



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **KONTROLLÜ BİR HVAC TEST ODASININ OPERATİF SICAKLIK TEMELLİ DENEYSEL DOĞRULAMASI**

**FATİH EVREN**  
HEZARFEN ENERJİ

**ABUZER ÖZSUNAR**  
GAZİ ÜNİVERSİTESİ

**BİROL KILKIŞ**  
BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ





# KONTROLLÜ BİR HVAC TEST ODASININ OPERATİF SICAKLIK TEMELLİ DENEYSEL DOĞRULAMASI

Fatih EVREN  
Abuzer ÖZSUNAR  
Biol KILKIŞ

## ÖZET

Bu çalışmada ANSI/ASHRAE 138 Standardı göz önünde bulundurularak kontrollü bir test odasının tasarımı, kurulumu ve deneysel doğrulaması yapılmıştır. Test odası içerisinde operatif sıcaklığın kontrol edilebilmesi amacıyla oda iç yüzey sıcaklıkları ve kuru termometre hava sıcaklığı birbirlerinden bağımsız kontrol edilebilmektedir. Çalışma kapsamında farklı yöntemler ile hesaplanan operatif sıcaklık değerleri üzerinden test odasının doğrulaması deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. ANSI/ASHRAE 138 Standardının belirlediği test koşulları dışındaki senaryolarda test odası içerisindeki ortalama ışınım sıcaklığı ve operatif sıcaklık değişimi incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Operatif sıcaklık, Isıl konfor sıcaklığı, Ortalama ışınım sıcaklığı, ANSI/ASHRAE Standart 138

## ABSTRACT

In this study a test chamber is designed and set up based on ANSI/ASHRAE Standard 138 and experimental verification is done. In order to control operative temperature, interior surface temperature for each wall of the test chamber and dry-bulb air temperature are adjusted independently. Operative temperature is calculated via different ways and experimental verification of test chamber is done by comparison of these calculations. Mean radiant temperature and operative temperature alteration of test chamber, except for standard test conditions of ANSI/ASHRAE Standard 138, is analyzed.

**Key Words:** Operative temperature, Thermal comfort, Mean Radiant Temperature, ANSI/ASHRAE Standard 138

## 1. GİRİŞ

Panel ısıtma/soğutma sistemleri sıcaklık kontrollü iç ortam yüzeylerini kullanarak ısıtma soğutma sağlamaktadırlar. Panel yüzeyi olarak zemin, duvar veya tavan kullanılabilir. Yüzey sıcaklıklarının kontrolü; yüzeylerin arkasından geçen boruların içerisinde su veya hava dolaştırılarak veya yüzeylerin arkasına yerleştirilen elektrik dirençli ısıtıcı üzerinden akım geçirilmek suretiyle sağlanmaktadır. Sıcaklık kontrollü bir yüzeyin “*radıant panel*” olarak adlandırılabilmesi için %50 veya daha fazla oranda termal ışınım yapmak üzere tasarlanmış olması gerekmektedir [1].

ANSI/ASHRAE 138 Standardı hissedilir ısıtma/soğutma yapan radyant tavan panellerinin ısı performanslarını test etmek ve derecelendirmek için kontrollü bir test odası, test ve değerlendirme yöntemi sunmaktadır [2].

Bu çalışmada ANSI/ASHRAE 138 Standardı göz önünde bulundurularak kontrollü bir test odası tasarımı, kurulumu ve deneysel doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Standardın amacı sadece radyant tavan panellerinin ısı performanslarını test etmek olup bu çalışmada test odası içerisinde değişik oda koşullarının canlandırılabilmesi, farklı cihazların ve sistemlerin ısı performanslarının değerlendirilmesi ve melez HVAC sistemlerinin test edilebilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, tasarlanan operatif sıcaklık ölçer cihazının kalibrasyon deneylerinin ve testlerinin bu kontrollü ortam altında yapılması amaçlanmıştır [3]. Bu amaçla, çalışma kapsamında kurulan test odası, standartta öngörülen test odasından farklılıklar içermektedir. Kurulan test odasının nitelikleri şöyledir:

- Zemin ve tavan dâhil tüm iç yüzeylerin sıcaklıkları ve test odası kuru termometre hava sıcaklığı birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir.
- Test odası iç yüzeylerinde toplam 80 noktaya yerleştirilen sensörler sayesinde yüzey sıcaklıkları, sıcaklık dağılımları anlık olarak ölçülebilmekte ve bilgisayara aktarılabilir.
- İki farklı noktada siyah küre sıcaklık probu sıcaklığı ölçülebilmekte, oda hacmi ortasında ya da test durumuna göre kritik noktalarda hava hızı ve sıcaklığı okunabilmektedir.

## 2. TEORİ

### 2.1. Teori

Operatif sıcaklık insan bedeninin ısı konforunu belirleyen temel sıcaklık olup, kuru termometre hava sıcaklığı, çevre yüzeylerinin ortalama ışıma sıcaklığı, hava hızı, insanın giysi ve aktivite düzeyini bünyesinde barındırmaktadır [4]. “ISO 7730 - Isıl Çevre Ergonomisi” ve “ASHRAE 55 - İnsanların Kullandığı Mekânlar İçin Isıl Çevre Şartları” standartlarında ısı konfor bölgesi, operatif sıcaklık üzerinden tariflenmektedir [4] [5].

Operatif sıcaklık hava sıcaklığının yanında çevre yüzey sıcaklıklarından da oldukça önemli oranda etkilenmektedir. Bu nedenle test odası içerisinde tüm yüzey sıcaklıklarının kontrol edilebilir olması sağlanmış ve test odasının deneysel doğrulaması operatif sıcaklık üzerinden yapılmıştır.

Operatif sıcaklık insan vücudu ile çevresinin ısı etkileşimi üzerinden hesaplanabileceği gibi bir mekânda ortalama ışıma sıcaklığı ve hava sıcaklığı kullanılarak da hesaplanabilmektedir.

Denklem 1’de insan vücudunun çevresi ile ısı etkileşimi ile operatif sıcaklık arasındaki bağıntı sunulmuştur. Eşitlikte yer alan  $C+R$ , deriden duyulur ısı geçişini ifade etmektedir. Denklemde ayrıca insan derisi yüzey sıcaklığı, giysi düzeyi ve ısı geçiş katsayısı parametreleri yer almaktadır. Bu çalışmada operatif sıcaklık bu perspektif üzerinden ele alınmamıştır [4].

$$C + R = \frac{t_{sk} - t_o}{R_{cl} + \frac{1}{f_{cl}h}} \quad (W/m^2) \quad (1)$$

$C+R$ : İnsan vücudundan taşınım ve ışıma hissedilir ısı kaybı,  $[W/m^2]$

$t_{sk}$ : İnsan derisi yüzey sıcaklığı,  $[^{\circ}C]$

$t_o$ : Operatif sıcaklık,  $[^{\circ}C]$

$R_{cl}$ : Giysilerin ısı direnci,  $[m^2K/W]$

$f_{cl}$ : Giysi alan çarpanı, -

$h$ : Toplam ısı geçiş katsayısı,  $[W/m^2.K]$

Operatif sıcaklığın ortamdaki yüzey sıcaklıkları ve ortamın kuru termometre hava sıcaklığı ile ilişkisi Denklem 2’te sunulmuştur [4].

