



Climate change impact assessment in residential buildings utilizing RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

Çağla Meral Akgül^{1*}, İpek Gürsel Dino²

¹Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 06800, Turkey

²Department of Architecture, Middle East Technical University, Ankara, 06800, Turkey

Highlights:

- Climate change impact assessment in a typical multi-story residential building in Istanbul
- Increase in cooling loads; adverse effects on occupant thermal comfort
- Different climate change scenarios

Keywords:

- Climate change
- Residential buildings
- Building energy consumption
- Occupant thermal comfort
- Carbon footprint

Article Info:

Research Article
Received: 03.03.2019
Accepted: 11.03.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.534970

Correspondence:

Author: Çağla Meral Akgül
e-mail: cmeral@metu.edu.tr
phone: +90 312 210 2462

Graphical/Tabular Abstract

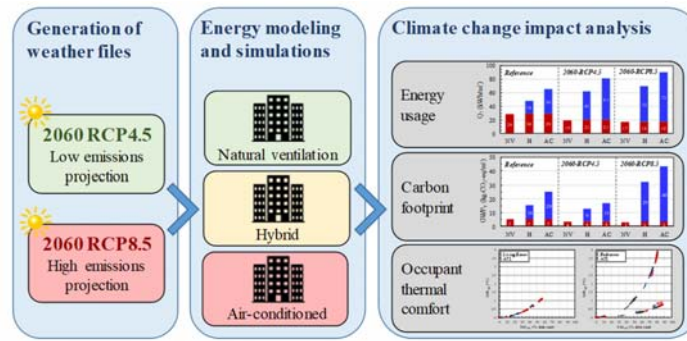


Figure A. Climate Change Impact Assessment in Residential Buildings Utilizing RCP4.5 and RCP8.5 Scenarios

Purpose: Residential buildings are among the high priority areas in climate change due to their large share of CO₂ emissions and significant energy saving potentials and the increased comfort expectations of their occupants. A systematic and numerical investigation on the impact of the climate change on building performance is crucial for both retrofitting the existing buildings and making long-term strategic decisions.

Theory and Methods:

This paper presents the simulation-based results of the climate change impact assessment for a typical multi-storey residential building in Istanbul. RCP4.5 and RCP8.5 scenarios - representing the low/medium and high CO₂ emission scenarios - defined by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) are used to generate two different climate data sets for 2060. Three cooling scenarios (natural ventilation, hybrid ventilation and air-conditioned) have been developed to represent different building usage profiles for the building simulations. Investigated performance metrics were selected as building heating/cooling energy usage, CO₂ emission and occupant thermal comfort.

Results:

For Istanbul, the 2060 OSD - which is 4.07°C for the reference year- is predicted to rise to 6.29°C for RCP4.5 and to 7.31°C for RCP8.5 climate change scenarios. The changing climate will have a strong impact on the building's energy use, carbon footprint and/or occupant thermal comfort. In both RCP4.5 and RCP8.5, there is a decrease in the heating (30% for RCP4.5 and 40% for RCP8.5) and increase in the cooling requirement (70% for RCP4.5 and 104% for RCP8.5 in fully air-conditioned scenario). Total global warming potential for 2060 will rise 104% for the RCP8.5 fully air-conditioned scenario. However, unlike the business-as-usual RCP8.5, decarbonization of electricity generation in RCP4.5 results in a 32% reduction of this value. In naturally ventilated buildings, thermal comfort will be a significant problem, especially in summer afternoons with the average indoor overheating degrees rising from 1.0°C to 2.6°C for RCP4.5 and to 3.5 for RCP8.5 for the bedrooms.

Conclusion:

Predicted temperature rise will have a strong impact on the building energy usage, carbon footprint and/or occupant thermal comfort; therefore, there is a strong necessity of planning adaptive measures considering the changing climate. The dynamic behavior of the occupants, such as just opening the windows before turning the air-conditioner on, will significantly enhance the performance of the building. Decarbonization of electricity generation will significantly reduce the building's carbon footprint. Presented results may serve as a basis for future climate change retrofit studies.



RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre konutlarda iklim değişikliği etki değerlendirmesi

Çağla Meral Akgül^{1*}, İpek Gürsel Dino²

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- İstanbul'da çok katlı, tipik bir konut binası için iklim değişikliği etki değerlendirmesi
- Soğutma yükü artışı; kullanıcı ısıl konforunun olumsuz etkilenmesi
- Farklı iklim değişikliği senaryoları

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 03.03.2019
Kabul: 09.03.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.534970

Anahtar Kelimeler:

İklim değişikliği,
konut binaları,
bina enerji tüketimi,
kullanıcı ısıl konforu,
karbon ayakizi

ÖZET

Binalar - özellikle de konut binaları- CO₂ salımlarındaki büyük payları, önemli enerji tasarrufu potansiyelleri ve kullanıcılarının artan konfor beklentileri nedeniyle iklim değişikliğinde yüksek öncelikli alanlar arasındadır. Binaların gelecekte iklim değişikliğinden nasıl etkileneceğinin sistematik ve sayısal olarak araştırılması hem mevcut binaların iyileştirilmesi hem de uzun vadeli kararlar alınabilmesi için çok önemlidir. Bu çalışmada, İstanbul'daki çok katlı tipik bir konut binası için iklim değişikliği etki değerlendirmesinin simülasyon temelli sonuçlarını sunulmaktadır. Çalışmada, 2060 yılı için Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) belirlediği düşük/orta ve yüksek CO₂ salımı olasılıklarını temsil eden RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kullanılarak oluşturulan iki farklı iklim veri seti kullanılmıştır. Ayrıca, bina simülasyonları için farklı bina kullanım profillerini temsil eden üç soğutma senaryosu (doğal havalandırma, hibrid havalandırma ve klimalı) geliştirilmiştir. İncelenen performans metrikleri bina ısıtma/soğutma enerji tüketimi, CO₂ salımı ve kullanıcı ısıl konforu olarak seçilmiştir. Analiz sonuçları, gelecekte öngörülen sıcaklık artışının binalarda soğutma enerjisi tüketimi ve/veya kullanıcı ısıl konforu üzerinde güçlü bir etkiye sahip olacağını göstermektedir. Ayrıca sonuçlar, binaların iklim değişikliğine adaptasyonuna yönelik tedbirlerin alınması gerekliliğine ve elektrik üretiminde dekarbonizasyonun iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasındaki önemine işaret etmektedir. Bu çalışma, iklim değişikliği çerçevesinde yapılacak retrofit çalışmaları için de bir temel oluşturacaktır.

Climate change impact assessment in residential buildings utilizing RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

H I G H L I G H T S

- Climate change impact assessment in a typical multi-storey residential building in Istanbul
- Increase in cooling loads; adverse effects on occupant thermal comfort
- Different climate change scenarios

Article Info

Research Article
Received: 03.03.2019
Accepted: 11.03.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.534970

Keywords:

Climate change,
residential buildings,
building energy
consumption,
occupant thermal comfort,
carbon footprint

ABSTRACT

Buildings - especially the residential buildings - are among the high priority areas in climate change due to their large share of CO₂ emissions, their significant energy saving potentials and the increased comfort expectations of their occupants. A systematic and numerical investigation of how building performance will be affected by climate change in the future is crucial for both retrofitting the existing buildings and making long-term strategical decisions. This paper presents the simulation-based results of the climate change impact assessment for a typical multi-storey residential building in Istanbul. In this study, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios - representing the low/medium and high CO₂ emission scenarios - defined by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) are used to generate two different climate data sets for 2060. Three cooling scenarios (natural ventilation, hybrid ventilation and air-conditioned) have been developed to represent different building usage profiles for the building simulations. Investigated performance metrics were selected as building heating/cooling energy consumption, CO₂ emission and occupant thermal comfort. Analysis results analysis show that the predicted temperature rise will have a strong impact on the building cooling energy consumption and/or occupant thermal comfort. The results indicate the necessity of taking measures for adaptation of buildings to the changing climate and the importance of decarbonization of electricity generation to mitigate the effects of climate change. This study will also serve as a basis for future retrofit studies for the changing climate.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: cmeral@metu.edu.tr / Tel: +90 312 210 2462

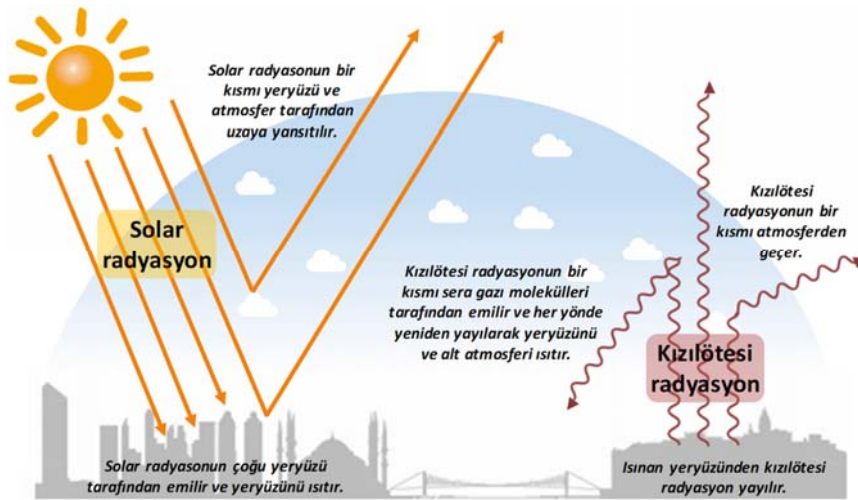
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gezegeenin uzun vadeli ısınması anlamına gelen küresel ısınmanın birincil sonucu, 21. yüzyılın en önemli problemlerinden biri haline gelen iklim değişikliğidir. Artan sıcaklıklar ile beraber değişen iklimin en belirgin göstergeleri yükselen deniz seviyeleri, eriyen buzullar ve çiçeklenme zamanlarındaki kaymalardır [1]. Bunlar ile beraber artan su baskınları, su kaynaklarının azalması ve kirlenmesi ve gittikçe azalan biyoçeşitlilik gibi çevresel olumsuzlukların da yaşanacağı öngörülmektedir [1]. Neticede, iklim değişikliği insan sağlığı için temel kabul edilen temiz hava, temiz su, yeterli beslenme ve sağlıklı barınak gibi temel gereksinimlerin karşılanmasını zorlaştıracaktır [2]. İklim değişikliğinin temel sebebinin fosil yakıtların yakımı gibi insan kaynaklı (antropojenik) faaliyetler sonucu havaya salınan ısı tutucu sera gazları olduğu konusunda bilimsel bir görüş birliği vardır (Şekil 1) [3-5]. Sera gazı salımlarının artışı ile beraber yükselen sıcaklıkların hem doğal, hem de insan yapımı sistemler üzerindeki olumsuz etkilerinin zamanla daha da belirginleşeceği tahmin edilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, yapılı çevredeki enerji tüketimi kaynaklı sera gazı salımları, 2013 yılı itibarıyla küresel antropojenik salımların %30'unu oluşturmaktadır [6]. Aynı kaynağa göre, küresel ısınmayı 2°C'nin altında tutabilmek için bina kaynaklı CO₂ salımlarının 2050 yılına kadar %77 oranında azaltılması gerekmektedir. Bu sebeple, yapılı çevre iklim değişikliği için yüksek öncelikli alanlardan biri olarak belirlenmiştir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) 2007 yılı raporuna göre, sera gazı salımlarının aynı oranda artmaya devam etmesi halinde 2100 yılı küresel ortalama sıcaklığının 2010 yılı değerlerine göre 2,6-4,8°C artacağı ve kümülatif CO₂ eşdeğer (CO₂-eş) salım miktarlarının 5.185-7.005 Gton CO₂-eş'e aralığına ulaşacağı tahmin edilmektedir [7]. CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) modeli kullanılarak hesaplanan 2100 yılı CO₂ salım aralığı tahmini oldukça geniştir. Bunun temel sebebi, gelecekteki karbon

döngüsünde net bir şekilde hesaplanabilen okyanus etkisinin aksine, kara etkisi hesapları için gerekli olan arazi kullanımı ve iklim değişiklikleri tahminlerindeki ciddi belirsizliklerdir.

İklim değişikliğinin binalar üzerindeki etkileri de büyüktür. Isınan ortam sıcaklıkları ile beraber binalarda ısı denge bozulur ve ısıtma/soğutma enerji kullanımı değişir [8, 9]. Şiddeti ve sıklığı gittikçe artan ısı dalgaları insan yaşamı üzerinde olumsuz etkiler gösterir. Küresel ısınma kaynaklı çevresel değişim hem iç, hem de dış mekanlarda insan faaliyetlerini tehdit edebilir; bina kullanıcılarının konforu, sağlığı ve iş verimliliği konularında ciddi sorunlar ortaya çıkarabilir. IEA'nın raporuna göre, 2050 yılına kadar sadece Ortadoğu coğrafyasında konut klima sayısının 47 milyondan 210 milyona çıkması beklenmektedir [10]. Aynı kaynağa göre 2050 yılında bina soğutma enerji yükünün, aynı bölgedeki toplam konut elektrik kullanımının %70'ini oluşturarak artan operasyonel maliyet ve salımlara yol açması ön görülmektedir.

Hızlı ekonomik büyüme, sanayileşme ve kentleşme ile artan çevresel baskılar, Türkiye'de çevre ile ilgili yeni taahhütler ve mevzuatların uygulanmasını kritik hale getirmiştir. TÜİK verilerine göre 1990-2017 yılları arasında Türkiye'de toplam CO₂-eş salımı 219,2 milyon tondan 526,3 milyon tona yükselmiştir [11]. 2015'te Türkiye, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne önerdiği Niyet Edilen Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkı Programı'nda 2030 yılına kadar sera gazı salımlarında %21'e varan azalma taahhüdünde bulunmuştur [12]. Türkiye On Birinci Kalkınma Planı [13] ve 2010-2023 Türkiye Cumhuriyeti İklim Değişikliği Stratejisi [14] uzun vadede enerji verimliliği, salımların azaltılması, çevre koruma ve sürdürülebilir büyüme konularında iyileştirmeler öngörmektedir. Türkiye bu taahhütleri yerine getirebilmek için enerji verimli binaların tasarımına, uygun teknolojik ekipman/yapı malzemesi seçimine ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına odaklanmaktadır. Konutlar, iklim değişikliğine karşı son derece hassastır. Küresel ısınma



Şekil 1. Sera etkisi (Greenhouse effect)

nedeniyle bina ısıtma enerjisi ihtiyacının azalması, soğutma enerjisi ihtiyacının artması ve bina kaynaklı CO₂ salımlarının uygun oranlarda değişmesi beklenmektedir [9]. Ayrıca, artan aşırı ısınma riski kullanıcı konforu ve sağlığını olumsuz etkileyecek, daha savunmasız olan yaşlılar, bebek ve çocuklar, hastalar ve yatalaklar için ciddi bir tehdit haline alacaktır [15]. Konutlarda yapılacak iklim değişikliği etki değerlendirmelerde artan nüfus, yükselen iç mekan konfor beklentileri, daha büyük mekanlara artan talep ve hane başına düşen kişi sayısının azalması gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. Konutları da kapsayan mevcut yapıyı çevre, kaynak tüketimi ve çevresel etkiler açılarından büyük bir tasarruf potansiyeline sahiptir [16]. Bina enerji kullanımının ve sera gazı salımlarının azaltılmasına yönelik faaliyetlerin orta ve uzun vadede iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir etkisinin olacağı konusunda geniş bir fikir birliği vardır. Dolayısıyla iklim değişikliğinin mevcut binalar üzerindeki etkisini anlamak ve ölçmek büyük önem taşımaktadır.

