



Makale / Research Paper

Binalarda Isı Köprüsü Etkisinin 3 Boyutlu Analizi

Burak TÜRKAN¹, Nagihan ETEMOĞLU¹, Akın Burak ETEMOĞLU*¹

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle, 16059
Bursa/TÜRKİYE
burakt@uludag.edu.tr

Received/Geliş: 09.02.2019

Accepted/Kabul: 14.06.2019

Öz: Enerji tasarrufu konusunun gelecekte artan nüfus ile birlikte dünyada önemli bir etkiye sahip olacağı düşünülmektedir. Özellikle binalarda yalıtım ile sağlanan enerji tasarrufu miktarlarının önemli derecede olması bu konuya olan ilgiyi daha da artırmıştır. Bu çalışmada Türkiye’de son 90 yılda her şehirde görülen en düşük dış hava sıcaklık değerlerinin, iç duvar yüzeyi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İki kat arası yapı yalıtımlı ve yalıtımsız olarak 3 boyutlu modellenerek Comsol Multiphysics programı ile analizler yapılmıştır. Yapıda oluşabilecek ısı köprüsü etkisi ile birlikte iç yüzey sıcaklık değerleri, yoğunlaşma, ısıl konfor ve sıcaklık faktörü parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yalıtımın özellikle daha düşük dış hava sıcaklıklarında önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte yalıtımlı duvar için sıcaklık faktörü değeri 0.87 olarak elde edilmiştir. Ayrıca yapılan maliyet analizi sonuçlarına göre yalıtımlı durumda yıllık enerji tüketim bedelinin yalıtımsız duruma göre %75.3 daha az olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Isı köprüsü, ısı yalıtımı, yüzey sıcaklığı, sıcaklık faktörü, nümerik çalışma.

3D Analysis of Thermal Bridge Effect in Buildings

Abstract: Together with the increasing population in the future, it is thought that energy saving in the world will have a significant effect. The fact that the amount of energy saving provided by the insulation in the buildings has increased significantly. In this study, the effect on the internal wall surface of the lowest outside temperatures seen in every city the last 90 years in Turkey were investigated. Insulated and non-insulated structure between two floors was analyzed by Comsol Multiphysics program as 3D model. The internal surface temperature values, condensation, thermal comfort and temperature factor parameters were calculated together with the thermal bridge effect. According to the results, it was seen that the insulation had an important effect especially at lower outdoor temperatures. However, the temperature factor value for the insulated wall was 0.87. In addition, according to the results of the cost analysis, it was found that the annual energy consumption cost in insulated condition is 75.3% less than the uninsulated condition.

Keywords: Thermal bridge, heat insulation, surface temperature, temperature factor, numerical study.

1. Giriş

Binaların yapı iskeletlerinde bulunan betonarme kolon ve kirişler yüksek ısı iletkenliğine sahip olduğu için bu kısımların ısı geçirgenliği daha fazla olmaktadır. Bu elemanlar ısının soğuk tarafa daha yoğun iletildiği kısımlardır. Isıl dengenin korunamadığı bu yapılar ısı köprüsü olarak adlandırılmaktadır. Yazın bu kısımlarda sıcaklık değerleri artarken kışın azalmaktadır. Bu elemanlarda oluşan ısı kayıpları sonucu iç yüzeylerinde nemlenme ve küf oluşumu meydana gelmektedir. İç yüzeylerde oluşan terleme ve küf oluşumu bina yapısının ömrünü olumsuz

Bu makaleye atf yapmak için

Turkan, B., Etemoglu, N., Etemoglu, A.B., “Binalarda Isı Köprüsü Etkisinin 3 Boyutlu Analizi” El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(3); 414-427.

How to cite this article

Turkan, B., Etemoglu, N., Etemoglu, A.B., “3D Analysis of Thermal Bridge Effect in Buildings” El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2019, 6(3); 414-427

etkilemektedir. Ayrıca ısı köprüleri iç ortam ısı konforunu da olumsuz etkileyerek enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda yalıtımsız durumda dış yapıda gerilme ve çatlamalarda oluşmaktadır. Bu olumsuz etkileri azaltmak için dış yapı kabuklarında yalıtım uygulamaları yapılmaktadır ki böylelikle iç ortamdaki duvar yüzey sıcaklıklarının yüksek tutulması sağlanarak terlemenin önüne geçilmesi hedeflenmektedir [1,2].

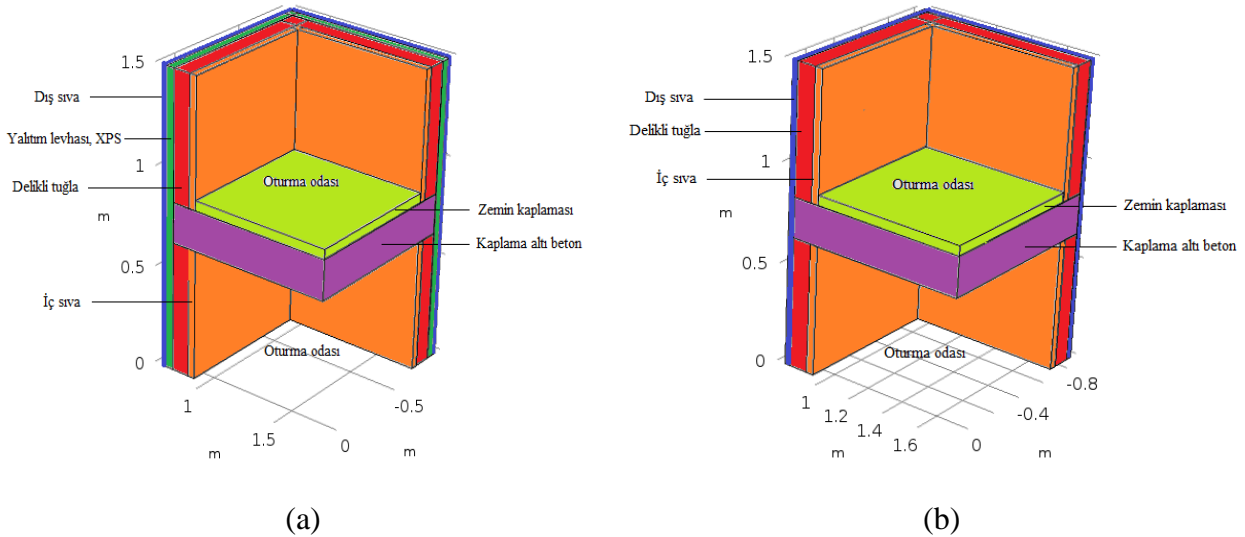
İnsanların zamanlarının büyük çoğunluğunu kapalı alanlarda geçirdiği düşünüldüğü takdirde buldukları ortamın ısı konforunun sağlanması kişilerin sağlığı açısından önemli olacaktır. Isıl konforun sağlanmaması insan sağlığına olumsuz etkisi yanında yakıt tüketiminin artmasından dolayı ekonomik olarak da zararlı olmaktadır [3]. Yapılacak yalıtım ile bu zararlı etkiler ortadan kaldırılırken aynı zamanda yapılan yakıt tasarrufu ile yalıtım maliyetinin kısa sürede amorti edeceği değerlendirilmektedir. Daha sonraki yıllarda ise bu kazanç tasarrufa dönüşebilecektir.