$$t_o = \frac{h_r t_{mr} + h_c t_a}{h_r + h_c} \quad (^{\circ}C) \quad (2)$$

$t_{mr}$ : Ortalama ışıma sıcaklığı,  $[^{\circ}C]$

$t_a$ : İç hava kuru termometre sıcaklığı,  $[^{\circ}C]$

$h_r$ : Işınimsal ısı geçiş katsayısı,  $[W/m^2.K]$

$h_c$ : Taşınım ısı geçiş katsayısı,  $[W/m^2.K]$

ANSI/ASHRAE Standart 138'e göre bu eşitlik Denklem 3'te sunulan basitleştirilmiş hali ile kullanılabilir [2]. Standartta yer alan test yöntemine göre; deneyler sırasında test odası içerisinde zorlanmış taşınım yapabilecek bir cihazın çalışmaması öngörülmektedir. Dolayısı ile standarda göre deney esnasında test odası içerisinde sadece radyant panel sistemler çalışabilecek ve hava hızı belirli bir limitin altında kalacaktır. Işınım ısı transferi katsayısının,  $h_c$ , iç ortam koşullarında neredeyse sabit olduğu ve bu değer 4,7  $W/m^2K$  olduğu kabul edilebilir. Hava hızının 0,15 m/s altında olduğu durumda ayakta duran bir insan için, taşınım ısı transferi katsayısı 4,0  $W/m^2K$  kabul edilebilir [4]. Bu veriler göz önüne alındığında ve testlerde  $t_{mr}$  ile  $t_a$  değerlerinin birbirlerine yakın olduğu durumda bu kabulün hata yüzdesinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Hava hızının yüksek olduğu durumlarda Denklem 2'de bulunan ışınım ısı geçiş katsayısının taşınım ısı geçiş katsayısına nazaran baskın hale geleceği ve Denklem 3'ün hata yüzdesinin artabileceği göz ardı edilmemelidir.

$$t_o = \frac{t_{mr} + t_a}{2} \quad (^\circ C) \quad (3)$$

Denklemlerde yer alan ortalama ışınım sıcaklığı,  $t_{mr}$ , insan vücudunun çevresi ile ısıl etkileşimi hesaplamalarında oldukça önemli bir parametredir [4]. Ortalama ışınım sıcaklığı çevre yüzey sıcaklıkları ölçülüp açı faktörleri belirlenerek hesaplanabileceği gibi, siyah küre termometresi, kuru termometre hava sıcaklığı ve hava hızı ölçümü üzerinden de hesaplanabilmektedir [6].

ANSI/ASHRAE 138 Standardında sunulan test odası özelinde, duvar yüzey sıcaklıkları ölçümleri üzerinden, ortalama ışınım sıcaklığı elde edilebilecek bağıntı Denklem 4'te sunulmuştur [2].

$$t_{mr} = \frac{A_1 t_1 + A_2 t_2 + A_3 t_3 + A_4 t_4 + A_{D\ddot{O}} t_{D\ddot{O}} + A_{TA} t_{TA} + \sum_{i=1}^m (A_{po} t_{po})}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_{D\ddot{O}} + A_{TA} + \sum_{i=1}^m (A_{po})} \quad (^\circ C) \quad (4)$$

$A_{1,2,3,4}$ : 1, 2, 3, 4 numaralı kalibrasyon odası duvarlarının iç yüzey alanları,  $[m^2]$

$A_{TA}$ : Kalibrasyon odası tavanının iç yüzey alanı,  $[m^2]$

$A_{po}$ : Test paneli etkin yüzey alanı (ANSI/ASHRAE Standart 138'e göre),  $[m^2]$

$t_{po}$ : Test paneli etkin yüzey sıcaklığı (ANSI/ASHRAE Standart 138'e göre),  $[^\circ C]$

$A_{D\ddot{O}}$ : Kalibrasyon odası döşemesi iç yüzey alanı,  $[m^2]$

$t_{1,2,3,4}$ : Kalibrasyon odası duvar sıcaklıkları,  $[^\circ C]$

$t_{TA}$ : Kalibrasyon odası tavan yüzey sıcaklığı,  $[^\circ C]$

$t_{D\ddot{O}}$ : Kalibrasyon odası döşeme yüzey sıcaklığı,  $[^\circ C]$

Bu standart, bir mekânın ısıtılması ya da soğutulması için kullanılan radyant tavan panellerinin testi ve kalibrasyonu için gerekli yöntemi içermektedir. Denklem 4'te görülen  $A_{po}$  ve  $t_{po}$  terimleri ANSI/ASHRAE Standart 138'e göre test edilen panelinin etkin yüzey alanını ve yüzey sıcaklığını ifade etmektedir. Bu çalışmada test paneli bulunmamakta dolayısı ile bu terimler denklemde yer almamaktadır. Bu durum için yeniden düzenleme yapıldığında Denklem 5 elde edilmektedir.

$$t_{mr} = \frac{A_1 t_1 + A_2 t_2 + A_3 t_3 + A_4 t_4 + A_{D\ddot{O}} t_{D\ddot{O}} + A_{TA} t_{TA}}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_{D\ddot{O}} + A_{TA}} \quad (^\circ C) \quad (5)$$

Ortalama ışınım sıcaklığı ayrıca siyah küre sıcaklığı hava hızı ve hava sıcaklığı ölçümleri üzerinden hesaplanabilmektedir. Belirtilen parametreler ile ortalama ışınım sıcaklığı arasındaki bağıntı Denklem 6'da sunulmuştur [6].

$$t_{mr} = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{1,10 \times 10^8 V_a^{0,6}}{\varepsilon D^{0,4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (^\circ C) \quad (6)$$

$t_g$ : Siyah küre sıcaklığı,  $[^\circ C]$

$V_a$ : Hava hızı,  $[m/s]$

$\varepsilon$ : Emisivite (Siyah küre için 0.95), -

$D$ : Siyah küre sıcaklık probu çapı,  $[m]$

### 3. DENEYLER

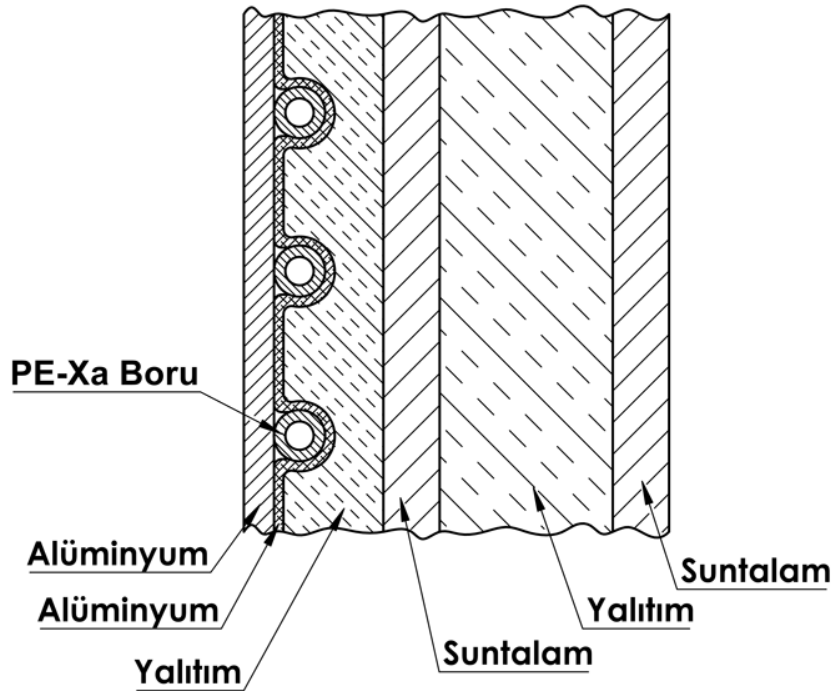
#### 3.1. Deney Düzeneği

Test odası ANSI/ASHRAE 138 standardı göz önünde bulundurularak kurulmuş olup boyutları 2,5 m x 3 m x 2, 8 m'dir.

Test odasında mekanik tesisatın kurulması ve radyant yüzeylerin oluşturulması için Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Isıl Bilimler Laboratuvarında daha önce kurulmuş olan yalıtımlı bir oda yeniden düzenlenmiştir. Işınimsal ısıtma/soğutma yapabilmek için, tüm duvarlara, zemine ve tavana borular döşenmiştir. Uygulama kolaylığı nedeni ile ıslak harç gerektirmeyen kuru sistem, yalıtımlı döşeme plakaları tüm yüzeylere döşenmiştir. Plakaların üzerinde bulunan kanallara PE-Xa malzemeden üretilmiş borular döşenmiştir.