Farklı iklimlerde iklim değişikliğinin bina performansına etkilerinin araştırıldığı birçok çalışma mevcuttur [8]. Bu araştırmalarda ofis/ticari yapılar [17-22], konut binaları [23-32], sağlık binaları [33, 34] gibi bina tipolojileri ağırlıklı olarak Kuzey Amerika ve Avrupa ülkeleri göz önünde bulundurularak çalışılmıştır. Bu çalışmalar, temel olarak üç konuya odaklanmıştır: (i) gelecek için iklim veri setlerinin oluşturulması, (ii) değişen iklim koşullarının binalara olan etkilerinin değerlendirilmesi ve (iii) binaların iklime adaptasyonu için iyileştirmeler. Bu çalışmalarda, iklim değişikliği etki değerlendirmesi mevcut iklimi temsil eden referans bir yıl ile gelecekteki bir yıl için hesaplanan bina performans metrikleri karşılaştırılarak yapılmıştır. Karmaşık olan bu hesaplamalar için genellikle enerji simülasyon araçları kullanılmıştır. Mevcut çalışmalarda ısıtma ve soğutma enerji kullanımı, sera gazı salımları, kullanıcı konforu, çalışan verimliliği ve iç ortam sıcaklığı gibi performans metriklerine odaklanılmıştır. Mevcut literatürde geniş bir coğrafyada iklim değişikliği etki değerlendirme çalışmaları yapıldığı görüldükçe, Türkiye'nin de içinde bulunduğu iklim değişikliğinden en fazla etkilenecek bölgelerden biri olan Doğu Akdeniz bölgesinde bu konuda bir eksiklik olduğu [9] ve bu bölgede - geleceğe yönelik bir etki değerlendirmesine ihtiyaç olduğu saptanmıştır. Bu eksikliği gidermek için bu çalışmada, İstanbul'da bulunan çok katlı, tipik bir konut binası için farklı iklim değişikliği projeksiyonları (RCP4.5 ve RCP8.5) kullanılarak detaylı bir iklim değişikliği etki değerlendirmesi yapılmıştır. Tipik bir konut binası için yaşam ömrü 40 yıl varsayılarak değerlendirmelerde 2060 yılı kullanılmıştır. Soğutma tercihlerinin bina performansına etkisini incelemek için üç farklı soğutma senaryosu (doğal havalandırma, hibrid havalandırma ve klimalı) geliştirilmiştir. Bina performans metrikleri (bina enerji kullanımı, CO₂ salımı ve kullanıcı ısıl konforu) seçilen iklim değişikliği senaryoları için bir bina enerji simülasyon aracı (EnergyPlus) kullanılarak hesaplanmıştır. 2060 yılı projeksiyonları için elde edilen değerler referans yılı değerleri ile karşılaştırılarak

sunulmuştur. Bu çalışmanın, gelecekte Türkiye'deki konutlarda iklim değişikliği sebebi ile karşılaşılabilecek olası sorunların tespitine yardımcı olması ve konutların iklim değişikliği adaptasyon seçeneklerinin araştırılmasına ışık tutması beklenmektedir.

2. TÜRKİYE'NİN ÖZELLİKLERİ (CHARACTERISTICS OF TURKEY)

2.1. Türkiye'nin İklimi (Turkey's Climate)

Türkiye alt tropikal iklim bölgesinde, Akdeniz iklimi özelliklerine sahip kutupsal ve tropik hava kütleleri arasında bir geçiş bölgesi üzerinde yer almaktadır [35]. Türkiye'nin iklimini etkileyen temel fizyografik faktörler (i) Karadeniz ve Akdeniz havzaları; (ii) Anadolu yarımadasının kuzey ve güney kıyıları boyunca batı-doğu yönelimli yüksek dağ sıraları; ve (iii) ortalama yüksekliği 1130 m olan Anadolu platosu olarak sayılabilir [36]. Türkiye'nin kıtasal iç kısımlarına ve kıtasal Akdeniz Bölgesi'ne yarı kurak ve kuru yarınemli iklim koşulları hakimdir. İstanbul'un içinde olduğu Marmara Geçiş Bölgesi'nde, yıl boyunca yağmurlu, yaz boyunca ise ılık ve yağmurlu bir iklim hakimdir [37]. Türkiye'nin batı ve güney kesimlerinde kışın ılıman ve yağışlı, yazın kurak ve sıcak yaz Akdeniz iklimi hakimdir, ve Köppen iklim sınıflandırmasına göre Csa ile sınıflandırılır. İyigün vd.'nin (2013) kümelene yöntemini ile geliştirdikleri sınıflandırmaya göre ise İstanbul'un içinde bulunduğu coğrafya, Yarınemli Doğu Marmara Geçiş Bölümü olarak adlandırılır; Akdeniz ve Karadeniz arasında yarınemli mezotermal geçiş iklimini temsil eder [38]. Türkiye'nin içinde bulunduğu Akdeniz havzası, iklim değişikliğine bağlı en güçlü ısınmanın gözlemleneceği bölgelerden biridir. Bu bölgede, özellikle yaz aylarında artan sıcaklıklarda ve yağışta belirgin bir azalma beklenmektedir [39]. Ayrıca, sıcak hava dalgalarının sıklığında/şiddetinde ve günlük aşırı ısınmada artış olacağı tahmin edilmektedir [40].

2.2. Türkiye'de konut sektörü (Residential building sector in Turkey)

Türkiye'de hem nüfus artışı hem de kentleşme hızı yüksektir (Şekil 2) [41]. Kentsel nüfusun toplam nüfus içindeki payı sadece son on sene içerisinde (2008-2018) %69,7'den %75,1'e çıkmıştır. 2050 yılında nüfusun %86,0'ının kentlerde yaşaması beklenmektedir. Yüksek kentleşme hızı, özellikle düşük ve orta gelir grupları için konut yapılarına duyulan ihtiyacın bir göstergesidir. 1984 yılında sosyal konutların planlanması, finanse edilmesi, desteklenmesi ve inşası amacıyla Toplu Konut Geliştirme İdaresi (TOKİ) kurulmuştur. 2003-2015 yılları arasında TOKİ, Türkiye'deki konut ihtiyacının yaklaşık %10'unu karşılayan toplam 655.000 konutu inşa etmiştir; 2023 itibarıyla bu rakamı 1.000.000 konuta çıkarmayı hedeflemektedir. İklim değişikliğinin olumsuz etkileri de düşünüldüğünde, inşaat sektöründeki bu hızlı büyüme ve özellikle konut binalarındaki artış, yapıyı çevrenin çevreye etkilerini ve sürdürülebilirliğini etkilemektedir [42].

3. VAKA ÇALIŞMASI (CASE STUDY)

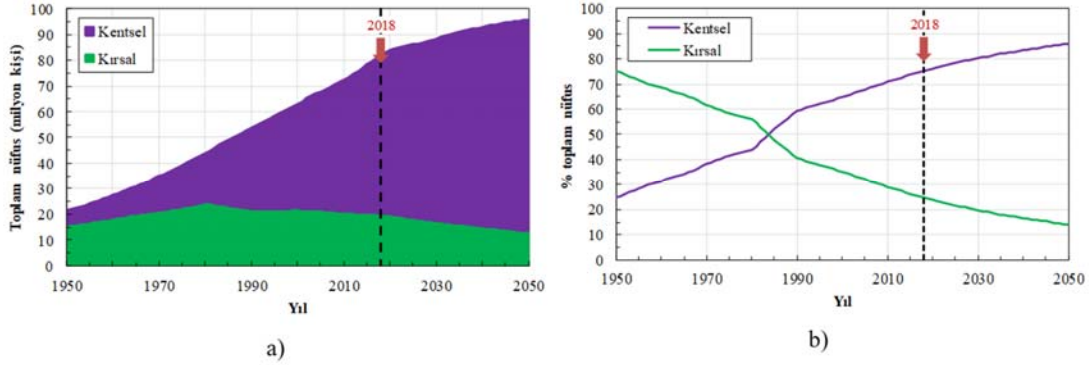
3.1. Bina özellikleri (Properties of the building)

İklim değişikliğinin Türkiye'deki konut binaları üzerindeki etkilerinin incelenmesinde TOKİ tarafından tasarlanan 10 katlı tipik bir konut binası kullanılmıştır (Şekil 3). Bina toplamda 5.617 m² büyüklüğündedir. Binada 20° eğimli bir üst kabuğa sahip soğuk çatı kullanılmıştır. Her katta 129 m² büyüklüğünde dört daire vardır. Her dairede 4 kullanıcının yaşadığı varsayılmıştır. Her daire üç farklı mekan tipine bölünmüştür: (i) Yaşama zonları (Z_{YA}): oturma odası ve mutfak gibi gündüz kullanılan alanlar; (ii) Yatak odası zonları (Z_{YO}): çoğunlukla uyumak için gece kullanılan alanlar; (iii) Servis zonları (Z_S): genellikle banyo veya koridor gibi kısa süreli kullanılan alanlar. Her katta daireler 48 m²'lik bir hol ile birbirlerine (Z_H) bağlanmaktadır. Binanın tavan yüksekliği 3,0 m'dir ve pencere/duvar oranı 0,20'dir. Bina dış cephesindeki duvar, zemin ve yalıtımlı çatı için kullanılan ısı geçirgenlik (U_{max}) değerleri TS 825 standardında ikinci iklim bölgesinde yer alan İstanbul için

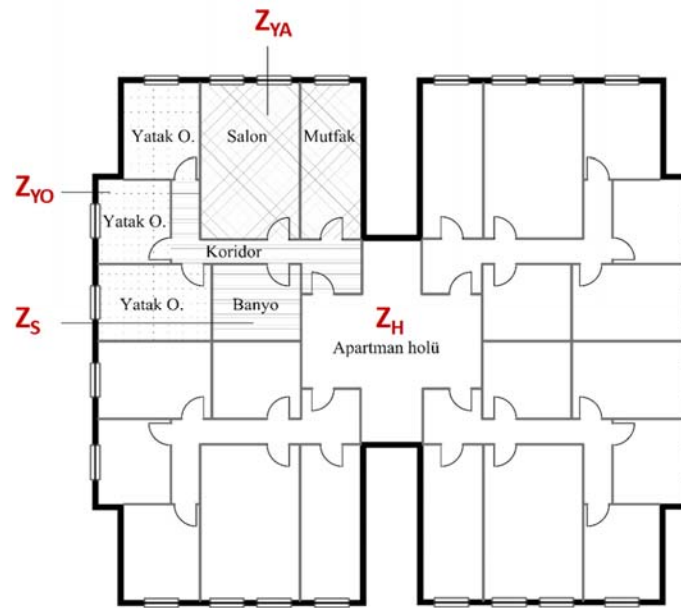
belirlenmiş maksimum ısı geçirgenlik (U_{max}) değerlerini karşılayacak şekilde sırasıyla 0,60, 0,60 ve 0,40 olarak alınmıştır [16, 43]. Pencere sisteminin U değeri 2,4 W/m²K, güneş ısı kazanım katsayısı (SHGC) 0,85 ve görünür geçirgenlik katsayısı (VT) 0,79 olarak seçilmiştir. Binanın iç ısı yükleri (kullanıcılar, aydınlatmalar ve ekipmanlar) ASHRAE Standardı 189.1'e göre seçilmiştir [44]. Vaka çalışmasında kullanılan kullanıcı yoğunluk oranları (anlık mevcut kullanıcı sayısının toplam kullanıcı sayısına oranı) Z_{YA} için 0-6:0, 6-7:0.2, 7-9: 0.6, 9-16: 0.3, 16-17:0.6, 17-18:0.8, 18-21: 1 ve 21-24: 0.2, Z_{YO} için ise 0-6:1, 6-7: 0.8, 7-8: 0.2, 8-21: 0 ve 21-24:0.8, Z_S ve Z_H için ise sıfır olarak alınmıştır.

3.2. Gelecek iklim tahmin verilerinin oluşturulması (Generation of future weather data projections)

İstanbul iklimi, Köppen iklim sınıflandırmasına göre Csa (Akdeniz iklimi) kategorisindedir ve genel olarak yazlar sıcak, kışlar ise yağışlı ve ılık geçer. İleriye dönük hava tahminleri için en belirleyici unsur gelecekteki atmosfer



Şekil 2. a) Toplam nüfus b) kentsel ve kırsal nüfus yüzdeleri [41] (a) Total population b) percentage of urban and rural population [41]



Şekil 3. Bina kat planı (Layout plan of the building)

