametrelerinden memnun kalmış, bunu sırasıyla “İşinsal Sıcaklık” (3,2) ve “Hava Akışı” (3,1) parametreleri izlemiştir. Termal konforu temsil eden parametreler ile ilgili ortalama memnuniyet düzeyi 3,28’dir. Bulgular, her termal konfor parametresindeki ortalama önem düzeyinin, ortalama memnuniyet düzeyinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Çalışmaya katılan ofis kullanıcılarının termal konfor parametreleri önem değerlendirmeleri incelendiğinde incelenen tüm kriterlerin önemli bulunduğu ancak ortam sıcaklığının en önemli parametre olarak öne çıktığı belirlenmiştir. Kullanıcıların memnuniyet düzeyleri incelendiğinde nötr seviyesinde olduğu görülmüştür (Şekil 2).

4.2.2. Termal Konfor Kullanıcı Geri Bildirimleri

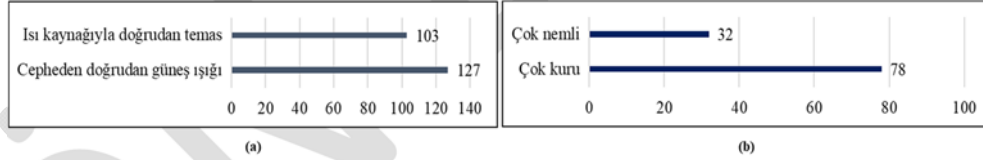
“Ortam Sıcaklığı” parametresine bağlı geri bildirimlerin ankete katılan kullanıcı sayısına göre dağılımı Şekil 3’de verilmiştir. Ortam sıcaklığına bağlı olarak en fazla karşılaşılan geri

bildirim “Dengesiz sıcaklık”tır. Bu geri bildirim 143 ofis kullanıcısı tarafından bildirilmiştir. Bunu sırasıyla “Çok soğuk”, “Çok sıcak”, “Pencere kenarı-iç taraf sıcaklık farkı”, “Düşey sıcaklık farkı” ve “Pencere veya cepheden hava sızıntısı” takip etmektedir.

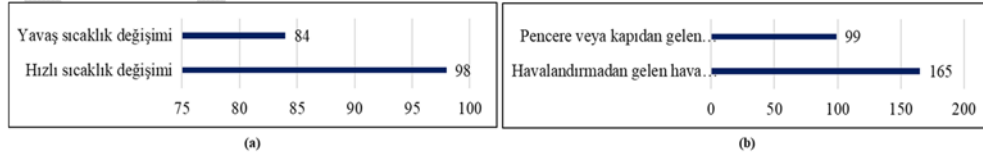


Şekil 3 - Ortam sıcaklığı geri bildirim türlerinin dağılımı

Işınal sıcaklığa bağlı olarak “Cepheden doğrudan güneş ışığı” geri bildirimini ilk sırada yer alırken bunu “Isı kaynağıyla doğrudan temas” kaynaklı termal konfor kaybı izlemektedir (Şekil 3a). Bağlı neme bağlı olarak en fazla karşılaşılan geri bildirim ise ortamının “Çok kuru” olmasıdır.



Şekil 4 - (a) Işınal sıcak geri bildirim türlerinin dağılımı ve (b)bağıl nem geri bildirim türlerinin dağılımı



Şekil 5 - (a) Sıcaklık değişimleri geri bildirim türlerinin dağılımı ve (b) hava akışı geri bildirim türlerinin dağılımı

Sıcaklık değişimlerine bağlı olarak en fazla karşılaşılan geri bildirim “Hızlı sıcaklık değişimi” iken hava akışına bağlı olarak en fazla karşılaşılan geri bildirim “Havalandırmadan gelen hava akışı”dır (Şekil 5).

Yapılan anket sonucunda, önceki bölümde literatür ve tesis yönetimi yazılımları ile iş emri arşivlerden tespit edilen geri bildirim türlerinin ofis kullanıcıları tarafından önemli bulunduğu ve memnuniyetin ise genel olarak düşük olduğu görülmüştür. Memnuniyeti düşüren faktörlerin belirlenmesi ve ilgili sorunların etkin bir şekilde tanımlanması için geri bildirim türlerinin de önem taşıdığı belirlenmiştir.

4.3. Termal Konfor Ölçme Modeli

Bu makalede ele alınan "termal konfor ölçme modeli", yapısal eşitlik modeli (YEM) ile kullanıcı memnuniyeti ölçme modelinin geliştirildiği çalışmanın bir parçası olarak bu çalışmanın metodolojisinin ikinci adımını oluşturmaktadır. Bu çalışmada kullanıcı memnuniyetini tanımlayan altı gizil değişken tanımlanmıştır ve bunlardan biri termal konfor değişkenidir. Çalışmada, ölçüm, hipotetik gizil yapılar ile her bir gizil yapının altında yatan gözlenen değişkenler arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi açısından Doğrulamalı Faktör Analizi (DFA) kullanılarak doğrulanmıştır. DFA yapılırken, içerik geçerliliği ve yapı geçerliliği testleri, uyum ve ayırıcı geçerlilik analizleri yapılmış, doğrulamalı faktör analizi uyum indisleri değerleri kabul edilebilir aralıkta bulunmuştur (Tablo 1). Analizler sonucunda termal konfor ölçeğinin yapısı bu araştırmadan elde edilen veriler üzerinden doğrulanmıştır. Böylelikle, geliştirilecek sistemde kullanıcı memnuniyetinin “termal konfor” boyutunda yapılacak değerlendirmeleri için Tablo 2’de verilen termal konfor parametrelerinin kullanılmasında gösterge değişkenlerin istatistiki olarak uygunluğu kanıtlanmıştır.

Tablo 1 - Ölçüm modeli için uyum iyiliği indisleri

Uyum İyiliği Indisleri	Önerilen Değer	Ölçüm Modeli (DFA)	YEM Modeli	Referans
X ² /serbestlik derecesi	<3	2,27	2,21	Byrne [108]
Non Normed Fit Index (NNFI)	0 düşük uyum- 1 mükemmel uyum	0,901	0,906	Hancock ve Mueller [109]
Comparative Fit Index (CFI)	0 düşük uyum- 1 mükemmel uyum	0,913	0,916	Wang ve Wang [110]
Root Mean Sq. Error of Approx (RMSEA)	<0,1	0,065	0,064	Hoyle [111]

Termal konfor (TC) gizil değişkeni; ortam sıcaklığı (TC1), ışınsal sıcaklık (TC2), bağıl nem (TC3), sıcaklık değişimleri (TC4) ve hava akışı (TC5) gözlenen değişkenleri ile ölçülmüştür. Yapılan doğrulamalı faktör analizi sonuçlarına göre, tüm değişkenlerin ilgili gizil değişken üzerindeki faktör yüklerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir ($p < 0,05$).