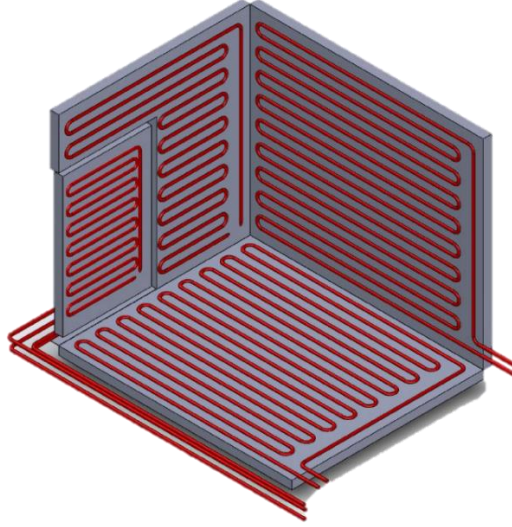
ANSI/ASHRAE Standart 138'de test odasının yüzeylerinin 0,9 ya da daha yüksek emisiviteye sahip olması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada test odası iç yüzeyleri, yüzey emisivitesi 0,9 olan alüminyum levhalar ile kaplanmıştır. Şekil 1'de test odasının duvar kesiti sunulmuştur.

Standartta bir duvarın dış duvarı temsil etmesi ve tavan yüzeyinin sıcaklık kontrollü olmaması gerektiği belirtilmiş bu nedenle tavan yalıtımının diğer yüzeylere nazaran daha fazla olması istenmiştir. Tavan yüzeyinin yalıtımının en az 3 m<sup>2</sup>.K/W, zeminin ve dış duvarı temsil eden duvarın ise en az 2 m<sup>2</sup>.K/W iletim direncine sahip olması gerektiği belirtilmiştir. Diğer duvarların ise en az 1,5 m<sup>2</sup>.K/W iletim direncine sahip yalıtım ile donatılmış olması gerektiği belirtilmiştir [2]. Bu çalışmada tüm yüzeyler toplam ısı iletim direnci 2,5 m<sup>2</sup>.K/W olan yalıtım malzemesi ile yalıtılmıştır. Test odası kapısına uygulanan yalıtımın toplam ısı iletim direnci ise 1,5 m<sup>2</sup>.K/W değerindedir.



Şekil 1. Test odası duvar kesiti

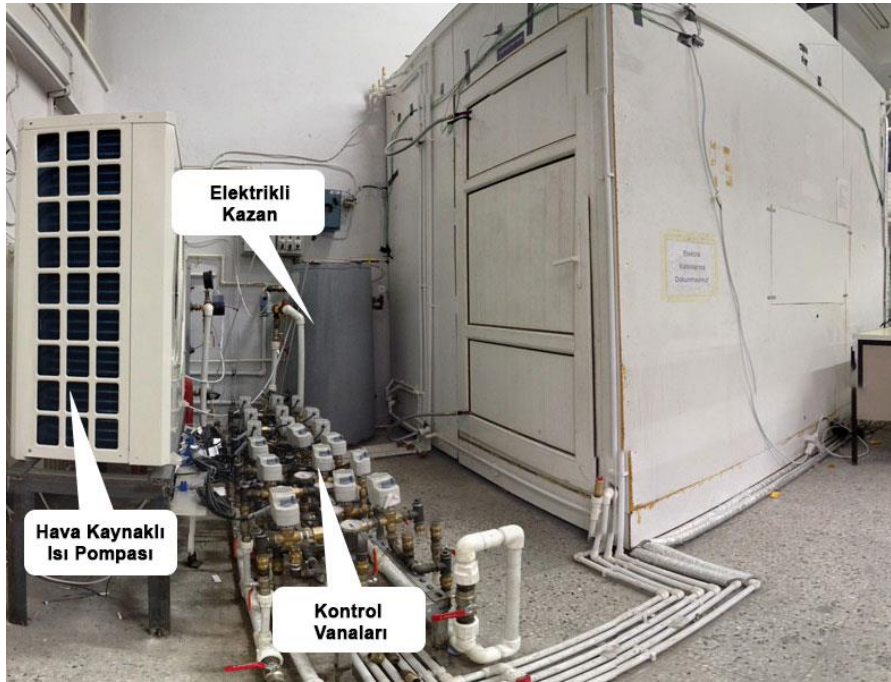
Standartta, hissedilir ısıtma/soğutma yapan tavan panellerinin test edilmesi öngörülmemiş ve bu nedenle tavanın ısıtılıp soğutulması istenmemiştir. Bu çalışma kapsamında kurulan test odasının tavan yüzey sıcaklığı da kontrol edilebilmektedir. Şekil 2'de test odası duvarlarına döşenen borular şematik olarak gösterilmiştir.



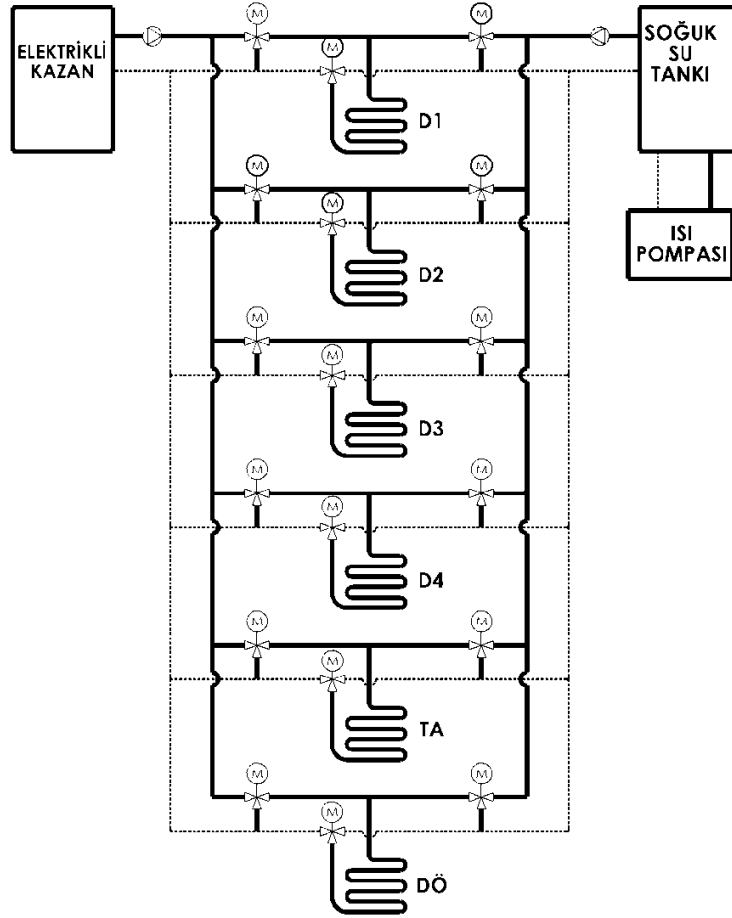
**Şekil 2.** Duvarlara döşenen boruların yerleşimi

Test odası iç yüzey sıcaklıklarının birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesi için 6 zon oluşturulmuş ve her zon 3 adet otomatik kontrol vanası ile kontrol edilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Kontrol vanaları aç/kapa kontrollü olup açıp kapama süresi 10 saniyedir.