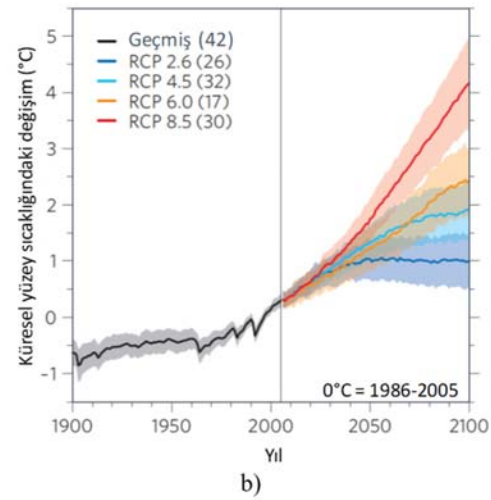
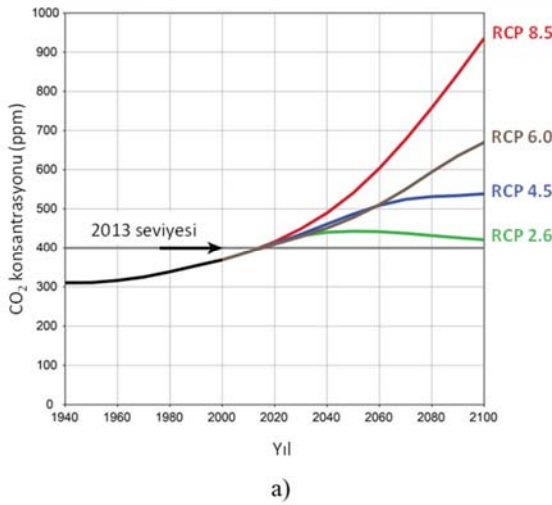
eşdeğer CO₂ konsantrasyonu ve buna bağlı değişen ışıma dengesi etkisidir (radiative forcing). Eşdeğer CO₂ konsantrasyonu birincil olarak antropojenik sera gazı salımlarına bağlıdır. Bu salımlar, temelde nüfus büyüklüğü, ekonomik aktivite, yaşam tarzı, enerji ve arazi kullanım tercihleri, teknolojiye gelişmeler ve iklim politikası gibi faktörler tarafından yönlendirilir. IPCC'nin 5. Değerlendirme Raporu 21. yüzyıl için iklim projeksiyonları yapmak için farklı sera gazı salımı ve atmosferik konsantrasyonu, hava kirletici salımı ve arazi kullanımı tahminleri yapılarak dört temsili konsantrasyon yolu (Representative Concentration Pathway veya RCP) tanımlar (Şekil 4a) [45]. Bu dört RCP, 2100 yılındaki ışıma dengesi etkilerine (2,6, 4,5, 6,0 ve 8,5 W/m²) göre RCP2.6, RCP4.5, RCP6 ve RCP8.5 olarak adlandırılmıştır. RCP2.6 sera gazı salımlarında katı bir azaltma senaryosunu, RCP4.5 ve RCP6.0 ara senaryoları, RCP8.5 ise çok yüksek salımlarınla sahip bir senaryoyu temsil eder. CMIP5 modellerinde farklı RCP senaryoları kullanılarak simüle edilen 2100 yılı yüzey sıcaklık artışları RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 ve RCP8.5 senaryoları için sırasıyla 0,3-1,7, 1,1-2,6, 1,4-3,1 ve 2,6-4,8°C olarak tahmin edilmektedir, Şekil 4b [46]. Bu çalışmada RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları seçilmiştir. RCP4.5, düşük/orta salım senaryolarından biridir ve sürdürülebilir teknolojilerin ve stratejilerin yardımı ile 2050 yılında ışıma dengesi etkisinin dengeleneceğini ve hava sıcaklığının ortalama 1,8°C yükseleceğini öngörür. RCP8.5 ise sera gazı salımlarının gelecekte artacağını ve küresel ısınmanın 2100 yılında 4,8°C'ye ulaşacağını öngörür. Kısaca, RCP4.5 iklim değişikliği açısından kısmen iyimser bir gelecek öngörürken, RCP8.5 en kötü durum senaryosunu temsil eder.

Enerji simülasyon araçları ile bina enerji tüketimi hesaplanırken, bölgenin iklimini temsil eden ve uzun süreler boyunca toplanmış istatistikî verilere dayanan saatlik hava durumu verileri kullanılır. İleriye dönük hava tahminleri

oluşturabilmek için ise farklı yöntemler geliştirilmiştir. Belcher vd. [47] tarafından geliştirilen bir yöntemde, mevcut küresel dolaşım modellerini ve bölgesel iklim modellerini dönüştürerek (morphing), gelecekteki bir yıl için hava durumu verileri hesaplanmaktadır[48]. Bu çalışmada, 2060 yılına ait RCP4.5 ve RCP8.5 iklim verilerini oluşturmak için bu yöntemi uygulayan WeatherShift™ aracı [48, 49] kullanılmıştır. Araç, 14 küresel iklim modelini (BCC-CSM1.1, CanESM2, GFDL-CM3, GFDL-ESM2M, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5B-LR, BCC-CSM1.1, CSIRO-Mk3.6.0, GFDL-ESM2G, GISS-E2-H, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR and NorESM1-M) esas alır, ve model değerleri arasında doğrusal enterpolasyon yaparak her bir iklim değişkeni için bir kümülatif dağılım fonksiyonu kullanır. Değiştirilen iklim değişkenleri ortalama sıcaklık, bağıl nem, güneş ışınımı, rüzgar hızı, atmosferik basınç ve yağıştır. Yöntemde, seçilen RCP4.5 veya RCP8.5 senaryolarına göre, İstanbul ili için 2060 yılına ait iki iklim veri seti oluşturulmuştur. Bahsedilen iklim değişkenlerinin bir yıl için saatlik değerlerini barındıran bu veri setleri enerji simülasyonlarında saatlik hesaplamalar için kullanılmıştır.

3.3. Mekan ısıtma / soğutma senaryoları (Heating / cooling scenarios)

Türkiye'de konut binalarının büyük çoğunluğunda iç mekanların soğutulmasında doğal havalandırma kullanılmaktadır. Güney ve batı bölgelerinde düşük oranda klima da kullanılmaktadır [50]. Bu çalışmada, kullanıcıların farklı mekan soğutma yöntemlerini (farklı doğal havalandırma koşullarını ve/veya klima termostat ayarlarını) temsil eden üç soğutma senaryosu (S_D, S_H ve S_K) geliştirilmiştir. Doğal havalandırma %30 oranında açılan dış pencerelerden tüm gün boyunca yapılmaktadır. Klima ise sadece mekanda kullanıcı bulunuyorsa - yaşam alanlarında sabah 7'den gece yarısına kadar, yatak odalarında gece 10'dan sabah 8'e kadar - çalışmaktadır. S_D'de soğutma



(*) Çalıştırılan model sayıları parantez içinde verilmiştir.

Şekil 4. a) RCP senaryolarına göre CO₂ konsantrasyonların kıyaslanması [45] **b)** CMIP5 modelinde çalıştırılan farklı RCP senaryolarına göre küresel yüzey sıcaklığındaki değişim ve belirsizlik [46] (a) Comparison of the CO₂ concentrations in the RCP scenarios [45] b) global surface temperature change and uncertainty according to RCP scenarios run by CMIP5 model[46]

sadece doğal havalandırma yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. S_H 'de doğal havalandırma ve klima birlikte kullanılmaktadır. Klima mekan iç hava sıcaklığı $25,5^{\circ}\text{C}$ üstünde çıktığında aktive olmakta, doğal havalandırma ise $23,5-25,5^{\circ}\text{C}$ arasında yapılmaktadır. S_K 'de ise soğutma $23,5^{\circ}\text{C}$ üstünde aktive olan klima ile gerçekleştirilmekte, doğal havalandırma yapılmamaktadır. Isıtma termostat dereceleri tüm gün boyunca yatak odaları için 19°C , servis alanları için ise 18°C , yaşam alanları için ise gece yarısından sabah 8'e 19°C , kalan zamanlarda 21°C olarak ayarlanmıştır.

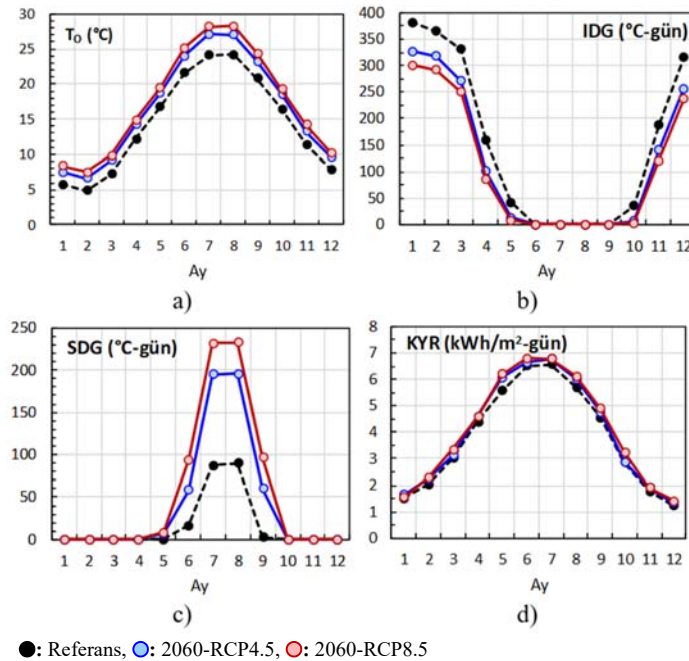
4. OLUŞTURULAN İKLİM VERİLERİNİN ANALİZİ (ANAYSIS OF THE CONSTRUCTED WEATHER DATA)

İstanbul için referans, 2060-RCP4.5 ve 2060-RCP8.5 iklim senaryoları kullanılarak hesaplanan aylık ortalama dış ortam kuru termometre sıcaklıkları (T_{KT}) Şekil 5a'da sunulmuştur. Yaz aylarında (Haziran-Ağustos), yıllık sıcaklık artışı 2060-RCP4.5 için $2,4-3,0^{\circ}\text{C}$ ve 2060-RCP8.5 için ise $3,6-4,1^{\circ}\text{C}$ mertebesindedir. Kış aylarında ise (Aralık-Şubat) artışlar RCP4.5 için $1,7-1,8^{\circ}\text{C}$, RCP8.5 için $2,4-2,6^{\circ}\text{C}$ olmuştur. Saatlik/aylık ortalama kuru termometre sıcaklıkları Şekil 6'da gösterilmektedir. Referans ve 2060 sıcaklıkları karşılaştırıldığında, yaz ortası öğleden sonraları yaşanan yüksek sıcaklıkların hem gün hem de yıl boyunca yayılarak daha geniş bir zaman dilimini kapsadığı görülmektedir. Bu durum, gün boyunca daha uzun süreli yüksek sıcaklıkların yaşandığı, daha uzun yazları işaret etmektedir. Orta seviye ısı stresi için standart eşik limiti olan 28°C 'nin üzerindeki saatlerin sayısı referans yılı için 225 saatken RCP4.5 için bu değer %210 artarak 699 saate, RCP8.5 için ise %338 artarak 985 saate çıkmıştır. Ortam sıcaklık derecesi (OSD), dış ortam sıcaklığının şiddetini zamandan ve iklim dosyalarını oluşturmak için kullanılan varsayımlardan bağımsız olarak

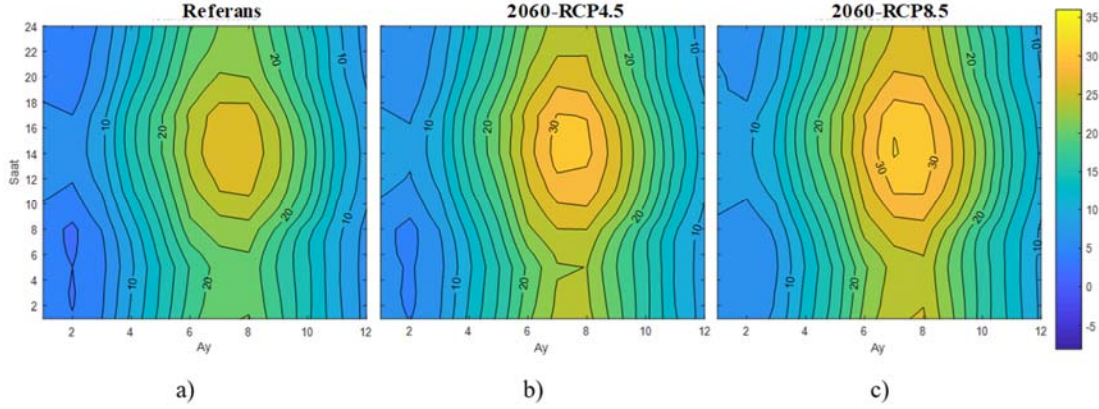
ölçen bir iklim metriğidir (Eş. 1) [23]. OSD hesaplanırken dış ortam sıcaklığının hem büyüklüğü hem de süresi dikkate alınır. Eşitlikte, T_{KT} dış ortam kuru termometre sıcaklığı, T_E ise eşik değeridir. T_E , mevcut tüm asgari yaz konfor sıcaklık limitlerinin altında olacak şekilde 18°C belirlenmiştir. N , 1 Mayıs - 30 Eylül tarihleri arasında hem konutun dolu olduğu hem de $T_{KT,i}$ 'nin T_E 'den büyük olduğu saat sayısıdır. t zaman adımdır; 1 saat olarak alınmıştır. $OSD_{18^{\circ}\text{C}}$ dış ortam sıcaklığının en az 1 saat boyunca eşik değerin üzerinde olduğu her iklim senaryosu için sıfırdan yüksektir. Referans yılı OSD değeri $4,07^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu değer, 2060 yılı için RCP4.5'e göre %55 artarak $6,29^{\circ}\text{C}$, RCP8.5'e göre %80 artarak $7,31^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır.

$$OSD_{18^{\circ}\text{C}} = \frac{\sum_{i=1}^N \max\{T_{KT,i} - T_E, 0\} \times t_i}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (1)$$

Isıtma ve soğutma derece-gün (IDG ve SDG) değerleri, belirli bir zaman aralığı için (gün, ay, yıl) bir binada konfor sıcaklığının muhafaza edilmesi için gereken ısıtma ve soğutma şiddetini gösteren metriklerdir. Birçok ülke IDG ve SDG değerlerinin hesabında farklı tanımlar kullanır. Bu çalışmada, Avrupa İstatistik Ofisi (Eurostat) tarafından kullanılan yöntem (Eş. 2-5) benimsenmiştir [51]. Yöntemde, günlük en yüksek ve en düşük saatlik dış hava sıcaklıkları (T_{\max} ve T_{\min}) ile ısıtma ($T_{I-\text{eşik}} = 15^{\circ}\text{C}$) ve soğutma ($T_{S-\text{eşik}} = 24^{\circ}\text{C}$) eşik sıcaklıkları üzerinden hesaplanan günlük ısıtma ve soğutma derece-gün (IDG_N ve SDG_N) değerleri kullanılır. Küresel ısınmaya paralel olarak IDG değerlerinde azalış, SDG değerlerinde ise artış beklenir. İklim senaryolarına göre hesaplanan aylık IDG ve SDG değerleri Şekil 5b, Şekil 5c'de sunulmuştur. Yıllık referans IDG değeri 1817°C-gün dür. 2060 yılı için RCP4.5'e göre %21 düşerek 1435°C-gün olarak, RCP8.5'e göre ise %28 düşerek 1300°C-gün olarak



Şekil 5. Aylık ortalama a) T_{KT} ($^{\circ}\text{C}$) b) IDG ($^{\circ}\text{C-gün}$) c) SDG ($^{\circ}\text{C-gün}$) ve d) KYR ($\text{kWh/m}^2\text{-gün}$) değerleri
(Monthly average values for a) T_{KT} ($^{\circ}\text{C}$) b) IDG ($^{\circ}\text{C-day}$) c) SDG ($^{\circ}\text{C-day}$) d) KYR ($\text{kWh/m}^2\text{-day}$))



Şekil 6. Saatlik/aylık ortalama kuru termometre sıcaklığı (°C) a) referans b) 2060-RCP4.5 c) 2060-RCP8.5
(Hourly/monthly average dry bulb temperatures (°C) a) reference b) 2060-RCP4.5 c) 2060-RCP8.5)

hesaplanmıştır. Yıllık referans SDG değeri ise 197°C-gün'dür. 2060 yılında SDG değerleri RCP4.5'e göre %162 artarak 516°C-gün, RCP8.5'e göre ise %237 artarak 663°C-gün olarak hesaplanmıştır. İklim değişikliğinin sonucu olarak özellikle Temmuz ve Ağustos aylarında soğutma ihtiyacının yoğun bir şekilde artması beklenmektedir.

$$IDG = \sum_{i=1}^N IDG_N \quad (2)$$

$$IDG_N = \begin{cases} 18 - (T_{max} + T_{min})/2, & (T_{max} + T_{min})/2 \leq T_{I-eshik} \\ 0, & diğ er \end{cases} \quad (3)$$

$$SDG = \sum_{i=1}^N SDG_N \quad (4)$$

$$SDG_N = \begin{cases} (T_{max} + T_{min})/2 - 21, & (T_{max} + T_{min})/2 \geq T_{S-eshik} \\ 0, & diğ er \end{cases} \quad (5)$$

Güneş radyasyon miktarı bina enerji kullanımı ve bina kullanıcı ısı konforunu etkileyen önemli bir iklim metriğidir. Yatay yüzeye gelen global güneş radyasyonu (Wh/m²) zemine yatay bir yüzeyde alınan güneş ışınım miktarıdır. İklim değişikliğinin küresel yatay radyasyon (KYR) üzerindeki etkisi sınırlıdır. Referans ve 2060 yılı iklim verilerine göre hesaplanan aylık ortalama KYR değerleri Şekil 5d'de sunulmuştur. Yıllık KYR değerleri 1394, 1464 ve 1499 kWh/m²-yıl olmuştur.