Termal konfora ilişkin standartlaştırılmış faktör yükleri sırasıyla; TC–TC1 için 0,800, TC–TC2 için 0,709, TC–TC3 için 0,696, TC–TC4 için 0,850 ve TC–TC5 için 0,790 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler, literatürde kabul edilen eşik değerlerin ($\geq 0,50$) üzerinde olup, ölçüm modelinin yakınsak geçerliliğini desteklemektedir. Ayrıca, Termal Konfor yapısına ait Cronbach's alfa katsayısı 0,879 olarak bulunmuş ve bu sonuç, ölçeğin yüksek düzeyde iç tutarlılığa sahip olduğunu göstermiştir.

4.4. Kullanıcı geri bildirimlerinin toplanmasında bilgi akışının modellenmesi

Kullanıcı geri bildirimlerinin toplanması ve değerlendirilmesinde mevcut pratiklerin analizi ve bağlamsal bilgi gereksinimlerinin belirlenmesi için 10 ofis kullanıcısı ile yüz yüze görüşmeler gerçekleştirilmiştir ve sonucunda 13 adet kullanım senaryosu geliştirilmiştir. Senaryolara dayanarak, kullanıcıların geri bildirimlerinin bilgi akışını modellemek için Birleşik Modelleme Dili (Unified Modeling Language -UML) diyagramları hazırlanmıştır. Geliştirilen senaryolardan bir tanesi bilgi gereksinimlerinin belirlenmesi sürecini açıklamak için aşağıda sunulmuştur (Şekil 6). Kullanım senaryoları, ilişkili UML modelleri ve her bir kullanım senaryosundan elde edilen bilgi gereksinimleri, farklı geri bildirim türlerini toplamak ve kullanmak için gerekli olan bilgi öğelerinin çeşitliliğini göstermektedir.

Kullanım Senaryosu Adı: Termal Konfor - Işınal Sıcaklık- Cepheden doğrudan güneş ışığı

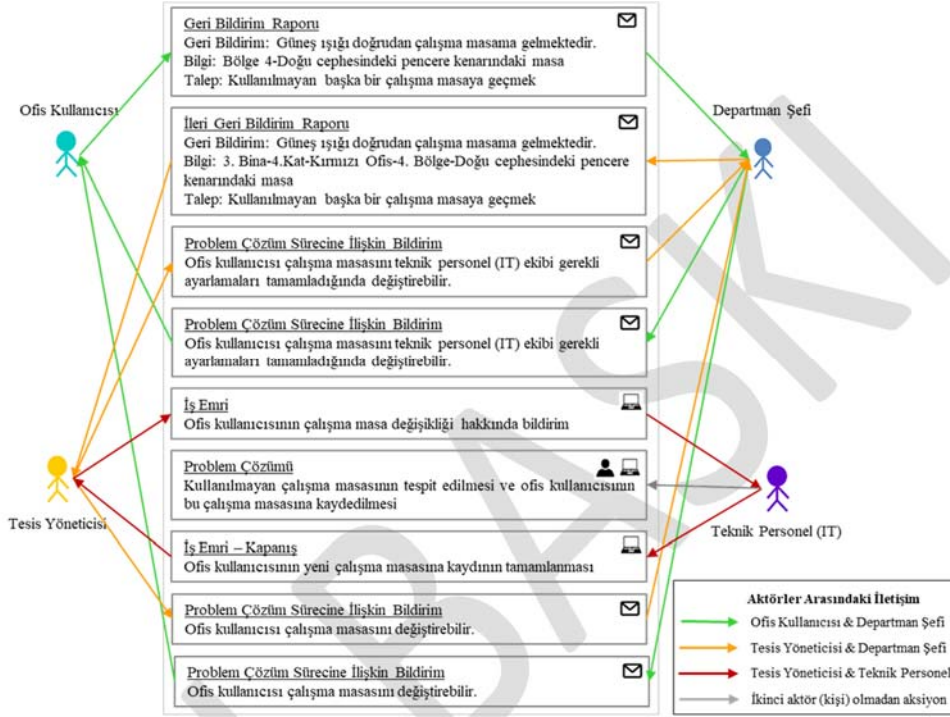
Aktörler: Ofis Kullanıcısı, Departman Şefi, Bina/Tesis Yöneticisi, Teknik Personel

Senaryo: Ofis kullanıcısı, masasına gelen güneş ışığı ile ilgili geri bildirimini ve masa değişiklik talebini e-posta ile departman şefine bildirir. Departman şefi, bu e-postayı tesis yöneticisine yönlendirir. Tesis yöneticisi gelen talebi onaylar ve teknik personel ekibine gerekli değişiklikleri yapmaları için çevrimiçi sistem ile iş emri verir. Ekip uygun masaları saptar, ofis kullanıcısını uygun olan masaya yönlendirir ve iş emrini çevrimiçi sistemden kapatır. Tesis yöneticisi, departman şefine bilgilendirme e-postası yollar ve departman şefi bu e-postayı ofis kullanıcısına yönlendirir. Ofis kullanıcısı masasını değiştirir (Şekil 6).

Kullanım senaryosu analizi, geri bildirim sorununu çözmek için gereken bilgileri iletmek amacıyla aktörler arasında altı e-posta ve iki bina yönetim sistemi etkileşimi gerektiğini göstermektedir. Ofis kullanıcısından departman şefine e-posta ile iletilen bildirimde gerekli bağlamsal bilgilerin yapılandırılmamış olması nedeniyle, departman şefi ayrıntıları kendisi ekleyerek tesis yöneticisine yine e-posta yöntemini kullanarak iletmektedir. Departman yöneticisi ve tesis yöneticisi, hata yapmaya açık ve zaman kaybına neden olan manuel veri girişleri yapmak zorunda kalmışlardır. Tesis yöneticisi ilgili geri bildirim ve bağlamsal bilgileri gerekli aksiyonların alınması için teknik personele bir iş emri aracılığıyla iletmiştir. Bunun sonucunda teknik personel ofis kullanıcısının masa değişikliğini yapmış ve kendisine atanan iş emrini çevrimiçi sistemden kapatmıştır. Alınan aksiyon sonucu ise sırasıyla tesis yöneticisine, ondan departman şefine ve ondan da ofis kullanıcısına e-posta ile aktarılmıştır.