8 kW kapasiteli bir ısı pompası kullanılarak soğuk su ihtiyacı karşılanmıştır. Isı pompası 12 °C'ye kadar soğuk su sağlayabilmektedir. Sıcak su ise 3 kW kapasiteli elektrikli kazan kullanılarak elde edilmiştir. Kazanda 80°C'ye kadar sıcak su elde edilmesi mümkündür. Şekil 3'te test odası ve mekanik tesisatın görünümü, Şekil 4'te mekanik tesisat şeması sunulmuştur.



**Şekil 3.** Test odası ve mekanik tesisat ekipmanları



Şekil 4. Mekanik tesisat şeması

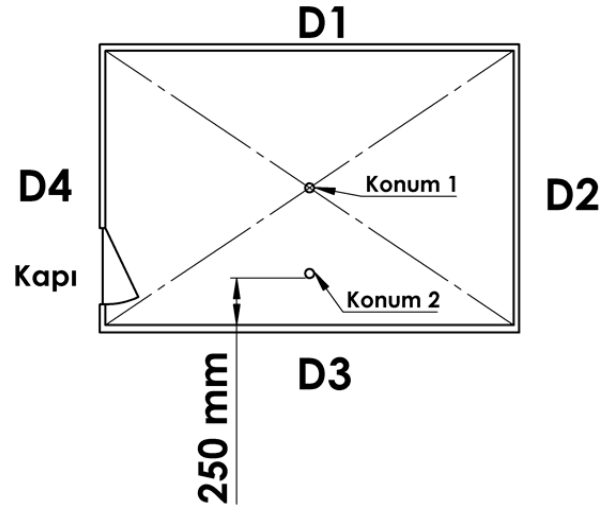
Oda içerisinde duvar yüzey sıcaklıklarının ölçülebilmesi için yüzeylerde eşit aralıklarla yerleştirilmek kaydı ile toplam 80 noktaya K tipi ısı-çift yerleştirilmiştir. Bu sayede her duvarın yüzey sıcaklık dağılımı ve ortalama sıcaklıkları ölçülebilmektedir. Şekil 5'te ısı-çiftlerin ölçümlerinin okunduğu veri sayaçlarının görünümü sunulmuştur.



Şekil 5. Veri Sayaçları

Oda hacminin orta noktası Konum-1 olarak isimlendirilmiş, bu konuma hava sıcaklığı ve hava hızı ölçülebilmesi için sıcak tel anemometresi yerleştirilmiştir. Aynı konuma bir siyah küre sıcaklık probu yerleştirilmiştir. Konum-2 ise D3 ile isimlendirilen duvarın yüzey orta noktasından 25 cm mesafede bulunmaktadır. Bu noktaya da bir siyah küre sıcaklık probu yerleştirilmiş olup bu noktada hava sıcaklığı ve hava hızının Konum-1 noktasındaki ile eşit olduğu varsayılmıştır. Şekil 6'da test odası duvar isimlendirmeleri, siyah küre termometresi ve sıcak tel anemometresinin konumları görülmektedir. Şekil 7'de test odası içerisinde Konum-1'de yer alan siyah küre probu ve sıcak tel anemometresi görülmektedir.



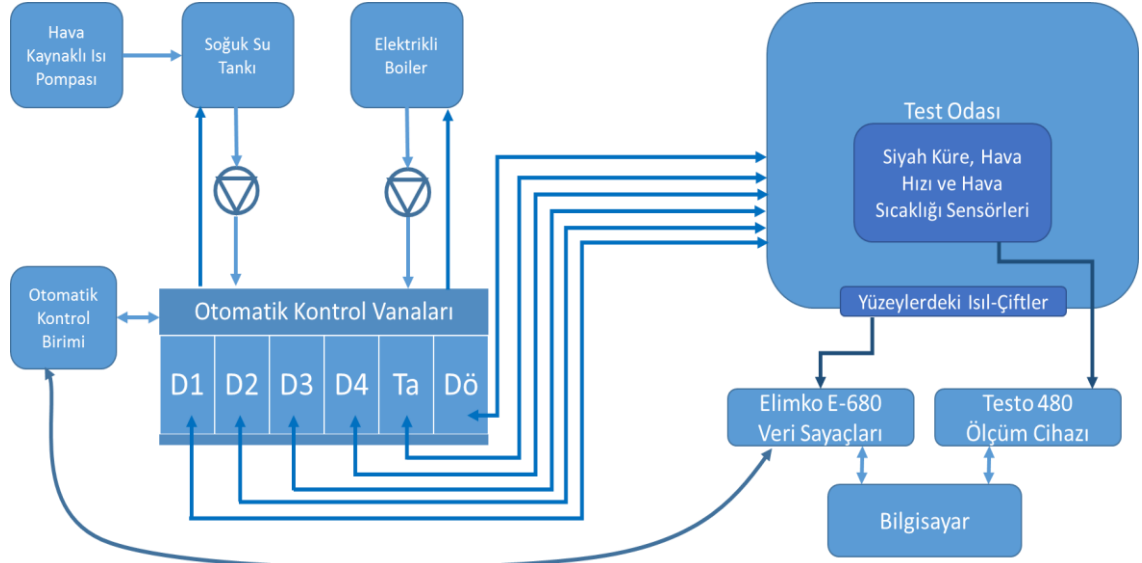


Şekil 6. Duvar isimlendirmeleri ve sensör konumları



Şekil 7. Siyah küre sıcaklık probu ve sıcak tel anemometresi görünümü

Test düzeneğinin tüm bileşenleri ve aralarındaki ilişkiler şematik olarak Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Test düzeneğinin şematik gösterimi

### 3.2. Deney Düzeneğinde Kullanılan Ekipmanlar ve Ölçüm Cihazları

Kullanılan mekanik tesisat ekipmanları ve ölçüm cihazları ile ilgili bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Mekanik tesisat ekipmanları ve ölçüm cihazları bilgileri.

Mekanik Tesisat Ekipmanları		
İsim	Marka ve Model	Açıklama
Hava kaynaklı ısı pompası	Solimpeks – SHCW RJ-80H	Isıtma Kapasitesi 8 kW Soğutma Kapasitesi 6 kW
Elektrikli su kazanı	Solimpeks – Solitank MDD-001	Tek serpantinli, 200 lt 3 kW termostatlı elektrik rezistanslı ısıtıcı 80°C'ye kadar sıcak su sağlama kapasitesi
Soğuk Su Tankı	Solimpeks – Solitank MA-003	200 lt, Poliüretan izolasyonu
Sirkülasyon Pompası	Halm – HUPA 25-6.0 U180	3,8 m <sup>3</sup> /h ve 7 m'ye kadar sirkülasyon kapasitesi
Otomatik kontrol vana gövdeleri	Siemens – VX46.15	3 yollu vana gövdeleri
Otomatik kontrol vana motorları	Siemens – SFA21/18	Aç/kapa kontrol Açma kapama süresi 10 saniye
Ölçüm Cihaz ve Sensörleri		
İsim	Marka ve Model	Açıklama
Veri sayacı ve kontrol cihazı	Elimko – E-680	Analog – Sayısal Çevirici: 16 bit Otomatik kontrol röleleri (Toplamda 80 kanallı 4 farklı cihaz kullanılmıştır.)
Isıl-Çift (K tipi)	Elimko – E-0,5T2KTTEA	K tipi ısı-çift kompanzasyon kablosu (Kalibrasyonları yapılmıştır)
Çok parametrelili ölçüm cihazı	Testo – 480	K tipi ısı çift girişi 2 adet 3 adet dijital sensör girişi (nem, hava hızı v.b.)

Sıcak anemometresi	tel	Testo – 0635 1050	Termal akış hızı ve hava sıcaklığı ölçümü Çap: 3mm 0-10 m/s aralığında ölçüm alabilme <u>Doğruluk Değerleri:</u> Hız ölçümünde: $\pm 0,03$ m/sn + 5%(ölç. değ.) Hava sıcaklığı ölçümünde: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Siyah küre sıcaklık probu		Testo – 0602 0743	<u>Doğruluk Değeri:</u> $\pm 0,3^{\circ}\text{C} + 0,1\%$ (ölç. değ.)

