



ISI KÖPRÜLERİNDE HİGROTERMAL PERFORMANSIN VE ISI KAYIPLARININ İNCELENMESİ

Filiz UMAROĞULLARI*, Esmâ MIHLAYANLAR**, Melek SEYİT***

Trakya Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Edirne

filizu@trakya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9503-1816*

emihlayanlar@trakya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0020-2839**

melekseyit@trakya.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1916-7508***

(Geliş Tarihi: 03.01.2024, Kabul Tarihi: 03.04.2024)

Özet: Enerji verimliliğinde önemli bir potansiyele sahip olan binalarda enerji kaybının en büyük kısmı bina kabuğundan gerçekleşmektedir. Günümüzde; farklı kalınlık ve özellikteki çeşitli katmanlardan oluşan bina kabuğunda, ısı kaybının azaltılmasında, ısı köprülerinden kaçınmaya yönelik uygulamalar en temel yaklaşımlardan biridir. Diğer bileşenlere oranla ısı iletiminin daha fazla olduğu ve nem problemlerinin öncelikle karşılaşıldığı alanlar olan ısı köprülerinin bina enerji performansının değerlendirilmesinde önemi büyüktür. Günümüzde yaygın olarak uygulanan betonarme karkas yapı sistemlerinde çeşitli nedenlerle çok sayıda ısı köprüsü meydana gelmektedir. Köşe noktalarında meydana gelen ısı köprüleri binanın ortalama ısı geçirgenliğini önemli ölçüde etkiler. Aynı zamanda yoğuşma ve küf oluşumunun da yaygın görüldüğü bölgelerdir. Bu bölgelerin yalıtım durumu da ısı ve higrotermal performansı etkilemektedir. Tasarım aşamasında bina kabuğunun higrotermal performansı hesaplanarak gerekli önlemler alınmalıdır. Bu amaçla çeşitli benzetim araçları kullanılmaktadır. Böylece tasarım aşamasında bina kabuğunun enerji, konfor ve sağlık koşullarını sağlaması mümkün olabilecektir. Bu çalışmada ısı köprülerindeki ısı kayıpları ve higrotermal performans araştırılmıştır. Mevcut bir konut yapısının köşe noktasında meydana gelen ısı köprüleri, yalıtımsız, kısmi yalıtımlı ve dışardan yalıtımlı olma durumlarına göre değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında Quick Field 6.3 ve Wufi 2D-4.3 programları aracılığıyla yapılan analizlerden ısı köprülerinin kısmi yalıtılması durumunda kesintisiz dışardan yalıtımlı olma durumuna göre %37 daha fazla ısı kaybı meydana geldiği görülmüştür. Aynı zamanda higrotermal performans açısından da kesintisiz dışardan yalıtımlı durumda yoğuşma riski görülmemektedir.

Anahtar kelimeler: Isı köprüsü, ısı kaybı, yoğuşma, higrotermal performans, ısı yalıtımı

INVESTIGATION OF THERMAL BRIDGE EFFECT ON HEAT LOSSES AND HYGROTHERMAL PERFORMANCE

Abstract: The largest energy loss in buildings, which have a significant potential for energy efficiency, occurs in the building envelope. At present, one of the most basic approaches to reducing heat loss in the building envelope, which consists of various layers of different thicknesses and properties, is to avoid thermal bridges. Thermal bridges are areas where heat conduction is higher than other components of the building and where moisture problems are primarily encountered and are of great importance in the evaluation of building energy performance. In today's widely applied reinforced concrete frame construction system, many thermal bridges occur for various reasons. Thermal bridges occurring at the corner points of the building significantly affect the average thermal transmittance of the building. These areas are also the areas where condensation and mould formation are common. The insulation status of these regions affects the thermal and hygrothermal performance. Necessary measures should be taken by calculating the hygrothermal performance of the building envelope during the design phase. Various simulation tools are used for this purpose. In this way, the building envelope can provide energy, comfort, and health conditions during the design phase. In this study, heat losses and hygrothermal performance of thermal bridges are investigated. The thermal bridges occurring at the corner point of an existing residential building were evaluated according to the conditions of uninsulated, partially insulated and externally insulated. Analyses within the scope of the study were carried out with Quick Field 6.3 and Wufi 2D-4.3 programs. In the analyses, it is seen that 37% more heat loss occurs in the case of partial insulation of thermal bridges than in the case of continuous external insulation. Likewise, in terms of hygrothermal performance, there is no condensation risk in the case of continuous external insulation.

Keywords: Thermal bridge, heat loss, condensation, hygrothermal performance, thermal insulation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nüfus artışı, enerji kıtlığı, iklim değişikliği etkileri ve sera gazı emisyonlarının artması küresel endişeleri de zamanla artırmaktadır. Enerji kullanımı bağlamında inşaat sektörü en fazla enerji tüketen sektörlerden biridir. Binalar, küresel olarak birincil enerji tüketiminin yaklaşık üçte birini tüketmekte olup toplam enerji kaynaklı sera gazı emisyonlarının da üçte birinden sorumludur (IEA, 2013). Artan bina stokuna karşı enerji kayıplarının ve olumsuz çevresel etkilerinin azaltılmasında bina enerji verimliliği ön plana çıkmaktadır. Uluslararası ölçekte topluluklar ve ülkeler bazında bina enerji verimliliği ve karbonsuzlaşmaya yönelik yıllara bağlı hedefler belirlenmektedir. Avrupa Birliği Konseyi iklim değişikliği ile mücadeleyi güçlendirmek amacıyla 1 Ocak 2021 tarihinden itibaren tüm yeni binaların yaklaşık Sıfır Enerjili /Zero Energy Buildings (nZEB) olmasını, 2030 yılında emisyonlardaki %40 azaltım hedefini de %50-55 oranına çıkarılmasını hedeflemiştir. 2050 yılına kadar iklim açısından karbon nötr bir AB'ye ulaşma hedefine onay verilmiştir (European Comission, 2020). AB'ye üye bütün ülkelerde, AB Bina Enerji Performansı Direktifi (EPBD) kabul edilerek uygulanmaktadır (Garay vd, 2014). Buna bağlı olarak bina enerji kodları belirlenmiştir. Binalarda enerji verimliliğini belirleyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bina kabuğu ve bina kabuğunun ısı performansı göz önünde bulundurulması gereken önemli faktörlerdendir (Goggins vd, 2016). Bu bağlamda, bina kabuğundaki ısı köprülerinin önemi artmıştır. Isı köprüleri, daha yüksek ısı iletkenliğe sahip bina kabuğunun bir parçasını temsil etmekte ve onu çevreleyen elemanlardan daha yüksek ısı kayıplarına neden olmaktadır. Isı köprüleri, yapı bileşeninin bünyesinde çevresine göre daha az ısı dirence sahip olan bölgelerdir. Isı, bu bölgelerdeki bileşenler üzerinden düşük sıcaklığa doğru ilerleyerek ısı kaybeden bir köprü oluşturmaktadır. Dolayısıyla bina kabuğunun ısı performansını değerlendirirken bu ek ısı kayıplarını hesaba katmak önemlidir (O'Grady, 2018).

Isı köprüsü normalden daha fazla ısı iletiminin gerçekleştiği sınırlı alanlardır. Isı iletimi, sıcaklığın yüksek olduğu bölgeden düşük olduğu bölgeye ilerler ve vektörel bir büyüklüktür. Isı köprülerinin grafiksel gösteriminde ısı geçişlerinin yönünü anlayabilmek için ısı izoterm eğrileri kullanılmaktadır. Isının aktığı doğrultuyu ısı akısı vektörü gösterir ve ısı akısı vektörleri bir vektörel alan oluşturur. Isı akısı vektörleri izoterm eğrilerine dik doğrultudadır. Isı köprüsünün olduğu durumlarda; ısı akısının, açık şekilde dikliği ve sabit sıcaklık eğrilerinin (izoterm eğrilerinin) paralellikleri bozulmaktadır.

Bina kabuğunda oluşabilecek ısı köprüleri, kabuğun ısı direnci üzerinde etkilidir. Isı köprülerinin soğuk (IEA, 2013; Evola vd, 2011) ya da sıcak (Bergero and Chiari, 2018; De Angelis and Serra, 2014; Martins vd, 2016; Zhao vd, 2022) iklim şartlarında enerji tüketimi üzerindeki etkisi önemlidir ve özellikle mimari

kısıtlamalar nedeniyle dış yalıtımın uygulanmadığı veya birçok çıkmanın bulunduğu tasarımlarda karşımıza çıkmaktadır (Erhorn-kluttig vd, 2009).