Araştırma sırasında geliştirilen tüm kullanım senaryolarının değerlendirilmesi, kullanıcı geri bildirimlerinin işlenmesi sürecindeki sorunları ortaya konmuştur. Örneğin, veri toplama sırasında eksik bilgi nedeniyle yeniden bilgi talep etme veya eksik bilgilerin geri bildirim sahibi dışında başka aktörler tarafından girilmesi, manuel veri girişleri nedeniyle hatalar ve iş gücü kaybı, görsel yardımcılarının eksikliği nedeniyle sorunun kaynağını bulmada zaman kaybı ve tekrar eden etkileşim nedeniyle kullanıcıların vaktinin alınması başlıca sorunlardır.

Ayrıca kullanım senaryoları, kullanıcı geri bildirimlerinin etkin bir şekilde değerlendirilebilmesi için bağlamsal bilgi öğelerinin önemini ortaya koymuş ve bağlamsal bilgi öğelerinin her bir geri bildirim türüne göre büyük ölçüde farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur.



Şekil 6 - Termal konfor-ışınal sıcaklık için kullanım senaryosu diyagramı

4.5. Termal Konfor Geri Bildirimlerinin BIM’de Temsili için Gerekli Bilgi Öğeleri

Kullanım senaryolarının oluşturulmasının ardından, kullanıcı geri bildirimlerinin analizi için gerekli olan bağlamsal bilgi öğelerini tespit etmek ve bunları BIM destekli tesis yönetimine entegre etmek için 12 tesis yöneticisi ile görüşmeler yapılmıştır. Toplamda 41 saat süren görüşmeler sırasında, önceki adımda geliştirilen kullanım senaryoları tesis yöneticilerine sunulmuştur. Görüşmeler şunları ortaya çıkarmıştır: (1) Geri bildirim türüne bağlı olarak gerekli konum bilgisi detay düzeyi farklılık göstermektedir (örn. bina, kat, oda, koordinat). (2) Bazı geri bildirim türleri için soruna neden olan belirli bir bina elemanı vardır ve etkin analiz için bu bilginin toplanması gereklidir. (3) Tesis yöneticilerinin geleneksel iletişim yöntemleriyle (örneğin telefon görüşmeleri ve e-postalar) ofis kullanıcılarından topladıkları bilgiler genellikle yetersizdir ve sorunun kaynağı olan elemanı bulma konusunda zorluklar yaşanmaktadır. (4) Bazı geri bildirim türlerinde, soruna neden olan belirli bir bina alanı vardır ve bu sorunun gözlemlendiği yerden farklı olabilmektedir. (5) Sorunun kök nedenini tespit etmek veya bazı geri bildirim türlerinde sorunu çözmek için sorunun gözlemlendiği zaman aralığı gerekmektedir. (6) Tesis yönetimi operasyonlarının, kullanıcıların mevcut mesai saatleri ile

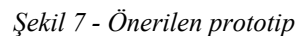
Tablo 2 - Termal konfor geri bildirimlerinin BIM’de temsili için bilgi gereksinimleri

Geri Bildirim Türü		Geri Bildirim Konumu				Problem Kaynağı		Zaman
Geri Bildirim Parametresi	Geri Bildirim	Bina	Kat	Oda	Lokasyon / Koordinat	Problem Kaynağı Eleman	Problem Kaynağı Konum	
Ortam Sıcaklığı	Çok soğuk	x		o	o			x
	Çok sıcak	x	o	o	o			x
	Dengesiz sıcaklık	x	o	o	o			x
	Pencere veya cepheden hava sızıntısı	x	x	x	x	x		
	Düşey sıcaklık farkı	x	x	x	o			x
	Pencere kenarı-iç taraf sıcaklık farkı	x	x	x	o	o		x
Işınal Sıcaklık	Cepheden doğrudan güneş ışığı	x	x	x	x	x		x
	Isı kaynağıyla doğrudan temas	x	x	x	x	x		x
Bağıl Nem	Çok kuru	x	o	o	o	o		x
	Çok nemli	x	o	o	o			x
Sıcaklık Değişimleri	Hızlı sıcaklık değişimi	x	o	o	o			x
	Yavaş sıcaklık değişimi	x	o	o	o			x
Hava Akışı	Havalandırmadan gelen hava akışı	x	x	x	x	x		x
	Pencere veya kapıdan gelen hava akışı	x	x	x	x	x		x

çakışmaması için planlama yapılırken tesis yönetimi hizmetinin sunulacağı tercih edilen tarih ve saat bilgisi de kullanıcılardan toplanmalıdır. (7) Kullanıcılar, tesis yönetimi operasyonlarının etkinliği ve verimliliği için önemli ek bilgiler verebilmektedir. Görüşmeler sırasında, tesis yöneticileri iletilen geri bildirimlerle ilgili bilgi eksikleri nedeniyle verimsizlik ve zaman kaybı yaşadıklarını bildirmişlerdir. Ayrıca, eksik bilgileri toplamak için yapılan ek telefon görüşmeleri ve e-postalar nedeniyle azalan kullanıcı memnuniyetine de dikkat çekmişlerdir. Hem geliştirilen kullanım senaryolarına hem de tesis yöneticilerinin aktarımlarına dayanarak, her bir geri bildirim türü için gerekli olan bağlamsal bilgi öğeleri belirlenmiştir. Araştırmanın ilk aşamasında geliştirilen kullanıcı geri bildirim hiyerarşisi ve her bir geri bildirim türü için gerekli görülen bağlamsal bilgi öğeleri Tablo 2'de sunulmuştur. Tüm geri bildirim türleri için zorunlu olan bilgi öğelerinin (kullanıcı bilgisi, tesis yönetimi operasyonları için tercih edilen eylem tarihi ile saati ve ek bilgiler) bu listeden hariç tutulmuştur. Tablo 2'de "x", zorunlu bilgi gereksinimlerini temsil ederken, "o" isteğe bağlı bilgi gereksinimlerini temsil etmektedir. Örneğin, geri bildirim konumu, her geri bildirim türü için gereken konum bilgisinin detay düzeyini gösterir ve kullanıcıların "Çok sıcak" geri bildirimini iletilmesi için ofis kullanıcısının bulunduğu bina bilgisi mutlaka bilinmelidir. Ancak aynı geri bildirimin spesifik bir lokasyon için verilmek istendiği durumda, spesifik bir kat veya oda veya koordinat da belirtilebilir. Öte yandan, "Cepheden doğrudan güneş ışığı" geri bildirimi için bina, kat, oda ve koordinat bilgisi gereklidir. Kullanım senaryosunda sunulduğu gibi, soruna neden olan bina elemanı da bu tür geri bildirimde sorunu tespit etmek ve çözmek için gereken bir bilgi gereksinimidir. "Bina elemanı", bir geri bildirim sebepleri olan veya bu geri bildirimle ilişkisi olan bir bina elemanıdır. İkinci bir örnek olarak, "Havalandırmadan gelen hava akışı" geri bildirimi için bu probleme neden olan bina elemanı (klima, merkezi sistem iklimlendirme/havalandırma cihazı vb.) bilgisi kullanıcıdan toplanmalıdır. Geri bildirim sorunu zamana bağlı ise (örneğin, sabahları) veya başka bir olayla birlikte gözlemleniyor (örneğin, yoğun yağış sırasında) zaman aralığı bilgisi gereklidir. Geliştirilen sistem, bu bağlamsal bilgiler setini kullanarak kullanıcılardan gerekli bilgiyi yapılandırılmış bir şekilde toplayabilecek ve etkin bir şekilde karar vericilere sunabilecektir.