Literatürde ısı köprüsü, yalıtım performansını artırıcı çalışmalar ve optimum kalınlık problemleri çoğunlukla nümerik olarak incelenmiştir. Binalarda yapılan yalıtım ısı kaybını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmaların birçoğunda yalıtım etkisinin deneysel ve nümerik olarak incelendiği görülmüştür. Karabulut ve ark. [4] yaptıkları çalışmada farklı şekillerde yalıtımlı balkon uzantılı ve dıştan yalıtımlı ara kat döşemelerine ait sıcaklık ve ısı akısı değişimlerini nümerik olarak incelemişlerdir. 5 cm yalıtım kalınlığı, üst kat 20°C ve alt kat 14°C olarak analizleri yapmışlardır. En fazla ısı transferinin kolon giriş bölgesinde olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı zamanda yalıtımsız duvarda gerçekleşen ısı kaybının yalıtımlı duvardan %85 daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Angelis and Serra [5] metal çerçeveli hafif duvarlardaki ısı yalıtım performansının değerlendirilmesi için sonlu eleman yazılımı kullanmışlardır. Ayrıca farklı çelik konstrüksiyona sahip yapılar üzerinde ısı köprüsü etkisini incelemişlerdir. Song ve ark. [6] yaptıkları çalışmada çelik kafes metal panel duvar sistemlerinde ısı köprüsünü azaltmak için alternatif bir çözüm olarak metal panelin kenarlarındaki alüminyum uzunluğunun azaltılması ve poliüretan yalıtım malzemesi eklenmesi uygulamasını yapmışlardır. Yapılan bu uygulama ile yıllık ısıtma ve soğutma enerji maliyetlerinin %68 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Capozzoli ve ark. [7] ısı köprülerinin analizinde non-linear regresyon modeli geliştirmiş ve Anova yöntemi kullanarak çözüm sonuçlarını elde etmişlerdir. Ibrahim ve ark. [8] yaptıkları çalışmada ısı köprüsü etkilerini incelemek için Matlab yazılımında geliştirilen 2 boyutlu ısı transferi denklemi ve EnergyPlus programını kullanmışlardır. İç ve dış yalıtım yapılması durumunda oluşan sonuçları karşılaştırmışlardır. Betonarme kolon giriş yapılarında yüksek ısı iletkenliğine sahip elemanlar kullanıldığı takdirde ısı köprüsü oluşmaktadır. Dolayısı ile bu yapılar ısı ve nem korunumu açısından oldukça zayıftır. Bina inşa edilmeden önce ısı köprüsünün oluşup oluşmayacağı bulunan iklim şartlarına göre değerlendirilmelidir. Asdrubali ve ark. [9] çalışmalarında binalarda oluşan ısı köprüsü tiplerinin analizini yapmak için bir (IR termografi) önermişlerdir. Bu yöntem ile ısı köprülerinin analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Nümerik ve deneysel çalışmalar ile bu yöntemin doğrulamasını yapmışlardır. Yapıdan gerçekleşen 4684 W toplam ısı kaybının %13.4'ünün ısı köprüsünden gerçekleştiğini ve ısı köprüsünün etkisinin azaltılması ile toplam ısı kaybının 4307 W'a azaldığını ve bu durumda ısı köprüsünden olan ısı kaybının ise %8.8 olduğunu göstermişlerdir. Isı kaybını artıran ısı köprülerinin engellenmesi için yalıtımın dış veya iç duvara yapılıp yapılmaması gerektiği hakkında fikir sahibi olunması gerekmektedir. Dilmaç ve ark. [10] dıştan ve içten yalıtım uygulanması sonucu giriş ve döşemelerde oluşan ısı köprüsünün binanın ısı performansına olan etkisini nümerik olarak araştırmışlardır. Giriş ve döşemelerde oluşan ısı köprüsüne ait sıcaklık değişimlerini farklı yalıtım durumları için karşılaştırmışlardır. Yalıtımsız, dıştan yalıtım ve içten yalıtım durumları için iç yüzeyin en düşük sıcaklık değerlerini sırası ile 16°C, 19°C ve 17°C olarak hesaplamışlardır. Buna göre dıştan yalıtımın iç ortamda meydana gelen ısı kaybını daha fazla azalttığı görülmektedir. Yalıtım yapıldığı takdirde ısı köprüleri önlenmektedir. Bu durumda enerji israfı da önlenecektir. Theodosiou ve Papadopoulos [11] ise enerji tüketimi üzerinde ısı köprülerinin etkisini araştırmışlardır. Isı köprülerinin oluşumunu en aza indirecek şekilde mevcut binaların tasarlanması gerektiğini vurgulamışlardır.

Bu çalışma kapsamında iki kat arası yapı 3 boyutlu olarak modellenerek iç yüzeyde oluşabilecek maksimum ve minimum sıcaklık değerleri Comsol Multiphysics programı ile nümerik olarak araştırılmıştır. Türkiye’de bulunan bütün illere ait son 90 yılda görülen en düşük dış hava sıcaklık değerleri esas alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Dış hava sıcaklıkları 10°C , 5°C , 0°C , -5°C , -10°C , -15°C , -20°C , -25°C , -30°C , -35°C , -40°C , -45°C olarak alınmıştır. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumda ara kattaki yapının sıcaklık değişimi incelenmiştir. Ayrıca iç yüzeyde yoğuşma oluşup oluşmayacağı da kontrol edilmiştir. Daha sonra yalıtımlı ve yalıtımsız durum için iç ortam ısı konfor şartları ve ısı köprüsü oluşup oluşmayacağı araştırılmıştır. Bununla birlikte çalışmada yapılan kabuller altında tasarladığımız ara kattaki yapı için sıcaklık faktörü değeri hesaplanmıştır. Son olarak yalıtımın enerji tasarrufu üzerindeki etkisini incelemek için son 2018 yılına ait Türkiye’deki 7 bölgenin 6 aylık ortalama en düşük hava sıcaklık değerleri kullanılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Herhangi çok katlı bir binanın ara katındaki yapının modeli Şekil 1’de verilmiştir. Oturma odasının sıcaklığı 22°C , iç ortam ısı taşınım katsayısı $8.2 \text{ W/m}^2\text{K}$, dış ortam ısı taşınım katsayısı $23.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak alınmıştır [12]. Her şehir için 1927-2017 yılları arasında ölçülen en düşük sıcaklık değerleri Tablo 1’de verilmiştir [13]. Şekil 2’de ise 1970 ve 2017 yılları arasında ocak ayı en düşük ortalama sıcaklık değerleri verilmiştir [14].



Şekil 1. Analizde kullanılan ara kat yapı modelleri (a-yalıtımlı, b-yalıtımsız)