5. BİNA ENERJİ GEREKSİNİMİ VE KARBON AYAKIZI (BUILDING ENERGY USE AND CARBON FOOTPRINT)

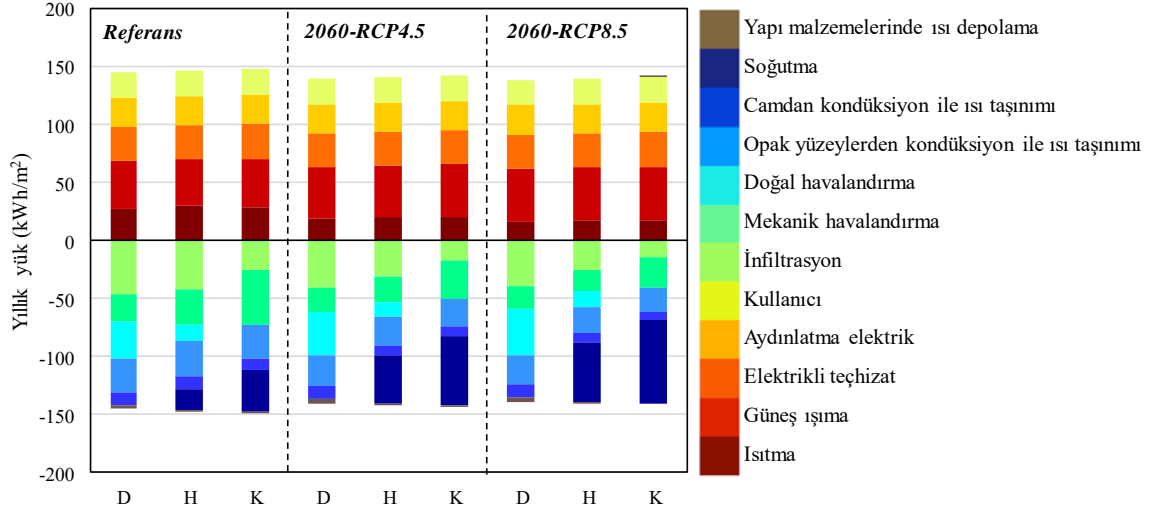
Farklı iklim senaryoları için metrekare kullanım alanı başına düşen ısı yükleri EnergyPlus simülasyonları kullanılarak hesaplanmış, yıllık yükler Şekil 7'te sunulmuştur. Bina kullanım alanı hesaplanırken ortak kullanım alanları (holler) dahil edilmemiştir. Vaka çalışmasına uygun olarak aydınlatma, ekipman ve kullanıcı kaynaklı iç kazanımlar farklı senaryolar boyunca sabit varsayılmıştır. Öte yandan, güneş enerjisi kazanımları, 2060 projeksiyonlarındaki güneş

ışınımındaki artış nedeniyle az bir miktar artmıştır. Kalan dış yükler, iç ve dış hava arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır ve bu nedenle referans ve 2060 projeksiyonları arasında ciddi farklılıklar vardır. Opak ve cam yüzeylerden kondüksiyon ile ısı taşınımı ve infiltrasyon artan dış hava sıcaklıklarından dolayı 2060 senaryolarında referans senaryoya kıyasla azalmıştır. İklim değişikliği ile ısıtma yükleri (Q_I) düşmüş, soğutma yükleri (Q_S) ise artmıştır. Isıl yüklerin ayrıntılı değerlendirmesi, gelecekte iklim adaptasyon stratejilerinin geliştirilmesi ve iyileştirme planlarının yapılması için kritik öneme sahiptir. Elde edilen Q_I ve Q_S değerleri birim kullanım alanı başına küresel ısıtma potansiyeli (KIP) (kg-CO₂-eş/m²) değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. KIP hesaplamalarında aşağıda sıralanan varsayımlar yapılmıştır:

- Isıtma/soğutma sistemi teknolojisi ile verimliliğinin referans ve 2060 yılları arasında değişmediği varsayılmıştır. Bu kötümsen bir varsayımdır; ileride - özellikle soğutma sistemi teknolojilerinde - verimliliğin artması beklenmektedir [52].
- Mekansal ısıtmanın KIP değeri 0,181 kg-CO₂eş/kWh olan doğal gaz kazanı ile karşılandığı varsayılmıştır. Bu değer Ecoinvent veri tabanından [53] elde edilmiştir; benzer çalışmalarda kullanılan KIP'ler ile uyumludur [54, 55]. Kazan verimi %80 olarak alınmıştır [56]. İleride Türkiye'de artan oranda biyogaz kullanımı planlanmaktadır. Biyogaz kullanımı ile KIP değeri önemli ölçüde düşürülebilir; fakat, çalışma kapsamında 2060 yılına kadar karbon yoğunluğunda bir azalmanın olmayacağı varsayılmıştır [57].

Klima için şebeke elektriğinin kullanıldığı varsayılmıştır:

- RCP8.5'e uygun olarak 21. yüzyılda verimli enerji üretim teknolojisinde hiç ya da çok az değişiklik olacağı ve 2060 yılında elektrik üretim kaynak dağılımının bugünkü gibi kalacağı varsayılmıştır. Halihazırda Türkiye elektrik üretimi (Tablo 1), büyük ölçüde doğal gaz, kömür ve hidroelektrik teknolojisine dayanmaktadır [58]. Türkiye şebeke elektriğinin mevcut KIP'i Ecoinvent veri tabanından [53] ve Türkiye elektrik üretimi üzerine yapılan yaşam döngüsü çalışmalarından



Şekil 7. Yıllık metrekare başına düşen ısı yükleri (kWh/m²) (Thermal loads per square meter (kWh/m²))

Tablo 1. Farklı elektrik kaynakları için birim elektrik üretimi başına küresel ısınma potansiyelleri ve bu kaynakların 2017 Türkiye elektrik üretimindeki payları [58]
(Global warming potentials per unit electricity generation for different electricity sources and share of these sources in 2017 Turkey electricity generation [58])

Enerji kaynağı	Türkiye üretimindeki payı (%)	Birim elektrik üretimi başına KIP (kg CO ₂ -eş/kWh)
Linyit	13,69	1,062 [60]
Taş kömürü ve antrasit	19,10	1,126 [60]
Sıvı yakıtlar	0,40	0,964 [63]
Doğal gaz	37,17	0,499 [60]
Güneş	0,97	0,0094-0,167 [64]
Hidrolik	19,58	0,004 - 0,01 [59]
Rüzgar	6,02	0,01 [59]
Jeotermal	2,06	0,06 [59]
Bioyakıt	1,00	0,058-0,132 [65]
Türkiye	100	0,557

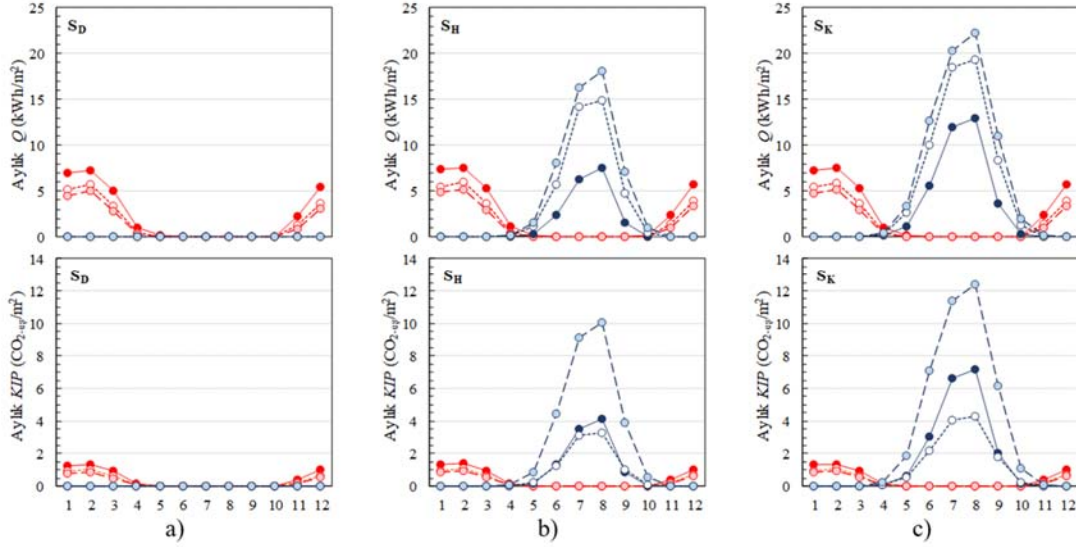
[59, 60] elde edilen değerler kullanılarak 0,557 kg CO₂-eş/kWh olarak hesaplanmıştır.

- RCP4.5'e göre yapılan hesaplamalarda ise daha iyimser bir yaklaşım kullanılmış, sera gazı salımlarını azaltmak için bazı önlemlerin alındığı varsayılmıştır. Elektrikğin %36'sının yenilenebilir kaynaklardan, %25'inin nükleer santrallerden ve geri kalan %36'sının fosil yakıtlardan (karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin kullanılmadan) elde edileceği varsayılmıştır [61]. İyimser yaklaşımda aynı zamanda teknolojik gelişmeler de olacağı kabul edilmiştir [62]. Bu iyimser yaklaşım için KIP 0,22 kg CO₂-eş/kWh olarak hesaplanmıştır [61].

Aylık Q₁ ve Q_s değerleri ile bunlara karşılık gelen aylık ısıtma (KIP₁) ve soğutma (KIP_s) kaynaklı küresel ısınma potansiyeli değerleri Şekil 8'de sunulmuş, yıllık değerler ise Tablo 2'de özetlenmiştir. S_D, S_H ve S_K senaryolarında referans yılı için yıllık Q₁ değerleri sırasıyla 28,0, 29,6 ve 29,4 kWh/m², KIP₁ değerleri ise 5,1, 5,4 ve 5,3 CO₂-eş/m² olmuştur. 2060 yılı için öngörülen iklim değişikliği

senaryolarında ısıtma ihtiyacı düşmüş, ısıtma süresi azalmıştır. Düşen ısıtma ihtiyacına paralel olarak Q₁ değerleri RCP4.5'te yaklaşık %30 azalarak 19,5, 20,7 ve 20,6 kWh/m²'ye, KIP₁ değerleri ise 3,5, 3,8 ve 3,7 kg-CO₂-eş/m²'ye gerilemiştir. RCP8.5'te Q₁ değerleri yaklaşık %40 azalarak sırasıyla 16,5, 17,6 ve 17,5 kWh/m² olmuş, KIP₁ değerleri ise 3,0, 3,2 ve 3,2 kg-CO₂-eş/m²'ye düşmüştür. Sonuçlar, seçilen soğutma senaryosunun Q₁ değerlerine etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

İklim değişikliğinin Q_s üzerindeki etkisi Q₁ üzerindeki kadar belirgindir. Artan sıcaklıklar, artan soğutma ihtiyacını da beraberinde getirir. Hem doğal havalandırmanın hem de klimanın kullanıldığı S_H için referans yılında Q_s 18,1 kWh/m² iken bu değer RCP4.5'te %127 artarak 41,2 kWh/m²'ye, ise RCP8.5'te %188 artarak 52,5 kWh/m²'ye çıkmıştır. Referans yılı KIP_s değeri 10,1 kg-CO₂-eş/m²'dir. Bu değer, RCP4.5'te %10 düşerek 9,1 kg-CO₂-eş/m² ve elektrik üretiminin aynı kaldığı RCP8.5'te ise %188 artarak 29,1 kg-CO₂-eş/m² olmuştur. Sadece klimanın kullanıldığı S_K için referans yılında Q_s 35,5 kWh/m² iken bu değer RCP4.5'te %70 artarak 60,5 kWh/m²'ye ve RCP8.5'te %104



(—) Referans-ısıtma; (····) 2060-RCP4.5-ısıtma; (---) 2060-RCP8.5-ısıtma
 (—) Referans-soğutma; (····) 2060-RCP4.5-soğutma; (---) 2060-RCP8.5-soğutma

Şekil 8. Metrekare başına düşen aylık ısıtma ve soğutma yükü (kWh/m^2) ve küresel ısınma potansiyeli ($\text{kg-CO}_2\text{-eş/m}^2$) a) S_D b) S_H ve c) S_K

(Monthly heating and cooling load (kWh/m^2) and global warming potential ($\text{kg-CO}_2\text{-eq/m}^2$) per square meter a) S_D b) S_H ve c) S_K)

Tablo 2. Yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı ve bunlara karşılık gelen küresel ısınma potansiyeli değerleri
 (Annual heating and cooling energy requirements and corresponding global warming potential values)

Senaryo (kWh/m^2)	Referans			2060-RCP4.5			2060-RCP8.5		
	S_D	S_H	S_K	S_D	S_H	S_K	S_D	S_H	S_K
Q_I	28,0	29,6	29,4	19,5	20,7	20,6	16,5	17,6	17,5
Q_S	-	18,1	35,5	-	41,2	60,5	-	52,2	72,4
Q_T	28,0	47,7	64,9	19,5	61,9	81,2	16,5	69,8	90,0
($\text{kg-CO}_2\text{eş/m}^2$)									
KIP_I	5,1	5,4	5,3	3,5	3,8	3,7	3,0	3,2	3,2
KIP_S	-	10,1	19,8	0,0	9,1	13,3	-	29,1	40,3
KIP_T	5,1	15,4	25,1	3,5	12,8	17,1	3,0	32,2	43,5

artarak $72,4 \text{ kWh/m}^2$ 'ye çıkmıştır. Referans yılı için KIP_S $19,8 \text{ kg-CO}_2\text{-eş/m}^2$ 'dir. KIP_S , RCP4.5'te %33 düşerek $13,3 \text{ kg-CO}_2\text{-eş/m}^2$ olmuş, RCP8.5'te ise %104 artarak $40,3 \text{ kg-CO}_2\text{-eş/m}^2$ 'ye çıkmıştır. Sonuçlar, doğal havalandırmanın klima ile beraber kullanıldığı, daha yüksek klima aktivasyon derecesine sahip S_H 'ın sadece klimanın kullanıldığı S_K 'ya göre çok daha enerji etkin olduğunu göstermektedir.

