



**Bu bir MMO
yayıdır**

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

İZMİR'DE BULUNAN BİR KONUTTA ÖLÇÜLEN HAVA SIZDIRMAZLIK DEĞERİNİN YILLIK ISITMA AMAÇLI ENERJİ TÜKETİMİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**CEM DOĞAN ŞAHİN
ZEYNEP DURMUŞ ARSAN
GÜLDEN GÖKÇEN AKKURT
İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

İZMİR'DE BULUNAN BİR KONUTTA ÖLÇÜLEN HAVA SIZDIRMAZLIK DEĞERİNİN YILLIK ISITMA AMAÇLI ENERJİ TÜKETİMİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Cem Doğan ŞAHİN
Zeynep DURMUŞ ARSAN
Güliden GÖKÇEN AKKURT

ÖZET

Türkiye'de binaların enerji verimli iyileştirilmesi çalışmaları Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği'nden sonra hız kazanmıştır. Ancak, bu iyileştirmelerin büyük bir çoğunluğu binaların ısı kabuğunda yapılan yenilemelerdir. Bu çalışmada İzmir'de çok katlı bir apartman bloğunda yer alan bir konutun hava sızdırmazlık değeri fan basınçlandırma (blower door) metodu ile ölçülmüştür. Yapı kabuğunda hava kaçaklarının meydana geldiği yerler termal kamera yoluyla belirlenmiştir. Konut yapısı, güvenilirliği doğrulanmış bir bina enerji simülasyon aracı ile modellenmiştir. Daha sonra bu model konutun aylık tüketim değerleri ve iç ortam sıcaklığı ile kalibre edilmiştir. Tespit edilen hava sızdırmazlık değerinin 0.5 h^{-1} iyileştirilmesinin konutun yıllık mekan ısıtma amaçlı enerji tüketimi üzerine olan etkisi bina enerji simülasyon aracı yardımıyla belirlenmiştir. Sonuçlar, hava sızdırmazlık değerindeki iyileştirmenin yıllık enerji tüketiminde %3'lük bir azalma sağladığını gösterirken, bu değer ısı yalıtımının eklenmesi sayesinde %13'tür.

Anahtar Kelimeler: Hava sızdırmazlığı, fan basınçlandırma (blower door) yöntemi, bina enerji performansı, kalibrasyon.

ABSTRACT

Energy efficient retrofit of existed buildings in Turkey has accelerated after the Directive on Building Energy Performance was initiated. Yet, the majority of the retrofit applications were centralised around those related with the buildings' thermal envelope. In this paper, air tightness performance of a flat in the multistorey apartment block in İzmir was measured by fan pressurisation (blower door) method. Air leakage areas in the building envelope were also identified using IR thermography. The residential building was modelled with a validated building energy simulation tool. After, the model was calibrated via monthly fuel utility bills and measured hourly indoor dry-bulb temperatures. The influence of weather stripping of the building envelope down to $0.5 \text{ ACH}@50\text{Pa}$ average infiltration rate on the annual energy use for space heating was determined via building energy simulation tool. Results show that air tightening of the building envelope reduced the energy consumption by 3% while addition of external insulation by 13%.

Key Words: Fan pressurization method (blower door), building energy performance, air tightness, calibration.

1. GİRİŞ

Türkiye enerji ihtiyacını karşılamada ithalata bağımlı bir ülke konumundadır. 1990'dan 2010'a gelindiğinde birincil enerji talebi 53 TEP'ten 109 TEP'e yükselmiştir [1]. Enerji talebinin %70'inin ithalatla karşılandığı düşünüldüğünde, enerji tasarrufunun önemi bir kez daha vurgulanmalıdır.

Binaların enerji tüketimi, Türkiye'deki toplam enerji tüketimin yaklaşık %34'üne karşılık gelmektedir [2]. Bu oranın azaltılması yönünde ilk olarak atılan adım olarak, 2000 yılında yürürlüğe giren Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği (TS825) gösterilebilir [3]. Daha sonra, bu adımı Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (BEP) takip ederek enerji verimliliği çalışmaları hız kazanmıştır [4]. Türkiye'deki nüfusun yaklaşık %67 sinin 2000 yılından önce yapılmış binalarda yaşadığı düşünülürse, mevcut binalarda yapılacak enerji verimliliği çalışmalarının büyük bir enerji tasarruf potansiyeline sahip olduğu söylenebilir [5].

Binalarda oluşan ısı kazanç veya kayıpları genellikle binanın ısıl kabuğundan olan iletim ve taşınım (duvarlardan, çatıdan, döşemeden, pencerelerden) ve enfiltrasyon (bina kabuğunda varolan çatlaklar ve açıklıklar ile kapı ve pencerelerden) yolu ile meydana gelmektedir. Ancak, binalarda yapılan enerji verimli iyileştirme çalışmalarının büyük bir çoğunluğunda binanın "ısı" kabuğunda yapıldığı enfiltrasyon kayıpları üzerinde gerektiği kadar durulmadığı görülmektedir. Enfiltrasyon ile ısı kayıp/kazanç hesabında hava sızdırmazlık değerinin bilinmesi doğru hesaplama için önemlidir. TS825'te yapılan hesaplamalarda hava sızdırmazlık değeri 0.8 h^{-1} olarak sabit kabul edilmektedir [3]. Bu değer binadan binaya değişiklik gösterdiğinden sabit alınmamalı, bina ısı kayıp/kazançlarının, dolayısı ile hacim ısıtma/soğutma enerji tüketimlerinin doğru hesaplanabilmesi için ölçülmelidir. Bu çalışmanın amacı, hava sızdırmazlık değerinin yıllık mekan ısıtma amaçlı enerji tüketimi üzerindeki etkisini göstererek doğru belirlenmesi gerektiğine vurgu yapmak ve konu üzerine bir tartışma ortamı yaratmaktır.

Literatürde, hava sızdırmazlığının binaların enerji tüketimi üzerine olan etkisini inceleyen çok sayıda çalışmaya rastlanmaktadır. Chen ve diğerleri, 2013 yılında yapmış oldukları çalışmada hava sızdırmazlığının mekan ısıtma amaçlı enerji tüketimi üzerine olan etkisini incelemişlerdir [6]. Bu çalışmada, iki apartman binasının hava sızdırmazlık değeri fan basınçlandırma yöntemiyle hesaplanmıştır. Daha sonra güvenilirliği doğrulanmış bir bina enerji simülasyon (BES) aracı kullanılarak, hava sızdırmazlığının enerji tüketimi üzerindeki niceliksel etkisi gözlenmiştir. BES aracında oluşturulan modeller, binaların gerçek tüketimi ile bu araçtan elde edilen değerlerin karşılaştırılması yöntemine dayanarak kalibre edilmiştir. Sonuçlar, hava sızdırmazlık değerinin 0.98 h^{-1} 'den 0.5 h^{-1} 'e iyileştirilmesiyle mekan ısıtma amaçlı enerji tüketiminin yaklaşık %13 azaldığını göstermiştir. Kalamees 2007'de yapmış olduğu çalışmada, bina kabuğunda meydana gelen hava kaçaklarını saptamak için termal kamera ve duman dedektörü yöntemlerini kullanmıştır [7]. Termal kamera ile hava kaçaklarının belirlenmesinde fan basınçlandırma yönteminden faydalanılmıştır. Sonuçlar, işçilik hatalarının ve binada bulunan kat sayısının hava sızdırmazlık değeri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Villi ve diğerleri, 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada çok katlı bir binadaki hava kaçaklarını incelemişlerdir [8]. Çalışmada fan basınçlandırma yöntemi kullanılmıştır. BES modeli, fan basınçlandırma yöntemi sonucunda elde edilen hava sızdırmazlık değerleri dikkate alınarak geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, hava sızdırmazlık değerine bağlı olarak meydana gelen ısı kayıplarının önemli oranda azaldığını göstermiştir. Coxon, 2013 yılında, İngiltere'de bulunan tipik bina örneklerinde hava sızdırmazlık değerlerinin mekan ısıtma amaçlı enerji tüketimine olan etkisinin incelenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir [9]. Çalışmada, öncelikle iki yapıdaki hava geçirgenliği bilinçli olarak artırılmış ve bu değer ölçülmüştür. Daha sonra, bu yapılardan bir tanesinin hava sızdırmazlığı $15 \text{ (m}^3\text{/(m}^2\text{.h)@50Pa)}$ değerinden $5 \text{ (m}^3\text{/(m}^2\text{.h)@50Pa)}$ değerine iyileştirilmiş, diğerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Sonuçlar, hava sızdırmazlığında yapılan iyileştirmenin ısı kayıplarını yaklaşık %35 azalttığını göstermiştir.