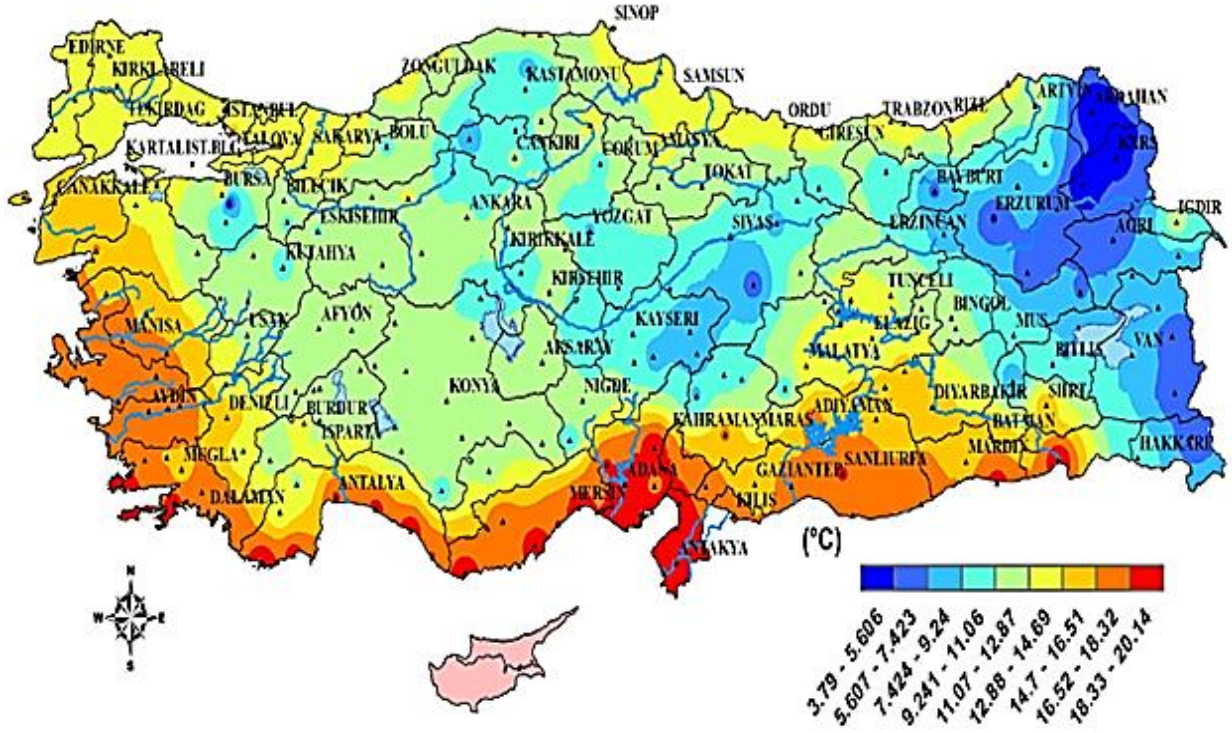
Şekil 1’de verilen modeller (a) yalıtımlı model ve (b) yalıtımsız modeldir. Ara kat yapısında kullanılan malzemeler, kalınlıkları ve ısı iletim katsayıları ise Tablo 2’de verilmiştir [4,15]. Yalıtım malzemesi olarak nemden etkilenmeyen ve bünyesine su almayan polistren hammaddesine sahip XPS levhası seçilmiştir.

Tablo 1. Türkiye’de bulunan şehirlere ait 1927 – 2017 yılları arasında ölçülen en düşük sıcaklık değerleri

| Şehir | Dış sıcaklık | Şehir | Dış sıcaklık | Şehir | Dış sıcaklık |
|----------------|--------------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| Ankara | -24.9°C | Edirne | -19.5°C | Malatya | -25.1°C |
| Adana | -8.1°C | Elâzığ | -22.6°C | Manisa | -17.5°C |
| Adıyaman | -14.4°C | Erzincan | -32.5°C | Mardin | -14°C |
| Afyonkarahisar | -27.2°C | Erzurum | -37.2°C | Mersin | -6.6°C |
| Ağrı | -45.6°C | Eskişehir | -27.8°C | Muğla | -12.6°C |
| Aksaray | -29°C | Gaziantep | -17.5°C | Muş | -34.4°C |
| Amasya | -21°C | Giresun | -9.8°C | Nevşehir | -23.6°C |
| Antalya | -4.6°C | Gümüşhane | -25.7°C | Niğde | -27°C |
| Ardahan | -39.8°C | Hakkâri | -23.4°C | Ordu | -7.2°C |
| Artvin | -16.1°C | Hatay | -14.6°C | Osmaniye | -8.5°C |
| Aydın | -11°C | Iğdır | -30.3°C | Rize | -7°C |
| Balıkesir | -18.8°C | Isparta | -21°C | Sakarya | -14.5°C |
| Bartın | -18.6°C | İstanbul | -16.1°C | Samsun | -9.8°C |
| Batman | -24°C | İzmir | -8.2°C | Siirt | -19.3°C |
| Bayburt | -31.3°C | Kahramanmaraş | -9.6°C | Sinop | -8.4°C |
| Bilecik | -16°C | Karabük | -15.1°C | Sivas | -34.6°C |
| Bingöl | -25.1°C | Karaman | -28°C | Şanlıurfa | -12.4°C |
| Bitlis | -24.1°C | Kars | -37°C | Şırnak | -14.5°C |
| Bolu | -34°C | Kastamonu | -26.9°C | Tekirdağ | -13.5°C |
| Burdur | -16.7°C | Kayseri | -32.5°C | Tokat | -23.4°C |
| Bursa | -25.7°C | Kırıkkale | -22.4°C | Trabzon | -7.4°C |
| Çanakkale | -11.5°C | Kırklareli | -15.8°C | Tunceli | -30.3°C |
| Çankırı | -25°C | Kırşehir | -28°C | Uşak | -19.9°C |
| Çorum | -27.2°C | Kilis | -12°C | Van | -28.7°C |
| Denizli | -11.4°C | Kocaeli | -18°C | Yalova | -11°C |
| Diyarbakır | -24.2°C | Konya | -28.2°C | Yozgat | -24.4°C |
| Düzce | -20.5°C | Kütahya | -28.1°C | Zonguldak | -8°C |

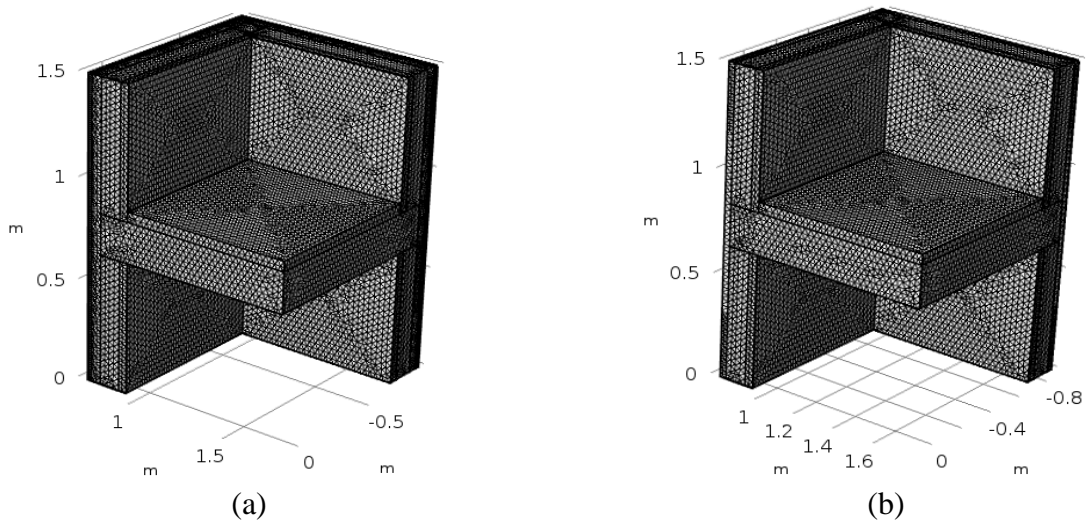
Tablo 2. Yapı malzemelerinin özellikleri

| Malzeme | Isı iletim katsayısı (W/mK) | Kalınlık (cm) |
|-----------------------|-----------------------------|---------------|
| Düsey delikli tuğla | 0.32 | 10 |
| İç sıva | 0.70 | 4 |
| Dış sıva | 1.60 | 2 |
| Yalıtım levhası (XPS) | 0.03 | 5 |
| Zemin kaplaması | 0.20 | 5 |
| Kaplama altı beton | 2.50 | 20 |