Birim kullanım alanı başına iklimlendirme için düşen toplam enerji gereksinimi (Q_T), Q_I ve Q_S değerleri toplanarak bulunmuştur. Referans yılına kıyasla S_D , S_H ve S_K için Q_T değerleri sırasıyla RCP4.5'e göre %-31, %+30 ve %+25, RCP8.5'e göre ise %-41, %+46 ve %+39 değişmiştir. KIP_T değerlerindeki değişim ise RCP4.5'e göre %-31, %-17 ve %-32, RCP8.5'e göre ise %-41, %+109 ve %+73 olmuştur. Hem RCP4.5 hem de RCP8.5 sonucunda değişen iklim koşulları, kullanıcı ısı konforunun özellikle yaz aylarında olumsuz etkilenmesine ve artan soğutma ihtiyacına bağlı olarak S_H ve S_K senaryolarındaki Q_T değerlerinin yükselmesine sebep olmuştur. Halihazırdaki şebeke elektriği karbon-yoğunluğu doğal gaz ile ısıtmanınkinden daha

yüksektir. Bu sebeple, referans yılına kıyasla ısıtma ihtiyacı düşse bile artan soğutma ihtiyacından dolayı elektrik üretimi karbon-yoğunluğunun aynı kalacağı varsayıldığı RCP8.5 için KIP_T değerleri yükselmiştir. Fakat, karbon-yoğunluğu daha düşük bir elektriğin üretilmesi öngörüldüğü RCP4.5 için KIP_T değerleri düşmüştür. Sonuçlar, iklim değişikliği ile mücadelede elektrik üretimi dekarbonizasyon süreçlerinin önemini vurgulamaktadır.

6. BİNA KULLANICI ISIL KONFORU (OCCUPANT THERMAL COMFORT)

Kullanıcıların ortam ısısından memnuniyetini ifade eden kullanıcı ısı konforu, bina performans değerlendirmesinin temel unsurlarından biridir. Türkiye'deki bina stokunun büyük bölümünü temsil eden doğal havalandırılmalı binalar, küresel ısınmanın olumsuz konfor etkilerine karşı oldukça hassastır. Bu çalışmada, kullanıcı ısı konforu analizi konfor koşullu zonlar (Z_{YA} ve Z_{YO}) ile sınırlandırılmıştır. Her bir iklim senaryosu için kullanıcı ısı konforu simüle edilen 120 adet apartman dairesi için (40 apartman dairesi \times 3 soğutma

senaryosu) operatif sıcaklık (T_O) ve aşırı ısınma riski - iç mekan aşırı ısınma süresi (İAS) ve derecesi (İAD) ve aşırı ısınma tırmanış faktörü (α_{IAD}) - metrikleri ile değerlendirilmiştir.

6.1. Operatif sıcaklık, T_O (Operative temperature, T_O)

Operatif sıcaklık T_O , her zon için ortalama iç hava sıcaklığı (T_{OIHs}) ve ısıtma sıcaklığı (T_{OIS}) değerlerinin ısı transfer katsayılarına göre ağırlıklı ortalamasıdır (Eş. 6). T_{OIHs} ve T_{OIS} simülasyon sonuçlarından elde edilir. Eşitlikte yer alan ısıtma katsayısı γ ise hava hızına bağlı olarak kullanıcı tarafından tanımlanan bir değerdir. Bu çalışmada, uluslararası ISO 77300 Standardına atıf yapan Niu ve Burnett [66] gibi 0,2 m/s'den küçük bir hava hızı için 0,5'lik bir ısıtma katsayısı seçilmiştir.

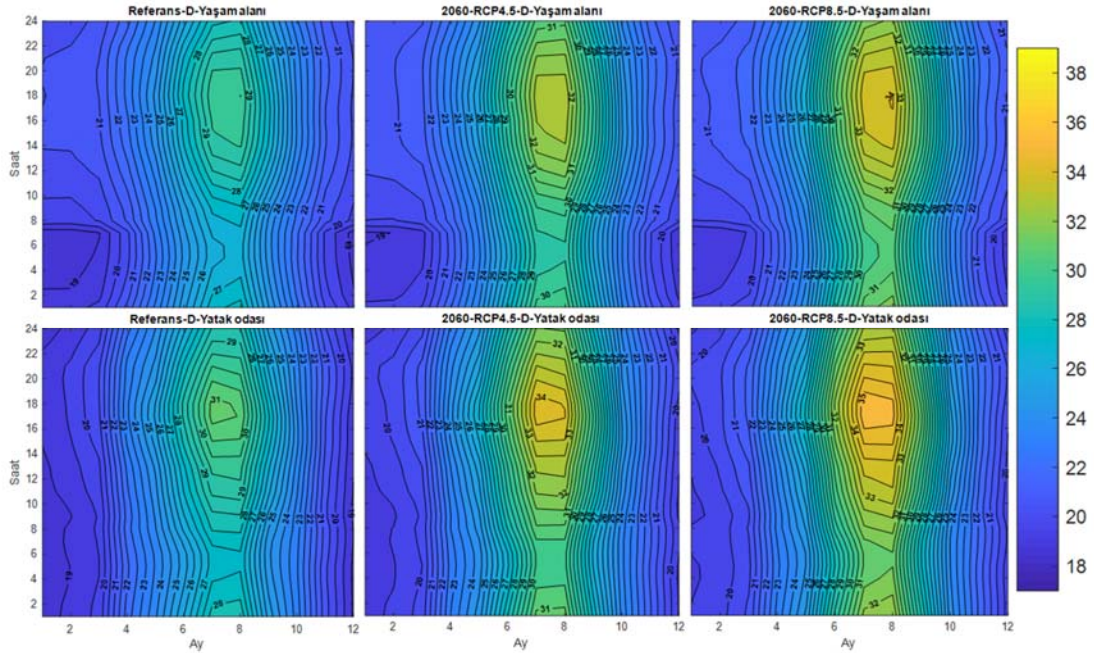
$$T_O = \gamma T_{OIHs} + (1 - \gamma) T_{OIS} \quad (6)$$

Referans yılı için 4,07°C hesaplanan $OSD_{18^\circ C}$ değerinin, RCP4.5 için +2,22°C ve RCP8.5 için 3,24°C artması T_O değerlerine de etki etmektedir. Gündüz biriken ısı özellikle yaz erken akşam saatlerinde en yüksek seviyeye çıkmaktadır. Bu durum, S_H 've S_K 'de klima kullanımı ile büyük ölçüde bastırılmaktadır. Fakat, aşırı ısınma açısından kritik olan, sadece doğal havalandırmanın kullanıldığı S_D 'de T_O değerlerinin özellikle yaz-öğleden sonraları aşırı yükseldiği görülmektedir. Şekil 9'da S_D için test binasındaki 40 apartman dairesinin Z_{YA} ve Z_{YO} zonları ortalama saatlik/aylık T_O değerleri sunulmuştur. Gündüz kullanılan yaşam alanları, gece kullanılan yatak odalarına kıyasla, gündüz dış ortam sıcaklıklarının ve güneş kazanımlarının daha yüksek olması nedeniyle daha fazla ısıl strese maruz kalmaktadır.

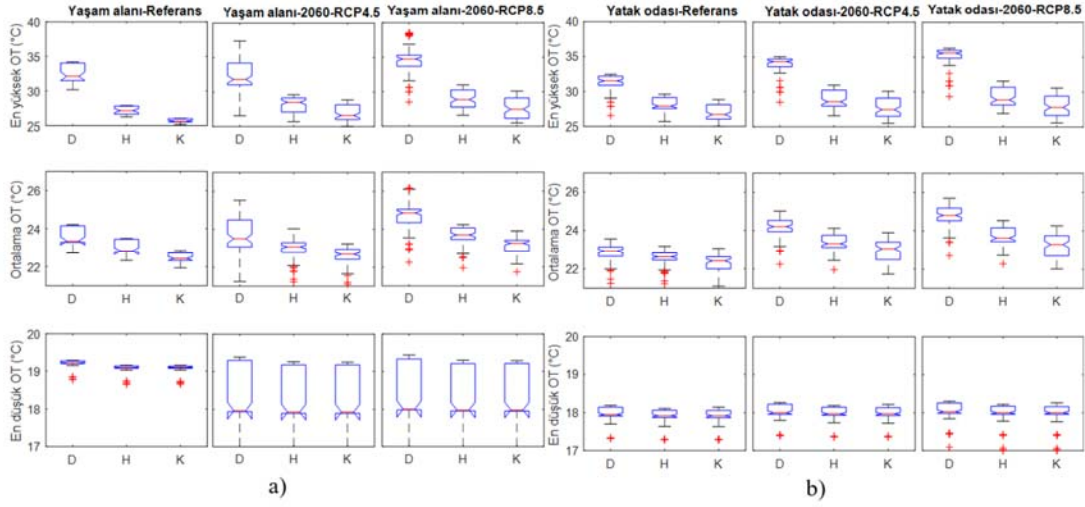
Yıl içerisinde dolu oldukları saatlerde 40 apartman dairesi için, yaşam alanları ve yatak odalarında ulaşılan en düşük, ortalama ve en yüksek T_O değerleri Şekil 10'da özetlenmiştir. Vaka çalışmasında seçilen termostay sıcaklıklarına göre aktif hale gelen ısıtma sistemi yeterli olmuş; tüm senaryolar için en düşük T_O değerleri (17,6-19,3°C) kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmıştır. Sadece doğal havalandırmanın kullanıldığı senaryolarda (S_D) iklim değişikliği ile ortalama T_O değerleri Z_{YA} (Ref.: 22,7-24,2°C; RCP4.5: 23,9-25,5°C; RCP8.5: 24,3-26,2°C) ve Z_{YO} (Ref.: 22,0-23,1°C; RCP4.5: 23,2-24,4°C; RCP8.5: 23,7-25,0°C) zonlarında bir miktar artmıştır. Bu senaryolarda, iklim değişikliğinin ve gece/gündüz kullanımının etkisi en yüksek T_O değerleri incelendiğinde daha belirgindir. En yüksek T_O değerleri, Z_{YA} zonları için Ref.: 30,2-34,2°C; RCP4.5: 32,4-37,4°C; RCP8.5: 33,3-38,5°C ve Z_{YO} zonları için Ref.: 30,9-32,5°C; RCP4.5: 33,0-35,0°C; RCP8.5: 34,1-36,3°C olmuştur. Klimanın kullanıldığı S_H ve S_K için ortalama T_O değerleri (Ref.: 21,3-23,5°C; RCP4.5: 21,8-24,0°C; RCP8.5: 22,0-24,2°C) değişen iklimten önemli ölçüde etkilenmemiştir. Sadece mekanik soğutmanın kullanıldığı S_K senaryosunda en yüksek T_O değerleri (Ref.: 25,2-26,6°C; RCP4.5: 25,4-27,1°C; RCP8.5: 25,5-27,2°C) hemen hemen sabit kalmıştır. Hem doğal havalandırmanın hem de mekanik soğutmanın kullanıldığı S_H için en yüksek T_O değerleri (Ref.: 26,3-27,9°C; RCP4.5: 27,4-28,4°C; RCP8.5: 27,6-28,9°C) iklim değişikliği ile bir miktar artmıştır.

6.2. Aşırı ısınma riski (Overheating risk)

Aşırı ısınma metrikleri hesaplanırken üzerine çıkıldığında bina kullanıcılarının aşırı ısınma yaşadığı ısıl konfor sıcaklık limiti (TL_{Konf}) kullanılır. Bu çalışmada, TL_{Konf} belirlenirken iki farklı yaklaşım dikkate alınmıştır. Kullanılan iki yaklaşımda da zonalardaki (yaşam alanları ve yatak odaları)



Şekil 9. S_D için ortalama saatlik/aylık operatif sıcaklıkları (Average hourly/monthly operational temperatures for S_D)



(*) Her kutu için ortadaki kırmızı çizgi: medyan; alt ve üst kenarlar: %25 ve %75; çubuklar: aykırı değerler dikkate alınmadan en uç veri noktaları; '+' sembolü: aykırı değerler.

Şekil 10. En yüksek, ortalama ve en düşük operatif sıcaklık değerleri a) Z_{YA} b) Z_{YO}
(Highest, average and lowest operative temperature values a) Z_{YA} b) Z_{YO})

metabolik aktivite seviyesi, kıyafet tercihi gibi temel varsayımların farklılığı gözönünde bulundurulmuştur.

İlk yaklaşım, çevresel faktörlere göre değişmeyen sabit bir sıcaklık limitidir; çoğunlukla mekanik soğutmanın uygulandığı binalarda tercih edilir. Sabit sıcaklık limiti (STL), CIBSE Guide A'ya uygun olarak [67] konut yaşam alanlarında 28°C ($STL_{YA}=28^{\circ}\text{C}$), yatak odalarında ise kullanıcıların yüksek sıcaklıklara daha sınırlı toleransı sebebi ile 26°C ($STL_{YO}=26^{\circ}\text{C}$) olarak alınmıştır.

İkinci yaklaşım, uyarlanabilir konfor yaklaşımına dayanan adaptif bir sıcaklık limitidir (ATL). Bu yaklaşım, bina kullanıcılarının çevrelerine rahatça uyum sağlayarak konforlarını aktif olarak geri kazanabilecekleri durumdaki ısı konforlarını yakalamak amaçlar. Bu uyum, davranışsal (kıyafet değişimi, havalandırma açma, öğleden sonraları ara verme gibi), psikolojik (beklentileri değiştirme) ve fizyolojik (iklime alışma) olmak üzere üç temel şekilde gerçekleşebilir [68]. Adaptif sıcaklık limitleri çoğunlukla doğal havalandırılmalı binalarda tercih edilir. Adaptif konfor hesaplamaları, ASHRAE 55-2004 ve EN 15251 gibi bina standartlarında tanımlanmış olsa da konutlara özgü ihtiyaçlar ve kullanım şekilleri için adapte edilmesi gereklidir. Zira, konutlarda kıyafetlerin/faaliyetlerin değiştirilmesi, pencerelerin açılması/kapatılması, termostatın ayarlanması gibi ofislerde uygulanması zor olan birçok adaptasyon eyleminin rahatça yapılabilir [69]. Ayrıca, uyku süresince yatak odası kullanıcılarının yüksek sıcaklıklara adaptasyon kapasiteleri daha sınırlıdır ve aşırı ısınmaya daha kolay maruz kalırlar. Isıl konfor kriterleri, bina kullanıcılarının adaptif kapasiteleri göz önünde bulundurularak Hollanda Standardı ISSO Yayını 74'te [70] yeniden tanımlanmıştır. Bu standardı temel alarak konutlarda adaptif konfor değerlendirmeleri önerilen bir yaklaşımda [69], konutlar yatak odası, banyo ve diğer (mutfak, oturma odası ve ofis gibi) olmak üzere üç ısı zona bölünmüştür. Isıl zonlar için

nötr konfor sıcaklığını ($T_{n,YO}$, $T_{n,YA}$, ve $T_{n,Banyo}$) uzun-sürelili dış ortam sıcaklıklarına ($T_{d,ref}$) bağlayan doğrusal birer eşitlik (Eş. 7-9) tanımlanmıştır. $T_{d,ref}$, önceki günlerdeki dış ortam kuru termometre sıcaklıklarının ağırlıklı bir ortalamasıdır (Eş. 10).