4.6. Bilgi Öğelerinin IFC'de Temsili ve BIM ile Tümüleşik Termal Konfor Değerlendirme Sistemi

Binalarda toplanan kullanıcı geri bildirimlerinin BIM'de analiz edilebilmesi için önceki bölümde belirlenen bağlamsal bilgi öğeleri BIM'de veri alışverişi için önde gelen standart olan IFC 4.1 şemasında temsil edilmiştir. Bu yaklaşımın test edilebilmesi için bir prototip geliştirilmiş ve ofis ortamında vaka çalışması aracılığıyla doğrulanmıştır. Geliştirilen prototip (Şekil 7), (1) önerilen bağlamsal bilgileri de içeren kullanıcı geri bildirimlerini mobil bir uygulama aracılığıyla yapılandırılmış bir şekilde anında toplamayı ve (2) toplanan bilgileri BIM'de tesis yöneticilerine sunarak mekansal-zamansal sorgulamalar yapılmasını ve BIM modelinde görselleştirilmiş geri bildirimler aracılığıyla bilgiye dayalı karar vermeyi desteklemeyi amaçlar. Kullanıcı geri bildirimlerinin IFC şemasında temsili ve BIM ile tümleşik prototipin geliştirilmesinin teknik aşamaları sırasıyla [112] ve [113] çalışmalarında daha ayrıntılı olarak sunulmuştur. Prototipin doğrulanması ve geçerlenmesi sürecinde, üniversite kampüsü içerisinde yer alan bir ofis binasının kullanıcıları ve tesis yöneticileri önerilen prototipi deneyimlemişlerdir. Ofis kullanıcısı modülü, ofislerindeki sorunlar



Özetle, bulgular önerilen sistemin uygulanabilir, pratik ve kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Validasyon süreci sistemin kullanıcı geri bildirimlerinin ve bağlamsal bilgi öğelerinin yapılandırılmış ve etkin bir şekilde toplanması için kullanılabileceğini göstermiştir. Önerilen sistemde BIM’de görsel olarak sunulan geri bildirimler sayesinde tesis yöneticileri tekrar eden geri bildirim örüntülerini ve geri bildirim kök nedenleri belirleyebilmektedirler. Tesis yöneticileri, kullanıcı geri bildirimlerini yapılandırılmış bir şekilde ve gerekli bağlamsal bilgi öğeleriyle zenginleştirilmiş olarak toplamanın (1) kullanıcılardan toplanan bilgilerin manuel girişi için gereken zamanı ve sorunun kaynağı olan bina elemanlarını veya alanlarını tespit etmek ve bulmak için gereken zamanı azaltma ve (2) bakım & onarım sorunlarının kullanıcılardan tekrar tekrar bilgi talebi olmadan hızlı teşhisi nedeniyle tesis yönetimi operasyonlarında etkinliği ve kullanıcı memnuniyetini artırma potansiyeline sahip olduğunu doğrulamışlardır.

5. SONUÇLAR

Ofis binalarında termal konforun kullanıcı memnuniyeti, sağlığı, üretkenliği ve enerji tüketimi üzerindeki önemli etkileri son yıllarda kullanıcı odaklı termal konfor çalışmalarına olan ilgiyi artırmıştır. Bu çalışmaların temel girdisi olan kullanıcı geri bildirimleri bireylerin konforunu anlamak, sorunları belirlemek ve bina koşullarını iyileştirmek için kritik bilgiler sağlar. Binalarda termal konfor memnuniyetinin ölçülmesi, kullanıcı şikâyet ve geri bildirimlerinin toplanması için yeni teknolojiler ile desteklenen pek çok sistem geliştirilmiştir. Ancak mevcut sistemlerin kullanıcı geri bildirimleriyle ilgili önemli bağlamsal bilgi öğelerini (örneğin, ilgili bina elemanları ve bina geometrisi) toplamadaki sınırlamaları nedeniyle karar vericiler, kullanıcı geri bildirimlerini binalarda termal konfor koşullarının tasarımı, işletme ve bakımında etkili bir şekilde kullanamamaktadır.

Bu çalışmada ofis binaları için (1) kullanıcı geri bildirimlerinin gerekli bağlamsal bilgilerle zenginleştirilerek toplanmasını ve yapılandırılmasını sağlayan ve (2) toplanan verileri karar vericilere yapı bilgi modellemesi (BIM) ile entegre edilmiş şekilde sunan bir termal konfor değerlendirme sistemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle termal konfor parametreleri, standartları ve kullanıcı geri bildirim toplama konusunda literatür ve sektördeki güncel uygulamalar ile çeşitli binalarda tesis yönetimi süreçlerinde toplanan kullanıcı geri bildirimleri incelenmiştir. Böylece geliştirilecek sistemde kullanılacak termal konfor parametreleri ve kullanıcı geri bildirim türleri belirlenmiştir. İkinci adımda ofis binası kullanıcılarının termal konfor parametrelerine verdikleri önem ve memnuniyetlerini belirlemek amacıyla çeşitli ofis binalarında toplam 308 bina kullanıcısı ile anket yapılarak toplanan veri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ortam sıcaklığının en önemli termal konfor parametresi olduğunu ve termal konfor memnuniyeti ile kullanıcıların genel ofis memnuniyeti arasında pozitif ve orta düzeyde güçlü bir korelasyon bulunduğunu göstermektedir. Bir sonraki adımda, alan çalışmasından elde edilen veriler ile Yapısal Eşitlik Modeli kullanılarak bir termal konfor ölçüm modeli geliştirilmiştir. Kullanıcı memnuniyetini tanımlayan altı gizil değişkenden biri olan termal konfor ölçme modeli, Doğrulayıcı Faktör Analizi (DFA) ile test edilerek, içerik ve yapı geçerliliği doğrulanmıştır. Böylece çalışmada seçilen termal konfor parametrelerinin kullanımının istatistiksel olarak uygun olduğu belirlenmiştir.