Bir yapıda ısı köprüsü oluşumuna neden olan detaylar; giriş, kolon (Martin, Campos-Celador, Escudero vd, 2012), hatıl, balkon çıkmaları (Ge vd, 2013; Aghasizadeh vd, 2022), duvar (Aguilar vd, 2014; Ascione vd, 2013; Dumitrescu vd, 2017; Kotti vd, 2017; Marincioni vd, 2015; Viot vd, 2015) döşeme (Garay vd, 2014; Ascione vd, 2013; Kotti vd, 2017; Fantucci vd, 2017; Martin, Escudero, Erkoreka vd, 2012; El Saied vd., 2022), kapı-pencere doğramaları (Asdrubali vd, 2012; Ahrab ve Akbari, 2013; Theodosiou, 2019; Terentjevas vd, 2021), çatı elemanları (Martin, Escudero, Erkoreka vd, 2012; Ahrab ve Akbari, 2013; Ascione vd, 2012) ve cephe kaplama elemanları (Theodosiou vd, 2017, Theodosiou vd, 2019) gibi elemanlar ve birleşim noktaları çeşitli çalışmalarda araştırılmıştır.

Binalarda ısı köprüsü çeşitli nedenlerden kaynaklanabilmektedir. Isı köprüsünün oluşma nedenleri (BS EN ISO 10211, 2007);

- Bina kabuğunun belli bir kısmının ya da tamamının farklı ısı iletkenliklere sahip malzemelerden oluşması,
- Bina kabuğunun kalınlığındaki bir değişiklik,
- Binanın ya da yapı elemanlarının geometrisindeki farklılıklar (bina formu, köşe noktaları, balkon gibi çıkmalar),
- Duvar-zemin-tavan gibi bağlantı noktalarında dış ve iç yüzey büyüklüklerinde farklılıklar (ısıtma radyatörlerinin konumlandırıldığı duvarlar),
- Akışkan akımından kaynaklanan ısı köprüleri (mekân içinden geçen tesisat boruları) olarak sıralanabilir (BS EN ISO 10211, 2007).

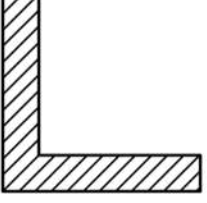
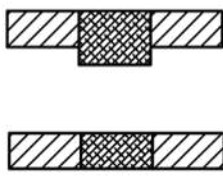
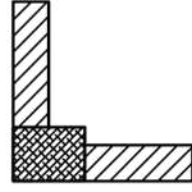
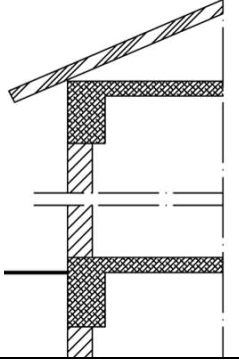
Tablo 1'de binalarda; geometri, strüktür ve malzeme değişiminden kaynaklanan ısı köprüleri şematik olarak gösterilmektedir.

Genel olarak yapı bileşenleri veya yapı formunun değiştiği herhangi bir birleşme noktasında meydana gelen ısı köprüleri ile ısı köprüsü oluşmayan bölgeler karşılaştırıldığında;

- a) Isı akış hızındaki değişiklik,
- b) İç yüzey sıcaklığındaki değişiklik gibi iki temel sonuç ortaya çıkar (BS EN ISO 10211, 2007).

Isı köprüleri, etki etme şekillerine göre doğrusal ve noktasal olarak gruplandırılır. Yapının uzunluğuna göre genişliği dar olan ve yapının genişliği boyunca devam edenler “doğrusal ısı köprüleri” dir. Doğrusal ısı köprüleri, üç ortogonal eksenenden biri boyunca düzgün bir kesite sahiptir (Prata vd, 2018).

Tablo 1. Binalarda geometri, strüktür ve malzeme değişiminden kaynaklanan ısı köprüleri
(Thermal bridges caused by geometry, structure and material changes in buildings)

Isı köprüsü oluşum sebepleri			
Geometri farklılığı	Strüktür + Malzeme farklılığı	Strüktür + malzeme + Geometri farklılığı	
			

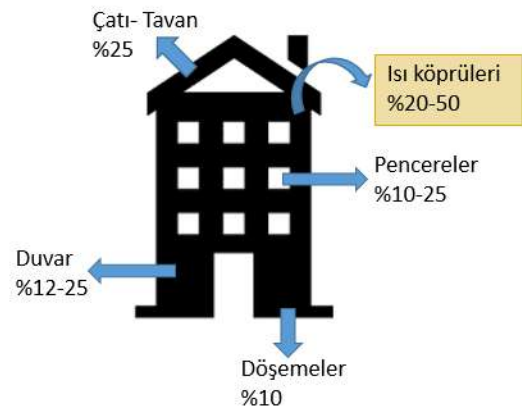
Etkisi bir noktadaki ısı geçirgenlik ile temsil edilen sınırlandırılmış olanlar “noktasal ısı köprüleri” dir (BS EN ISO 10211, 2007). Bağlı olarak küçük boyutlu, yapının kalınlığı boyunca uzamayan, yapı yüzeylerine dik olarak konumlanan birleşim elemanları çevresindeki ısı köprüleridir.

Isı köprüleri, sıcaklık dağılımını etkileyerek dağılımın bölgesel olarak bozulmasına neden olur. Ayrıca ısı geçirgenlik direncini azaltarak yüzey sıcaklıklarının düşmesine neden olduğu için elemanın yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farkın artmasına neden olur. Yapı kabuğunun ısı geçirgenliğine bağlı olarak yüzey sıcaklıkları önemli ölçüde değişir (Erhorn-kluttig vd, 2009). Bu fark yaz ve kış koşullarından etkilenir.

Soğuk iklimlerde binalardaki ısı köprüleri önemli bir sorundur. Çünkü bu alanlarda sadece ısı kayıpları değil, aynı zamanda yoğuşma ve küf gelişimi de söz konusudur. İç yüzey sıcaklıklarında ortaya çıkan azalma sonucu su buharı faz değiştirerek sıvılaşmakta ve küflenme ortaya çıkmaktadır. Donma-çözülme etkileri sonucunda yapı elemanının bünyesindeki gerilmeler artarak yüzeylerde kabarma ve dökülmeler görülmekte hatta aşırı gerilmeler zorlanmalara ve çatlaklara neden olabilmektedir. Ayrıca yoğuşma sırasında su ile dolan boşlukların ısı iletkenlik özellikleri de artmaktadır. Elektriklenme sonucu yüzeylerde tozlanma oluşmaktadır. Bunun yanı sıra donatılı elemanlarda görülen ısı köprülerinde, korozyon gibi kimyasal paslanmalar da söz konusudur. Bu durum yapı malzemelerinin deformasyonuna, yapı hasarlarına ve iç hava kalitesinin bozulmasına yol açacaktır (Evola vd, 2011; Erhorn-kluttig vd, 2009). Dolayısıyla yapı sağlığı üzerinde de önemli bir etkiye sahip olan ısı köprüleri, enerji korunumunu, iç ortam kalitesini ve kullanıcı sağlığını da etkilemektedir. Isı köprülerinin iyileştirilmesi ekonomik açıdan yarar sağlamakla birlikte karbondioksit emisyonlarının azaltılması gibi enerji verimliliği ve çevresel faydalar da sağlamaktadır (Evola vd, 2011).

Isı köprülerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisinin azaltılmasında bina kabuğunun sürekli bir şekilde yalıtılması büyük önem taşır (Erhorn-kluttig vd, 2009).

Bina kabuğunda yapı elemanlarından (duvar, döşeme, pencere, çatı vb.) farklı oranlarda ısı kayıpları gerçekleşmektedir. Isı köprülerinden kaynaklanan ısı kayıpları %20-50 arasında değişen büyük bir orana sahiptir (Theodosiou vd, 2019). Şekil 1’de yalıtımsız bir binada gerçekleşen ısı kayıpları gösterilmiştir. Binaların ısı kayıplarına karşı korumanın en etkili yolu, uygun ve kesintisiz ısı yalıtımının yapılmasıyla sağlanabilmektedir. Literatürde yapı kabuğunda yalıtımın yeri ve kalınlığının belirlenmesinde pek çok çalışma bulunmaktadır. Özel (2022), duvar yönüne bağlı olarak tuğla duvar gövdesi üzerinde optimum yalıtım kalınlığını ısıtma ve soğutma yükleri üzerinden değerlendirmektedir (Özel, 2022). Çağlayan (2022), Türkiye’nin 81 ili için yıllık enerji tüketimi ve maliyet analizi ile optimum yalıtım kalınlıklarını belirlemeye yönelik çalışmada hem tuğla duvar hem de aynı kalınlıkta betonarme bileşen için hesaplamalar yapmıştır (Çağlayan vd, 2022).