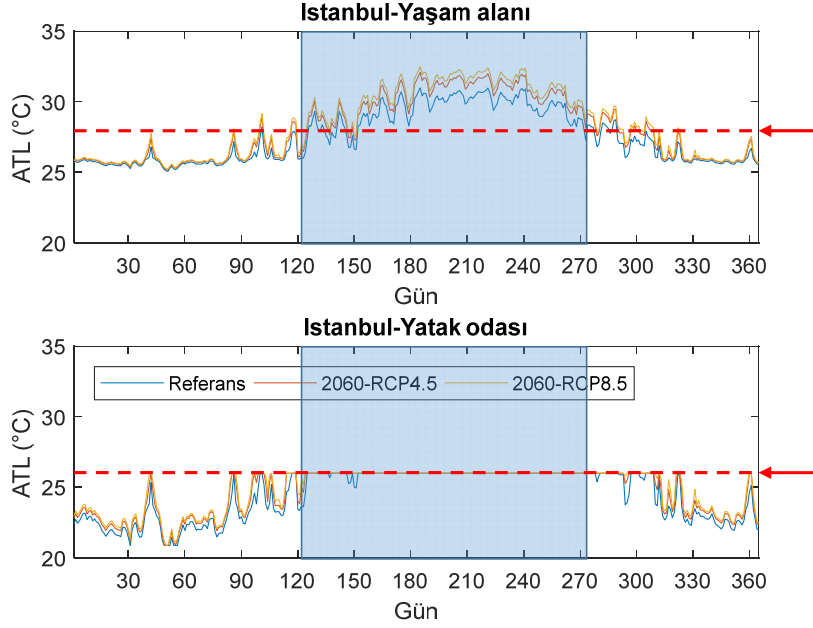
$$T_{n,YO} = \begin{cases} 16^{\circ}\text{C}, T_{d,ref} < 0^{\circ}\text{C} \\ 0,23T_{d,ref} + 16^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C} \leq T_{d,ref} < 12,6^{\circ}\text{C} \\ 0,77T_{d,ref} + 9,18^{\circ}\text{C}, 12,6^{\circ}\text{C} \leq T_{d,ref} < 21,8^{\circ}\text{C} \\ 26^{\circ}\text{C}, T_{d,ref} \geq 21,8^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

$$T_{n,YA} = \begin{cases} 0,06T_{d,ref} + 20,4^{\circ}\text{C}, T_{d,ref} < 12,5^{\circ}\text{C} \\ 0,36T_{d,ref} + 16,63^{\circ}\text{C}, 12,5^{\circ}\text{C} \geq T_{d,ref} \end{cases} \quad (8)$$

$$T_{n,Banyo} = \begin{cases} 0,112T_{d,ref} + 22,65^{\circ}\text{C}, T_{d,ref} < 11^{\circ}\text{C} \\ 0,306T_{d,ref} + 20,32^{\circ}\text{C}, 11^{\circ}\text{C} \geq T_{d,ref} \end{cases} \quad (9)$$

$$T_{d,ref} = \frac{T_{bugün} + 0,8T_{bugün-1} + 0,4T_{bugün-2} + 0,2T_{bugün-3}}{2,4} \quad (10)$$

Yaşam alanları ve yatak odaları için adaptif limitlerin üst sınırları (ATL_{YA} ve ATL_{YO}) kabul edilebilir konfor bandını (ω) ve T_n etrafındaki ayrılma derecesini (α) gösteren sabitler ile hesaplanır (Eş. 11-13). Yatak odaları için hesaplamalardan bağımsız olarak üst konfor sıcaklık limiti 26°C olarak alınır. ω ve α sabitleri, memnuniyetsizlerin tahmini yüzdesine (MTY) [71] göre belirlenir. Bu çalışmada, MTY %20 olarak seçilmiş, Peeters vd.'nin [80] önerdiği sabitler (%10 MTY için $\omega=5^{\circ}\text{C}$ ve $\alpha=0,7$; %20 MTY için $\omega=7^{\circ}\text{C}$ ve $\alpha=0,7$) kullanılmıştır. Hesaplanan adaptif sıcaklık limitleri (ATL) Şekil 11'te sunulmuştur. Şekilde kırmızı, kesikli çizgiler sabit sıcaklık limitlerini (STL) göstermektedir. Adaptif konfor modeline göre sıcak bir iklimde yaşayanlar, yaşam alanları için daha yüksek sıcaklıklara tahammül edebilirler. İklim değişikliğine paralel olarak hesaplanan ATL_{YA} değerleri de yükselmektedir. Aşırı ısınma metriklerinin hesaplandığı süre içerisinde, İstanbul



(*)Mavi kutu: Aşırı ısınma metriklerinin hesaplandığı zaman aralığı (1 Mayıs-30 Eylül)
 (**)Kırmızı kesik çizgi: Sabit sıcaklık limitleri (STL)

Şekil 11. Adaptif sıcaklık limitleri (ATL) (Mavi Referans Turuncu 2060-RCP4.5 Sarı 2060-RCP8.5)
 (Adaptive temperature limits (ATL) (Blue Reference Orange: 2060-RCP4.5 Yellow 2060-RCP8.5))

için yaşam alanlarında çoğunlukla $ATL_{YA} \geq STL_{YA}$ eğilimi vardır. Yatak odalarında ise $ATL_{YO} \leq STL_{YO}$ 'dır. Yüksek yaz sıcaklıkları nedeniyle İstanbul için ATL_{YO} ile STL_{YO} tüm iklim senaryoları için neredeyse birbirine eşittir. Bu çalışmada, banyolar kısıtlı kullanım süreleri sebebi ile dikkate alınmamıştır.

$$ATL_{YO} = \min(26^{\circ}\text{C}, (T_{n,YO} + \omega\alpha)) \quad (11)$$

$$ATL_{YA} = T_{n,YA} + \omega\alpha \quad (12)$$

$$ATL_{Banyo} = T_{n,Banyo} + \omega\alpha \quad (13)$$

ATL hesaplamalarına dayanarak, Hamdy vd. [23] aşırı ısınma riskini belirlemek için üç farklı metrik kullanmıştır: iç mekan aşırı ısınma süresi (İAS) ve derecesi (İAD), ve aşırı ısınma tırmanış faktörü (α_{iAD}). Bu metrikler, özellikle konut yapılarının ısı stresin artmasına verdiği ısı cevabı ölçmeyi amaçlar ve bu nedenle iklim değişikliği etki değerlendirmesi için uygundur. Bu çalışmada, bu üç metrik 1 Mayıs-30 Eylül dönemi için Z_{YA} ve Z_{YO} zonlarının dolu oldukları saatler göz önüne alınarak hesaplanmıştır. İAS, bir zondaki iç mekan operatif sıcaklığının zon konfor sıcaklık limitini (TL_{Konf}) aştığı saatlerin toplam saate oranıdır (Eş. 14-15). Eşitlikte Z: zon, i: dolu saat, $N_{dolu}(Z)$: hesaplama periyodunda Z zonunun dolu olduğu toplam saat, $T_{o,i,Z}$: Z zonunun i zaman adımındaki operatif sıcaklığı, $TL_{Konf,i,Z}$: Z zonunda i zaman adımındaki konfor sıcaklık limitlerini temsil eder. t zaman adımı olup 1 saat olarak alınmıştır. Bu çalışmada, $TL_{Konf,i,Z}$ için hem sabit hem de adaptif sıcaklık limitleri kullanılmış; buna uygun olarak

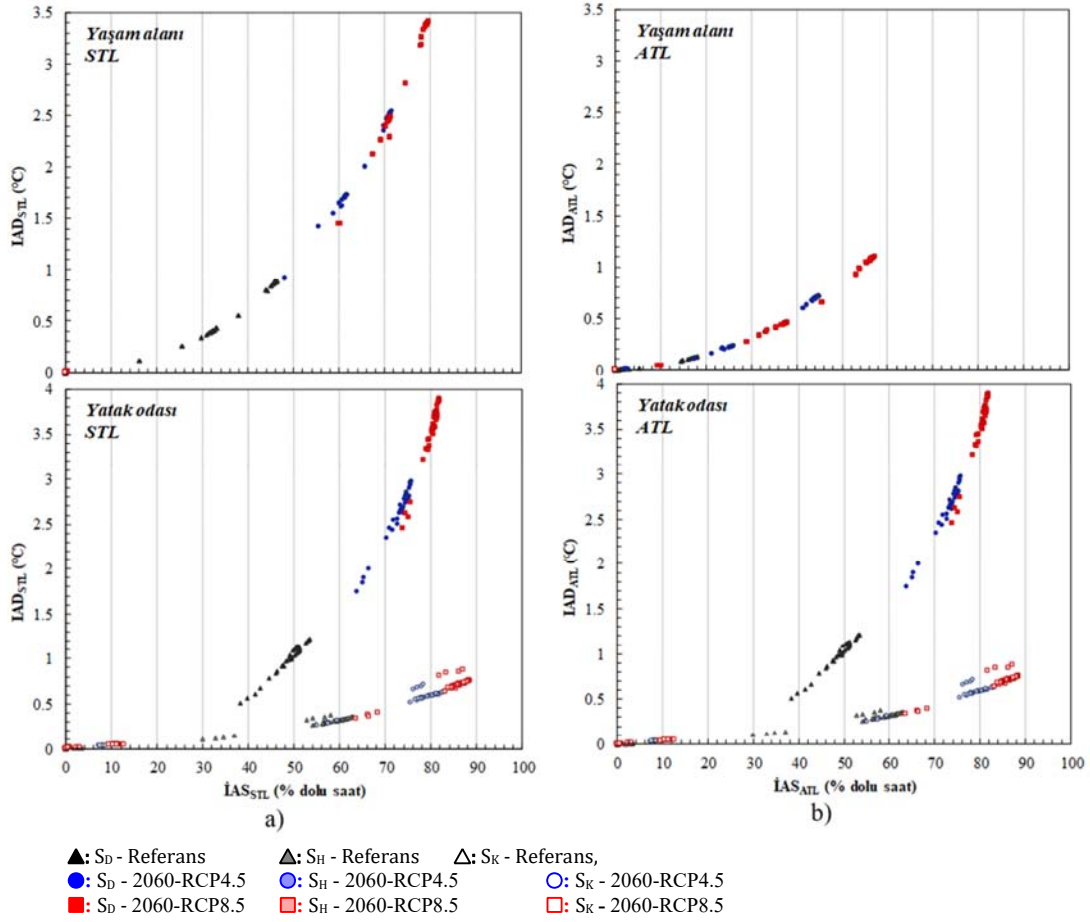
$\dot{I}AS_{STL}$ ve $\dot{I}AS_{ATL}$ değerleri hesaplanmıştır. İAD, konutların ısı strese duyarlılığını tahmin etmek için Hamdy vd. [23] tarafından tanımlanan bir konfor metriğidir. İAS'ye benzer şekilde, İAD, iç mekan aşırı ısınma derecesini ölçmeyi amaçlar ve ek olarak aşırı ısınmanın yoğunluğu ile sıklığını dikkate alır. Yoğunluk, iç mekan operatif sıcaklığı $OT_{i,Z}$ ile her bölge tipindeki $TL_{Konf,i,Z}$ arasındaki fark olarak belirlenir (Eş. 16). Bu çalışmada, İAD hesaplanırken de hem sabit hem adaptif sıcaklık limitleri kullanılmıştır. Her zon tipi için:

$$\dot{I}AS = \frac{\sum_{i=1}^{N_{dolu}(Z)} a_{\text{aşırı_ısınma}} \times t_{i,Z}}{\sum_{i=1}^{N_{dolu}(Z)} t_{i,Z}} \quad (14)$$

$$a_{\text{aşırı_ısınma}} = \begin{cases} 1, & \max(T_{o,i,Z} - TL_{Konf,i,Z}, 0) > 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (15)$$

$$\dot{I}AD = \frac{\sum_{i=1}^{N_{dolu}(Z)} [\max\{T_{o,i,Z} - TL_{Konf,i,Z}, 0\}] \times t_{i,Z}}{\sum_{i=1}^{N_{dolu}(Z)} t_{i,Z}} \quad (16)$$

1 Mayıs - 30 Eylül aralığında hesaplanan İAD ve İAS değerleri Şekil 12'de sunulmuş, değerler, Tablo 3'de özetlenmiştir. İstanbul gibi ılıman kıyılı iklimlerinde, yaşam alanlarının aşırı ısınma risk değerlendirmeleri için ATL'ye göre hesaplanan $\dot{I}AD_{YA}$ ve $\dot{I}AS_{YA}$ değerleri STL'ye göre hesaplanarlardan daha düşük olur. Daha soğuk iklimlerde kullanıcıların yüksek sıcaklıklara adapte olmaları daha zor olduğu için bu durumun tersi geçerlidir. S_D 'de ortalama $\dot{I}AD_{YA,STL}$ değeri referans yılı için $0,56^{\circ}\text{C}$ iken 2060 yılı RCP4.5 için $1,96^{\circ}\text{C}$ 'ye, RCP8.5 için $2,74^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkmıştır. Kullanıcıların adaptasyonunu göz önüne alınarak hesaplanan $\dot{I}AD_{YA,ATL}$ değerleri $\dot{I}AD_{YA,STL}$ değerlerinin çok altındadır,



Şekil 12. İç mekan aşırı ısınma süreleri ve dereceleri a) STL b) ATL (Indoor overheating hours and degrees a) STL b) ATL)

referans yılı için $0,05^{\circ}\text{C}$ 'den 2060 yılı RCP4.5 için $0,39^{\circ}\text{C}$ 'ye, RCP8.5 için $0,65^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkmıştır. S_D ve S_K'da yaşam alanları için hesaplanan İAD_{YA} değerleri (klima ve/veya doğal havalandırma ile) etkin soğutma sebebi çok düşüktür. Yatak odaları için ATL ve STL limitleri çok benzerdir. Bu sebeple, iki yaklaşıma göre hesaplanan ortalama İAD_{YO} ve İAS_{YO} değerleri birbirine son derece yakındır. S_D için hesaplanan İAD_{YO} değeri referans yılı için $1,01^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu değer, 2060 yılı RCP4.5 için $2,64^{\circ}\text{C}$ 'ye, RCP8.5 için $3,53^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmiştir. Hem klimanın hem de doğal havalandırmanın kullanıldığı S_H soğutmada yetersiz kalmıştır. Bu senaryoda İAD_{YO} değeri referans yılı için $0,30^{\circ}\text{C}$ iken 2060 yılı RCP4.5 için $0,56^{\circ}\text{C}$ 'ye, RCP8.5 için $0,69^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkmıştır. S_D ve S_K için İAD_{YO} ve İAS_{YO} değerleri İAD_{YA} ve İAS_{YA} değerlerinden daha yüksektir. Bunun sebebi, yatak odalarında gün içerisinde hapsolan kondüktif ısının ve güneş kazanımlarının dağıtılmasında seçilen soğutma senaryosunun yetersiz kalması ile özellikle yaz erken akşam saatlerinde yaşanan aşırı ısınmadır. S_K'da klima ile yeterli derecede soğutma yapılmaktadır; İAD_{YA} değerleri ihmal edilebilir seviyededir.