Son aşamada, ofis binaları için BIM ile tümleşik termal konfor değerlendirme sistemi prototipi oluşturulmuştur. Bu amaçla, ofis kullanıcıları ve tesis yöneticileri ile yüz yüze görüşmeler gerçekleştirilerek kullanıcı geri bildirimlerinin toplanması sürecindeki bilgi akışı modellenmiş ve kullanıcı geri bildirimlerinin BIM’de temsil edilebilmesi için gerekli bağlamsal bilgi öğeleri belirlenmiştir. Geliştirilen prototip üç hafta boyunca gerçek bir ofis binasında kullanılarak geçerlenmiştir. Bulgular önerilen sistemin uygulanabilir, pratik ve kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Geçerleme sürecinde, sistemin kullanıcılardan toplanan bilgilerin manuel girişi ve sorunun kaynağı olan bina elemanlarının / mahallerinin tespit edilmesi için gereken zamanı azaltma ve kullanıcılardan tekrarlayan bilgi talebi alınmadan bakım- onarım sorunlarının hızlı teşhisini sağlamasıyla, yönetim operasyonlarında etkinliği ve kullanıcı memnuniyetini artırabileceği tesis yöneticileri tarafından doğrulanmıştır.

Literatürdeki kullanıcı geri bildirimlerinin BIM ile entegre edildiği çalışmalar bulunmaktadır. Ancak geliştirilen sistemlerde kullanıcı geri bildirimlerinin doğru yorumlanması ve etkin bir karar verme için gerekli olan bağlamsal bilgilerin toplanmadığı görülmektedir. Bu çalışmada geliştirilen sistemde önceki çalışmalardan farklı olarak, kullanıcıdan toplanan geri bildirimlerin doğru değerlendirilebilmesi için gerekli olan (1) bina verileri (örn. bina geometrisi, ısıtma, soğutma, havalandırma, cephe sistemleri) ve (2) geri bildirimle ilgili bağlamsal veriler (örn. geri bildirimin bina içindeki konumu, zamanı, ilgili mahal veya bina elemanı) yapılandırılmış olarak kayıt altına alınır ve BIM ile entegre edilmiş şekilde sunulurken termal konfor çalışmalarında yorumlanabilir veri sağlar.

Önerilen sistemin ofislerde enerji tüketimini optimize ederek termal konforu iyileştirmesi ve böylece kullanıcı memnuniyeti, sağlığı, üretkenliğine katkıda bulunması beklenmektedir. Gelecek çalışmalarda, geliştirilen prototipin farklı ofis binalarında daha fazla bina kullanıcıları tarafından kullanılarak iyileştirilmesi ve toplanan verinin binaların tasarım ve yönetimine yarar sağlayacak şekilde yorumlanması için çalışmalar planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma 116M177 proje numarası ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Tan, C. Y., Rahman, R. A., WELL building: Key design features for office environments, J Archit Eng, 29(2), 04023011, 2023.
- [2] Forooraghi, M., Miedema, E., Ryd, N., Wallbaum, H., Scoping review of health in office design approaches, Journal of Corporate Real Estate, 22(2), 155-180, 2020.
- [3] Wu, J., Hou, Z., Shen, J., Lian, Z., A method for the determination of optimal indoor environmental parameters range considering work performance, J. Build. Eng., 35, 101976, 2021.
- [4] Kawakubo, S., Sugiuchi, M., Arata, S., Office thermal environment that maximizes workers’ thermal comfort and productivity, Built Environ, 233, 110092, 2023.

- [5] Frontczak, M., Wargocki, P., Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments, *Build Environ*, 46(4), 922-937, 2011.
- [6] Song, Y., Mao, F., Liu, Q., Human comfort in indoor environment: a review on assessment criteria, data collection and data analysis methods, *IEEE Access*, 7, 119774-119786, 2019.
- [7] Caro, R., Marrero, M. D. R., Martínez, A., Cuerda, E., del Mar Barbero-Barrera, M., Neila, J., ..., Ramos-Palacios, C. R., Data-driven research into the inaccuracy of traditional models of thermal comfort in offices, *Build Environ*, 248, 111104, 2024.
- [8] Mamulova, E., Loomans, M., Loonen, R., Schweiker, M., Kort, H., Let's talk scalability: The current status of multi-domain thermal comfort models as support tools for the design of office buildings, *Built Environ*, 242, 110502, 2023.
- [9] Sujana, C. M., Wicaksana, C. H., Level of awareness of stakeholders in the construction industry regarding the green building concept in Indonesia, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1324(1), 012052, 2024.
- [10] Antoniadou, P., Papadopoulos, A. M., Occupants' thermal comfort: State of the art and the prospects of personalized assessment in office buildings, *Energy Build*, 153, 136-149, 2017.
- [11] Xie, J., Li, H., Li, C., Zhang, J., Luo, M., Review on occupant-centric thermal comfort sensing, predicting, and controlling, *Energy Build*, 226, 110392, 2020.
- [12] Ortiz, M. A., Kurvers, S. R., Bluyssen, P. M., A review of comfort, health, and energy use: Understanding daily energy use and wellbeing for the development of a new approach to study comfort, *Energy Build*, 152, 323-335, 2017.
- [13] Kim, J., Schiavon, S., Brager, G., Personal comfort models—A new paradigm in thermal comfort for occupant-centric environmental control, *Build Environ*, 132, 114-124, 2018.
- [14] Nicol, J. F., Humphreys, M. A., Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, *Energy Build*, 34(6), 563-572, 2002.
- [15] Schweiker, M., Huebner, G. M., Kingma, B. R., Kramer, R., Pallubinsky, H., Drivers of diversity in human thermal perception—A review for holistic comfort models, *Temperature*, 5(4), 308-342, 2018.
- [16] Molina, G., Donn, M., Johnstone, M. L., MacGregor, C., The feeling of comfort in residential settings I: a qualitative model, *Buildings and Cities*, 4(1), 2023.
- [17] Rupp, R. F., Vásquez, N. G., Lamberts, R., A review of human thermal comfort in the built environment, *Energy Build*, 105, 178-205, 2015.
- [18] Zhao, Q., Lian, Z., Lai, D., Thermal comfort models and their developments: A review, *Energy Built Environ*, 2(1), 21-33, 2021.
- [19] Donkers, A., de Vries, B., Yang, D., Creating occupant-centered digital twins using the occupant feedback ontology implemented in a smartwatch app, *Semantic Web*, 1-26, 2022.