Şekil 1. Yalıtımsız bir binada ısı kayıpları
(Heat losses in uninsulated building)

Isı kayıplarının yüksek olduğu ısı köprüsü bölgelerinin analizlerinde ısı transferi iki boyutludan tek boyuta indirgenerek hesaplanmaktadır. Isı iletimi hesaplamalarında nümerik yaklaşımlar önerilmektedir (El Saied vd, 2022; Asdrubali vd, 2012; Terentjevas, 2021; Al-Sanea ve Zedan, 2012). Yapı bileşenlerinin ısı davranışını değerlendirirken, ısı geçirgenliğin deneysel

olarak belirlenmesinde genellikle sıcak kutu (hot box) testi yöntemi (IEA, 2013; ISO 8990, 1994; Asdrubali ve Baldinell, 2011; Asdrubali vd, 2012; Fang vd, 2006) termal görüntülemelerle analiz edilmesinde kızılötesi termografi cihazları (IEA, 2013; O'Grady vd, 2018) ve sayısal olarak hesaplanmasında bir dizi hesaplamalar ve algoritmalar (Zalewski vd, 2010) kullanılmaktadır.

Çalışmalarda ısı köprülerinin etki alanları sabit rejim (Garay vd, 2014; Martin, Campos-Celador, Escudero vd, 2012; Aguilar vd, 2014; Aghasizadeh vd, 2022; Capozzoli vd, 2013) ve dinamik rejim (Martin, Campos-Celador, Escudero vd, 2012; Al-Sanea ve Zedan, 2012; Brumă vd, 2015; Quinten ve Feldheim, 2016) şartlarından birine göre ya da her ikisine (Martin, Campos-Celador, Escudero vd, 2012) göre ele alınarak değerlendirilmektedir. Yapılan incelemelerde QUICK FIELD (Karacavus ve Can, 2008). ANSYS (CFX, FLUENT) (O'Grady vd, 2018; Martins vd, 2016; Martin, Campos-Celador, Escudero vd, 2012; Aghasizadeh vd, 2022; Ascione vd, 2012; Theodosiou vd, 2017), THERM (De Angelis ve Serra, 2014; Kotti vd, 2018; El Saied vd, 2022; Terentjevas vd, 2021; Romero vd, 2021), MATLAB (Aguilar vd, 2014; Martin, Escudero, Erkoreka vd, 2012), ANOVA-FAST (Capozzoli, Gorrino, Corrado vd, 2013; Capozzoli, Gorrino, Corrado, Grinzato vd, 2013), WUFI (Ge ve Baba, 2015; Antretter vd, 2013) gibi yazılım araçları ve benzetim ile elde edilen sonuçların sayısal modeller yardımıyla hesaplandığı görülmektedir.

Genellikle betonarme (Garay vd, 2014; Evola vd, 2011; Martin, Campos-Celador, Escudero vd, 2012; Real vd, 2016) başta olmak üzere ahşap (Martin, Campos-Celador, Escudero vd, 2012; Viot vd, 2015; Prata vd, 2018), çelik (De Angelis ve Serra, 2014; Martins vd, 2016; Fukuyo, 2003; Schöck Ltd., 2015) ve alüminyum (Theodosiou vd, 2019) yapı elemanları ve bileşenleri ile ilgili ısı kayıpları birçok yönden ele alınmaktadır. Yapılan çalışmalar arasında, yapı elemanına uygulanan yalıtım durumuna göre oluşacak ısı köprüsü ile ilgili ölçümler (Prata vd, 2018), dış duvar elemanı için yalıtım tabakasının kalınlığının artırılması (Martin, Campos-Celador, Escudero vd, 2012) ile yalıtımın ısı köprüsü üzerindeki etkisi incelenmektedir. Ayrıca araştırmacılar yalıtımlı yüksek binaların gerçek ısı kaybının tanımlanmasını ve ısı köprülerinin iyileştirilmesini değerlendiren araçlar geliştirmektedir (Asdrubali vd, 2012).

Türkiye'de genellikle gelişmiş geleneksel yapı sistemlerinden betonarme sistemler tercih edilmektedir. Bu doğrultuda yapılan akademik çalışmalarda da ısı köprüleri ve çevresindeki bölgelerde sıcaklık ve ısı akısı dağılımı incelenmiştir. Yalıtım sistemlerinin sayısal değerler üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Uluslararası yayınlarda ise ısı köprülerinde sıcaklık ve ısı akısı dağılımlarının hesaplanması ile ilgili geliştirilen yaklaşımlar ve uygulama sonuçları karşılaştırılmaktadır.

Türkiye'de mevcut veya yeni binalarda enerjinin etkin kullanımının yanı sıra çevre korunumunu da hedefleyen yasal düzenlemeler aşağıda ısı köprüsü ile ilgili standartlar ile verilmektedir.

TS 825 (Binalarda Isı Yalıtım Kuralları) standardı binalarda yıllık ısıtma enerjisi tüketiminin sınırlandırılmasına yöneliktir. Bu standartla birlikte yeni yapılacak binalara yönelik çeşitli tasarım seçenekleri için önerilen hesap metodu ve değerleri uygulanarak, uygun enerji performansını sağlayacak yalıtım kalınlıkları belirlenir. Standartta göre ısı kaybı hesabında ısı köprülerinden iletilen ısı kaybı da değerlendirilmektedir (TS 825, 2013).

AB'nin 2002/91/EC sayılı "Binaların Enerji Performansı Direktifi" doğrultusunda hazırlanan Binalarda Enerji Performans Yönetmeliği (BEPY) ile binaların birincil enerji ve karbondioksit (CO₂) emisyonunun sınırlandırılması hedeflenir. Yönetmelik ile sera gazı emisyonlarının sınırlandırılması, ısıtma ve soğutma sistemlerinin kontrolü, bina performansının artırılması ile uygulama esasları ve çevre korunumu amaçlanır. Dış iklim şartları, iç mekân gereksinimlerini, yerel şartlar ve maliyet faktörü de dikkate alınarak, bir binanın bütün enerji kullarımlarını değerlendirmeyi sağlayacak hesaplama kuralları belirlenir (BEPY, 2010).

Ayrıca 2010'da BEPY kapsamında binalara Enerji Kimlik Belgesi (EKB)'nin hazırlanması amacıyla ulusal hesaplama yöntemi olarak Bina Enerji Performansı Yazılımı (BEP-TR) geliştirilmiştir. Enerji Verimliliği Kanunu'na göre, tüm binaların Enerji Kimlik Belgesi alması zorunludur. Bu belge düzenlenirken EN 15217 standardı dikkate alınır. BEP-TR ulusal yazılımıyla binanın azami yıllık enerji ihtiyacı belirlenmektedir. Binanın fonksiyonuna, bulunduğu iklim bölgesine, mimari tasarımına ve yürürlükteki zorunlu standartlara göre ısıtma, soğutma, havalandırma, sıcak su ve aydınlatma enerji tüketimi hesaplanır.