Bu çalışmada, ilk olarak İzmir-Balçova'da bulunan çok katlı bir apartman bloğunda yer alan bir konutun hava sızdırmazlık değeri fan basınçlandırma yöntemi ile ölçülmüştür. Daha sonra konut çeperi ve bina kabuğundan gerçekleşen hava kaçakları termal kamera yöntemi ile saptanmıştır. Bina, güvenilirliği kanıtlanmış bir BES aracı ile modellenmiştir. Daha sonra bu model, simülasyon sonuçlarından elde edilen iç ortam sıcaklığı ve yıllık mekan ısıtma amaçlı enerji tüketim değerlerinin gerçek iç ortam sıcaklığı ve enerji tüketimi değerleri ile karşılaştırılması yöntemi ile kalibre edilmiştir.

Hava sızdırmazlık değerinin 0.5 h^{-1} 'e iyileştirilmesinin yıllık mekan ısıtma amaçlı enerji tüketimine olan etkisi, BES aracı kullanılarak tahmin edilmiştir. Ayrıca, dıştan yalıtım eklenmesi ile bina kabuğunda yapılan iyileştirmenin etkisi de incelenmiştir.

2. HAVA SIZDIRMAZLIK DEĞERİNİN ÖLÇÜMÜ

Literatürde, hava sızdırmazlık değerinin ölçülmesi için uygulanan üç farklı yöntem rastlanmıştır. Bunlar, fan basınçlandırma, izleyici gaz (*tracer gas*) ve nabız (*pressure pulse*), yöntemleridir [10]. İzleyici gaz yöntemi, hava sızdırmazlık değeri belirlenecek olan hacme homojen bir şekilde doldurulan özel bir gazın zamanla değişiminin ölçülmesine dayalı bir yöntemdir. Nabız yöntemi, daha önceden sıkıştırılan havanın bir piston silindir düzeneği kullanılarak geri salınması sonucu yaratılan anlık (1-2 saniye) basınç ve hacim değişiminin ölçülmesine dayalı bir yöntemdir [11]. Fan basınçlandırma, hava sızdırmazlık değerinin (HSD) elde edilebilmesi için uygulamada en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntem en basit şekliyle, portatif-ayarlanabilir bir kapı üzerine monte edilmiş fan yardımıyla iç ve dış ortam arasında yaratılmış sabit basınç farkının (genellikle 50 Pa) ve fan içinden geçen hava debisinin ölçülmesine dayalıdır [12].

Fan basınçlandırma yöntemi ilk olarak 1977 yılında İsveç'te pencere üzerine sabitlenmiş bir fanın faydalanılarak bina kabuğu sızdırmazlığının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Aynı teknik daha sonra, pencereye sabitlenmiş bir fan yardımıyla 1979'da Texas-ABD'de ve kapıya sabitlenmiş bir fan yardımıyla Princeton Üniversitesi-ABD'de bina kabuğundaki hava kayıp-kaçaklarının saptanması ve onarılması için kullanılmıştır. Bu nedenle bu yöntem genellikle gayri resmi olarak üfleme kapısı (*blower door*) ya da daha teknik bir deyişle fan basınçlandırma yöntemi olarak bilinmektedir [13].

Bu yöntem günümüzde yalnızca bina kabuğunun hava sızdırmazlık değerinin belirlenmesinde değil aynı zamanda, havalandırma kanallarındaki ve bina kabuğundaki kaçakların saptanması için kullanılmaktadır [12]. Ancak bu çalışmada, havalandırma kanallarındaki kayıp ve kaçakların saptanması konusuna değinilmeyecektir.

2.1. Fan basınçlandırma yöntemi

Bu bölümde tek ısıtıl bölgeye sahip hacimlerin hava sızdırmazlık değerinin elde edilebilmesi için uygulanacak test yönteminden bahsedilecektir. Bazı durumlarda çok ısıtıl bölge hacimlerin hava sızdırmazlık değerinin hesaplanabilmesi de gerekebilir. Bunun için yaygın bir şekilde kullanılan yaklaşımlar da vardır. Örneğin apartmanlarda, bir konutun yalnızca dış ortamla olan sızdırmazlık ilişkisi değil aynı zamanda komşu konutlarla arasında oluşan sızdırmazlık ilişkisinin de bilinmesi istenebilir. Bunun için Levin, 1991 yılında birden fazla üfleme kapısının gerektiği bir yöntem kullanmıştır [12].

Test prosedürüne başlanmadan önce, iç ve dış ortam arasında yaratılmak istenen basınç farkı belirlenmelidir. Hava sızdırmazlık değerinin belirlenebilmesi için genellikle testin 50Pa basınç farkı yaratacak şekilde uygulanması önerilmektedir. Bunun nedeni, 50Pa basınç farkının, rüzgar veya baca etkisi gibi faktörlerin yaratabileceği bozucu etkilerin üstesinden gelebilecek büyüklükte olmasıdır. Hava sızdırmazlık değerinin belirlenebilmesi için yaratılacak olan basınç farkı belirlendikten sonra test prosedürü uygulanır. Fan basınçlandırma yönteminin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda belirtilmiştir [12]. Buna göre:

- i. Test düzeneği dış ortama açık bir kapıya kurulmalı, bunun dışındaki dış ortamla bağlantılı diğer kapılar kapatılmalıdır.
- ii. Fanın emiş tarafında hava akışını engelleyecek bir nesne olmamalıdır.
- iii. Bütün pencereler ve havalandırma açıklıkları kapatılmalıdır.
- iv. Oda kapıları hava akışını engellememesi için test süresince açık bırakılmalıdır.
- v. Kazan, kombi gibi yanma ile çalışan sistemlerin kapalı durumda olduğundan emin olunmalıdır.
- vi. Havalandırma fanları, klima vb. cihazlar kapatılmalıdır.