### 3.3. ANSI/ASHRAE Standart 138 ile Kurulan Test Düzeneğinin Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında ANSI/ASHRAE Standart 138; test odası içerisindeki operatif sıcaklık hesabına etki eden standart koşulları ve test edilecek tavan panellerinin performansının belirlenmesine etki eden standart koşulları olarak iki kısımda ele alınmıştır. Standart ile çalışma kapsamında kurulan test odası arasında farklılık gösteren kısımlar tavan panellerinin performansının belirlenmesine etki edebilecek olup, operatif sıcaklık hesaplamasına etkisi bulunmamaktadır. Kurulan test odasının standardın ikinci kısmının özelliklerini de sağlayabilmesi için gerekli ön hazırlıklar yapılmış olup, ilgili sistemlerin eklenmesi ya da düzenlemelerin yapılması ile standardın ikinci kısmına uygun hale gelebilecektir.

Standartta yer alan operatif sıcaklık ile ilgili hesaplamalarının kullanılabilmesi için test esnasında test odası içerisinde zorlanmış taşınım olmaması ve oda iç yüzeylerinin yüzey emisivitesinin 0,9 ya da daha yüksek olması gerekmektedir [2]. Kurulan test odasında ve yapılan doğrulama deneylerinde bu şartlar sağlanmıştır. Ölçümlere etki edebilecek bir diğer unsur ise yüzey sıcaklığı homojenliği ve tüm yüzey sıcaklığının doğru olarak hesaplamaya yansıtılmasıdır. Homojenliğe etki edebilecek en önemli unsurlardan biri ısı yalıtım olup, çalışma kapsamında kurulan odada standartta belirtilen yalıtım koşulları sağlanmıştır. Dahası yüzey sıcaklık ölçümleri, her yüzeye eşit aralıklarla yerleştirilen toplam 80 sensörden alınan ölçümlerin ortalaması alınarak elde edilmiş olup, ölçümler tüm yüzeyin sıcaklığını yansıtmaktadır.

Tavan panellerinin performansının standart şekilde belirlenebilmesi için gerekli standart test koşullarının sağlanması gerekmektedir. Testlerin başlaması için test odasının içerisinde belirtilen şartlara getirilmiş olması istenilmektedir. Bu şartlar tavan panelinin ısıtma ya da soğutma testine tabi tutulmasına göre belirlenmiş olup ısıtma testi için iç hava kuru-termometre sıcaklığının  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  ve bağıl nemin % 35 olması istenmekte, soğutma testi için ise bu değerlerin  $24^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  ve % 35 olması istenmektedir. Bu koşulun sağlanması için iki öneri sunulmaktadır; birinci yöntemde test odasının bulunduğu mahallin iklimlendirme kontrolünün sağlanmış olması durumunda test odasının iki duvarının hareket edebilir şekilde tasarlanabileceği belirtilmiştir. Bu durumda test öncesi hareketli duvarların açılarak test odası içerisinde dışarıya ile aynı şartlara (test başlangıç şartları) getirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Test odasının bulunduğu ortam iklimlendirilmiyor ise, test odası iç hacminde iklim kontrolü sağlayacak bir sistem kurulması gerektiği belirtilmiştir. Bu durumda hava kanallarının test odasının içinden geçmemesi ve menfezlerin yüzeye hemzemin olması gerektiği belirtilmiştir. Menfezlerin sızdırmaz, yalıtımlı kapaklara sahip olması gerektiği ve deney başlangıcında bu kapakların hava sızdırmayacak şekilde kapatılması gerektiği belirtilmiştir.

Test odasının bulunduğu ortamda iklimlendirme kontrolünün sağlanmadığı şartlar altında, test odasının tüm duvarlarının tamamının ısı yalıtımının % 25 oranında artırılması gerektiği belirtilmiştir. Yapılan çalışmada test odası içerisinde ve test odasının bulunduğu ortamda iklimlendirme kontrolü bulunmamaktadır. Duvar yalıtımlarında belirtilen artırım sağlanmıştır. Test odasında belirtilen iklimlendirme kontrolü sağlandığı takdirde standartta belirtilen tavan panel testlerinin yapılabileceği düşünülmektedir.

### 3.4. Deneylerin Yapılışı

Çalışmada, Denklem 5 ve Denklem 6'dan elde edilen ortalama ışınım sıcaklıkları kullanılarak operatif sıcaklık ayrı ayrı hesaplanmış ve kıyaslanarak test odasının deneysel doğrulanması yapılmıştır.

Deneylerin yapılışı sırasında tüm ölçümler sistem ısıl denge durumuna geldikten sonra alınmıştır. Veriler 30 dakika boyunca alınan ölçümlerin ortalamasıdır. İki ölçüm noktası arasında sistemin ısıl dengeye gelmesi için en az 45 dakika ara verilmiştir.

Duvar sıcaklıkları o duvar yüzeyinde bulunan tüm sıcaklık sensörlerinin belirlenen test süresince aldığı verilerin ortalamasını ifade etmektedir.

Deneyler tüm duvar sıcaklıklarının eşit olduğu durum ve farklı duvar sıcaklıkları olduğu durum için yapılmıştır. Eşit duvar sıcaklıkları deneylerinde herhangi bir duvarın ortalama yüzey sıcaklığının, Denklem 5'e göre hesaplanan ortalama ışınım sıcaklığından sapması  $\pm 1,5$  °C aralığındadır.

### 3.5. Deney Sonuçları

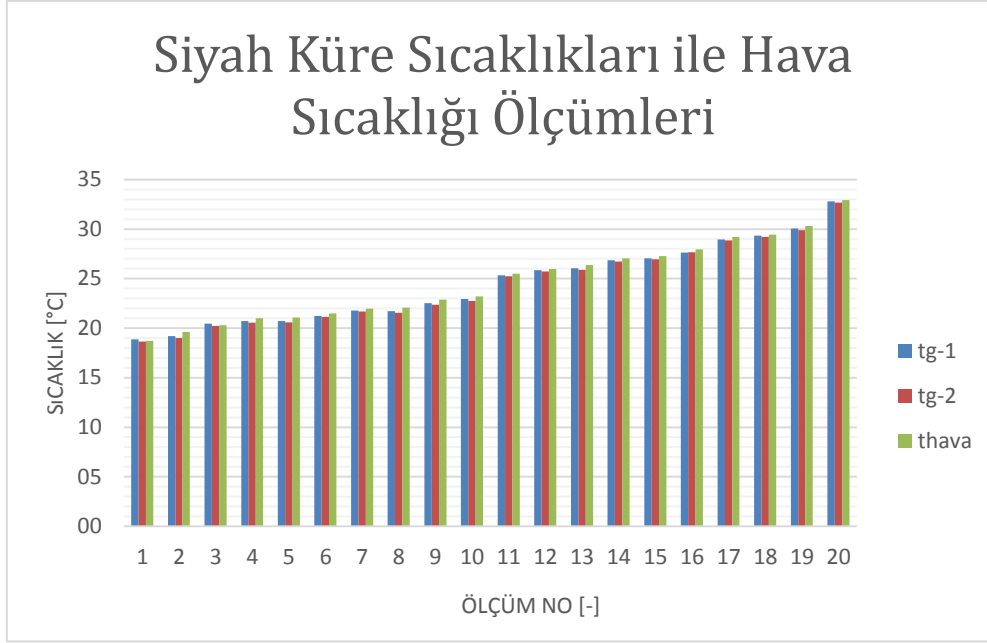
Tüm duvar sıcaklıklarının eşit olduğu durumda Denklem 5 ve Denklem 6 kullanılarak elde edilen ortalama ışınım sıcaklıkları ve bu değerler üzerinden hesaplanan operatif sıcaklıklar kıyaslanmıştır. Tablo 2'de bu deneylerin ölçüm ve hesaplama değerleri görülmektedir. Tabloda görüldüğü üzere Denklem 5 ve Denklem 6 üzerinden elde edilen ortalama ışınım sıcaklığı değerlerinin bu değerlerin ortalamasından,  $t_{mr-ort}$ , sapması  $\pm 0,2$  °C aralığındadır. Yine bu denklemler ile elde edilen ortalama ışınım sıcaklığı kullanılarak hesaplanan operatif sıcaklık değerlerinin ortalama operatif sıcaklıktan,  $t_{o-ort}$ , sapması  $\pm 0,1$  °C aralığındadır.