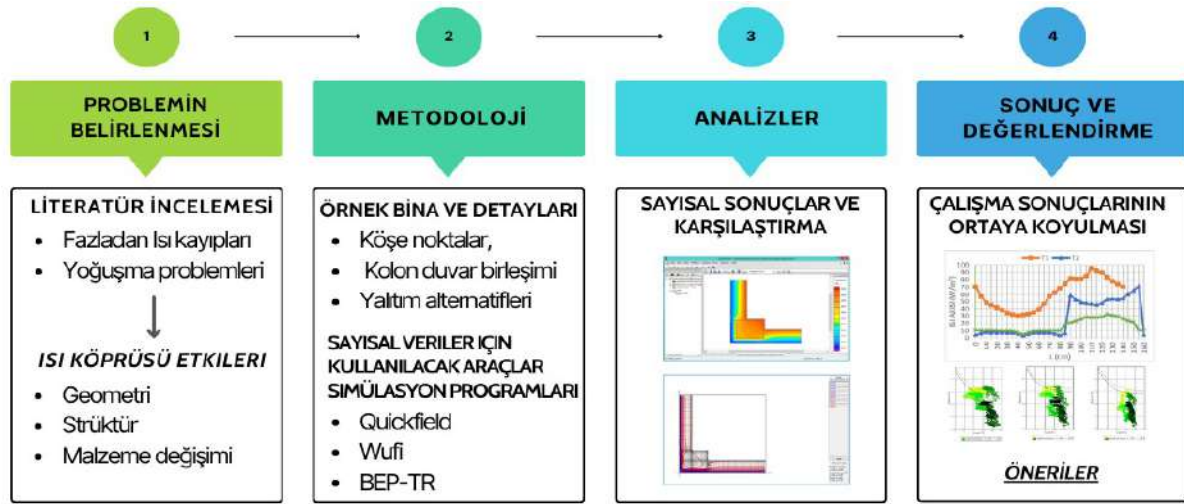
TS EN ISO 10211 (Bina yapılarında ısı köprüleri- Isı akışları ve yüzey sıcaklıkları- Ayrıntılı hesaplama yöntemleri) standardı; binalardaki 2 ve 3 boyutlu geometrik ısı köprülerindeki ısı akışları ve yüzey sıcaklıklarının ayrıntılı hesaplama yöntemlerini açıklamaktadır. Standartta bir binadaki toplam ısı kayıplarının tespitinde ısı akışları ve yüzey buğulanma riskinin tayini için asgari yüzey sıcaklıkların sayısal olarak hesaplanmasında gerekli esaslar belirtilmektedir (TS EN ISO 10211, 2017).

TS EN ISO 14683 (Bina inşaatı-Isıl köprüler-Lineer ısıl geçirgenlik-Basitleştirilmiş metod ve hatasız değerler) standardı; yapı elemanlarında oluşan doğrusal ısı köprüleri yoluyla ısı akışlarının belirlenmesi için basitleştirilmiş yöntemleri ele almaktadır. Isı köprüsü kataloglarına ve manuel hesaplama yöntemlerine ilişkin şartlar belirtilerek doğrusal ısı geçişleri için varsayılan değerler verilmektedir (TS EN ISO 14683, 2017).

Bu çalışmanın amacı öncelikli olarak ısı köprülerindeki ısı kayıpları ve higrotermal performansın analiz edilmesidir. Literatürde ısı ve higrotermal performansı birlikte ele alan az sayıda çalışma bulunmaktadır. Türkiye’de yaygın olarak kullanılan betonarme iskelet sistemdeki ısı köprüsü etkilerinin farklı benzetim araçları ile örnek bina üzerinde analizlerin yapılması çalışmanın özgünlüğü açısından önemlidir. Bu amaçla yapı elemanı bazında köşe noktasında bulunan betonarme kolon kesiti farklı yalıtım durumlarına göre iki boyutlu ısı köprüsü etkisi açısından incelenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında örnek binanın yıllık enerji performansı da değerlendirilmiştir. Çalışma metodolojisinde problem tanımı (ısı köprüsü etkileri ve problemleri) ve yöntem (örnek binaya ait veriler ve kullanılan sayısal modeller) açıklanmıştır. Elde edilen bulgular tablo ve grafiklerle analiz edilerek yorumlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Isı köprülerinin oluşum nedenleri, ısı ve nem performansı üzerindeki olumsuz etkileri çalışmanın ana problemini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda Türkiye’deki yapım koşulları açısından yaygın olarak kullanılan betonarme bina tipolojisi örnek olarak seçilmiştir. Örnek binaya ait özellikler tablo ve şekille özetlenmiştir. Isıl ve higrotermal performans; yatay kesitte köşe noktasında bulunan betonarme kolon kesiti, farklı yalıtım durumlarına göre Quickfield ve WUFI programlarıyla belirlenmiştir. Ayrıca binanın toplam enerji performansı BEP-TR programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler değerlendirilerek ısı köprüsü problemlerinin azaltılmasına yönelik öneriler sunulmuştur. Çalışma kapsamında izlenen yol Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Çalışmanın metodolojisi (Methodology of this study)

Tablo 2. Örnek bina ile ilgili bilgiler (Information about the case building)

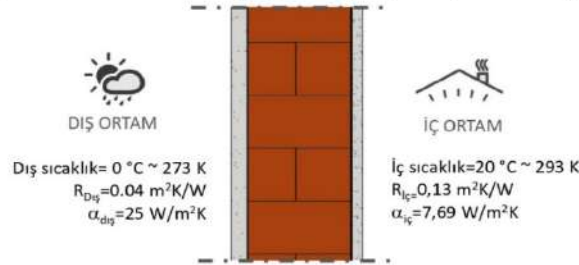
Kat adedi	Bodrum+Zemin+3 Normal Kat	Bağımsız Bölüm Sayısı	8 (Her katta 2 daire)
Taban Alanı	196 m ²	Toplam Alan	1100 m ²
Dış cephe toplam yüzey alanı (bitişik cephe hariç)	625,8 m ²	Dış cephedeki toplam betonarme alanı	104,55 m ²
Çatı	Ahşap, kırma, oturtma çatı	Taşıyıcı sistem	Betonarme iskelet
Duvar dolgu malz.	19 cm tuğla	Isı yalıtımı	5 cm yalıtım levhası
Isıtma sistemi	Merkezi ısıtma (kömür/katı yakıt)	Arsa Durumu	Bir kenarı bitişik nizam

Çalışmada Türkiye’de 2. Derece Gün Bölgesinde yer alan Edirne/Uzunköprü İlçesindeki 2017 tarihli bir apartman yapısı örnek bina olarak seçilmiştir. Apartman binası betonarme iskelet sistem; bodrum+zemin ve 3 normal kata sahiptir. 196m² taban alanına sahip 8 bağımsız bölümden oluşan konutta merkezi ısıtma sistemi kullanılmaktadır. Tablo 2’de bina hakkında bilgiler yer almaktadır.

2.1. Problem Tanımı (Problem Definition)

Çalışmada sabit rejim şartları altında hesap yapan Quikfield programında girdi olarak TS 825 Standardında belirlenen en soğuk ay olan Ocak ayı değerleri kullanılmıştır. Aylık ortalama iç sıcaklık değeri 20 °C=293 Kelvin iken dış sıcaklık 0 °C=273 Kelvin olarak kabul edilmiştir (Şekil 3). Periyodik rejim koşullarında hesap yapan Wufi programında ise Edirne’nin bir yıllık saatlik iklim verileri kullanılmıştır.

TSE 825 2. Derece Gün Bölgesi/Ocak Ayı Değerleri (Kabul edilen)



Şekil 3. Kabul koşulları (Accepted values)

Türkiye’de inşaat sektöründe yaygın olarak betonarme iskelet sistem kullanılmaktadır. Bu sistemde, betonarme

kolon, kirişler, hatıllar, lentolar, döşeme alınları vb. yapı elemanları, tuğla ve gazbeton gibi farklı malzemelerle kurgulanan duvarlardan daha yüksek ısı iletkenliğine sahiptir ve ısı köprülerinin oluşumu kaçınılmazdır.

Bu çalışmada, Türkiye’de betonarmenin geniş kullanımı ile karakterize edilmiş sıklıkla karşılaşılan ısı köprülerine atıfta bulunarak elde edilen verilerin doğruluğu incelenmektedir. Bu amaçla mevcut bir konut yapısının köşe noktasında oluşabilecek ısı köprüsü üzerindeki etkiler, kendi içinde yalıtım uygulaması durumuna göre 3 farklı konfigürasyonla iki boyutta (2D) ele alınmıştır. Bu çerçevede yatay düzlemde duvar-kolon köşe birleşimleri için tuğla duvar malzemeli ve betonarme kolonlu bir köşe noktası incelenmiştir. Seçilen örnek için tamamen yalıtımsız (*Tip 1*), kolon dıştan kısmı yalıtımlı (*Tip 2*) ve dıştan sürekli yalıtımlı (*Tip 3*) konfigürasyonları program yardımıyla analiz edilmiştir. Sıcaklık değerlerinin yanı sıra ısı akısı özellikleri de araştırılmıştır. Isı köprüsü analizi için yatay kesitte binanın köşe noktasında konumlanan 30x40 cm boyutundaki betonarme kolondan itibaren her iki doğrultudaki eleman uzunluğu 1 m alınmıştır. Simüle edilen konfigürasyonlar ile ilgili genel bilgiler ve kullanılan yapı malzemelerinin TS 825 Standardına göre ısı özellikleri (TS 825, 2013) Tablo 3’te verilmiştir. Konfigürasyonların U değerleri (ısı iletkenlik katsayısı) TS 825’e uygun olarak hesaplanmıştır. TS 825’te 2. Bölge için duvarlarda izin verilen maksimum U değeri 0,60 W/m²K tavsiye edilmektedir. Yalıtımsız durumda (U=1,54 W/m²K) bu sınır değeri aşılmaktadır. Yalıtımlı durumda ise U değeri 0,52 W/m²K ile sınır değerin altındadır.