Fan basınçlandırma testi sonucu cihazdan elde edilen değer CFM@50Pa (cubic feet per minute at 50 Pa) birimindedir. Bu değer öncelikle Eşitlik 1 kullanılarak HSD@50Pa birimine çevirilmelidir [14]. Bu değer 50Pa negatif ya da pozitif basınç altındaki saatlik ortalama hava değişim oranını vermektedir.

$$HSD@50 = \frac{CFM@50 * 60}{\text{konut hacmi (cubic feet)}} \quad (1)$$

Farklı ölçüm yöntemleri ve çalışma grupları hava sızdırmazlık değerini farklı birimlerle belirtmişlerdir. Türkiye’de en sıklıkla kullanılan birim ise ortalama hava sızdırmazlık değeri ya da diğer bilinen adıyla hava değişim oranıdır (h^{-1}). Ortalama hava sızdırmazlık değerinin elde edilebilmesi için Eşitlik 2’de gösterilen yöntem kullanılmaktadır [14].

$$\text{Ortalama hava sızdırmazlık değeri (HSD)} = \frac{HSD@50}{20} \quad (2)$$

Eşitlik 2’de verilen basit denklikle ortalama hava sızdırmazlık değeri bulunabilir, ancak bu değer arkasında ihmal edilmiş birçok detay vardır. Bu detaylar, kayıp-kaçak noktalarının niteliği, dış ortam rüzgarlılık ve baca etkisidir [14]. Bu nedenle, belirtilen faktörlerin etkisini de dikkate alan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşıma göre ortalama hava sızdırmazlık değeri Eşitlik 3 ve 4 ile hesaplanabilir.

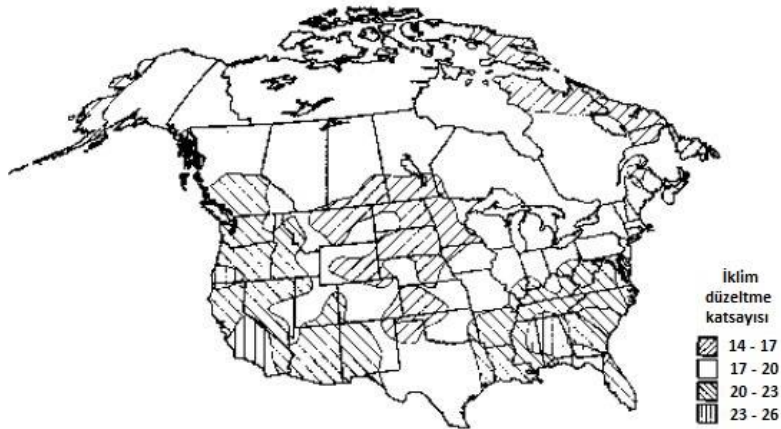
$$\text{Ortalama hava sızdırmazlık değeri (HSD)} = \frac{HSD@50}{N} \quad (3)$$

$$\text{(Korelasyon katsayısı)} N = C * H * S * L \quad (4)$$

Burada “C” iklim düzeltme katsayısı, “H” yükseklik düzeltme katsayısı, “S” rüzgar korunumu katsayısı ve “L” kayıp-kaçak düzeltme katsayısıdır. Bu katsayılar Tablo 1’de verilmiştir. Bu noktada önemli olan C katsayısının tayin edilmesidir. Örneğin bu katsayı Kuzey Amerika için belirlenmiş, bu değerler Şekil 1’de verilmiştir. Ancak Türkiye için böyle bir çalışmaya rastlanmadığından, katsayının kullanılması mümkün değildir. Bu nedenle bu çalışmada yaklaşık bir sonuç veren Eşitlik 2 kullanılacaktır.

Tablo 1. Düzeltme katsayıları [14]

H	Binadaki kat sayısı	1	2	3	4
	Düzeltilme katsayısı	1,0	0,9	0,8	0,7
S	Rüzgar korunumu	Korunaklı	Normal	Korunaksız	
	Düzeltilme katsayısı	1,2	1	0,9	
L	Kayıp-kaçak türü	Küçük	Normal	Büyük	
	Düzeltilme katsayısı	1,4	1	0,7	



Şekil 1. Kuzey Amerika için belirlenmiş iklim düzeltme katsayıları [13]

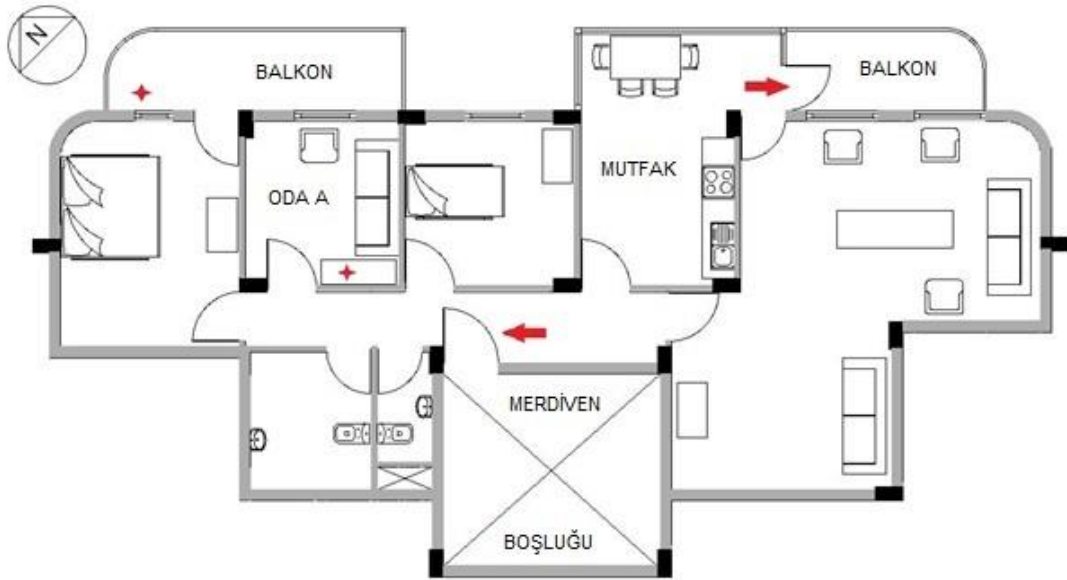
Tablo 2’de hava sızdırmazlık değerlerinin temsili karşılıkları gösterilmiştir.

Tablo 2. Hava sızdırmazlık değerlerinin temsili karşılıkları [15]

Birim	İyi	Orta	Geçirgen (Kötü)
(HSD), h ⁻¹	<0.35	0.35 ve 1 arasında	>1

3. ÇALIŞMA ALANI

Örnek çalışmanın yapıldığı konutun bulunduğu apartman bloğu İzmir-Balçova'da yer almaktadır. Bu bölgede ısıtma ve sıcak su ihtiyacı genellikle jeotermal bölgesel ısıtma sistemi ile karşılanmaktadır. Apartman bloğu 1985 yılında inşa edilmiş olup, betonarme karkas taşıyıcı sistemine sahiptir. Konut, 3. katta, kuzey-doğu yönüne bakmakta; üç oda, bir salon, mutfak, banyo, iki tuvalet ve iki balkondan oluşmaktadır. Konutun mutfak tarafında bulunan balkonun bir kısmı PVC çerçevelenme ile kapatılarak mutfak içerisine dahil edilmiştir. Çalışmanın yapıldığı konutun planı Şekil 2'de verilmiştir.