Şekil 2. Türkiye'nin 1970-2017 yılları arasında ocak ayı ortalama en düşük sıcaklık değerleri

Yapı elemanı malzemeleri TS EN 771-1, TS 11989 EN 13164 ve TS 500 standartlarına uygun olarak seçilmiştir [15]. Modelin yalıtımlı (a) ve yalıtımsız (b) haldeki ağ yapısı Şekil 3'te verilmiştir. Modelde kullanılan ağ yapısı olarak programdaki en yüksek kalite (extremely mesh) seçilmiştir. Analizde kullanılan modellerde toplamda yalıtımlı ve yalıtımsız yapıda 495998 ve 334716 üçgen ağ yapısı bulunmaktadır. Analizlerde sonlu eleman metodu kullanılan Comsol Multiphysics programında [16] çözüm yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde her bir ağ yapısı için sınır şartları da göz önüne alınarak ayrı ayrı çözüm elde edilir. Ağ yapısının sayısı çözüm süresini etkiler. Programda analiz süresi dikkate alınarak en yüksek ağ kalitesinde yakınsama kriteri 0.001 seçilerek çözümlene gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sırasında hesaplanan son iki sıcaklık değeri arasındaki fark 0.001 tolerans değerine ulaşana kadar analizlere devam edilmiştir. Bu yakınsama kriterine ulaşıldığı anda analiz sonlandırılmıştır.



Şekil 3. Modele ait ağ yapıları (a-yalıtımlı, b-yalıtımsız)

2.1. Matematik Model

İki ortam arasında sıcaklık farkı varsa ısı transferi yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru gerçekleşir. Şekil 3’de verilen yapıda ısı transferi iç ortam sıcaklığından iç yüzey duvarlarına taşınım ile gerçekleşirken, duvar içerisinden dış yüzeye iletim ile transfer edilmektedir. Daha sonra dış yüzeye gelen ısı dış ortama taşınım ile aktarılmaktadır. Isı transferi için Fourier yasası kullanılarak katı içerisindeki enerji dengesi matematiksel olarak ifade edilebilmektedir [16].

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \nabla(-k\nabla T) = 0 \quad (1)$$

Burada; ρ , yoğunluk (kg/m^3); c_p , özgül ısı (kJ/kgK); k , ısı iletim katsayısı (W/mK); T , sıcaklık(K) ve t , süre (saniye)’dir. Yapılan çalışma sürekli rejimde olduğu için zamana bağlı terimler sadeleşerek ısı transferi denklemi;

$$\nabla(-k\nabla T) = 0 \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir.

2.1.1. Sınır Koşulları

İç ortamda bulunan yüzey için sınır şartı;

$$h_i (T_{iy} - T_i) = k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Oturma odasının iç taban yüzeyi için sınır şartı ise eşitlik (4)’te verilmiştir.

$$h_i (T_i - T_{iy}) = k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (4)$$

Aynı zamanda oturma odasının iç yüzey duvarından dış ortam yüzeyine iletimle transfer edilen ısı havaya taşınım ile aktarılmaktadır. Yapının dış duvar yüzeyi için sınır şartı;

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = h_d (T_{dy} - T_\infty) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem 4’te, h_i iç ortam ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2\text{K}$) ve denklem 5’te, h_d dış ortam ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2\text{K}$), k ısı iletim katsayısı (W/mK), T_{iy} iç yüzey sıcaklığı ($^\circ\text{C}$), T_{dy} dış yüzey sıcaklığı ($^\circ\text{C}$), T_i iç ortam sıcaklığı ($^\circ\text{C}$), T_∞ dış ortam sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)’dır [16].

2.1.2. Sıcaklık Faktörü

Kızıl ötesi termografiyle ısı köprülerinin tespit edilebilmesi için ısı iletkenliğinin kritik seviyesi bilgisi gereklidir. Bu sebepten dolayı uluslararası enerji ajansı ısı köprülerinin tespiti için sıcaklık faktörü yöntemini geliştirmişlerdir. Bu kritik sıcaklık faktörü değeri her ülkenin kendi tasarım kriterlerine bırakılmıştır. Bu değer literatürde aynı zamanda sıcaklık oranı, sıcaklık indeksi ve yoğunlaşma direnci olarak da ifade edilmektedir [17]. Bina yapısı için hesaplanan sıcaklık faktörü değeri o ülke için daha önceden belirlenen kritik sıcaklık faktörü değerinin üzerinde ise iç ortam yüzeyinde nem ve küf oluşumu engellenmiş olur. Böylece ısı köprüsünün oluşumu da gözlenmez.

Sıcaklık faktörü değeri bize iç yüzeyde yoğunlaşma ve ısı köprüsü oluşmaması için iç ortam yüzey sıcaklık değerinin kaç derecede tutulması gerektiği hakkında bilgi vermektedir. Binamızı inşa ederken bu kritik bilgiyi dikkate alarak yapı malzemelerini ve yalıtım kalınlığını doğru seçmemiz gerekmektedir.

Sıcaklık faktörü (f_{Rsi}) iç yüzey sıcaklığı (T_{iy}) ile iç (T_i) ve dış (T_∞) ortam havası sıcaklıklarına bağlıdır. Bu değer;

$$f_{Rsi} = \frac{T_{iy} - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir [17].

2.2. Maliyet Hesabı

Konutların ısıtılmasında enerji tüketim maliyetinin bulunması için öncelikle binanın yalıtımlı ve yalıtımsız durumunda tüketeceği enerji miktarları hesaplanır. Daha sonra elde edilen değer yıllık yakıt tüketim süresi ve birim enerji tüketim fiyatı ile çarpılarak yıllık enerji maliyeti hesaplanır. Bu veriler elde edildikten sonra yalıtımlı ve yalıtımsız durum arasındaki fark ile tasarruf miktarı hesaplanır. Eşitlik (7) ve (8)' de yalıtımlı ve yalıtımsız durum için tüketilen enerji maliyet hesabı denklemleri verilmiştir [12].

$$Maliyet_{yalıtımlı} = \frac{U_{yalıtımlı} \cdot A \cdot \Delta T}{H_U \cdot \eta_k} N \cdot z \cdot Z \quad (7)$$

$$Maliyet_{yalıtımsız} = \frac{U_{yalıtımsız} \cdot A \cdot \Delta T}{H_U \cdot \eta_k} N \cdot z \cdot Z \quad (8)$$

Bu eşitliklerde verilen $U_{yalıtımlı}$ yalıtımlı duvarın toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K), $U_{yalıtımsız}$ yalıtımsız duvarın toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K), A duvarın yüzey alanı (m^2), ΔT sıcaklık farkı ($^\circ C$), H_U yakıtın alt ısıl değeri ($kcal/m^3$), η_k ısıtma sistemi verimi, N yıllık ısınma süresi (gün/yıl), z günlük ısınma süresi (saat/gün), Z yakıt (doğalgaz) birim fiyatı (TL/m^3) olarak ifade edilebilir. Yalıtımlı ve yalıtımsız durum için toplam ısı transfer katsayısı (U) ise eşitlik (9) kullanılarak hesaplanmıştır [12].