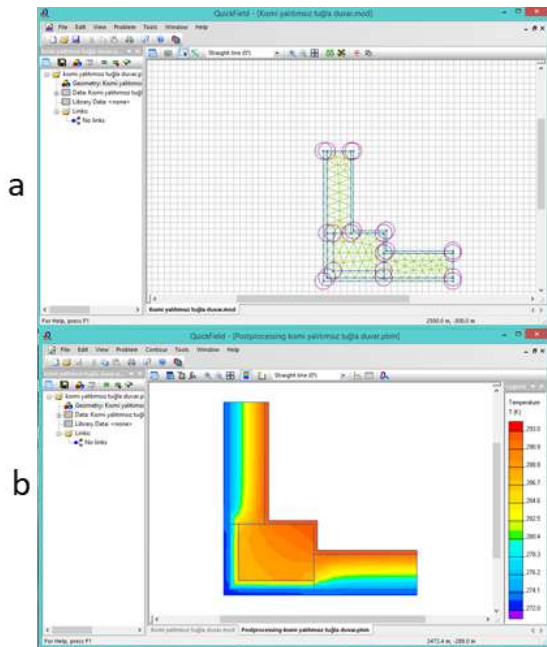
Tablo 3. Örnek binadaki dış duvarlara ait değişkenler (Variables of the external walls in the case building)

Yalıtım Durumu	Tip 1 Yalıtımsız	Tip 2 Kolon kısmı yalıtımlı	Tip 3 Sürekli/kesintisiz yalıtımlı		
(Tuğla duvar 19 cm)					
Düğüm noktası	188	208	224		
Katmanlar	Tabaka Kalınlığı, d (m)	Su buharı difüzyon direnci, μ	Yoğunluk, δ (kg/m ³)	Isıl iletkenlik katsayısı, λ (W/mK)	Isıl iletkenlik Direnci, R (m ² .K/W)
Yüzeysel ısı iletim katsayısı (İç) α_i	-	-	-	-	0,13
İç sıva (alçı harcı)	0,02	10	1400	0,7	0,028
Donatılı normal beton (TS 500)	0,30 x 0,40	100	2400	2,5	0,12
Yatay Delikli Tuğla (TS EN 771-1)	0,19	10	1000	0,45	0,42
Expanded polistren köpük-EPS (TS 11989 EN 13164)	0,05	50	16	0,04	1,25
Yalıtım Sıvası	0,008	10	200	0,3	0,026
Dış sıva (çimento harcı)	0,3	15	1800	1	0,03
Yüzeysel ısı iletim katsayısı (Dış) α_d	-	-	-	-	0,04
Lejant	SIVA	TUĞLA	BETONARME	YALITIM LEVHASI	

2.2. Yöntem (Method)

Yapı elemanlarındaki ısı geçişi gerçek durumda üç boyutlu olarak meydana gelmekte ve karmaşık hesap metotları içermektedir. Ancak hesaplamaların daha pratik olarak yapılabilmesi için tek ve iki boyutlu hesaplama metotları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında ısı köprüsü etkisi kolon ve çevresi ile sınırlandırılarak iki boyutlu ısı geçişi iki farklı benzetim aracı ile modellenmiştir. Analizler için Quick Field 6.3 ve Wufi 2D-4.3 paket programları kullanılmıştır. Quick Field Programı; manyetik parçalar, elektostatik çözümler, ısı transferi, stres analizleri ve elektrik devreleri gibi konularda birçok çalışmaya altlık oluşturmaktadır. Program sonlu eleman analizleri metodunu (Finite Element Method - FEM) kullanmaktadır.

Bu çalışmada, özellikle ısı transferi analizleri yardımıyla iki boyutlu ısı iletimi çözümü yapılmıştır. Bu çerçevede ısı köprüsü detayları için belirlenen kalınlık ve ebatlardaki elemanlar programda oluşturularak malzeme özellikleri ve ısı iletkenlik değerleri girilmiştir. Kesişim noktalarında belirli düğüm noktaları (nodes) belirlendikten sonra program otomatik olarak elemanları 'mesh' denilen üçgensel alanlara bölmektedir. Benzetim sonucunda eleman içerisindeki sıcaklık ve ısı dağılımları görülebilmektedir. İstenilen noktalar için özel ölçümler alınabilmekte ve seçili alanlardaki ısı akısı ve sıcaklıkla ilgili büyüklükler grafiklere aktarabilmektedir (Quick Field, 2017). Şekil 4'te ise Quick Field 6.3 versiyonu arayüzü hakkında bilgi verilmektedir.

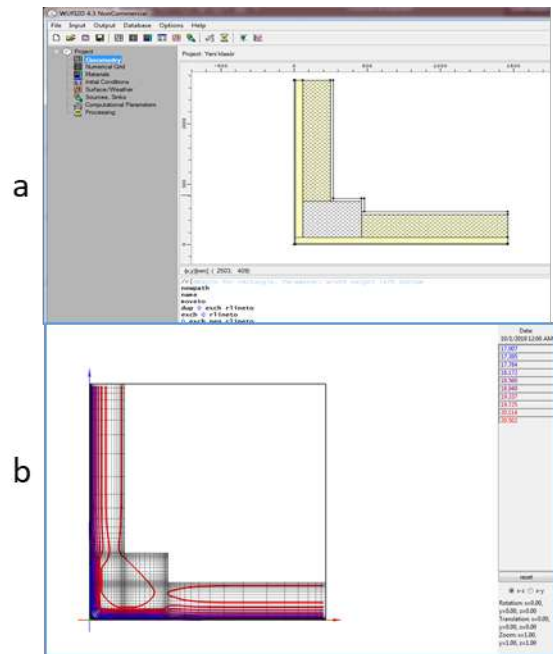


Şekil 4. Quick Field 6.3 programının arayüzünde a) Düğüm noktaları ve ağ yapısı b) İzotermal görünüm (Interface of the Quick Field 6.3 program a) Nodes and meshes b) Isothermal view)

Wufi 2D programı bina bileşenlerinin iki boyutlu kesitinde zamana bağlı olarak ısı ve nem performansını hesaplamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile

çalışmaktadır ve seçilen geometri için bir ağ modeli tanımlanması gerekmektedir. Bu ağ modeli; hesaplamaların hassasiyeti ve hesaplama süresi açısından sık, normal ve seyrek değerlerde seçilebilmektedir. Program hesaplamalarda EN 15026 (Yapı bileşenlerinin ve yapı elemanlarının higrotermal performansı) standardını esas almaktadır. Bu yöntemle geometrik ve yapısal ısı köprülerinin etkileri de hesaplanabilir. ısı köprülerinin hesaplanmasında ISO 10211 standardına göre hesap yapılmaktadır. Aynı zamanda ilk inşaat nemi, bileşenlerin kuruma zamanı, yoğuşma riskini belirlemek amacıyla da kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında ele alınan köşe noktası geometrisi için yeterli hassasiyeti sağlayacak normal değerlerde ağ aralıkları seçilmiştir. Çok katmanlı yapı bileşeninde; malzeme özellikleri, başlangıç koşulları, iklim verileri girdi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 5'te Wufi 2D-4.3 versiyonu arayüzü görülmektedir.