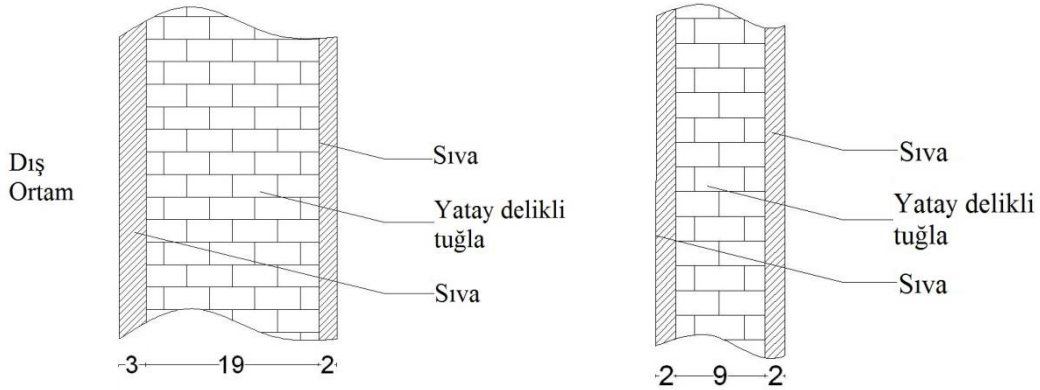
**Şekil 2.** Konut planı

İki kişinin yaşadığı konut 108 toplam alan ve 287 m³ hacme sahiptir. Konut, jeotermal enerjili sistem ile ısıtma sezonu boyunca kesintisiz olarak ısıtılmaktadır. Her bir konutun ısıtma sezonu boyunca tükettiği enerji, ısı pay ölçerler aracılığıyla belirlenmektedir. Konut sakinleri, sıcak yaz aylarını yazlık konutlarında geçirdiği için soğutma sisteminin kurulmasına ihtiyaç duymamışlardır.

Yapının dış duvarları, 3 cm dış sıva, 19 cm yatay delikli tuğla ve 2 cm iç sıvadan oluşmaktadır. İç duvarlar ise 2 cm iç ve dış sıva ve 9 cm yatay delikli tuğladan oluşmuştur. Duvar detayları ve ısı transfer katsayıları Tablo 3'te verilmiştir. Cephedeki pencere ve kapı açıklıkları ise, tek cam ve boyanmış ahşap çerçeveden yapılmıştır. Şekil 3 binanın dış ve iç duvar kesit detaylarını göstermektedir.

Tablo 3. İç ve dış duvar detayları

Duvar	Katman	Malzeme	Kalınlık (cm)	Toplam ısı transfer katsayısı (W/m ² K)
Dış Duvar	Dış katman	Sıva	3	2,3
	1	Yatay delikli tuğla	19	
	İç katman	Sıva	2	
İç Duvar	1	Alçı sıva	2	2,2
	2	Yatay delikli tuğla	9	
	3	Alçı sıva	2	



a) b)
Şekil 3. a) Dış duvar ve b) iç duvar kesiti

3.1. Hava Sızdırmazlığı

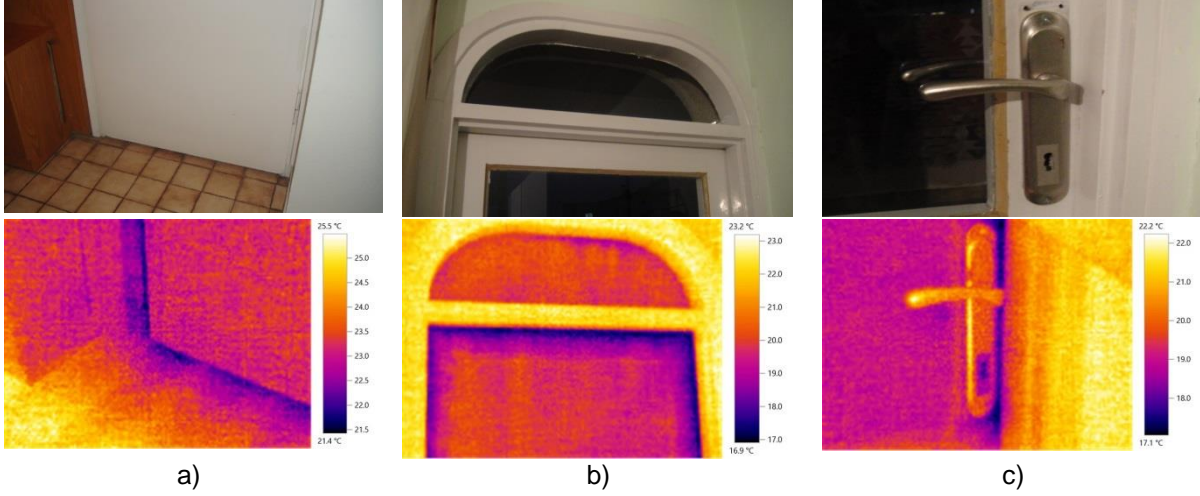
Konutun hava sızdırmazlık performansı fan basınçlandırma yöntemi kullanılarak belirlenmiştir [12]. Bu metot ile konut hacmi 50 Pa negatif basınçlandırılmıştır. Ölçüm öncesi, tüm pencereler, kapılar ve havalandırma açıklıkları kapatılmıştır, ancak iç kapılar açık bırakılmıştır. Fan basınçlandırma testi sonucunda daha güvenilir değerler elde edilebilmesi için, ölçüm iki farklı noktada gerçekleştirilmiştir. Bu noktalar Şekil 1'de "kırmızı ok" işaretiyle gösterilmiştir. Test 1, konutun balkon kapısına yerleştirilen test düzeneğiyle; belirtilen talimatlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test 2 ise konutun merdiven boşluğuna açılan giriş kapısına yerleştirilen test düzeneğiyle gerçekleştirilmiş, test boyunca apartmanın merdiven boşluğundaki bütün pencereler ve ana giriş kapısı, atmosfer basıncına en yakın değerin elde edilebilmesi amacıyla açık tutulmuştur.

Ölçümler 2 Nisan 2014 tarihinde, gerçekleştirilmiştir. Bu tarihteki rüzgar hızının, testin gerçekleştirilebilmesi için belirtilen talimatlara göre kabul edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, konutun ortalama hava sızdırmazlık değeri Test 1'e göre 0,70, Test 2'ye göre ise 0,63 h⁻¹ (HSD) olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre konutun hava sızdırmazlık değerinin orta dereceli olduğu söylenebilir. Ancak daha sonra, Test 1 sonuçları nispeten daha doğru olduğu kabul edilerek BES modelinde 0.7 HSD değeri kullanılmıştır.

3.2. Hava kayıp - kaçaklarının saptanması

Bina kabuğundaki hava kayıp kaçaklarının saptanabilmesi için termal kamera metodundan faydalanılmıştır. Termal kamera metodu uygulanmadan önce konutta yapılan incelemelerde pencere ve kapı kenarlarından muhtemel sızıntıların oluşabileceği öngörülmüştür. Daha sonra, termal kamera metodu, fan basınçlandırma testi ile aynı anda uygulanmış, iç ortam ile dış ortam arasında 50 Pa negatif basınç oluşturulmuştur. Böylece açıklıklardan giren soğuk hava termal kamera ile

görüntülenmiştir. Bu incelemenin gerçekleştirildiği anda dış ortam sıcaklığı, iç ortamdan yaklaşık 7°C daha soğuktur. Termal kamera çekimleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Hava kayıp kaçak yerleri a) konut giriş kapısı, b) balkon kapısı, c) kapı kolu.