Bir binanın iklim değişikliği sonucunda maruz kalacağı dış ortam ısı stresini bastırabilme kapasitesi, Hamdy vd. [23] tarafından tanımlanan aşırı ısınma tırmanış faktörü (α_{IAD}) ile değerlendirilebilir. α_{IAD} , iklim değişikliği sonucunda dış

ortam sıcaklığında meydana gelen değişmeyi seçilen bir zaman aralığındaki (bu çalışmada 1 Mayıs-30 Eylül) iç mekan kullanıcı ısı konfor değişimi ile ilişkilendirir. Referans ve 2060 yılları arasındaki dış ortam sıcaklık değişimi $\Delta OSD_{18^{\circ}\text{C}}$ ile, kullanıcı konforundaki değişim ise yine aynı yıllar arasındaki ΔIAD ile hesaplanır. α_{IAD} ise bu iki değer birbirine oranıdır (Eş. 17). Hamdy vd. göre [23], $\alpha_{IAD} > 1$ olması iç mekan ısı koşullarının dış ortam ısı stresine kıyasla kötüleştiğini gösterir. Buna karşılık, $\alpha_{IAD} < 1$ olması binanın artan sıcaklıkların olumsuz etkisini belli bir kapasitede bastırabileceği anlamına gelir.

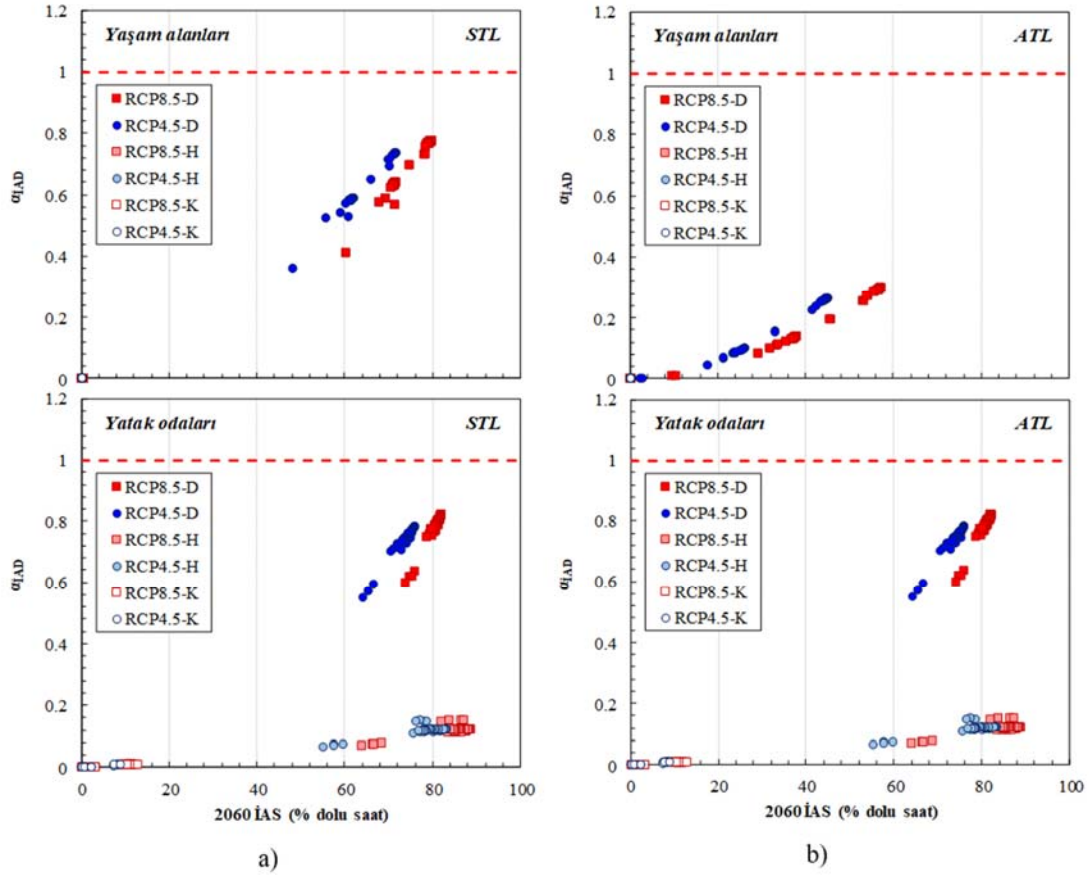
$$\alpha_{IAD} = \frac{\Delta IAD}{\Delta OSD_{18^{\circ}\text{C}}} \quad (17)$$

Çalışmada hesaplanan α_{IAD} değerleri Şekil 13'de sunulmuştur. Yaşam alanlarında S_D senaryosu için Hem RCP4.5, hem de RCP8.5 için $\alpha_{IAD, YA}$ değerlerinin 1'den az olması yaşam alanlarında küresel ısınmanın etkilerinin belirli bir kapasitede bastırabileceğini göstermektedir. S_D ve S_K senaryolarındaki bu değerlerin sifıra yaklaşması, bu senaryolarda küresel ısınma etkilerinin etkin bir şekilde bastırılacağı gösterir. STL ile elde edilen α_{IAD} değerleri ATL ile elde edilen değerlerden daha yüksektir. Bunun sebebi, yaşam alanları için STL_{YA}'nin ATL_{YA}'ya kıyasla daha katı olmasıdır. Yatak odalarında ise gün içerisinde

Tablo 3. STL veya ATL kullanılarak hesaplanan ortalama iç mekan aşırı ısınma dereceleri ve süreleri
(Average indoor overheating degrees and hours calculated utilizing STL or ATL)

	İAD _{YA,STL} (°C) / İAS _{YA,STL} (% dolu saat)			İAD _{YO,STL} (°C) / İAS _{YO,STL} (% dolu saat)		
	S _D	S _H	S _K	S _D	S _H	S _K
Referans	0,56±0,25 / 36,4±8,3	* / *	* / *	1,01±0,17 / 49,0±3,5	0,30±0,06 / 56,3±8,0	* / *
2060-RCP4.5	1,96±0,46 / 64,3±6,3	* / *	* / *	2,64±0,30 / 73,3±3,0	0,56±0,10 / 77,5±7,0	* / *
2060-RCP8.5	2,74±0,55 / 73,6±5,1	* / *	* / *	3,53±0,35 / 80,3±2,0	0,69±0,12 / 84,2±6,2	* / *
	İAD _{YA,ATL} (°C) / İAS _{YA,ATL} (% dolu saat)			İAD _{YO,ATL} (°C) / İAS _{YO,ATL} (% dolu saat)		
	S _D	S _H	S _K	S _D	S _H	S _K
Referans	0,05±0,05 / 7,5±7,5	* / *	* / *	1,01±0,17 / 49,0±3,5	0,30±0,06 / 56,3±8,0	* / *
2060-RCP4.5	0,39±0,24 / 31,3±11,5	* / *	* / *	2,64±0,30 / 73,3±3,0	0,56±0,10 / 77,5±7,0	* / *
2060-RCP8.5	0,65±0,34 / 42,8±12,4	* / *	* / *	3,53±0,35 / 80,3±2,0	0,69±0,12 / 84,2±6,2	* / *

(* / *) İhmal edilebilir.

**Şekil 13.** İç mekan aşırı ısınma tırmanış faktörleri (α_{IAD}) a) STL ve b) ATL (Indoor overheating escalation factors a) STL and b) ATL)

(doğal ve/veya klimalı) havalandırmanın yetersiz olması gün içerisinde biriken ısının dağıtılmasını zorlaştırmakta ve yaz akşamları erken saatlerinde aşırı ısınmaya sebep olmaktadır. Aşırı ısınmanın şiddeti ve süresi seçilen soğutma senaryosuna bağlıdır. STL ve ATL kullanılarak yapılan hesaplamalar birbirlerine çok yakın $\alpha_{IAD,YO}$ değerleri vermektedir. $\alpha_{IAD,YO}$ değerlerinin 1'den küçük olması yatak odalarında küresel ısınmanın etkilerinin bir miktar bastırılabilceğini göstermektedir.

Bulgular, artan sıcaklıkların yaz aylarında kullanıcı ısı konforunda önemli bir etkiye sahip olacağını göstermektedir. Bu durum, ısıtma ihtiyacını düşürmek için kullanılan

yalıtımın, yazın yüksek güneş kazanımlarının ve yetersiz soğutmanın bileşik etkisi ile ilgilidir. Duvarlardan sınırlı ısı kaybı, iç ısı yükleri ve yüksek güneş kazanımları birleştiğinde iç mekanlarda ısının birikmesine neden olur. TS825 standardının önerdiği yalıtım miktarları yalnızca ısıtma derece gün değerlerini dikkate alır [16]. Ayrıca, yeni yapılarda kış aylarındaki ısı kaybını azaltmak için hava sızdırmazlığı artırılmaktadır. Sadece ısıtma enerjisi ihtiyacının azaltılmasına yönelik alınan bu kararlar aşırı ısınma riskini yükseltir. İç mekan aşırı ısınmasını azaltabilmek için etkin havalandırma, düşük ışık geçirgenliğine sahip camlar ve gölgeleme elemanları ile güneş kazanımlarını sınırlandırma gibi pasif önlemlerin

araştırılması gereklidir. Ayrıca, kullanıcı davranışı da aşırı ısınmayı kontrol altına almakta büyük önem taşır. Aktif davranan kullanıcılar sürekli ve doğru havalandırma yaparak ısı kazanımları ve iç mekan sıcaklıklarını kontrol altında tutabilir ve aşırı ısınma riskini son derece azaltabilirler.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışma, iklim değişikliğinin Türkiye'deki mevcut konutlar üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Bu bölgede gelecekteki iklim projeksiyonları üzerine farklı çalışmalar olsa da bu projeksiyonların yapılı çevre üzerindeki etkisi şimdiye kadar ihmal edilmiştir. Halbuki bu konu, konut kullanıcılarının iklim değişikliğine karşı hassas olmaları, Türkiye'de konutların CO₂ salımlarında önemli bir payı olması ve konutlardaki ciddi enerji tasarrufu fırsatları gibi nedenlerden oldukça önemlidir. Bu çalışmada, iklim değişikliğinin mevcut konut binaları üzerindeki etkisini değerlendirmek için referans yılı ve RCP4.5 ve RCP8.5'e göre yapılan 2060 yılı iklim projeksiyonları için tipik bir çok katlı TOKİ binasında enerji simülasyonları yapılmıştır. Farklı bina kullanım profillerini temsilen üç soğutma senaryosu (doğal havalandırma, hibrid, klimalı) hazırlanmıştır. Simülasyon sonuçları iklimlendirme için gereken enerji ihtiyacını, buna karşılık gelen CO₂ salımını ve kullanıcı ısı konfor seviyesini hesaplamak için kullanılmıştır. Kullanıcı ısı konfor hesaplamalarında, hem sabit sıcaklık limitleri hem de konutlar için daha uygun olan adaptif sıcaklık limitleri kullanılmıştır.

2060'ta İstanbul için yaz ortalama sıcaklığının RCP4.5'a göre 2,4-3,0°C, RCP8.5'e göre ise 3,6-4,1°C artması beklenmektedir. OSD_{18°C} değerinin 4,1°C'den RCP4.5'e göre 6,3°C'ye, RCP8.5'e göre ise 7,3°C'ye çıkacağı hesaplanmıştır. İklim değişikliği ile IDG'ler azalacak (Referans: 1817°C-gün, RCP4.5: 1435°C-gün, RCP8.5: 1300°C-gün) ve SDG'ler (Referans: 197°C-gün, RCP4.5: 516°C-gün, RCP8.5: 663°C-gün) artacaktır. Güneş ışınım şiddetindeki değişikliklerin minimal kalması beklenmektedir. Gerçekleşecek iklim değişikliğinin en iyi RCP4.5, en kötü RCP8.5 arasında aralıkta olması öngörülmektedir. Referans yılı ve 2060 projeksiyonları arasındaki yaz ayları yüksek sıcaklık farklarının, bu aylardaki bina soğutma yüklerini ve kullanıcı ısı konforunu oldukça olumsuz etkilemesi beklenmektedir. Kış aylarında ise artan sıcaklıklar, ısıtma ihtiyacını düşürecektir. Bu farklar RCP8.5 için, RCP4.5'e kıyasla çok daha belirgin olacaktır. Farklı soğutma senaryoları arasında enerji ihtiyacı ve kullanıcı ısı konforu arasında belirgin farklar vardır.