Şekil 5. Wufi 2D-4.3 Programının arayüzünde a) Bileşen geometrisinin oluşturulması b) İzotermal görünüm (Interface of the Wufi 2D-4.3 Program a) Constructing the component geometry b) Isothermal view)

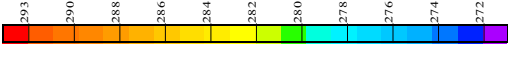
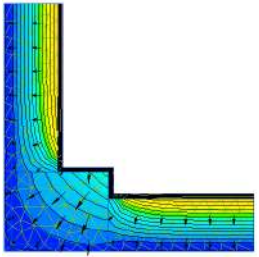
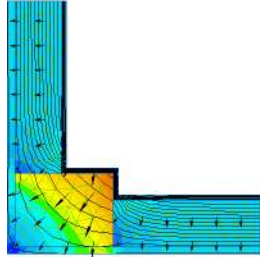
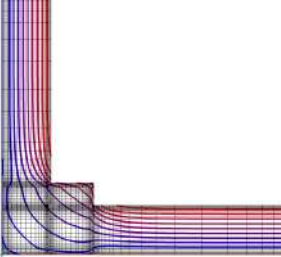
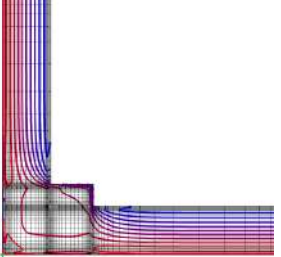
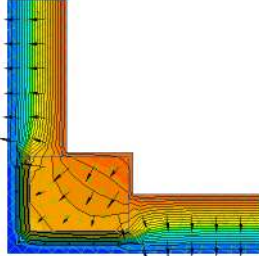
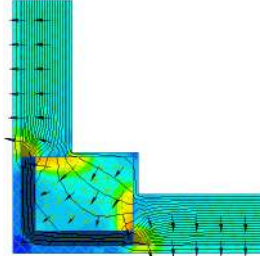
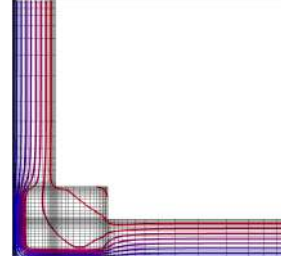
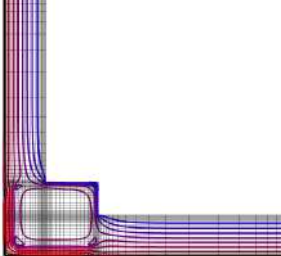
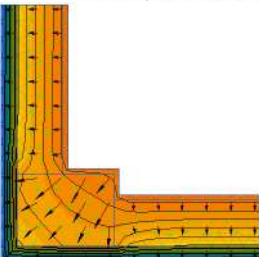
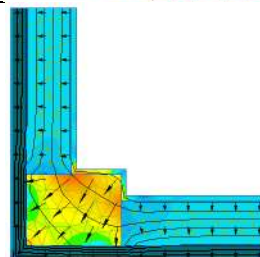
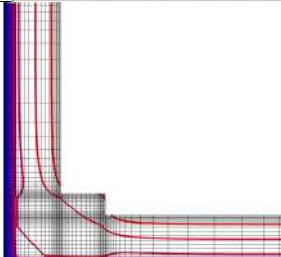
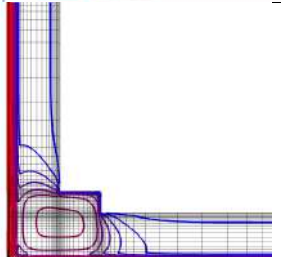
3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME (Findings and Evaluation)

Örnek binada seçilen detay (köşe) noktasında **Tip 1, 2 ve 3** konfigürasyonları için sıcaklık, ısı akısı, bağıl nem ve yoğuşma analizleri yapılmıştır. ısı köprüsü için Quick Field programında elde edilen sıcaklık ve ısı akısı değerleri ile WUFI programında elde edilen sıcaklığa bağlı bağıl nem değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu konfigürasyonlar arasında en düşük sıcaklık ve en yüksek ısı akısı dağılımının yalıtımsız durumda olduğu görülmektedir. Kısmi yalıtımlı durumda yalıtımsız duruma göre iyileşme görülmesine rağmen homojen

olmayan sıcaklık ve ısı akısı dağılımları özellikle duvar kolon birleşim noktalarında dikkati çekmektedir. Dışardan kesintisiz yalıtımlı durumda sıcaklık ve ısı

akısının dengeli ve ısı kaybının diğer durumlara göre büyük oranda azaldığı görülmektedir.

Tablo 4. Örnek binada köşe birleşiminde oluşan ısı köprüsü için 3 farklı durumda sıcaklık, ısı akısı ve bağıl nem analizleri (Temperature, heat flux and relative humidity analyzes in 3 different status for the thermal bridge formed at the corner junction in the case building)

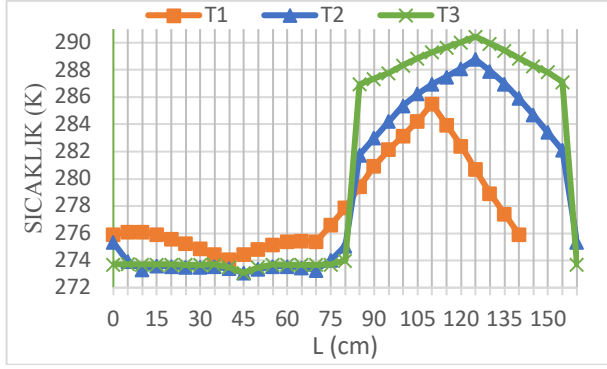
	Quick Field 6.3		Wufi 2D-4.3	
Tipler	Sıcaklık	Isı Akısı	Sıcaklık	Bağıl Nem
				
Yalıtımsız Tuğla Duvar (Tip 1)				
Kısmi Yalıtımlı Tuğla Duvar (Tip 2)				
Kesintisiz Yalıtımlı Tuğla Duvar (Tip 3)				

Yatay düzlemde köşe birleşiminde yer alan taşıyıcı kolonda dıştan içe belirli bir istikamet doğrultusunda elde edilen veriler değerlendirilmiştir. 40/30 boyutundaki kolonun etrafındaki 5 cm'lik yalıtımın dış hattı üzerinde belirli aralıklarda ölçülen sıcaklık ve ısı akısı değerleri grafiğe aktarılmıştır.

Şekil 6'daki veriler incelendiğinde özellikle yalıtımsız durum **Tip 1**'de en düşük sıcaklıklar meydana gelmektedir. Aynı zamanda yalıtımsız durumda eleman kesitinde sıcaklık farkı daha yüksektir. Taşıyıcı eleman içerisinde en düşük sıcaklık farkları ise **Tip 2** ve **Tip 3** konfigürasyonlarında görülmektedir.

Aynı eleman içinde sıcaklık farklarının az olması, ısıl gerilmelerden kaynaklanan hasarların oluşumunu engeller. Bu sayede enerji tüketimine ve korunumuna da katkı sağlanır. Oluşan sıcaklık farkları, elemanın bünyesinde gerilmeler meydana getirerek taşıyıcı elemanın mukavemetinin düşmesine de sebep olur. Özellikle kış koşullarında iç ortam sıcaklıkları beklenen

seviyelere ulaşamamakta, ısıl konfor koşulları sağlanamamaktadır. İç mekân ile dış mekân arasındaki sıcak farkının en yüksek olduğu dönemlerde kesit içerisindeki nem miktarı da artmaktadır. Su buharı, katmanlı yapı kabuğunda nem geçişine direnç gösteren bir bileşenle karşı karşıya geldiğinde ise yoğunlaşma oluşmaktadır. Bu durum yüzeylerin nemlenmesine ve rutubet-küf oluşumuna neden olarak hem kullanıcı hem de yapı sağlığını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca donatılı betonarme elemanlarda demir donatılar, korozyona uğrayarak zamanla özelliklerini kaybedebilmekte ve binanın statikini tehdit etmektedir.

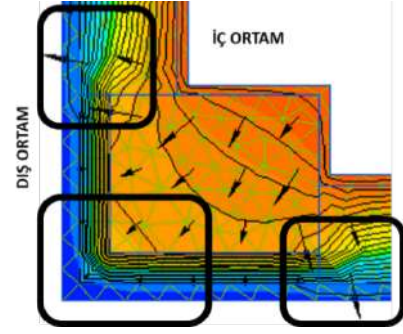


Şekil 6. Konfigürasyonlara göre kolon çevresi sıcaklık değerleri (Temperature values of around the column according to the configurations)

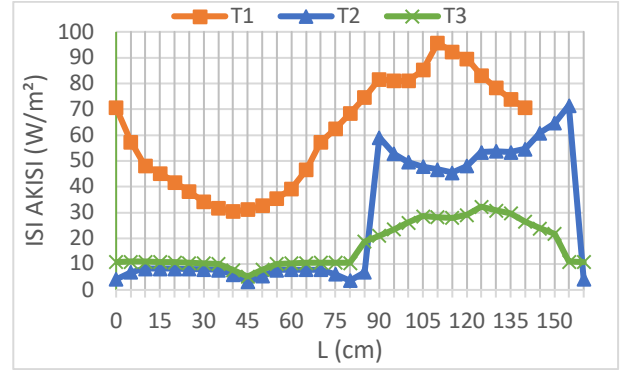
Çalışma doğrultusunda **Tip 3**'ün uygulanması durumunda yapı elemanı kesitinde **Tip 2**'den ort. 1-1,5 °C; **Tip 1**'den ise ort. 2,5-3 °C daha yüksek sıcaklıklar elde edilmiştir. **Tip 2**'de kolonun dışarıdan yalıtılmasına rağmen, istenen faydanın tam sağlanamadığı gözlenmektedir. Çünkü kolon korunsu da kolon-duvar birleşimlerinde ısıl iletkenlik farkı bulunan diğer elemanlar dış etkenlere maruz kalmakta ve bu olumsuzluklar kolon sıcaklıklarını da etkilemektedir. Dış iklim koşullarına açık olan duvar bileşeninden direkt ya da endirekt olarak suyun kesit içine girmesi engellenememektedir. Zamanla nemlilik oranı artan duvar bileşeninin, ısı yalıtım özelliği bozularak performansı önemli ölçüde azalacaktır. Eleman kesitinde oluşan ısıl gerilmeler Şekil 7'de vektör yönleri ve izoterm eğrileri ile ifade edilmeye çalışılmıştır.