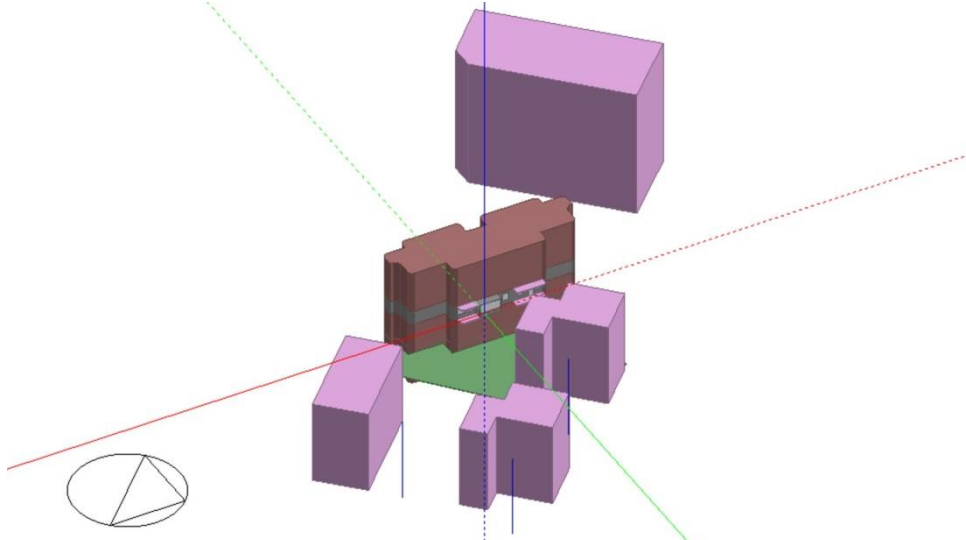
Şekil 4'te verilen termal görüntü sonuçlarının, teste başlamadan önce yapılan incelemelere göre yapılan öngörülerini doğrular nitelikte olduğu anlaşılmıştır. Böylece konuttaki kapı ve pencerelerin, genel olarak hava kaçaklarının gerçekleştiği yerler olduğu belirlenmiştir.

4.BİNA ENERJİ SİMÜLASYON (BES) MODELİ

Örnek bina, EnergyPlus hesaplama metodolojisini kullanan DesignBuilder simülasyon aracı yardımıyla modellenmiştir [16,17]. Modelleme sırasında yapılan önemli kabuller aşağıda verilmiştir:

- 1) Konut, ara katta yer aldığından ve üst ve alt katlar da benzer ısıtma düzeninde ısıtıldığından dolayı konutu çevreleyen hacimler (merdiven boşluğu hariç) adyabatik kabul edilmiştir.
- 2) Simülasyon zamanını azaltmak - çalışmayı hızlandırmak – için sadece inceleme yapılan konuta komşu balkonlar modellenmiştir.

Şekil 5 konutun BES modelini göstermektedir. Komşu binalar ve yeşil alanlar, binaların yaratmış olduğu gölgelemenin ve yeşil alanlardan gerçekleşen yüzey yansımalarının da hesaba katılması için modele dahil edilmiştir.



Şekil 5. Bina enerji simülasyonu modeli

4.1. BES Modelinin Kalibrasyonu

Güvenilirliği kanıtlanmış BES araçlarını kullanmak, BES modellerinin doğru sonuçlar vereceği anlamına gelmez. Bu nedenle modellerin kalibre edilmesi gereklidir. Literatürde, BES modellerinin kalibre edilebilmesi için çoğunlukla kullanılan yöntemin ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasına dayalı olduğu gözlemlenmiştir [6,18,19]. Bu çalışmada kalibrasyon, ölçülen iç ve dış ortam sıcaklıklarının ve gerçek enerji tüketim değerlerinin simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmasına göre yapılmıştır. BES modelinin kalibrasyonunda kullanılan metodoloji Şekil 6'da gösterilmiştir.

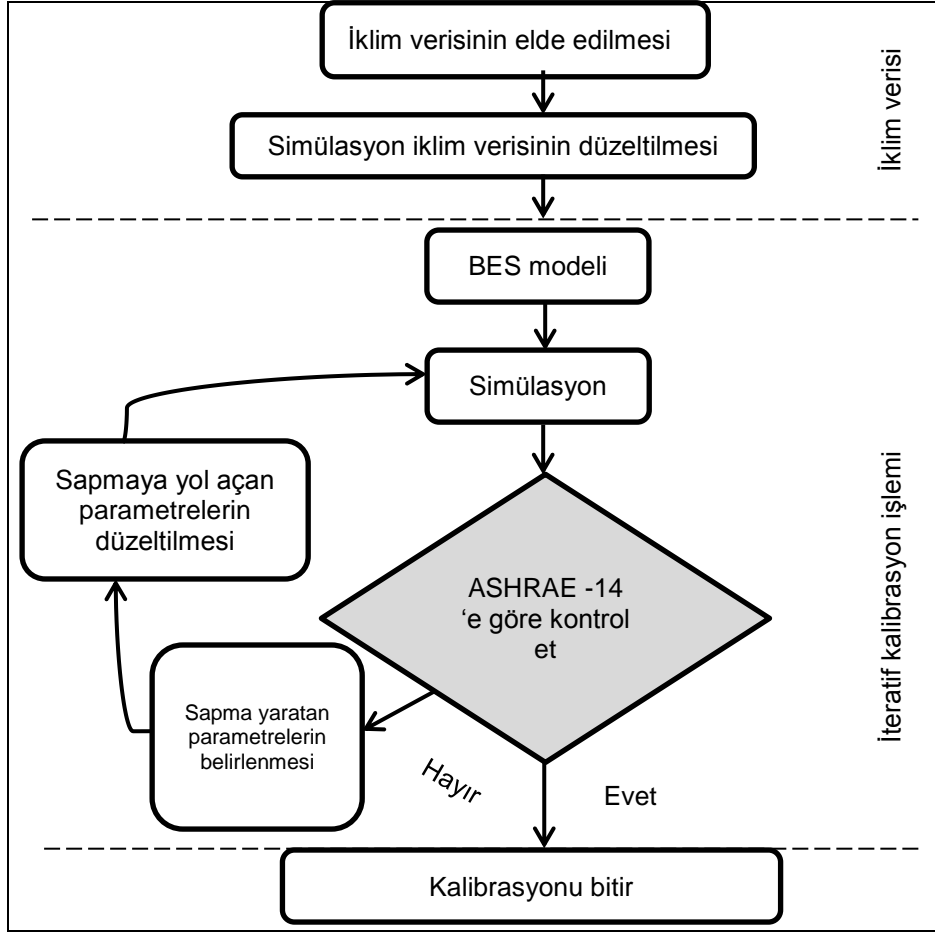
Şekil 6'ya göre ilk olarak, iç ve dış ortam sıcaklıkları belirlenen süre boyunca ölçülmeli ve sonra dış ortam sıcaklıkları simülasyon aracının iklim datası içerisine yerleştirilmelidir. İklim verisi değiştirilip BES modeli oluşturulduktan sonra, simülasyon gerçekleştirilmeli ve ilk sonuçlar alınmalıdır. Eğer sonuçlar ASHRAE-14'te belirtilen hata oranları içerisinde ise, model kalibre edilmiş sayılabilir [20]. Ancak, hata oranları yüksek ise, BES modelinde sapmaya yol açan parametreler belirlenmeli ve bu parametreler belirtilen hata oranlarından daha düşük oranlar elde edilene kadar düzeltilmelidir. Hata oranları, Eşitlik 5-7 kullanılarak hesaplanmıştır [17,21].

$$MBE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)}{n} \right) \% \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$CV(RMSE_{period}) = \left(\frac{RMSE_{period}}{A_{period}} \right) \% \quad (7)$$

Burada MBE, ortalama taraflı hata, RMSE, ortalama karekök hata, CV(RMSE) ise, varyasyon katsayısını temsil etmektedir. Ayrıca, s_i simülasyon sonucu elde edilmiş veriyi, m_i ölçülmüş veriyi, n veri sayısını, A_{period} ise ölçülen değerlerin ortalamasını belirtmektedir.