- [20] Mitkees, L., Heidarinejad, M., Sabatino, M., Stephens, B., Occupant thermal comfort and indoor environmental conditions in Mies van der Rohe's SR Crown Hall, *Build Res Inform*, 52(3), 249-272, 2024.
- [21] Han M., May R., Zhang X., Wang X., Pan S., Yan D. and Xu L., A review of reinforcement learning methodologies for controlling occupant comfort in buildings, *Sustainable cities and society*, 51(101748), 2019.
- [22] Pritoni, M., Salmon, K., Sanguinetti, A., Morejohn, J., Modera, M., Occupant thermal feedback for improved efficiency in university buildings, *Energy Build*, 144, 241-250, 2017.
- [23] Koch, C., Neges, M., König, M., Abramovici, M., Natural markers for augmented reality-based indoor navigation and facility maintenance, *Autom. Constr.*, 48, 18-30, 2014.
- [24] Hua, Y., Göçer, Ö., Göçer, K., Spatial mapping of occupant satisfaction and indoor environment quality in a Leed Platinum campus building, *Build Environ*, 79, 124-137, 2014.
- [25] Göçer, Ö., Hua, Y., Göçer, K., Completing the missing link in building design process: enhancing post-occupancy evaluation method for effective feedback for building performance, *Build Environ*, 89, 14-27, 2015.
- [26] Patlakas, P., Koronaios, G., Raslan, R., Neighbour, G., Altan, H., Case studies of environmental visualization, *Energies*, 10(10), 1459, 2017.
- [27] Pin, C., Medina, C., McArthur, J.J., Supporting post-occupant evaluation through work order evaluation and visualization in FM-BIM, *International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Berlin-Almanya, 1-8, 20-25 Temmuz, 2018.
- [28] Alavi, H., Forcada, N., Bortolini, R., Edwards, D.J., Enhancing occupants' comfort through BIM-based probabilistic approach, *Autom Constr*, 123, 103528, 2021.
- [29] Aguilar, A.J., de la Hoz-Torres, M.L., Ruiz, D., Martínez-Aires, M.D., Monitoring and assessment of indoor environmental conditions in educational building using building information modelling methodology, *Int J Environ Re. Public Health*, 19 (21), 13756, 2022.
- [30] Abdelrahman, M.M., Miller, C., Targeting occupant feedback using digital twins: adaptive spatial-temporal thermal preference sampling to optimize personal comfort models, *Build Environ*, 218, 109090, 2022.
- [31] Gray, F.M., Dibowski, H., Gall, J., Braun, S., Occupant feedback and context awareness: on the application of building information modeling and semantic technologies for improved complaint management in commercial buildings, *25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vienna-Avusturya, 1, 101-108, 8-11 Eylül, 2020.
- [32] Alavi, H., Forcada, N., User-centric BIM-based framework for HVAC root-cause detection, *Energies*, 15(10), 3674, 2022.

- [33] Edirisinghe, R., Woo, J., BIM-based performance monitoring for smart building management, *Facilities*, 39(1/2), 19-35, 2020.
- [34] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55, Thermal environmental conditions for human occupancy, Atlanta: American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 2023.
- [35] Nicol, F., Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics, *Energy Build*, 36(7), 628-637, 2004.
- [36] ISO 7730, Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the hafta PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, ISO Standard No. 45001:2018, Yayın Tarihi Temmuz 7, 2007, Erişim Tarihi Mart 15, 2024.
- [37] Parkinson, T., De Dear, R., Thermal pleasure in built environments: physiology of alliesthesia, *Build Res Inf*, 43(3), 288-301, 2015.
- [38] Attia, S. G., Hensen, J. L., Investigating the impact of different thermal comfort models for zero energy buildings in hot climates, *International Conference on Energy and Indoor Environment for Hot Climates*, Doha-Qatar, 110-117, 24-26 Şubat, 2014.
- [39] Cole, R. J., Brown, Z., McKay, S., Building human agency: a timely manifesto. *Build Res Inf*, 38(3), 339-350, 2010.
- [40] De Dear, R., Brager, G. S., Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, 1998.
- [41] Cabanac, M., Physiological role of pleasure: a stimulus can feel pleasant or unpleasant depending upon its usefulness as determined by internal signals, *Science*, 173(4002), 1103-1107, 1971.
- [42] De Dear, R., Revisiting an old hypothesis of human thermal perception: alliesthesia, *Build Res Inf*, 39(2), 108-117, 2011.
- [43] Ma, N., Chen, L., Hu, J., Perdikaris, P., Braham, W. W., Adaptive behavior and different thermal experiences of real people: A Bayesian neural network approach to thermal preference prediction and classification, *Build Environ*, 198, 107875, 2021.
- [44] Heydarian, A., McIlvennie, C., Arpan, L., Yousefi, S., Syndicus, M., Schweiker, M., Jazizadeh, F., Risetto, R., Pisello, A. L., Piselli, C., Berger, C., Yan, Z., Mahdavi, A., What drives our behaviors in buildings? A review on occupant interactions with building systems from the lens of behavioral theories, *Build Environ*, 179, 106928, 2020.
- [45] Martins, L. A., Soebarto, V., Williamson, T., A systematic review of personal thermal comfort models, *Built Environ*, 207(A), 108502, 2022.
- [46] Akgül M. Ç., Dino, G. İ., Climate change impact assessment in residential buildings utilizing RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 3, 1665-1683, 2020.
- [47] Lovins, A., Air-conditioning comfort: Behavioral and cultural issues, 1992.