Simüle edilen konfigürasyonlardaki ısı akısı dağılımı Şekil 8'de verilmiştir. Yalıtımsız durumda (**Tip 1**) yapı elemanı kesitinde meydana gelebilecek ısı kayıpları **Tip 2**'ye göre %55, **Tip 3**'e göre ise %72 daha fazladır. **Tip 3** konfigürasyonu ısı kayıpları açısından **Tip 2**'e göre %37 daha avantajlıdır. Benzer şekilde sürekli yalıtımlı

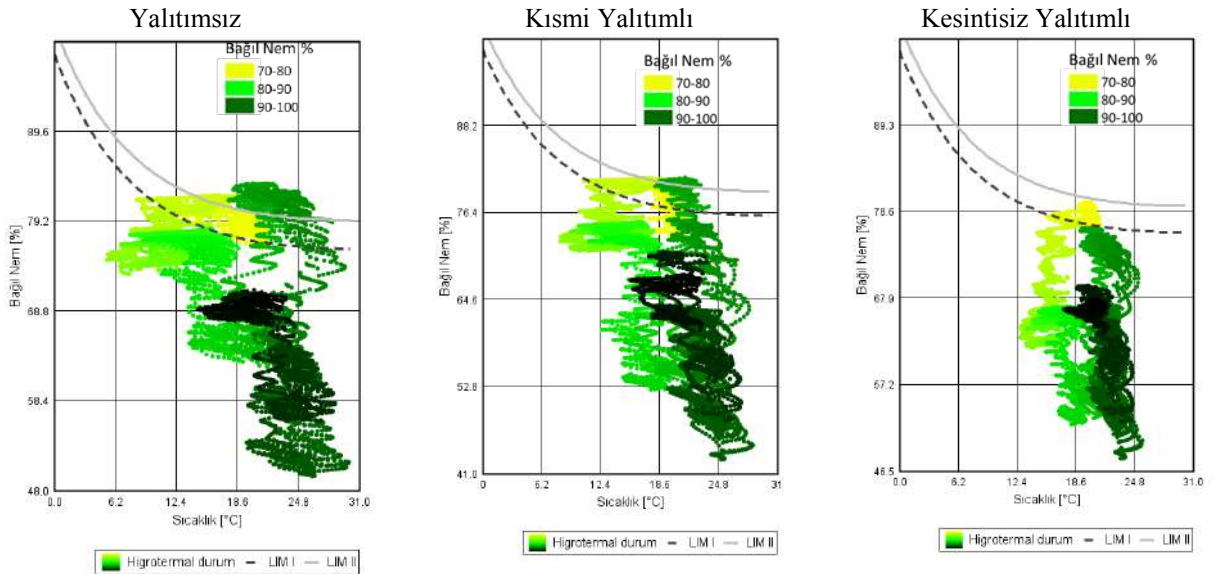
durumda eleman kesitindeki ısı dağılımları daha dengelidir. Yalıtımsız durumdaki elemanın kesitindeki yüksek ısı farkları, elemanın ısıl performansını olumsuz etkileyeceği göz ardı edilmemelidir.



Şekil 7. Kısmi yalıtılmış Tip 2 için elemanda gerçekleşen ısı kaybı ve ısıl gerilmeler (Heat loss and thermal stresses in the structural element for partially filled insulated Type 2)



Şekil 8. Konfigürasyonlara göre kolon çevresi ısı akısı değerleri (Heat flux values of the column according to the configurations)

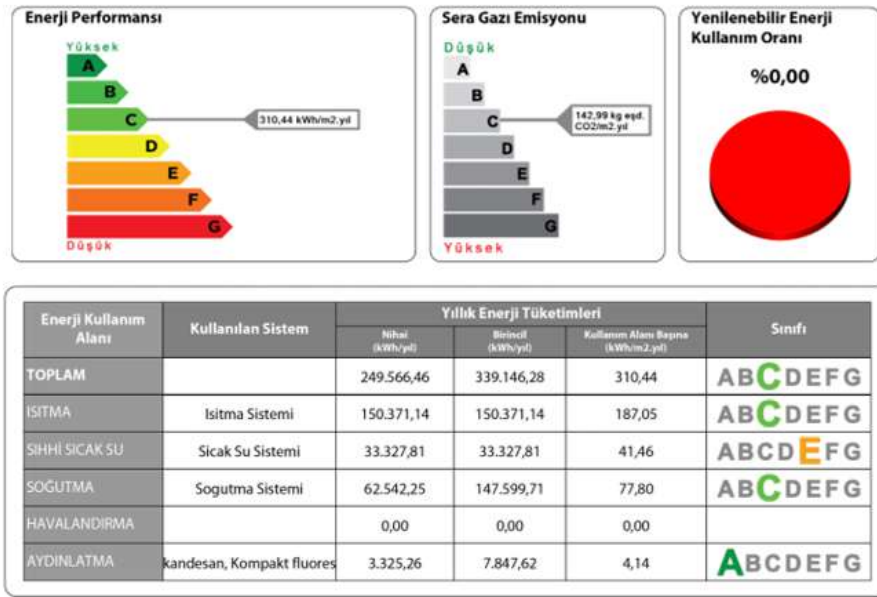


Şekil 9. Isı köprülerindeki yoğuşma durumu (Condensation in the thermal bridges)

WUFI programından elde edilen ve Şekil 9’da gösterilen yoğuşma grafiklerinde limit 1 suda ayrışamayan malzemelerin, limit 2 ise suda ayrışabilen malzemelerin sınır değerlerini ifade etmektedir. Görüldüğü gibi dışarıdan kesintisiz yalıtımlı durumda yoğuşma riski oluşmazken kısmi yalıtımlı durumda yoğuşma riski yüksektir. Yoğuşma durumunda yapı kabuğu performansını sağlayamayacak ve bileşenler bozulma etkileri ile karşı karşıya kalacaktır. Aynı zamanda bu durum iç ortam konfor koşullarını da olumsuz etkileyerek yapı sağlığının bozulmasına neden olacaktır.

Çalışma kapsamında ele alınan örnek binanın yapı kabuğu **Tip 3** senaryosu ile eşleşmektedir. BEP-TR

programına bina özelliklerinin girilmesiyle binaya ait enerji tüketim sınıfı belirlenmiştir. Binaya ait enerji kimlik belgesinde yapının ihtiyaç duyduğu yıllık ısıtma, soğutma, sıcak su ve havalandırma için gerekli tüketim miktarları ve sera gazı emisyonu hakkında bilgiler yer almaktadır. Yapıya ait enerji kimlik belgesine göre yapı, kullanım alanı başına düşen toplam 310,44 kWh/m² enerji tüketimi ile enerji performans sınıfı ‘C’ sınıfı olarak belirlenmiştir. Yıllık CO₂ emisyonu yaklaşık 143 kg eşd. CO₂/m².yıl ile yine ‘C’ sınıfı olarak hesaplanmıştır. Yapıda yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmamaktadır. Şekil 10’da yıllık nihai ısıtma, soğutma, havalandırma, sıcak su ve aydınlatma enerji tüketim miktarları ve sınıfları yer almaktadır.



Şekil 10. Örnek binanın yıllık enerji ihtiyacı, enerji performans ve sera gazı emisyon sınıfları (Annual energy demand, energy performance and greenhouse gas emission degrees in the case building)

Binaya uygulanan sınır yalıtım değeri ile enerji tüketim sınıfı C olarak belirlenmiştir. Enerji tüketiminin azaltılması ve enerji tüketim sınıfının iyileştirilmesi için yalıtım kalınlıklarının artırılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ve uygulama detaylarının iyileştirilerek binanın renovasyonu faydalı olacaktır.