**Şekil 6.** Kalibrasyon metodolojisi

Bu çalışmada, iç ve dış ortam sıcaklıkları mini veri kaydediciler ile 10 dakikalık aralıklarla ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Dış ortam sıcaklığını ölçecek cihaz balkona, iç ortam sıcaklığını ölçecek cihaz ise odalardan bir tanesine yerleştirilmiştir. Veri kayıt cihazları, direkt güneş ışığı almayacak şekilde ve yerden yaklaşık 1.5 metre yüksekliğe monte edilmiştir. Ölçülen dış ortam sıcaklık değerleri simülasyon iklim verisi içerisinde yerleştirilmiştir. Veri kayıt cihazlarının yerleri Şekil 2'de "yıldız" işareti ile gösterilmiştir.

4.2. İyileştirme Senaryoları

BES modeli kalibre edildikten sonra, enerji verimli iyileştirme senaryoları belirlenir ve uygulanır. Bu çalışmada, hava sızdırmazlık değerinin 0.5 h^{-1} değerine iyileştirilmesi ve dış duvarların yalıtılması iyileştirme senaryosu olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu iki iyileştirmenin bileşik etkisinin görülmesi için bir başka senaryo daha uygulanmıştır. Çalışmada uygulanan iyileştirme senaryoları Tablo 4'te gösterilmiştir.

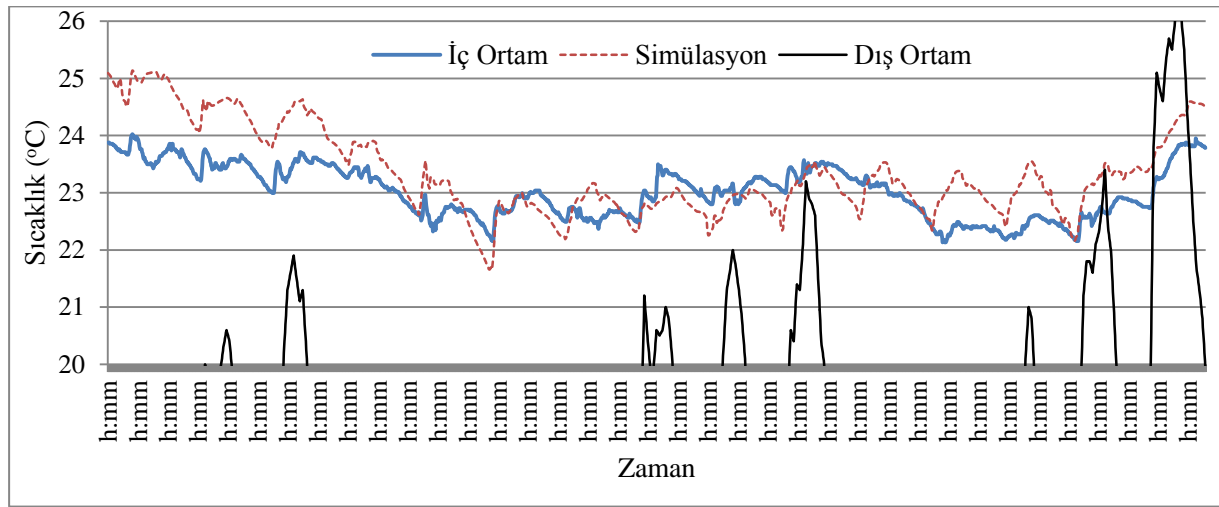
Tablo 4. Enerji verimli iyileştirme senaryoları

Senaryo	Adı	Detay	Mevcut Durum	İyileştirilmiş Durum
1	Hava sızdırmazlığı	Hava sızdırmazlık katsayısının 0.5 h^{-1} değerine iyileştirilmesi	0.70 h^{-1}	0.50 h^{-1}
2	Dış yalıtım	Dış duvarın (5 cm XPS) ile dıştan yalıtılması	$2.30 \text{ W/m}^2\text{K}$	$0.52 \text{ W/m}^2\text{K}$
3	1 ve 2'nin kombinasyonu	Senaryo 1 ve 2'nin bileşik etkisi.		

Hava sızdırmazlık değerinin iyileştirilebilmesi için, saptanmış olan kayıp-kaçak noktalarının onarılması gereklidir. Bu çalışmada daha önce saptanmış olan bulgulara göre, hava sızdırmazlık değeri kapı ve pencere kenarlarının izole edilmesi ve kapı kollarının hava geçişine izin vermeyecek şekilde bir yenisi ile değiştirilmesi sonucu iyileştirilebilir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

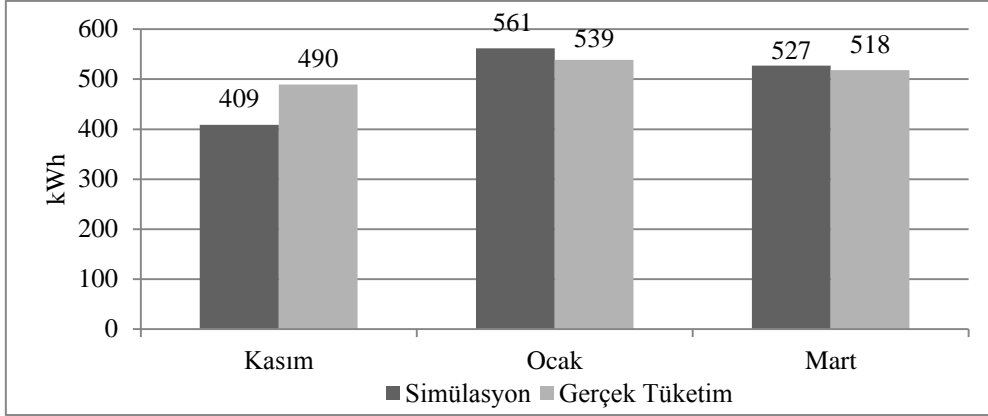
BES modelinin kalibre edilebilmesi için, iç ortama (Oda A) yerleştirilen mini veri kaydediciler ile ölçülmüş ve simülasyon sonucu elde edilmiş sıcaklıkların karşılaştırılması yöntemi kullanılmıştır. Şekil 7, bu sıcaklıkların karşılaştırılmasına dayalı olarak elde edilmiş kalibrasyon sonuçlarını göstermektedir. Karşılaştırmalar, 8-22 Nisan 2014 tarihleri arasındaki 15 günü kapsamaktadır. Şekil 7'deki kalın mavi çizgi ölçülmüş iç ortam değerlerini, kesikli kırmızı çizgi simülasyon sonucunda elde edilmiş değerlerini ve düz ince siyah çizgi ise ölçülmüş dış ortam sıcaklıklarını göstermektedir.