Sadece doğal havalandırmanın kullanıldığı S_D'de iklim değişikliği ile beraber azalan ısıtma ihtiyacına paralel olarak Q_T ve KIP_T değerleri düşerken, artan sıcaklıklar sebebiyle İAD_{YA,ATL} ve İAD_{YO,ATL} değerleri ciddi miktarlarda yükselmektedir. İki projeksiyon için de yaz ayları, erken akşam saatleri yatak odaları aşırı ısınma riskinin en yüksek olduğu zamanlardır. Bu durumun temel sebepleri (i) kullanıcıların uyku sırasında yüksek sıcaklıklara adaptasyon

kapasitesinin sınırlı olması ve (ii) yatak odalarında gün içerisinde biriken kondüktif ısının ve güneş kazanımlarının yetersiz doğal havalandırma sebebiyle etkin bir şekilde dağıtılamamasıdır. Doğal havalandırma ve klimanın kullanıldığı S_H'de ve sadece klimanın kullanıldığı S_K'da iklim değişikliği sebebiyle yaz aylarında düşen kullanıcı ısı konforunu dengelemek için klima kullanımının artması beklenmektedir. S_H ve S_K'da Q_T değerleri azalan ısıtma ihtiyacına kıyasla çok daha hızlı artan soğutma ihtiyacı nedeniyle yükselmektedir. S_H ve S_K için hesaplanan İAD_{YA,ATL} değerlerinin oldukça düşük olması etkin soğutma sayesinde yaşam alanlarında kullanıcı konfor seviyelerinin yüksek olacağını göstermektedir. Yatak odalarında ise S_H için yaz aylarının erken akşam saatlerinde daha önce anlatılan sebeplere bağlı olarak kullanıcılar sınırlı bir miktar aşırı ısınmaya maruz kalabilir. S_K'da ise aşırı ısınma riski yoktur. Her iki iklim projeksiyonu için de kullanıcıların doğal havalandırma ile klimayı beraber kullandığı S_H, sadece klimanın kullanıldığı S_K'ya kıyasla çok daha enerji etkindir. Bu durum, bina enerji verimliliğinde kullanıcı davranışının önemini göstermektedir. RCP8.5'te S_H ve S_K'da kullanılacağı varsayılan şebeke elektriğinin karbon-yoğunluğu doğal gaz ile ısıtmanın karbon-yoğunluğundan daha yüksektir; bu sebeple, KIP_T değerlerinin de artacağı öngörülmektedir. RCP4.5'te, S_H ve S_K için artan soğutma ihtiyacına karşın KIP_T değerlerinde azalma beklenmektedir. Sonuçlar, elektrik üretimi dekarbonizasyon süreçlerinin iklim değişikliği ile mücadelede son derece önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye, son yıllarda hızlı şehirleşme ve kentsel dönüşüm süreçlerinden geçmektedir. Bu durum, iklim değişikliği gözetilerek mevcut binaların iyileştirme süreçlerinin belirlenmesinin yanı sıra yeni tasarım stratejilerinin araştırılması için eşsiz bir fırsat sunmaktadır. Çalışma sonuçları, iklim değişikliğinin konut binalarının performansı üzerindeki olumsuz etkisine ve mevcut bina stokunun iklimlendirilmesine yönelik acil ihtiyaçlara işaret etmektedir. Bu çalışmanın, iklim değişikliğinin konutlar üzerindeki etkilerini anlamak ve bu etkileri en aza indirmek için geliştirilecek iyileştirme süreçlerini belirlemek için ileride yapılacak analiz, değerlendirme ve araştırmalar için bir temel oluşturması beklenmektedir. Unutulmamalıdır ki vaka çalışması için seçilen TOKİ binası mevcut Türkiye yapı stoğunu tam olarak temsil edemez; zira, yürürlükteki standartlara uygun olarak inşa edilmemiş birçok bina vardır. Bu binalar üzerine de benzer çalışmaların yapılması ve iyileştirme alternatiflerinin oluşturulması son derece önemlidir. İleride araştırılması gereken bir diğer husus da seçilen hane halkı sayısının ve bina kullanım şekillerinin çeşitlendirilmesi ve farklı kullanıcı profillerinin bina performansına etkilerinin incelenmesidir.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu araştırma, Orta Doğu Teknik Üniversitesi BAP-02-01-2017-002 kodlu bilimsel araştırma projesi ödeneği ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Wilby, R. L., A Review of Climate Change Impacts on the Built Environment, *Built Environ.*, vol. 33, no. 1, 31-45, 2007.
2. T.C. Sağlık Bakanlığı - Türkiye Halk Sağlığı Kurumu, İklim değişikliğinin sağlık etkilerinin azaltılması ulusal programı ve eylem planı, 2014.
3. Türkeş, M., Genel klimatoloji: Atmosfer, hava ve iklimin temelleri, 4. baskı. İstanbul: Kriter Yayınevi, Fiziki Coğrafya Serisi No: 4, 2017.
4. Gething, B., Gething, W., Puckett, K., Design for Climate Change. RIBA, 2013.
5. Meral, C., Türkiye’de yaygın olarak kullanılan yük taşımayan duvar sistemlerinin küresel ısınma potansiyelleri, AGUDOS-2013-03-03-2-00-71, 2015.
6. IEA, Transition to Sustainable Buildings - Strategies and opportunities to 2050. 2013.
7. Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., Hanson, C. E., IPCC, 2007: Summary for Policymakers, *Clim. Chang. 2007 Impacts, Adapt. vulnerability. Contrib. Work. froup II to fourth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang.*, no. April 2007, 7-22, 2007.
8. de Wilde, P., Coley, D., The implications of a changing climate for buildings, *Build. Environ.*, vol. 55, 1-7, 2012.
9. Gürsel Dino, I., Meral Akgül, C., Impact of climate change on the existing residential building stock in Turkey: An analysis on energy use, greenhouse gas emissions and occupant comfort, *Renew. Energy*, vol. 141, 828-846, 2019.
10. IEA, The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning, 2018.
11. Türkiye İstatistik Kurumu, TÜİK, 1990-2017 sera gazı emisyon istatistikleri, 2018.
12. The Government of Turkey, Republic of Turkey Intended Nationally Determined Contribution, United Nations Framew. Conv. *Clim. Chang.*, 2015.
13. T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, On birinci kalkınma planı (2019-2023), 2019.
14. Ministry of Environment and Urbanization, Republic of Turkey Climate Change Strategy 2010-2023, Ankara, 2010.
15. Lomas, K. J., Kane, T., Summertime temperatures and thermal comfort in UK homes, *Building Research and Information*, 2013, vol. 41, no. 3, 259-280.
16. Altun, M., Meral Akgül, Ç., Akçamete, A., Effect of envelope insulation on building heating energy requirement, cost and carbon footprint from a life cycle perspective, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 35, no. 1, 147-164, 2020.
17. Kolokotroni, M., Ren, X., Davies, M., Mavrogianni, A., London’s urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings, *Energy Build.*, vol. 47, 302-311, 2012.
18. De Wilde, P., Tian, W., Predicting the performance of an office under climate change: A study of metrics, sensitivity and zonal resolution, *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, 1674-1684, 2010.
19. Berger, T., Amann, C., Formayer, H., Korjenic, A., Pospischal, B., Neururer, C., Smutny, R., Impacts of climate change upon cooling and heating energy demand of office buildings in Vienna, Austria, *Energy Build.*, vol. 80, 517-530, 2014.
20. Kershaw, T., Lash, D., Investigating the productivity of office workers to quantify the effectiveness of climate change adaptation measures, *Build. Environ.*, vol. 69, 35-43, 2013.
21. Wang, L., Liu, X., Brown, H., Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models, *Energy Build.*, vol. 157, 218-226, 2017.
22. Daly, D., Cooper, P., Ma, Z., Implications of global warming for commercial building retrofitting in Australian cities, *Build. Environ.*, vol. 74, 86-95, 2014.
23. Hamdy, M., Carlucci, S., Hoes, P. J., Hensen, J. L. M., The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study, *Build. Environ.*, vol. 122, no. August 2003, 307-323, 2017.
24. Jenkins, D. P., Patidar, S., Banfill, P. F. G., Gibson, G. J., Probabilistic climate projections with dynamic building simulation: Predicting overheating in dwellings, *Energy Build.*, vol. 43, no. 7, 1723-1731, 2011.
25. Van Hooff, T., Blocken, B., Hensen, J. L. M., Timmermans, H. J. P., Reprint of: On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings, *Build. Environ.*, vol. 83, 142-158, 2015.
26. Filippín, C., Ricard, F., Flores Larsen, S., Santamouris, M., Retrospective analysis of the energy consumption of single-family dwellings in central Argentina. Retrofitting and adaptation to the climate change, *Renew. Energy*, vol. 101, 2017.
27. Triana, M. A., Lamberts, R., Sassi, P., Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures, *Energy Build.*, vol. 158, 1379-1392, 2018.
28. Andrić, I., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B., Le Corre, O., The impact of climate change on building heat demand in different climate types, *Energy Build.*, vol. 149, 225-234, 2017.
29. Spandagos, C., Ng, T. L., Equivalent full-load hours for assessing climate change impact on building cooling and heating energy consumption in large Asian cities, *Appl. Energy*, vol. 189, 352-368, 2017.
30. Sehizadeh, A., Ge, H., Impact of future climates on the durability of typical residential wall assemblies retrofitted to the PassiveHaus for the Eastern Canada region, *Build. Environ.*, vol. 97, 111-125, 2016.
31. Karimpour, M., Belusko, M., Xing, K., Boland, J., Bruno, F., Impact of climate change on the design of energy efficient residential building envelopes, *Energy Build.*, vol. 87, 142-154, 2015.
32. Barbosa, R., Vicente, R., Santos, R., Climate change and thermal comfort in Southern Europe housing: A case study from Lisbon, *Build. Environ.*, vol. 92, 440-451, 2015.

33. Lomas, K. J., Giridharan, R., Thermal comfort standards, measured internal temperatures and thermal resilience to climate change of free-running buildings: A case-study of hospital wards, *Build. Environ.*, vol. 55, 57-72, 2012.
34. Pagliano, L., Carlucci, S., Causone, F., Moazami, A., Cattarin, G., Energy retrofit for a climate resilient child care centre, *Energy Build.*, vol. 127, 1117-1132, 2016.
35. Deniz, A., Toros, H., Incecik, S., Spatial variations of climate indices in Turkey, *Int. J. Climatol.*, vol. 31, no. 3, 394-403, 2011.
36. Türkeş, M., Spatial and temporal analysis of annual rainfall variations in Turkey, *Int. J. Climatol.*, vol. 16, no. 9, 1057-1076, 1996.
37. Türkeş, M., Koç, T., Sarış, F., Spatiotemporal variability of precipitation total series over Turkey, *Int. J. Climatol.*, vol. 29, no. 8, 1056-1074, 2009.
38. İyigun, C., Türkeş, M., Batmaz, I., Yozgatligil, C., Purutçuoğlu, V., Koç, E. K., Öztürk, M. Z., Clustering current climate regions of Turkey by using a multivariate statistical method, *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 114, no. 1-2, 95-106, 2013.
39. Giorgi, F., Lionello, P., Climate change projections for the Mediterranean region, *Glob. Planet. Change*, vol. 63, no. 2-3, 90-104, 2008.
40. Erlat, E., Türkeş, M., Observed changes and trends in numbers of summer and tropical days, and the 2010 hot summer in Turkey, *Int. J. Climatol.*, vol. 33, no. 8, 1898-1908, 2013.
41. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D., *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*, 2018.
42. Balaban, O., The negative effects of construction boom on urban planning and environment in Turkey: Unraveling the role of the public sector, *Habitat Int.*, vol. 36, no. 1, 26-35, 2012.
43. Altun, M., Akçamete, A., Meral Akgül, Ç., Dış sıcaklık verisinin bina ısıtma enerji gereksinimine etkisinin ve TS 825 derece-gün bölge kümelenmesinin geçerliliğinin incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, 2020.
44. ASHRAE, Standard for the design of high-performance green buildings except low-rise residential buildings (189-1), *ASHRAE Stand.*, no. 189.1-2011, 2011.
45. Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2014.
46. Knutti, R., Sedláček, J., Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections, *Nat. Clim. Chang.*, vol. 3, no. 4, 369-373, 2013.
47. Belcher, S., Hacker, J., Powell, D., Constructing design weather data for future climates, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 26, no. 1, 49-61, 2005.
48. Troup, L., Fannon, D., Morphing Climate Data to Simulate Building Energy Consumption, ASHRAE and IBPSA-USA Building Performance Modeling Conference, 2016.
49. Dickinson, R., Brannon, B., Generating future weather files for resilience, 2016.
50. Turkish Statistical Institute, *Population and Housing Census*, 2011.
51. Eurostat, *Energy statistics - Cooling and heating degree days*, 2018.
52. Santamouris, M., Cooling the buildings - past, present and future, *Energy Build.*, vol. 128, 617-638, 2016.
53. Ecoinvent Centre, *Ecoinvent Database*. 2012.
54. Wan, K. K. W., Li, D. H. W., Pan, W., Lam, J. C., Impact of climate change on building energy use in different climate zones and mitigation and adaptation implications, *Appl. Energy*, vol. 97, 274-282, 2012.
55. Jenkins, D. P., Singh, H., Eames, P. C., Interventions for large-scale carbon emission reductions in future UK offices, *Energy Build.*, vol. 41, 1374-1380, 2009.
56. Henninger, R. H., Witte, M. J., *EnergyPlus Testing with Global Energy Balance Test*, 2015.
57. Johnston, D., Lowe, R., Bell, M., An exploration of the technical feasibility of achieving CO2 emission reductions in excess of 60% within the UK housing stock by the year 2050, *Energy Policy*, vol. 33, no. 13, 1643-1659, 2005.
58. Türkiye Elektrik İletim A.Ş., *Elektrik enerjisi üretimi - tüketimi - kayıplar*, 2017.
59. Atilgan, B., Azapagic, A., Assessing the environmental sustainability of electricity generation in Turkey on a life cycle basis, *Energies*, vol. 9, no. 1, 2016.
60. Atilgan, B., Azapagic, A., Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Turkey, *J. Clean. Prod.*, vol. 106, 555-564, 2015.
61. Atilgan, B., Azapagic, A., Energy challenges for Turkey: Identifying sustainable options for future electricity generation up to 2050, *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 12, no. February, 234-254, 2017.
62. Schenler, W., Bauer, C., Burgherr, P., Hirschberg, S., Bachmann, T., Carrera, D. G., Simons, A., Final report on indicator database for sustainability assessment of advanced electricity supply options, Deliverable D10. 1—RS 2b, 2008.
63. Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., Azapagic, A., Life cycle assessment of electricity generation in Mexico, *Energy*, vol. 36, no. 3, 1488-1499, 2011.
64. Asdrubali, F., Baldinelli, G., D'Alessandro, F., Scrucca, F., Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, 1113-1122, 2015.
65. Evans, A., Strezov, V., Evans, T. J., Sustainability considerations for electricity generation from biomass, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 5, 1419-1427, 2010.
66. Niu, J., Burnett, J., Integrating radiant/operative temperature controls into building energy simulations, *ASHRAE Trans.*, vol. 14, 1998.
67. CIBSE, *Environmental design: CIBSE Guide A, Chart. Inst. Build. Serv. Eng. London*, 2015.

68. de Dear, R. J., Brager, G. S., Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, *ASHRAE Trans.*, vol. 104, no. 1, 145-167, 1998.
69. Peeters, L., Dear, R. de, Hensen, J., D'haeseleer, W., Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation, *Appl. Energy*, vol. 86, no. 5, 772-780, 2009.
70. ISSO, Thermische behaaglijkheid Eisen en achtergronden betreffende het thermisch binnenklimaat in kantoren en vergelijkbare utiliteitsbouw, Rotterdam ISSO, 2014.
71. Oseland, N. A., Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes, *Energy Build.*, vol. 23, no. 2, 105-115, 1995.