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \dots + \frac{L_n}{k_n} + \frac{1}{h_d} \quad (9)$$

Burada h_i iç ortam ısı taşınım katsayısı (W/m^2K), h_d dış ortam ısı taşınım katsayısı (W/m^2K), $L_1, L_2 \dots L_n$ duvar kalınlıkları (m), $k_1, k_2 \dots k_n$ duvar yapı elemanlarının ısı iletim katsayıları (W/mK)'dır. Analizde yapılan basitleştirici kabuller ise aşağıda verilmiştir;

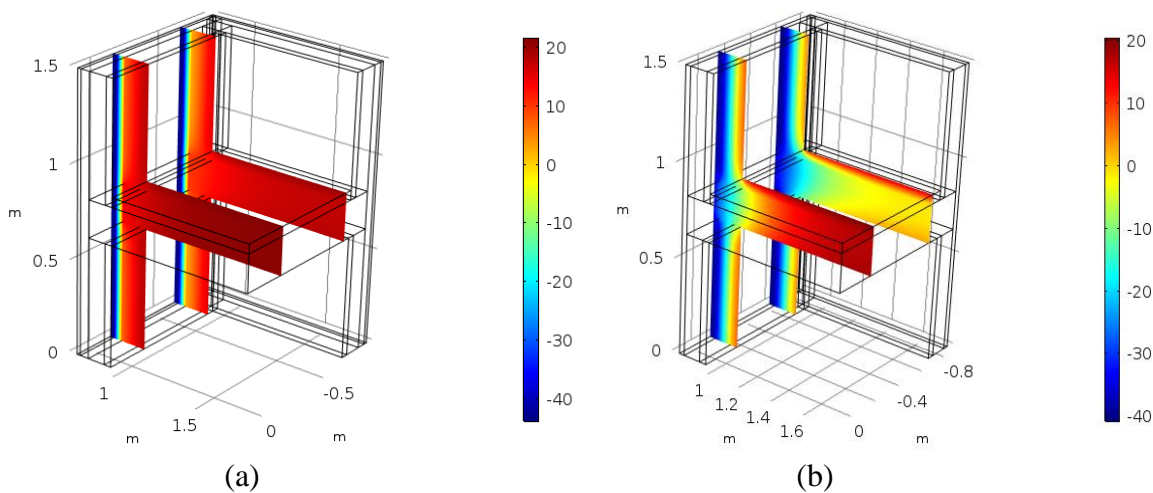
- Isı transferi sürekli rejimde gerçekleşmektedir.
- İç ve dış ortam ısı taşınım katsayıları sabit kabul edilmiştir.
- Radyasyon etkileri ihmal edilmiştir.
- İç ve dış ortam sıcaklıkları sabit kabul edilmiştir.
- Kompozit duvar malzemesi içerisinde ısı üretimi bulunmamaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

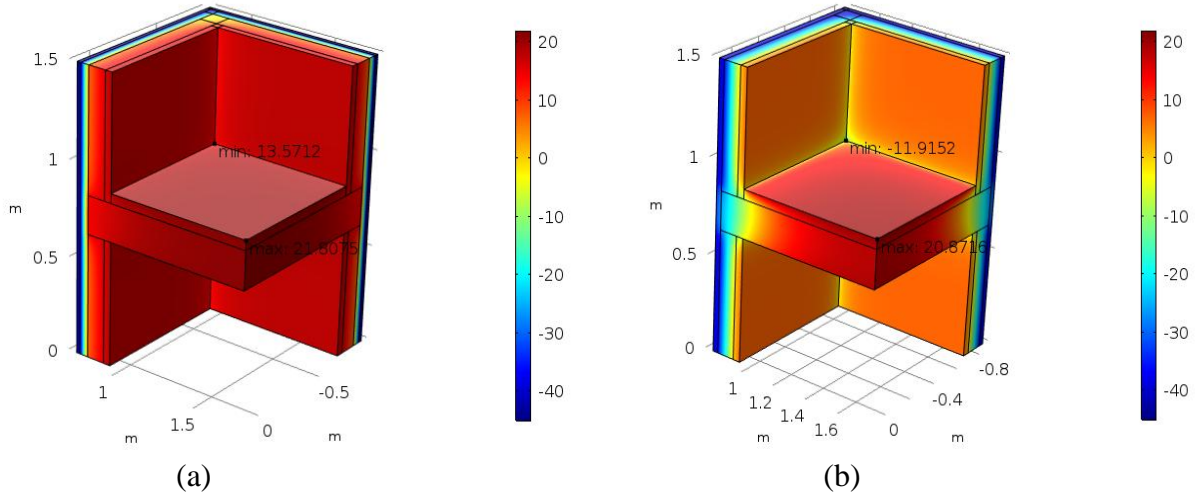
Analizlerde kullanılan dış hava sıcaklıklarının seçiminde Tablo 1 ve Şekil 2’de verilen en düşük sıcaklık değerleri göz önüne alınmıştır. Buna göre dış hava sıcaklıkları 10°C’den -45°C’ye 5°C sıcaklık aralıkları seçilerek analizler yapılmıştır. Böylece her şehirde görülen en soğuk dış hava sıcaklık değerleri için yalıtım, yoğuşma ve ısı köprüsü etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında simülasyon programında modellenen dış duvara 5 cm kalınlığında yalıtım uygulanmıştır. Şekil 4 ve 5’te örnek olarak -45 °C dış hava sıcaklığında yalıtımlı ve yalıtımsız duvar kesiti durumları için simülasyon sonunda elde edilen sıcaklık değişimleri verilmiştir.

Şekil 5’te ise -45°C dış hava sıcaklık değeri için iç yüzeyde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklık değerlerinin okunduğu yerler gösterilmiştir. Minimum sıcaklık yapının köşe noktasında oluşurken maksimum sıcaklık dairenin iç taban kısmında oluşmuştur. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumda minimum iç yüzey sıcaklık değerleri 13.57°C ve -11.91°C olarak hesaplanmıştır.

Yüzeyde yoğuşma olup olmadığının test edilebilmesi için çığ nokta sıcaklık değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Tablo 3’te oturma odası sıcaklığının iç ortam nem miktarına göre çığ nokta sıcaklıkları verilmiştir. Ortamın nem miktarının, ısıl konfor şartının sağlanması için %40-60 arasında olması tavsiye edilmektedir [12]. Analizlerde %55 bağıl nem miktarı için çığ nokta sıcaklığı 12.5°C olarak seçilmiştir (Tablo 3). Buna göre yalıtımlı durumda iç yüzey sıcaklığı çığ nokta sıcaklığının (12.5°C) üzerinde olduğu için yoğuşma meydana gelmemektedir. Eğer iç ortam bağıl nemi daha fazla olursa, Tablo 3’de verilen değerler göz önüne alınırsa, aynı dış hava koşullarında da yoğuşma görülebilir. Yoğuşma olmaması için kış aylarında iç ortam havasının bağıl nem değerinin düşük olması gerekmektedir. Ancak yalıtımsız durumda iç yüzey sıcaklığı yoğuşma sıcaklığının altında olduğu için yoğuşma meydana gelmektedir. Şekil 4 ve 5’te verilen simülasyon sonucuna göre ısı köprüsünün oluşmaması için yalıtımlı ve yalıtımsız durumlarda elde edilen iç yüzey sıcaklık değerleri göz önünde bulundurularak dış cepheye yalıtım uygulanması gerektiğine karar verilmiştir. Bu şekilde, yalıtımsız durumda oluşabilecek ısı köprülerinin ve yüzeyde meydana gelebilecek yoğuşmanın da önüne geçilmiş olur. 10°C den -45°C ye kadar alınan dış hava sıcaklıklarında yalıtımlı ve yalıtımsız durum için iç yüzeyde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklık değerleri Tablo 4’de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 4. Yalıtımlı (a) ve yalıtımsız (b) durum için ara kat yapıda sıcaklık değişimi (-45°C dış hava sıcaklığı)