- [48] Leaman, A., Bordass, B., Thermal comfort and personal control: Understanding the psychological effects of temperature in the workplace, *Environ Behav*, 31(6), 817-845, 1999.
- [49] Nkurikiyeyezu, K., Suzuki, Y., Maret, P., Lopez, G., Itao, K., Conceptual design of a collective energy-efficient physiologically-controlled system for thermal comfort delivery in an office environment, *SICE J Control Meas Syst Integr*, 11(4), 312-320, 2018.
- [50] IPEEC Building Energy Efficiency Taskgroup, Building Energy Performance Gap Issues: An International Review, https://www.energy.gov.au/sites/default/files/the_building_energy_performance_gap-an_international_review-december_2019.pdf. Yayın Tarihi Kasım, 2019, Erişim Tarihi Mayıs 23, 2024.
- [51] Wyon, D., Indoor environmental effects on productivity, *Paths to Better Building Environments*, 96, 5-15, 1996.
- [52] 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(2), 119-131, 2012.
- [53] Huang, Y., Zhang, Y., Yang, L., Thermal comfort study in outdoor environments in a subtropical climate, *Building and Environment*, 51, 21-29, 2012.
- [54] Owolabi, H. O., Ayandele, J. K., Olaoye, D. D., A systematic review of structural equation model (SEM), *Open J Educ Dev*, 1(2), 27-39, 2020.
- [55] Kubo, S., Aoki, S., Nakano, M., Tsuji, H., Inoue, S., Mimura, E., Structural equation modeling for comfort and thermal sensation, *J Jpn Soc Fuzzy Theory Intel Informat*, 20(2), 164-170, 2008.
- [56] Koretsune, A., Kubo, S., Nakano, M., Tsuji, H., Jinno, Y., Mimura, E., Causal analysis for thermal comfort votes. 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Taipei, Tayvan, 6, 4854-4859, 8-11 Ekim, 2006.
- [57] Elnabawi, M. H., Jamei, E., The thermal perception of outdoor urban spaces in a hot arid climate: A structural equation modelling (SEM) approach, *Urban Clim*, 54, 101969, 2024.
- [58] Zainal, R., Khamis, N. S. N., Musa, S. M. S., Hamza, G., Enhancing thermal comfort in green residential colleges: A comprehensive model integrating building characteristics, occupant behaviour, and social factors, *J Adv Res Fluid Mech Therm Sc.*, 132(1), 158-174, 2025.
- [59] Sugini, Nugraha, J., Thermo-adaptive-psychological thermal comfort index of PMVTAPSEM: Development of a PMVTAP index based on the SEM approach, McLellan, B. (Eds), *Sustainable Future for Human Security*. Springer, Singapore, 6, 237-249, 2018.
- [60] Andalas, B., Kusnopranto, H., Utomo, S. W., Koestoer, R. H., Spatial perspective on thermal comfort and energy consumption: A PLS-SEM approach, *EAI Endorsed Trans Energy Web*, 7(28), 2020.

- [61] Gnecco, V. M., Pigliautile, I., Pisello, A. L., Exploring office comfort and productivity in living labs: A yearlong structural equation modeling study, *Build Environ*, 250, 111147, 2024.
- [62] Tekce, I., Ergen, E., & Artan, D., Structural equation model of occupant satisfaction for evaluating the performance of office buildings, *Arabian J Sci Eng*, 45(10), 8759–8784, 2020.
- [63] Chen, Y., Chen, Y., Chen, B., Deng, J., Xu, S., The integration model of objective and subjective data of residential indoor environment quality in northeast China based on structural equation modeling, *Build Simul*, 15, 1745–1758, 2021.
- [64] Zhang, D., Mui, K. W., Wong, L. T., Ten questions concerning indoor environmental quality (IEQ) models: The development and applications, *Appl Sci*, 13(5), 3343, 2023.
- [65] Loftness, V., Aziz, A., Choi, J., Kampschroer, K., Powell, K., Atkinson, M., Heerwagen, J., The value of post-occupancy evaluation for building occupants and facility managers, *Intell Build Int*, 1(4), 249-268, 2009.
- [66] Choi, J. H., Lee, K., Investigation of the feasibility of POE methodology for a modern commercial office building, *Build Environ*, 143, 591-604, 2018.
- [67] Hahn, J., Heiler, S., Kane, M. B., Park, S., Jensch, W., The information gap in occupant-centric building operations: lessons learned from interviews with building operators in Germany, *Front Built Environ*, 8, 838859, 2022.
- [68] Binalhaj, M., Liu, H., Sulaiman, M., Abudayyeh, O., Mobile crowdsourcing-based data collection for user-centered facility maintenance management, *Can J Civ Eng*, 48(12), 1652-1662, 2021.
- [69] Lazarova-Molnar, S., Logason, H. P., Andersen, G., Kjærgaard, M. B., Mobile crowdsourcing of data for fault detection and diagnosis in smart buildings, *International Conference on Research in Adaptive and Convergent Systems*, Odense-Danimarka, 12-17, 11-14 Ekim, 2016.
- [70] Taneja, O., Measures for maintaining low energy use in commercial buildings over their lifecycle, *ASHRAE Transactions*, 117, 525, 2011.
- [71] Yang, L., Yan, H., Lam, J. C., Thermal comfort and building energy consumption implications—a review, *Appl Energy*, 115, 164-173, 2014.
- [72] Alfano, F. R. D. A., Olesen, B. W., Palella, B. I., Riccio, G., Thermal comfort: Design and assessment for energy saving, *Energy Build*, 81, 326-336, 2014.
- [73] Tekce, I., Ergen, E., Artan, D., Structural equation model of occupant satisfaction for evaluating the performance of office buildings, *Arabian J Sci Eng*, 45(10), 8759-8784, 2020.
- [74] Lassen, N., Josefsen, T., Goia, F., Design and in-field testing of a multi-level system for continuous subjective occupant feedback on indoor climate, *Build Environ*, 189, 107535, 2021.

- [75] Andargie, M. S., Azar, E., An applied framework to evaluate the impact of indoor office environmental factors on occupants' comfort and working conditions, *Sustainable Cities Soc*, 46, 101447, 2019.
- [76] Kwon, M., Remøy, H., Van den Bogaard, M., Influential design factors on occupant satisfaction with indoor environment in workplaces, *Build Environ*, 157, 356-365, 2019.
- [77] Korsavi, S. S., Montazami, A., Children's thermal comfort and adaptive behaviours; UK primary schools during non-heating and heating seasons, *Energy Build*, 214, 109857, 2020.
- [78] Ming, R., Yu, W., Zhao, X., Liu, Y., Li, B., Essah, E., Yao, R., Assessing energy saving potentials of office buildings based on adaptive thermal comfort using a tracking-based method, *Energy Build*, 208, 109611, 2020.
- [79] Gou, Z., Siu-Yu Lau, S., Post-occupancy evaluation of the thermal environment in a green building, *Facilities*, 31(7/8), 357-371, 2013.
- [80] Shahzad, S., Brennan, J., Theodossopoulos, D., Calautit, J. K., Hughes, B. R., Does a neutral thermal sensation determine thermal comfort?, *Build Serv Eng Res Technol*, 39(2), 183-195, 2018.
- [81] Gong, X., Meng, Q., Yu, Y., A field study on thermal comfort in multi-storey residential buildings in the Karst area of Guilin, *Sustainability*, 13(22), 12764, 2021.
- [82] Li, P., Froese, T. M., Brager, G., Post-occupancy evaluation: State-of-the-art analysis and state-of-the-practice review, *Build Environ*, 133, 187-202, 2018.
- [83] Jazizadeh, F., Kavulya, G., Klein, L., Becerik-Gerber, B., Continuous sensing of occupant perception of indoor ambient factors, *J Comput Civ Eng*, 161-168, 2011.
- [84] Khan, D. S., Kolarik, J., Weitzmann, P., Design and application of occupant voting systems for collecting occupant feedback on indoor environmental quality of buildings—a review, *Build Environ*, 183, 107192, 2020.
- [85] Inyim, P., Carmenate, T., Hidalgo, D., Reyes, M., Leante, D., Bobadilla, L., Mostafavi, A., Smart applications for the integrated sensing, simulation, and feedback of occupant behaviors to enable personalized interventions for energy saving in buildings, *San Juan-Porto Riko*, 960-969, 31 Mayıs-2 Haziran, 2016.
- [86] Ramsauer, D., Dorfmann, M., Tellioglu, H., Kastner, W., Human perception and building automation systems, *Energies*, 15(5), 1745, 2022.
- [87] Shalabi, F., Turkan, Y., IFC BIM-based facility management approach to optimize data collection for corrective maintenance, *J Perform Constr Facil*, 31(1), 4016081, 2017.
- [88] Gupta, S.K., Atkinson, S., O'Boyle, I., Drogo, J., Kar, K., Mishra, S., Wen, J.T., BEES: real-time occupant feedback and environmental learning framework for collaborative thermal management in multi-zone, multi-occupant buildings, *Energy Build*, 125, 142-152, 2016.
- [89] Comfy, Intelligent Workplaces for Dynamic Businesses, <https://comfyapp.com/>. Erişim Tarihi: Mart 31, 2024.