Şekil 7. Ölçüm ve simülasyon sıcaklıklarının karşılaştırılması (Oda A)

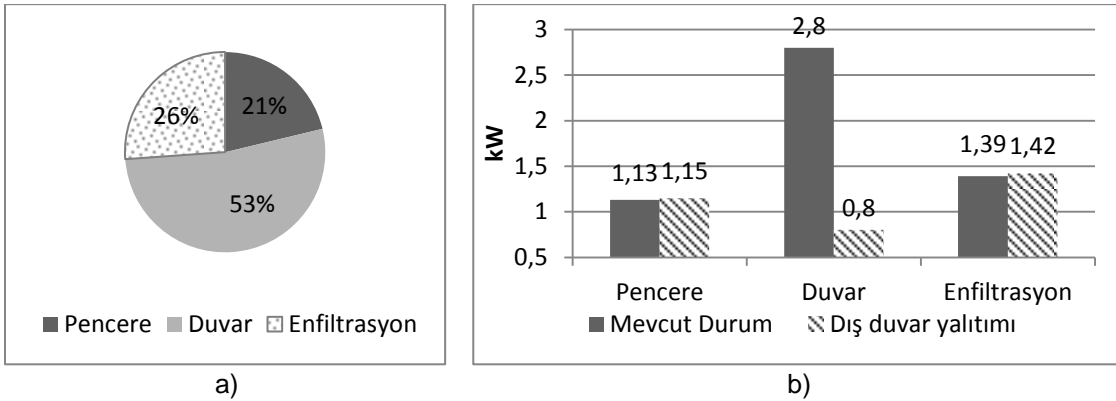
ASHRAE-14'e göre, eğer saatlik ölçümler için hesaplanan MBE değerleri $\pm\%10$ 'un, CV(RMSE) değerleri ise $\pm\%30$ 'un içerisindeyse BES modeli kalibre edilmiş olarak kabul edilebilir. Şekil 7'ye göre simülasyon sonuçları ile iç ortam sıcaklıkları birbiriyle benzer bir eğilim göstermektedir. Ayrıca, bu çalışmadaki MBE değeri $\%1$ ve CV(RMSE) değeri ise $\%2.2$ olarak hesaplanmıştır. Böylece, BES modeli kalibre edilmiştir denilebilir.

Şekil 8'de mekan ısıtma amaçlı enerji tüketiminin simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmasına dayalı kalibrasyon sonuçları aylık olarak gösterilmiştir. Konutun enerji tüketimini gösteren faturalardan yalnızca 2013 Kasım, 2014 Ocak ve 2014 Mart aylarına erişilebildiğinden, kalibrasyon bu değerler dikkate alınarak yapılmıştır. Sonuçlar, sapmaların 2013 Kasım için $\%16$, 2014 Ocak için $\%4$ ve 2014 Mart ayı için $\%2$ olduğunu göstermektedir. Buna göre yıllık mekan ısıtma amaçlı enerji tüketimi 3178 kWh olarak tahmin edilmiştir.



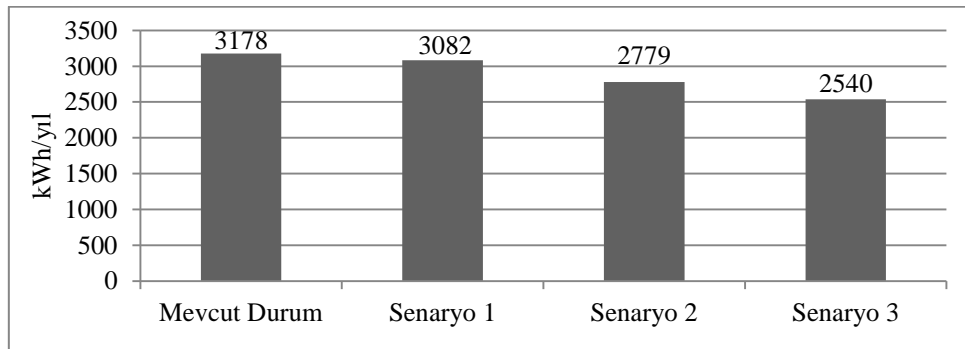
Şekil 8. Simülasyon ve gerçek tüketim değerlerinin (mekan ısıtma) aylık bazda karşılaştırılması.

Şekil 9a konutun mevcut durumdaki ısı kayıplarının yüzdesel dağılımını göstermektedir. Buna göre ısı kayıplarının %21'i pencerelerden, %26'sı enfiltrasyon yoluyla ve %53'ü de duvarlardan meydana gelmektedir. Senaryo 1 sonrasında bu dağılımlar pencereler için %22, enfiltrasyon %24 ve duvarlar %54 seviyesindedir. Şekil 9b senaryo 2 sonrası ısı kayıplarını göstermektedir. Buna göre duvarların dıştan yalıtılması, pencerelerden ve enfiltrasyon yoluyla gerçekleşen ısı kayıplarını artırmıştır. Senaryo 2 sonrasında bu oranlar pencereler için %34, enfiltrasyon için %42 ve duvarlar için %24 olarak dağılmıştır. Senaryo 3 sonucunda ise bu oranlar, pencereler için %35, enfiltrasyon için %40 ve duvarlar için %25 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. a) Mevcut durumdaki ısı kayıpları yüzdesi, b) Senaryo 2 sonrası ısı kayıpları (kW)

Şekil 10 iyileştirme senaryolarının yıllık enerji tüketimi bazında karşılaştırmasını göstermektedir. Buna göre, hava sızdırmazlık değerinin 0.7 h^{-1} 'den 0.5 h^{-1} değerine indirilmesi (Senaryo 1) yıllık mekan ısıtma amaçlı enerji tüketimini %3, dış duvarların 5 cm XPS ile dıştan yalıtılması (Senaryo 2) %13, Senaryo 3 (Senaryo 1 ve 2'nin bir arada uygulanması) ise yaklaşık %20 düşürmüştür.



Şekil 10. İyileştirme senaryolarının karşılaştırılması.

YORUMLAR

Bu çalışmada, Türkiye'nin Ege Bölgesi'nde yer alan çok katlı apartman bloğunda yer alan bir konutun hava sızdırmazlık değerinin değişiminin konutun toplam ısıtma enerjisi tüketimine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla dairenin hava sızdırmazlık değeri fan basınçlandırma yöntemiyle ölçülmüştür. Ayrıca çalışmada duvarların dıştan yalıtılmasının da mekan ısıtma amaçlı enerji tüketimine etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre aşağıdaki yargılara varılabilir:

- 1) Hava sızdırmazlığı, enerji tüketiminin azaltılması üzerine dıştan yalıtıma kıyasla daha az etkilidir.
- 2) Pencereler ve kapılar, daha iyi bir ısıtma performansı elde edilebilmesi için izole edilmelidir.
- 3) BES modelleri, daha iyi sonuçlar elde edebilmek için kalibre edilmelidir. Bu çalışmada kalibrasyon işlemi tek bir oda hacmi dikkate alınarak yapılmıştır. BES modelinin gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesi isteniyorsa, kalibrasyon işleminin konuttaki tüm hacimler ele alınarak yapılması daha doğru olur.
- 4) Bu çalışmada yapılan kalibrasyon işleminde yalnızca sıcaklık dikkate alınmıştır. Daha fazla iklim parametresinin dikkate alınması gerçeğe daha yakın sonuçlar verecektir.
- 5) Sıcaklığa bağlı olarak yapılan kalibrasyon işlemi daha uzun süreleri kapsmalıdır. Bu çalışmada 15 günlük ölçüm sonuçları kullanılmıştır, ancak benzer çalışmalarda en az bir yıllık ölçümler yapılması daha doğru sonuçlar verecektir.
- 6) Benzer şekilde daha fazla sayıda aylık (eğer mümkünse günlük) enerji tüketim değerleri karşılaştırılmasına dayalı kalibrasyon işlemi, daha iyi tahminler verecektir. Bu çalışmada ısıtma sistemi, yalnızca üç aya ait mekan ısıtma amaçlı enerji tüketimi dikkate alınarak kalibre edilmiş ve gerçek tüketime göre en yüksek hata payı Kasım ayı için %16 olarak hesaplanmıştır.
- 7) İyileştirmelerin bileşik etkileri iyi değerlendirilmelidir. Çünkü iyileştirmelerin tekil etkilerinin toplamı bileşik etkisine eşit değildir. Bunun nedeni her bir iyileştirmenin diğerini etkilemesi, birbirisiyle etkileşim içinde olmasındandır.
- 8) Konutların hava sızdırmazlık değeri mutlaka belirlenmelidir. Türkiye'deki konutlarda mekanik havalandırma sisteminin yaygın olmadığı düşünüldüğünde, hava sızdırmazlık değerinin bilinmesi doğal havalandırma ve enfiltrasyon ile oluşan ısı kayıp/kazançlarının belirlenmesi için önemlidir.
- 9) Dış duvar yalıtımı yaptırmadan önce hava sızdırmazlık değerinin elde edilmesi için gerekli ölçüm ve denetimler yapılmalıdır.
- 10) Benzer çalışmalarda, dış duvarların toplam ısı transfer katsayısı deneysel ve/veya analitik yöntemler kullanılarak doğru bir şekilde belirlenmelidir. Bu çalışmada duvarların toplam ısı transfer katsayısı, sadece BES aracı kullanılarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] World Energy Council (2012), National Committee of Turkey, Energy Report.
- [2] MENR (2011). Ministry of Energy and Natural Resources, Turkey.
- [3] TS825. (2008). "Turkish Standard - Thermal Insulation Requirements for Buildings".
- [4] Directive on Building Energy Performance, B. E. P. (2008). Number: 27075. *Official Gazette, December*.
- [5] TUIK (2014). Turkish Statistical Institute.
- [6] Chen, S. Levine, M.D. Li, H. Yowargna, P. Xie, L. (2012). "Measured air tightness performance of residential buildings in North China and its influence on district space heating energy use." *Energy and Buildings* 51, pp. 157 – 164.
- [7] Kalamees, T. (2007) "Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia" *Building and Environment*. 42, pp. 2369 - 2377.
- [8] Villi, G., Peretti, C., Graci, S., & De Carli, M. (2013). Building leakage analysis and infiltration modelling for an Italian multi-family building. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(2), 98-118.



- [9] Coxon, R. (2013). "Research into the effect of improving airtightness in a typical UK dwelling." The REHVA European HVAC Journal, 50(1) pp. 24 – 27.
- [10] Mattsson, Magnus, et al. "Methods to Identify Air Leakages in the Building Envelope of Churches." *EEHB 2011: Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings*, pp.129-138, (2011).
- [11] Cooper, E., Etheridge, D., Mattson, M., Wigö, H. "Pressure Pulse Technique – a New Method for Measuring the Leakage of the Building Envelope of Churches." *EEHB 2011: Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings*, pp. 205-2012, (2011).
- [12] Minneapolis (2012). Blower Door Operation Manual for Model 3 and Model 4 Systems. Retrieved from: http://www.energyconservatory.com/sites/default/files/documents/mod_3-4_dg700_new_flow_rings_cr_tpt_no_fr_switch_manual_ce_0.pdf
- [13] Sherman, Max H., and Wanyu R. Chan. "Building air tightness: research and practice." *Building Ventilation: the state of the Art* (2006): 137-162.
- [14] Meier, Alan, 1986. "Infiltration: Just ACH50 Divided By 20?" *Energy Auditor and Retrofitter* (now Home Energy), pp 16-19, July/August (1986).
- [15] Van der Meer, B. (2001). Blower Door Testing. *The Pennsylvania Housing Research Center*.
- [16] EnergyPlus Software Version 8.1. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm , (2014).
- [17] DesignBuilder Software Version 3. <http://www.designbuilder.co.uk/> , (2014).
- [18] Kandil, A. E., Love, J. A. (2014). Signature analysis calibration of a school energy model using hourly data. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(5), 326-345.
- [19] Koranteng, C., Mahdavi, A. (2011). An investigation into the thermal performance of office buildings in Ghana. *Energy and Buildings*, 43(2), 555-563.
- [20] Guideline, A. S. H. R. A. E. (2002). Guideline 14-2002, Measurement of Energy and Demand Savings. *American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia*.
- [21] Soebarto, V. I. (1997, September). Calibration of hourly energy simulations using hourly monitored data and monthly utility records for two case study buildings. In *Proceedings of Building Simulation* (Vol. 97, pp. 411-419).

ÖZGEÇMİŞLER

Cem Doğan ŞAHİN

1987 yılı Kayseri doğumludur. Lisans öğrenimini Süleyman Demirel Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde 2009 yılında tamamlamıştır. 2010 yılında yurtdışında 1 yıl dil eğitimi gördükten sonra 2011 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'na başlamış 2013 yılı sonunda bu programı başarı ile tamamlamıştır. 2014 yılında İYTE Makina Mühendisliği'nde doktora eğitimine başlamış ve aynı bölümde 2012 yılından bu yana Araştırma Görevlisi olarak, binalarda ve sanayilerde enerji verimliliği üzerine çalışmalarını sürdürmektedir. Ayrıca 2013 yılında enerji yönetici sertifikasını almaya hak kazanmıştır.

Zeynep DURMUŞ ARSAN

1971 yılında İzmir doğumludur. 1992 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Bölümü'nden mezun olmuştur. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü'nde yürüttüğü yüksek lisans çalışmasını 1997 yılında tamamlamasının ardından, 'Türkiye'de Sürdürülebilir Mimari' konulu Doktora çalışmasını, 2004 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde tamamlamıştır. 2005 yılında Belçika, Leuven Katolik Üniversitesi, Sürdürülebilir İnsan Yerleşimleri Merkezi ve 2011 yılında Avusturya, Viyana Teknik Üniversitesi, Yapı Fiziği ve Yapı Ekolojisi Bölümü'nde doktora sonrası araştırmalarını yürütmüştür. 2006'dan bu yana, İYTE Mimarlık Fakültesi, Merkezi Yapı Fiziği Laboratuvarı, İklimlendirme Birimi kurucu ve yürütücülüğü yanında, yerel sürdürülebilirlik ve mimari, sürdürülebilir bina tasarımı, bina enerji performans simülasyonları konularında çalışmalar yürütmektedir. Halen İYTE Mimarlık Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.

**Gülden GÖKÇEN AKKURT**

1968 yılı İzmir doğumludur. 1990 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nden 1992 yılında Yüksek Mühendis, 2000 yılında Doktor unvanı almıştır. 2000 yılından bu yana İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2004-2007 yıllarında İYTE Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanlığı, 2007-2010 yıllarında İYTE Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi Müdürlüğü görevini yürütmüştür. Ocak 2011'den bu yana İYTE Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanlığı'nı sürdürmektedir. Jeotermal elektrik santrallerinde verim artırma yöntemleri, jeotermal enerji teknolojileri ile enerji verimliliği ve binalarda enerji performansı konularında çalışmaktadır.