Şekil 5. -45 °C dış hava sıcaklığı için yalıtımlı (a) ve yalıtımsız (b) yapıda elde edilen iç yüzey sıcaklık değerleri

Tablo 3. 22°C ortam sıcaklığının bağıl nem değerlerine göre çığ noktası sıcaklıkları (°C) [18]

| 22°C | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| %30 | %35 | %40 | %45 | %50 | %55 | %60 | %65 | %70 | %75 | %80 | %85 | %90 | %95 |
| 3.6 | 5.9 | 7.8 | 9.5 | 11.1 | 12.5 | 13.9 | 15.1 | 16.3 | 17.4 | 18.4 | 19.4 | 20.3 | 21.2 |

Tablo 4. Farklı dış hava sıcaklık değerleri için yalıtımlı ve yalıtımsız durumda iç yüzeyde ölçülen maksimum ve minimum sıcaklık değerleri

| Dış sıcaklık | Yalıtımlı durum | | Yalıtımsız durum | |
|--------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | Maksimum sıcaklık | Minimum sıcaklık | Maksimum sıcaklık | Minimum sıcaklık |
| 10°C | 21.96°C | 20.49°C | 21.79°C | 15.92°C |
| 5°C | 21.95°C | 19.86°C | 21.71°C | 13.39°C |
| 0°C | 21.93°C | 19.23°C | 21.62°C | 10.86°C |
| -5°C | 21.92°C | 18.6°C | 21.54°C | 8.33°C |
| -10°C | 21.90°C | 17.97°C | 21.46°C | 5.8°C |
| -15°C | 21.69°C | 17.34°C | 21.37°C | 3.27°C |
| -20°C | 21.67°C | 16.71°C | 21.29°C | 0.73°C |
| -25°C | 21.66°C | 16.08°C | 21.20°C | -1.79°C |
| -30°C | 21.65°C | 15.45°C | 21.12°C | -4.32°C |
| -35°C | 21.63°C | 14.82°C | 21.04°C | -6.85°C |
| -40°C | 21.62°C | 14.2°C | 20.95°C | -9.38°C |
| -45°C | 21.60°C | 13.57°C | 20.67°C | -11.91°C |

Tablo 4'e göre yalıtımsız durumda en düşük sıcaklığın görüldüğü köşe noktasında yoğuşmanın 0°C dış hava sıcaklığından sonra oluşabileceği tespit edilmiştir. Ancak yalıtımlı durumda ise -45°C sıcaklığında bile iç yüzeyde görülen en düşük sıcaklık değerinin çığ noktası sıcaklığının üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durumda iç yüzeyde yoğuşma meydana gelmeyecektir.

3.1. Isıl Konfor Hesabı

Binalarda yoğuşmanın ve ısı köprüsünün yanında ısıl konfor şartlarının da sağlanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında tanımlanan yapı için konfor ortamının belirlenmesinde iç yüzey sıcaklığı en önemli parametredir. İç yüzey sıcaklığı, iç ve dış ortam sıcaklıklarına, ısı taşınım katsayılarına ve yapı malzemesinin ısı iletim katsayısına bağlıdır. Pehlevan (1993) çalışmasında konfor şartının sağlanması için iç yüzey ile ortam arasında en az 2-3°C'lik sıcaklık farkının olması

gerektiğini belirtmektedir. Tablo 1’de konfor şartları için yüzey sıcaklığı (T_{iy}) ile iç ortam sıcaklığı (T_i) arasındaki fark değerleri verilmiştir [19].

Tablo 5. Konfor durumları için iç ortam ile yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın değişimi

| T_i-T_{iy} (°C) | Konfor Durumu |
|-------------------|---------------|
| 2 | Çok konforlu |
| 3 | Konforlu |
| 4 | Az konforlu |
| 6 | Konforsuz |
| 8.5 | Soğuk |
| >8.5 | Çok soğuk |

Tablo 6. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumlar için farklı dış hava sıcaklık değerlerinde elde edilen iç ortam konfor durumları ($T_i=22^\circ\text{C}$)

| Dış sıcaklık | Yalıtımlı | | | Yalıtımsız | | |
|--------------|--------------------|--------------|---------------|--------------------|--------------|---------------|
| | T_{iy} (minimum) | T_i-T_{iy} | Konfor durumu | T_{iy} (minimum) | T_i-T_{iy} | Konfor durumu |
| 10°C | 20.49°C | 1.51°C | Çok konforlu | 15.92°C | 6.08°C | Konforsuz |
| 5°C | 19.86°C | 2.14°C | Çok konforlu | 13.39°C | 8.61°C | Çok soğuk |
| 0°C | 19.23°C | 2.77°C | Çok konforlu | 10.86°C | 11.14°C | Çok soğuk |
| -5°C | 18.6°C | 3.4°C | Konforlu | 8.33°C | 13.67°C | Çok soğuk |
| -10°C | 17.97°C | 4.03°C | Az konforlu | 5.8°C | 16.2°C | Çok soğuk |
| -15°C | 17.34°C | 4.66°C | Az konforlu | 3.27°C | 18.73°C | Çok soğuk |
| -20°C | 16.71°C | 5.29°C | Az konforlu | 0.73°C | 21.27°C | Çok soğuk |
| -25°C | 16.08°C | 5.92°C | Az konforlu | -1.79°C | 23.79°C | Çok soğuk |
| -30°C | 15.45°C | 6.55°C | Konforsuz | -4.32°C | 26.32°C | Çok soğuk |
| -35°C | 14.82°C | 7.18°C | Konforsuz | -6.85°C | 28.85°C | Çok soğuk |
| -40°C | 14.2°C | 7.8°C | Konforsuz | -9.38°C | 31.38°C | Çok soğuk |
| -45°C | 13.57°C | 8.43°C | Soğuk | -11.91°C | 33.91°C | Çok soğuk |

Tablo 6’da iç ortamda elde edilen minimum sıcaklık değerlerine göre yalıtımlı ve yalıtımsız durum için konfor şartları verilmiştir. Yalıtımlı durumda -25°C sıcaklıkta az konforlu durum daha sonra yerini konforsuz duruma bırakmıştır. Dolayısı ile -25°C dış hava sıcaklığı için 5 cm yalıtım kalınlığı yeterlidir. Ancak -25°C ‘den daha soğuk hava sıcaklıklarında konfor şartlarını sağlamak için yalıtım kalınlığı artırılmalıdır. Yalıtımsız duvarda ise 10°C dış hava sıcaklığında bile konforsuz durum elde edilmiştir. Dolayısı ile yalıtımsız duvarda hem yoğuşma meydana gelmekte, ısı köprüsü oluşmakta hem de ısıl konfor şartı sağlanamamaktadır.

3.2. Sıcaklık Faktörü Hesabı

Farklı dış hava sıcaklıkları için yalıtımlı ve yalıtımsız durumda ara kat yapısında köşe noktalarda ölçülen minimum sıcaklıklar dikkate alınarak elde edilen sıcaklık faktörü değerleri 0.87 ve 0.49’dur. Dünyada bulunan bazı ülkelerin kendi iklim şartlarına göre hesapladıkları sıcaklık faktörü değerleri Tablo 7’de verilmiştir [20]. Her bir ülke kritik sıcaklık faktörünü kendi şartlarında nem miktarına bağlı olarak dış, iç ortam ve iç ortam yüzey sıcaklık değerlerini hesaba katarak elde etmiştir.