- [90] TherMOOstat, TherMOOstat, <https://thermoostat.ucdavis.edu/>. Erişim Tarihi Kasım 29, 2022.
- [91] Rittenbruch, M., Donovan, J., Santo, Y., Mini-orb: a personal indoor climate preference feedback interface, Conference on Human-Computer Interaction (IFIP), Bamberg-Almanya, 134-149, 14-18 Eylül, 2015.
- [92] Clear, A., Mitchell Finnigan, S., Olivier, P., Comber, R., ThermoKiosk: investigating roles for digital surveys of thermal experience in workplace comfort management, CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Montreal QC- Kanada, 1-12, 21 - 26 Nisan, 2018.
- [93] Zhao, J., Lam, K., Ydstie, B., Loftness, V., Occupant-oriented mixed-mode energyplus predictive control simulation, Energy Build, 117, 362-371, 2016.
- [94] Kauppinen, T., Litvinova, E., Kallenbach, J., Capturing and linking human sensor observations with YouSense, Proceedings of the International Semantic Web Conference, Riva del Garda- İtalya, 1272, 19-23, 19-23 Ekim, 2014.
- [95] Jazizadeh, F., Ghahramani, A., Becerik-Gerber, B., Kichkaylo, T., Orosz, M., User-led decentralized thermal comfort driven HVAC operations for improved efficiency in office buildings, Energy Build, 70, 398-410, 2014.
- [96] Ghahramani, A., Tang, C., Becerik-Gerber, B., An online learning approach for quantifying personalized thermal comfort via adaptive stochastic modeling, Build Environ, 92, 86-96, 2015.
- [97] Abdallah, M., Clevenger, C., Vu, T., Nguyen, A., Sensing occupant comfort using wearable technologies, Construction Research Congress, San Juan-Porto Riko, 940-950, 31 Mayıs-2 Haziran, 2016.
- [98] Barrios, L., Kleiminger, W., The comfstat-automatically sensing thermal comfort for smart thermostats, 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), Kona, HI-Amerika Birleşik Devletleri, 257-266, 13-17 Mart, 2017.
- [99] Zhang, S., Cheng, Y., Fang, Z., Huan, C., Lin, Z., Optimization of room air temperature in stratum-ventilated rooms for both thermal comfort and energy saving, Appl Energy, 204, 420-431, 2017.
- [100] Jiang, J., Wang, D., Liu, Y., Xu, Y., Liu, J., A study on pupils' learning performance and thermal comfort of primary schools in China, Build Environ, 134, 102-113, 2018.
- [101] Saber, E. M., Iyengar, R., Mast, M., Meggers, F., Tham, K. W., Leibundgut, H., Thermal comfort and IAQ analysis of a decentralized DOAS system coupled with radiant cooling for the tropics, Build Environ, 82, 361-370, 2014.
- [102] Deng, Z., Chen, Q., Reinforcement learning of occupant behavior model for cross-building transfer learning to various HVAC control systems, Energy Build, 238, 110860, 2021.
- [103] Valančius, R., Jurelionis, A., Impact of temperature variation on energy consumption and productivity of the occupants in office buildings, Energetika, 58(3), 141-147, 2012.

- [104] Van Craenendonck, S., Lauriks, L., Vuye, C., Kampen, J., Local effects on thermal comfort: Experimental investigation of small-area radiant cooling and low-speed draft caused by improperly retrofitted construction joints, *Build Environ*, 147, 188-198, 2019.
- [105] Sansaniwal, S. K., Mathur, J., Mathur, S., Review of practices for human thermal comfort in buildings: present and future perspectives, *Int J Ambient Energy*, 43(1), 2097-2123, 2022.
- [106] MacDonald, R. R., Missing data-Quantitative applications in the social sciences, *Br J Math Stat Psychol*, 55, 193, 2002.
- [107] Taber, K. S., The use of Cronbach's alpha when developing and reporting research instruments in science education, *Res Sci Educ*, 48, 1273-1296, 2018.
- [108] Byrne, B. M., Watkins, D., The issue of measurement invariance revisited, *J Cross Cult Psychol* 34(2), 155-175, 2003.
- [109] Hancock, G. R., Mueller, R. O. (Eds.), *Structural equation modeling: A second course*, Iap, 2013.
- [110] Wang, J., Wang, X., *Structural equation modeling: Applications using Mplus*, John Wiley & Sons, 2019.
- [111] Hoyle, R. H., *Path analysis and structural equation modeling with latent variables*, 2012.
- [112] Ergen, E., Kula, B., Guven, G., Artan, D., Formalization of Occupant Feedback and Integration with BIM in Office Buildings, *J Comput Civ Eng*, 35(1), 107-118, 2021.
- [113] Artan, D., Ergen, E., Kula B., Guven, G., RateWorkSpace: BIM Integrated Post-Occupancy Evaluation System for Office Buildings, *J Inf Technol Constr*, 27, 441-485, 2022.
- [114] Lund, A. M., Measuring usability with the use questionnaire, *Usability Interface*, 8(2), 3-6, 2001.
- [115] Brooke, J., SUS-A quick and dirty usability scale, *Usability Evaluation in Industry*, 189(194), 4-7, 1996.