**Tablo 2.** Eşit duvar sıcaklıkları için ölçüm ve operatif sıcaklık değerleri tablosu.

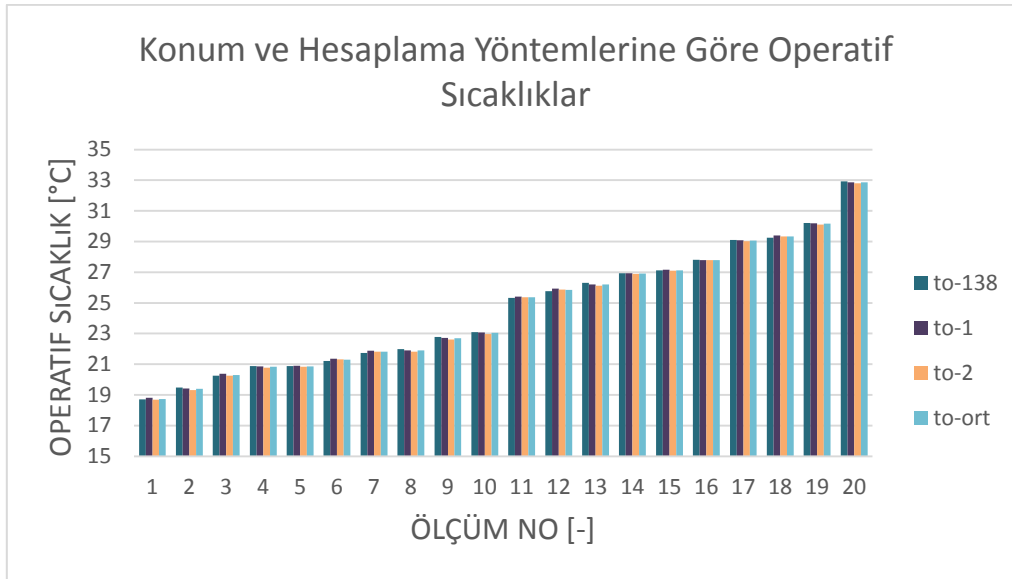
Ölçüm Değerleri										Denklem 5	Denklem 6						
$t_{D1}$	$t_{D2}$	$t_{D3}$	$t_{D4}$	$t_{TA}$	$t_{DO}$	$t_{g-1}$	$t_{g-2}$	$t_{hava}$	$V_{hava}$	$t_{mr-138}$	$t_{mr-1}$	$t_{mr-2}$	$t_{mr-ort}$	$t_{o-138}$	$t_{o-1}$	$t_{o-2}$	$t_{o-ort}$
17,8	17,9	18,5	19,0	19,4	19,7	18,9	18,7	18,7	0,0	18,7	18,9	18,7	18,8	18,7	18,8	18,7	18,7
18,4	18,5	19,0	19,6	20,0	20,4	19,2	19,0	19,6	0,0	19,3	19,2	19,0	19,2	19,5	19,4	19,3	19,4
19,2	19,5	20,0	20,5	21,0	21,3	20,5	20,2	20,3	0,0	20,2	20,5	20,2	20,3	20,3	20,4	20,3	20,3
19,6	20,1	20,6	21,2	21,8	22,2	21,2	21,1	21,5	0,0	20,9	21,2	21,1	21,1	21,2	21,4	21,3	21,3
20,0	20,6	21,2	21,8	22,5	22,8	21,8	21,7	22,0	0,0	21,5	21,8	21,7	21,6	21,7	21,9	21,8	21,8
20,8	21,2	21,6	22,1	22,7	23,0	21,7	21,6	22,1	0,0	21,9	21,7	21,6	21,7	22,0	21,9	21,8	21,9
21,8	22,0	22,4	22,8	23,4	23,7	22,5	22,4	22,9	0,0	22,7	22,5	22,3	22,5	22,8	22,7	22,6	22,7
22,2	22,3	22,7	23,0	23,7	24,0	22,9	22,7	23,2	0,0	23,0	22,9	22,7	22,9	23,1	23,1	23,0	23,0
23,8	24,4	25,0	25,4	26,0	26,5	25,3	25,2	25,5	0,0	25,2	25,3	25,2	25,2	25,3	25,4	25,4	25,4
24,1	24,8	25,3	25,7	26,3	26,9	25,8	25,7	26,0	0,0	25,5	25,8	25,7	25,7	25,8	25,9	25,9	25,8
24,9	25,6	25,9	26,3	27,2	27,6	26,1	25,9	26,4	0,0	26,2	26,0	25,9	26,1	26,3	26,2	26,1	26,2
25,4	26,3	26,5	26,9	27,7	28,2	26,8	26,7	27,0	0,0	26,8	26,8	26,7	26,8	26,9	26,9	26,9	26,9
25,7	26,3	26,7	27,0	27,9	28,4	27,1	27,0	27,3	0,0	27,0	27,1	26,9	27,0	27,1	27,2	27,1	27,1
27,6	28,4	28,7	29,2	30,1	30,5	29,3	29,2	29,4	0,0	29,1	29,3	29,2	29,2	29,3	29,4	29,3	29,3
28,9	29,5	29,7	30,2	31,1	31,5	30,1	29,9	30,3	0,0	30,1	30,1	29,9	30,0	30,2	30,2	30,1	30,2
31,5	32,4	32,5	32,9	34,0	34,3	32,8	32,7	32,9	0,0	32,9	32,8	32,7	32,8	32,9	32,9	32,8	32,9

Sıcaklık birimleri °C, Hava hızı birimi m/s olarak verilmiştir.

Grafik 1'de eşit duvar sıcaklıkları durumunda alınan sonuçlar için Konum-1 ve Konum-2'deki siyah küre sıcaklıkları ( $t_{g-1}$  ve  $t_{g-2}$ ) ve Konum-1'de ölçülen kuru termometre hava sıcaklığı ( $t_{hava}$ ) sunulmuştur. Grafik 2'de ise eşit duvar sıcaklıkları için ASHRAE Standart 138'e göre hesaplanan operatif sıcaklık  $t_{o-138}$ , Konum-1 ve Konum-2 de siyah küre sıcaklıkları üzerinden hesaplanan operatif sıcaklık değerleri ( $t_{o-1}$  ve  $t_{o-2}$ ) sunulmuştur.