Duvarlarda ısı köprüsü ile birlikte yüzeyde yoğuşma oluşmaması için yapının hesaplanan sıcaklık faktörü değerinin kritik sıcaklık faktöründen fazla çıkması gerekmektedir. Aynı zamanda sıcaklık

faktörü değeri ısı konfor içinde bir parametre olmaktadır. Eğer yapımızın sıcaklık faktörü kritik sıcaklık faktörünün üzerinde ise iç ortam yüzey sıcaklığı yüksek olacaktır. Bu durumda iç ortam yüzey sıcaklığı ile iç ortam hava sıcaklığı arasındaki fark bize ısı konfor durumunu kontrol etme imkanı verecektir. Bu çalışmada Türkiye’de görülen en düşük dış hava sıcaklıkları kullanılarak seçilen yapı üzerinde yalıtımlı ve yalıtımsız durumlar için iç ortam yüzey sıcaklık değerleri hesaplanarak sıcaklık faktörü hesaplanmıştır. 5 cm yalıtım kalınlığında tüm durumlar için elde edilen kritik sıcaklık faktörü değeri ($f_{Rsi}=0.87$) iç ortam havası bağıl nemi %55 ve iç ortam sıcaklığı 22°C alındığı takdirde geçerlidir.

Tablo 7. Bazı ülkelerin önerdikleri kritik sıcaklık faktörü değerleri

| Ülke | Sıcaklık faktörü f_{Rsi} | Ülke | Sıcaklık faktörü f_{Rsi} |
|----------|----------------------------|------------------|--|
| Belçika | ≥ 0.7 | İsviçre | ≥ 0.75 |
| Hollanda | ≥ 0.65 | Birleşik Krallık | ≥ 0.75 |
| Fransa | ≥ 0.52 | Finlandiya | Zemin için ≥ 0.97 duvar için ≥ 0.87 |
| Almanya | ≥ 0.7 | | |

3.3. Maliyet Hesabı Sonuçları

Yalıtımın yıllık enerji tüketim miktarı üzerinde etkisini araştırmak için maliyet hesabı analizi yapılmıştır. Yıllık enerji tüketim maliyeti hesabında kullanılan değerler Tablo 8’de, Türkiye’de bulunan her bölgenin 2018 yılına ait 6 aylık ortalama en düşük sıcaklık değerleri ile iç ve dış ortam sıcaklık farkı (ΔT) değerleri ise Tablo 9’da verilmiştir [21].

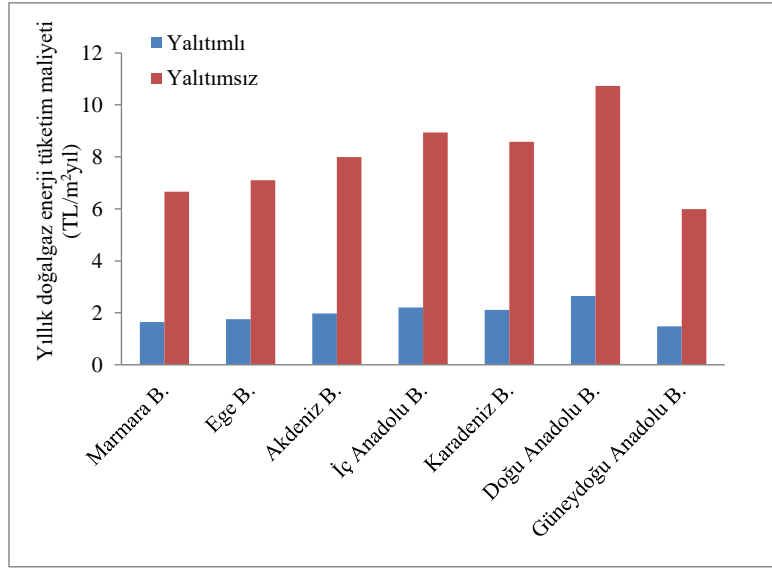
Tablo 8. Yıllık enerji tüketim maliyet hesabında kullanılan değerler

| Parametre | Değer | Parametre | Değer |
|------------------|--------------------------|-----------|--|
| $U_{yalıtımlı}$ | 0.451 W/m ² K | η_k | 0.91 |
| $U_{yalıtımsız}$ | 1.828 W/m ² K | Z | 1.239230 TL/m ³ (Şubat 2019) |
| A | 1 m ² | N | 180 gün/yıl |
| Hu | 8250 kcal/m ³ | z | 10 saat/gün |
| ΔT | Tablo 9 | | |

Tablo 9. Türkiye’de bulunan bölgelerin 6 aylık ortalama en düşük sıcaklık değerleri

| Bölgeler | Ocak | Şubat | Mart | Ekim | Kasım | Aralık | Ortalama | ΔT |
|-------------------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|----------|------------|
| Marmara | 4°C | 5.6°C | 8.9°C | 14.7°C | 9.6°C | 3.5°C | 7.71°C | 14.28°C |
| Ege | 2.1°C | 6.2°C | 9.3°C | 13.1°C | 7.6°C | 2.3°C | 6.76°C | 15.23°C |
| Akdeniz | 0.1°C | 2.7°C | 7.6°C | 11.5°C | 5.6°C | 1.6°C | 4.85°C | 17.15°C |
| İç Anadolu | -1.9°C | 0.4°C | 6°C | 9.6°C | 3°C | -0.1°C | 2.83°C | 19.16°C |
| Karadeniz | -0.9°C | 1.7°C | 6.4°C | 11.6°C | 3.4°C | -0.6°C | 3.6°C | 18.4°C |
| Doğu Anadolu | -7.3°C | -5°C | 2.6°C | 7.3°C | 0.3°C | -4°C | -1.01°C | 23.01°C |
| Güneydoğu Anadolu | 4.1°C | 6.6°C | 11.4°C | 18.1°C | 9.6°C | 5.1°C | 9.15°C | 12.85°C |

Eşitlik (7) ve (8) de verilen ifadeler kullanılarak 7 bölgeye ait yalıtımlı ($Maliyet_{yalıtım}$) ve yalıtımsız ($Maliyet_{yalıtımsız}$) durumlar için hesaplanan yıllık enerji tüketim maliyetleri hesaplanmıştır (Şekil 6). Bu çalışmada 1 m^2 'lik yüzey alanı için enerji tüketim maliyetleri hesaplanmıştır.



Şekil 6. 1 m^2 'lik dış duvar yüzey alanı için bölgelere göre hesaplanan yıllık doğalgaz enerji tüketim maliyetleri

Yalıtımsız durumda en fazla yakıt tüketim bedeli Doğu Anadolu Bölgesi'nde $10.72 \text{ TL/m}^2\text{yıl}$ iken en düşük yakıt tüketim bedeli ise Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde $5.98 \text{ TL/m}^2\text{yıl}$ olarak hesaplanmıştır. Her bölgede yalıtımlı durumda harcanan yakıt miktarının azaldığı görülmektedir. En fazla tasarruf edilen bölge $8.08 \text{ TL/m}^2\text{yıl}$ ile Doğu Anadolu Bölgesi olmuştur. Güneydoğu Anadolu Bölgesi ise $4.51 \text{ TL/m}^2\text{yıl}$ ile en az tasarruf edilen bölgelerin başında yer almaktadır. Burada her bir bölge için yalıtımlı durumda yıllık doğalgaz enerji tüketim maliyetinin yalıtımsız duruma göre yaklaşık %75.3 daha az olduğu tespit edilmiştir. Türkiye'de hane sayısının oldukça fazla olduğu dikkate alındığında binalara yalıtım yapılmasının doğalgaz tüketiminde çok büyük miktarlarda enerji tasarrufu sağlayacağı ve doğalgaz alımında dışa bağımlılığı önemli ölçüde azaltacağı söylenebilir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada öncelikle herhangi çok katlı bir binaya ait ara kat yapısı 3 boyutlu olarak Comsol Multiphysics programında modellenmiştir. Dış hava sıcaklıkları için Türkiye'de son 90 yılda görülen en düşük sıcaklık değerleri referans alınmıştır. Yalıtımın etkisinin iç yüzey sıcaklık değerleri üzerinde etkisi olup olmadığı araştırılmıştır. Bununla birlikte yoğuşma kontrolü yapılarak sıcaklık faktörü değerleri ve iç ortam konfor şartları da hesaplanmıştır. Son olarak yalıtımın yıllık doğalgaz enerji tüketimi üzerindeki etkisini araştırmak için güncel olan 2018 yılına ait her bölgenin 6 aylık ortalama en düşük sıcaklık değerleri kullanılmıştır.

Elde edilen bazı sonuçlar ise şu şekilde özetlenebilir:

- Dış yalıtım yapılması ısı köprüsü ve iç yüzeyde yoğuşma oluşmaması açısından önemlidir.
- Isı köprüsü oluşmaması için ısıl konfor şartları yerine getirilmelidir.
- Ayrıca yapılan çalışmada ısı köprüsü açısından sıcaklık faktörü parametresi de incelenmiştir. Tasarladığımız ara kattaki yapı için %55 bağıl nem, $22 \text{ }^\circ\text{C}$ iç ortam sıcaklığı

ve 5 cm yalıtım kalınlığı seçilmesi durumu için kritik sıcaklık faktörü değerinin 0.87 olması gerektiği tespit edilmiştir. Aynı şartlarda yalıtımsız durumda ise bu değer 0.65 olduğu görülmüştür.

- Yalıtım kalınlığı seçilirken aynı zamanda iç ortam havasının bağıl nemi ve çiğ nokta sıcaklığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca kış aylarında iç ortam havası bağıl neminin düşük olması yüzeyde nemlenme durumunu ortadan kaldırmaktadır. Aynı zamanda kış aylarında iç ortam havası bağıl neminin yüksek olması durumunda ise yüzeyde nemlenme olmaması için yalıtımın artırılması gerekmektedir.
- 5 cm yalıtım kalınlığının -25°C dış hava sıcaklığına kadar ısı konfor şartını sağladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte -45°C dış hava sıcaklığına kadar iç yüzeyde nemlenme meydana gelmemiştir.
- Binalarda ısı yalıtımı yapılması ısı konfor, enerji tasarrufu ve insan sağlığı açısından önemlidir. TS 825 standartlarına göre yalıtım kalınlıkları mevcut binalarda ve yeni yapılacak yapılarda kesinlikle uygulanmalı ve bina sahipleri bu konuda bilinçlendirilmelidir. Aynı zamanda yapılacak yalıtım ile yapı kabuğunda oluşabilecek nem engellenerek binanın ömrü uzatılmaktadır.
- Binalarda ısı köprüsü etkisi incelenirken iç yüzeyde yoğuşma, sıcaklık faktörü, yalıtım kalınlığı ve ısı konfor şartları aynı anda hesaba katılmalıdır.
- Hesaplanan maliyet analizi sonuçlarına göre ülkemizdeki tüm binalarda yalıtım yapılması durumunda büyük oranda enerji tasarrufu sağlanacaktır. Buna bağlı olarak doğalgaz enerji tüketimi için harcanan faturalar da azaltılmış olacaktır.

Kaynaklar

- [1]. Sezer, F. Ş., Yeşilyurt, N. K., Türkiye'deki Çift Duvar Arası Yalıtım Uygulamalarında Isı Köprülerinin Analizi ve Yurtdışı Uygulamaları ile Karşılaştırılması, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2011, 16 (1), 1-10.
- [2]. Sezer, F.Ş., Cihan, M.T., Dışarıdan Yalıtımlı Binaların Ara Kat Döşemelerinin Isıl Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2010,15, 2, 65-72.
- [3]. Saryal, N., Duvar Isı Yalıtımının İnsan Sağlığı Yönünden Önemi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 1983, 6(1), 37-39.
- [4]. Karabulut, K., Buyruk, E., Fertelli, A., Katlar Arası Farklı İç Ortam Sıcaklığına Bağlı Olarak Isı Köprülerindeki Isı Transferinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Tesisat Mühendisliği, 2013, Sayı 137, Eylül/Ekim.
- [5]. Angelis, E., Serra, E., Light Steel-Frame Walls: Thermal İnsulation Performances and Thermal Bridges, Energy Procedia, 2014, 45, 362–371.
- [6]. Song, J.H., Lim, J. H., Song, S.Y., Evaluation of Alternatives For Reducing Thermal Bridges in Metal Panelcurtain Wall Systems, Energy and Buildings, 2016, 127, 138–158.
- [7]. Capozzoli, A., Gorrino, A., Corrado, V., A Building Thermal Bridges Sensitivity Analysis, Applied Energy, 2013, 107, 229–243.
- [8]. İbrahim, M., Bıwole, P.H., Wurtz, E., Achard, P., Limiting Windows Offset Thermal Bridge Losses Using a New İnsulating Coating, Applied Energy, 2014, 123, 220–231.
- [9]. Asdrubali, F., Baldinelli, G., Bianchi, F., A Quantitative Methodology to Evaluate Thermal Bridges İn Buildings, Applied Energy, 2012, 97, 365–373.
- [10]. Dilmaç, Ş., Can, A., Sezer, F.Ş., Ara Kat Kirişli Döşemelerinde İçeriden ve Dışarıdan Yalıtım Uygulamalarının Enerji Verimliliklerinin Karşılaştırılması, Tesisat Mühendisliği, 2004, Mart-Nisan.
- [11]. Theodosiou, T.G., Papadopoulos, A.M., The Impact Of Thermal Bridges On The Energy Demand of Buildings With Double Brick Wall Constructions, Energy and Buildings, 2008, 40, 2083–2089.

- [12]. Can M., Avcı, A., Etemoğlu, A.B., Teknik Tesisat El Kitabı, Dora yayınevi, 2008, Bursa.
- [13]. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A>, son erişim tarihi: 15.01.2019.
- [14]. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=parametrelerinTurkiyeAnalizi>, son erişim tarihi: 15.01.2019.
- [15]. TS 825, Binalarda ısı yalıtım kuralları, Türk standartları enstitüsü, Ankara, 2009.
- [16]. Comsol Multiphysics 5.3., Heat Transfer Module User's Guide, 2018.
- [17]. Kalamees, T., Critical Values for The Temperature Factor to Assess Thermal Bridges, Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 2006, 12 (3-1), 218–229.
- [18]. Karakoç, H., Binyıldız, E., Turan, O., Binalarda ve Tesisatta Isı Yalıtımı, pp 170, Ode Teknik Yayınları, No: G20,1999.
- [19]. Pehlevan, A., Isınmada Enerji Ekonomisi, Isıl Konfor Etkileşimi, Enerji Tasarrufu Semineri Tebliğleri, TÜYAP, 1993, 167-178, Ocak.
- [20]. Uyttenbroeck, J., Carpentier, G., Vochthuishouding in gebouwen. Wissenschaftliches und Technisches Bauzentrum, Technische voorlichtingen, 1984, 153, Brussels.
- [21]. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/sicaklik-analizi.aspx>, son erişim tarihi: 15.01.2019.