**Grafik 1.** Eşit duvar sıcaklıkları için konumlara göre siyah küre sıcaklıkları ve hava sıcaklığı



**Grafik 2.** Eşit duvar sıcaklıkları için konumlara ve hesaplama yöntemlerine göre operatif sıcaklık

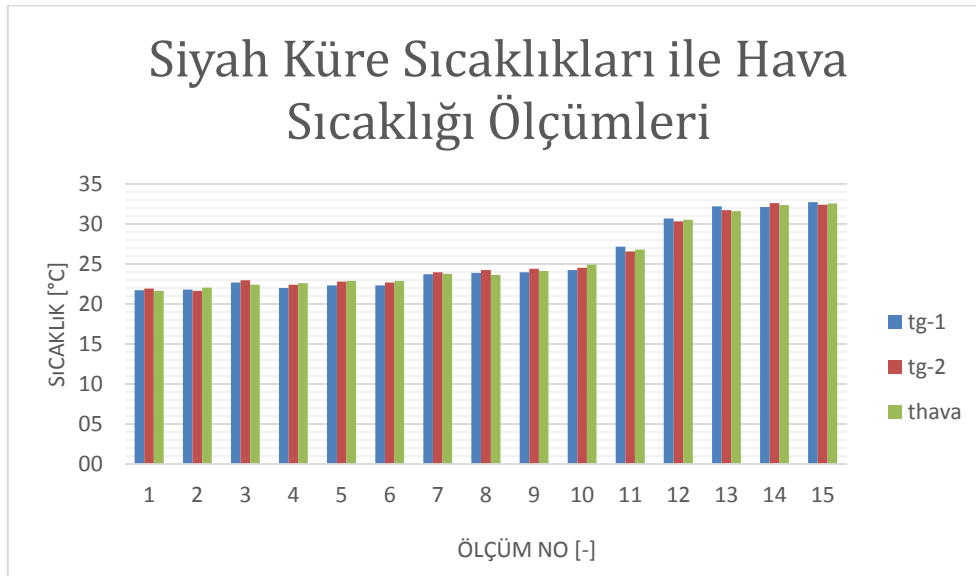
Duvar sıcaklıklarının en az birinin Denklem 5 ile elde edilen ortalama ısıtım sıcaklığı değerinden en az 4 °C farklı olduğu durumlarda alınan ölçümler ve yapılan hesaplamalar Tablo 3'te sunulmuştur. Tabloda görüldüğü üzere Denklem 5 ve Denklem 6 üzerinden elde edilen ortalama ısıtım sıcaklığı değerlerinin büyük çoğunluğu bu değerlerin ortalamasından,  $t_{mr-ort}$  sapması  $\pm 0,3$  °C aralığında olup değerlerin tamamı ise,  $t_{mr-ort} \pm 0,5$  °C aralığındadır. Bu denklemler ile elde edilen ortalama ısıtım sıcaklığı üzerinden hesaplanan operatif sıcaklık değerleri  $t_{o-ort} \pm 0,2$  °C aralığındadır.

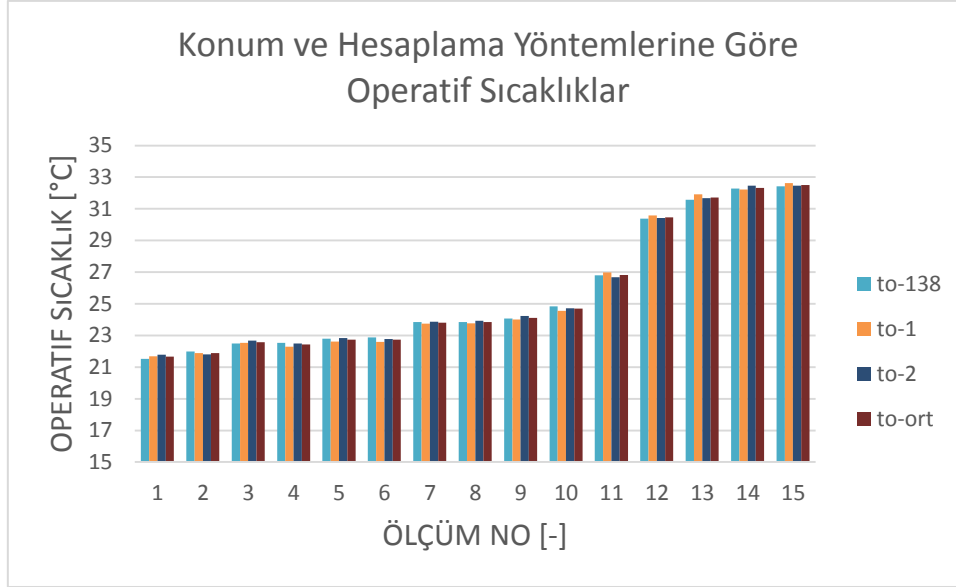
**Tablo 3.** Farklı duvar sıcaklıkları için ölçüm ve operatif sıcaklık değerleri tablosu.

Ölçüm Değerleri										Denklem 5		Denklem 6					
$t_{D1}$	$t_{D2}$	$t_{D3}$	$t_{D4}$	$t_{TA}$	$t_{DO}$	$t_{g-1}$	$t_{g-2}$	$t_{hava}$	$V_{hava}$	$t_{mr-138}$	$t_{mr-1}$	$t_{mr-2}$	$t_{mr-ort}$	$t_{o-138}$	$t_{o-1}$	$t_{o-2}$	$t_{o-ort}$
17,5	17,8	19,1	25,3	19,8	29,6	21,7	21,9	21,6	0,0	21,4	21,7	21,9	21,7	21,5	21,7	21,8	21,7
19,7	20,1	21,0	21,9	22,0	27,1	21,8	21,6	22,0	0,0	21,9	21,7	21,6	21,8	22,0	21,9	21,8	21,9
18,2	18,5	20,1	21,2	28,7	29,1	22,7	23,0	22,4	0,0	22,6	22,7	23,0	22,8	22,5	22,5	22,7	22,6
27,1	20,2	21,3	21,7	22,1	21,8	22,0	22,4	22,6	0,0	22,5	22,0	22,4	22,3	22,5	22,3	22,5	22,4
27,8	20,3	21,4	21,9	22,2	21,8	22,3	22,8	22,9	0,0	22,7	22,3	22,8	22,6	22,8	22,6	22,8	22,7
27,1	20,7	21,8	22,1	22,5	22,3	22,3	22,7	22,9	0,0	22,9	22,3	22,7	22,6	22,9	22,6	22,8	22,7
19,5	19,6	21,2	25,9	28,7	29,1	23,7	23,9	23,8	0,0	23,9	23,7	23,9	23,9	23,8	23,7	23,9	23,8
19,0	19,3	21,0	22,3	31,3	31,7	23,9	24,2	23,6	0,0	24,1	23,9	24,2	24,1	23,9	23,8	23,9	23,8
26,4	28,6	22,3	22,7	22,4	21,8	23,9	24,4	24,1	0,0	24,0	23,9	24,4	24,1	24,1	24,0	24,2	24,1
20,2	20,1	22,0	26,9	29,7	30,0	24,2	24,5	24,9	0,0	24,7	24,2	24,5	24,5	24,8	24,6	24,7	24,7
21,7	21,9	27,7	28,3	30,5	30,7	27,2	26,5	26,8	0,0	26,8	27,2	26,6	26,8	26,8	27,0	26,7	26,8
24,1	30,7	30,6	31,2	32,7	33,1	30,7	30,3	30,5	0,0	30,3	30,7	30,3	30,4	30,4	30,6	30,4	30,5
26,3	26,3	32,5	33,0	35,4	35,6	32,2	31,7	31,6	0,0	31,5	32,2	31,7	31,8	31,6	31,9	31,7	31,7
34,6	35,4	30,7	30,4	31,7	30,6	32,1	32,6	32,3	0,0	32,2	32,1	32,6	32,3	32,3	32,2	32,5	32,3
26,5	32,9	32,6	33,0	34,6	34,9	32,7	32,4	32,5	0,0	32,3	32,7	32,4	32,5	32,4	32,6	32,5	32,5

Sıcaklık birimleri °C, Hava hızı birimi m/s olarak verilmiştir.

Grafik 3'te farklı duvar sıcaklıkları durumunda alınan sonuçlar için Konum-1 ve Konum-2'deki siyah küre sıcaklıkları ( $t_{g-1}$  ve  $t_{g-2}$ ) ve Konum-1'de ölçülen kuru termometre hava sıcaklığı ( $t_{hava}$ ) sunulmuştur. Grafik 4'te ise eşit duvar sıcaklıkları için ASHRAE Standart 138'e göre hesaplanan operatif sıcaklık  $t_{o-138}$ , Konum-1 ve Konum-2 de siyah küre sıcaklıkları üzerinden hesaplanan operatif sıcaklık değerleri ( $t_{o-1}$  ve  $t_{o-2}$ ) sunulmuştur.

**Grafik 4.** Farklı duvar sıcaklıkları için konumlara göre siyah küre sıcaklıkları ve hava sıcaklığı



**Grafik 4.** Farklı duvar sıcaklıkları için konumlara ve hesaplama yöntemlerine göre operatif sıcaklık

Yapılan belirsizlik analizi sonucunda ortalama ışıınım sıcaklığı ve operatif sıcaklık değerlerinin belirsizliğinin  $\pm 0,05^\circ\text{C}$  aralığında olduğu belirlenmiştir.

## SONUÇ

Sonuç itibariyle, kurulan test odasında ANSI/ASHRAE 138 standardının öngördüğü test koşulları sağlandığı durumda standartta belirtilen hesaplama yöntemlerinin kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür, test odası deneysel olarak doğrulanmıştır. Standartın belirlediği aralıkta yer almayan deneylerde duvar sıcaklıklarının en az birinin ortalama ışıınım sıcaklığı ile arasındaki farkın  $\pm 4^\circ\text{C}$ 'ye kadar olduğu ve sadece radyant ısıtma/soğutma yapılan durumlar için kurulan test odası özelinde standartta sunulan yöntem ile hesaplama yapmanın kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir. Zorlanmış taşınım ile ısıtma/soğutma yapılan durum için bu kabul geçerli değildir.

## SİMGELER

$A_{1,2,3,4}$	1, 2, 3, 4 numaralı test odası duvarlarının iç yüzey alanları, [ $\text{m}^2$ ]
$A_{DÖ}$	Test odası döşemesi iç yüzey alanı, [ $\text{m}^2$ ]
$A_{po}$	Test paneli etkin yüzey alanı (ANSI/ASHRAE Standart 138'e göre), [ $\text{m}^2$ ]
$A_{TA}$	Test odası tavanı iç yüzey alanı, [ $\text{m}^2$ ]
$C+R$	İnsan vücudundan taşınım ve ışıınımla hissedilir ısı kaybı, [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$D$	Siyah küre sıcaklık probu çapı, [m]
$f_{cl}$	Giysi alan çarpanı, -
$h$	Toplam ısı geçiş katsayısı, [ $\text{w}/\text{m}^2.\text{K}$ ]
$h_c$	Taşınımsal ısı geçiş katsayısı, [ $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ ]
$h_r$	İşınımsal ısı geçiş katsayısı, [ $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ ]



$R_{cl}$	Giysilerin ısı direnci, [ $m^2K/W$ ]
$t_{1,2,3,4}$	Test odası duvar sıcaklıkları, [ $^{\circ}C$ ]
$t_a$	<i>İç hava sıcaklığı</i> , [ $^{\circ}C$ ]
$t_a$	Hava sıcaklığı, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{D\ddot{O}}$	Test odası döşeme yüzey sıcaklığı, [ $^{\circ}C$ ]
$t_g$	Siyah küre probu ile ölçülen sıcaklık, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{mr}$	Ortalama ışıınım sıcaklığı, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{mr-1}$	Denklem 6 kullanılarak oda iç hacmi merkezinde bulunan siyah küre termometresi üzerinden hesaplanan ortalama ışıınım sıcaklığı, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{mr-138}$	Denklem 5'e göre (ANSI/ASHRAE Standart 138 baz alınarak) hesaplanan ortalama ışıınım sıcaklığı, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{mr-2}$	Denklem 6 kullanılarak D3 isimli duvarın yüzey merkezine 15 cm mesafede bulunan siyah küre termometresi üzerinden hesaplanan ortalama ışıınım sıcaklığı, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{mr-ort}$	$t_{mr-1}$ , $t_{mr-2}$ ve $t_{mr-138}$ değerlerinin aritmetik ortalaması, [ $^{\circ}C$ ]
$t_o$	Operatif sıcaklık, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{o-1}$	$t_{mr-1}$ ile hesaplanan operatif sıcaklık, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{o-138}$	$t_{mr-138}$ ile hesaplanan operatif sıcaklık, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{o-2}$	$t_{mr-2}$ ile hesaplanan operatif sıcaklık, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{o-ort}$	$t_{o-1}$ , $t_{o-2}$ ve $t_{o-138}$ değerlerinin aritmetik ortalaması, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{po}$	Test paneli etkin yüzey sıcaklığı (ANSI/ASHRAE Standart 138'e göre), [ $^{\circ}C$ ]
$t_{sk}$	İnsan derisi yüzey sıcaklığı, [ $^{\circ}C$ ]
$t_{TA}$	Test odası tavan yüzey sıcaklığı, [ $^{\circ}C$ ]
$V_a$	Hava hızı, [m/s]
$\varepsilon$	Emisivite (Siyah küre için 0.95) -

## BİLGİLENDİRME

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 2120177 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] ASHRAE HVAC Systems & Equipment, "Panel Heating and Cooling", ASHRAE, 2008.
- [2] ANSI / ASHRAE Standart 138, "Method of Testing for Rating Ceiling Panels for Sensible Heating and Cooling", Atlanta, 2013.
- [3] KILKIŞ, B., "A Dynamic Operative Temperature Sensor for Low-Exergy High Performance Buildings", ASHRAE Transactions, Vol.116, Part2, pp:108-115, 2009.
- [4] ASHRAE Temel El Kitabı., "Fizyolojik İlkeler ve Isıl Konfor", Çeviren: T. DERBENTLİ, Tesisat Mühendisleri Derneği, 1997.





- [5] ISO EN ISO 7730:2006, “Ergonomics of thermal environment – Analytical determination and interpretation Calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort”, International Standardization Organization. 2006.
- [6] ASHRAE Fundamentals., “MEASUREMENT AND INSTRUMENTS”, American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2009.

## ÖZGEÇMİŞ

### Fatih EVREN

2012 yılında Başkent Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuş ve Hezarfen Enerji Ar-Ge şirketini kurmuştur. Hâlen Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir. Isıl konfor, panel ısıtma ve melez HVAC sistemleri üzerine çalışmaktadır.

### Abuzer ÖZSUNAR

1965 Adıyaman/Besni doğumludur. 1987 yılında Gazi Üniversitesinde lisans eğitimini tamamlamıştır. 1988 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır. Aynı üniversitede yüksek lisans eğitimini 1992 yılında doktora eğitimini 1999 yılında tamamlamıştır. 2002 yılında öğretim görevlisi olarak atanmış, 2012 yılında ise doçent unvanını almıştır. Halen aynı bölümde bölüm başkan yardımcısı olarak görev yapmaktadır. Karışık konveksiyon, elektronik cihazların soğutulması ve iklimlendirme konularında çalışmaktadır.

### Birol KILKIŞ

Dr. Kılış, 1949 yılında Ankara da doğdu. 1970 yılında ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümünden yüksek şeref derecesi ile mezun oldu. Aynı bölümden M. Sc ve Doktor derecelerini alarak von Karman Enstitüsünden Akışkanlar Mekaniği dalında şeref derecesi ile mezun oldu. 1981 yılında TÜBİTAK Teşvik Ödülünü Kazandı. ASHRAE Yüksek Performans Binaları Komitesi üyesi ve ASHRAE TC 7.4 Sürdürülebilir Binalar İçin Ekserji Analizi Teknik Komitesi İkinci Başkanıdır. Diğer beş komitenin de üyesidir. Halen Başkent Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Profesör kadrosunda hizmet vermektedir. Ayrıca Enerji Mühendisliği Yüksek Lisans Programı Ana Bilim Dalı Başkanı, Avrupa Birliği Güneş Enerjisi Paneli Yönetim Kurulu Üyesidir. .