4. SONUÇLAR (Conclusions)

Çalışmada çok katlı bir konut örneğinde yatay düzlemde ısı köprüsü oluşumu, elemanın geometrisi ve malzeme değişimine göre ele alınmıştır. Tuğla duvar-betonarme kolon birleşiminde, yalıtım durumuna göre 3 farklı konfigürasyon belirlenerek ısı köprüsü analizi yapılmıştır. Yapılan analizde, farklı konfigürasyonlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bir tarafı bitişik nizamlı olan binada diğer üç cephedeki betonarme kolon-kiriş yüzey alanı, toplam dış yüzey alanının %20’si kadardır. Zemin katta betonarme (kolon, perde, giriş) dış cephede yer alırken 1, 2 ve 3. normal katlarda konsollar bulunmasından dolayı betonarme elemanlar iç yüzeyde kalmaktadır.

Benzetim sonuçları analiz edildiğinde yalıtımsız durum **Tip 1**’de, ısı yalıtımı yapılmamış elemanların yüzeylerinden yüksek ısı kayıpları meydana gelmektedir. Kolon ve kirişlerin dışarıdan yalıtıldığı **Tip 2** ve **Tip 3**’te, eleman kesiti sıcak tarafta kalmaktadır. Ancak **Tip 2**’de ısı köprülerinin dışarıdan yalıtılması ile bu kısımlar korunmakta fakat duvar kesitleri dış koşullarla direkt temas etmektedir. **Tip 3**’te yapı elemanı içerisinde daha az sıcaklık değişimi görülmektedir. Yapı elemanın ortalama kesit sıcaklığına göre **Tip 3**, **Tip 2**’den ort. 1-1,5 °C; **Tip 1**’den ise ort. 2,5-3 °C daha yüksek sıcaklıklara sahiptir. Yapı elemanı kesitinde meydana gelebilecek ısı kayıpları **Tip 1**’de **Tip 2**’ye göre %55, **Tip 3**’e göre ise %72 daha fazladır. **Tip 3**’teki ısı kayıpları **Tip 2**’den %37 daha azdır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında bina kabuğundaki yapı elemanları üzerinde kesintisiz yalıtımın olumlu etkileri (enerji tüketimi, ısı ve nem performans açısından) görülmektedir (Martin, Campos-Celador, Escudero vd, 2012; Asdrubali vd, 2012; Capozzoli vd, 2013; Umuroğulları vd, 2011).

Hallik vd. farklı iki örnek bina kabuğunda ısı köprülerini ISO 10211'e göre karşılaştırmakta ve bina tipine bağlı olarak ısı kayıplarının %35 ila %76 oranında azaldığını öne sürmektedir (Hallik ve Kalamees, 2021). Evola vd., ısı kaybının %30'unun ısı köprülerinden kaynaklandığını belirtmektedir (Evola vd, 2011). Ayrıca dışarıdan yalıtımın içeriden yalıtıma göre ısı köprüsü etkisini %53-65 oranında azaltılabileceği belirtilmektedir (El Saied vd, 2022). Deneysel ve benzetim yöntemleriyle elde edilen benzer bulgular çalışma metodunu doğrular niteliktedir.

Çalışmada ele alınan örnek yapıya ait mevcut enerji kimlik belgesindeki veriler **Tip 3**'ün avantajlarını doğrulamaktadır. Yapının enerji performans sınıfının 'C' çıkmasında, yalıtımın etkisi büyüktür. Enerji korunumu açısından dış yalıtımın varlığı, yıllık tüketilen ısıtma ve soğutma enerjisi açısından tasarruf sağlamaktadır. Enerji sınıfının artırılabilmesi için ek önlemlerin alınması gerekmektedir. Hem enerji korunumu hem de yapı sağlığı açısından yalıtım kesintiye uğratılmamalı ve uygulamada ısı köprüsüne neden olabilecek hatalardan kaçınılmalıdır. Bina kabuğunda ısı köprüsüne neden olabilecek karmaşık geometrilerden kaçınılmalıdır. Fosil kaynaklardan elde edilen olumsuz çevresel etkileri azaltmak için yenilenebilir enerji kaynakları ya da atık vb. kaynaklardan yararlanılmalıdır.

Binanın enerji performans sınıfının yükseltilebilmesi için tasarım aşamasında bina benzetim yöntemlerinden faydalanılmalıdır. Bu amaçla duvar bileşen türü, yalıtım malzemesi türü, kalınlığı ve yeri (ısı ve nem performansı), yapı kabuğu sızdırmazlığı dikkate alınmalıdır. Enerji verimli tasarım için pasif tasarımlara öncelik verilmeli, bina sistemlerinin verimlilikleri artırılmalı, enerji talebinin azaltılabileceği malzeme ve ekipman dahil edilerek bina enerji ihtiyacı yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmalıdır. Ayrıca ülkemizde bina performansının iyileştirilmesine yönelik enerji verimliliği yaptırımlarının gözden geçirilmesi, Enerji Kimlik Belgesi C sınıfı koşulunun iyileştirilmesi de alınabilecek önlemler arasındadır.

KAYNAKLAR (References)

IEA (International Energy Agency), 2013, Transition to Sustainable Buildings-Strategies and Opportunities to 2050. Transition to Sustainable Buildings. <https://doi.org/10.1787/9789264202955-en>

European Commission, 2020. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en#zero-emission-buildings.

Garay, R., Uriarte, A. and Apraiz, I., 2014, Performance assessment of thermal bridge elements into a full scale experimental study of a building façade. Energy and Buildings, 85, 579–591. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.09.024>

Goggins, J., Moran, P., Armstrong, A. and Hajdukiewicz, M., 2016, Lifecycle environmental and economic performance of nearly zero energy buildings (NZEB) in Ireland, Energy Build. Vol:116, pp. 622–637.

O'Grady, M., Lechowska, A. A. and Harte, A. M., 2018, Application of infrared thermography technique to the thermal assessment of multiple thermal bridges and Windows, Energy and Buildings, 168, 347–362.

Evola, G., Margani, G. and Marletta, L. 2011, Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate. Energy and Buildings, 43(9), 2385–2393. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.028>.

Bergero, S. and Chiari, A., 2018, The influence of thermal bridge calculation method on the building energy need: A case study. Energy Procedia, 148(Ati), 1042–1049.

De Angelis, E. and Serra, E., 2014, Light steel-frame walls: Thermal insulation performances and thermal bridges. Energy Procedia, 45, 362–371.

Martins, C., Santos, P. and Da Silva, L. S., 2016, Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: A parametric study. Journal of Building Physics, 39(4), 342–372.

Zhao, K., Jiang, Z., Huang, Y., Sun, Z., Wang, L., Gao, W. and GE, J., 2022, The method of reducing heat loss from thermal bridges in residential buildings with internal insulation in China's hot summer and cold winter zone. Journal of Building Engineering, 62, 105421.

Erhorn-kluttig, H., Erhorn, H., Citterio, M., Cocco, M., Orshoven, V. and Tilmans, A., 2009, Thermal Bridges in the EPBD context, 30th AIVC Conference "Trends in High Performance Buildings", Berlin/Germany, October 1-2.

Martin, K., Campos-Celador, A., Escudero, C., Gómez, I. and Sala, J. M., 2012, Analysis of a thermal bridge in a guarded hot box testing facility. Energy and Buildings, 50, 139–149.

Ge, H., McClung, V. R. and Zhang, S., 2013, Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study. Energy and Buildings, 60, 163–173.

Aghasizadeh, S., Kari, B.M, Fayaz, R., 2022, "Thermal performance of balcony thermal bridge solutions in reinforced concrete and steel frame structures", Journal of Building Engineering, Volume 48, 1 May, 103984.

Aguilar, F., Solano, J. P. and Vicente, P. G., 2014, Transient modeling of high-inertial thermal bridges in buildings using the equivalent thermal wall method. Applied Thermal Engineering, 67(1–2), 370–377.

- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., De' Rossi, F. and Vanoli, G. P., 2013, Simplified state space representation for evaluating thermal bridges in building: Modelling, application and validation of a methodology. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 344–354.
- Dumitrescu, L., Baran, I. and Pescaru, R. A., 2017, The Influence of Thermal Bridges in the Process of Buildings Thermal Rehabilitation. *Procedia Engineering*, 181, 682–689.
- Kotti, S., Teli, D. and James, P. A. B., 2017, Quantifying Thermal Bridge Effects and Assessing Retrofit Solutions in a Greek Residential Building. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 306–313.
- Marincioni, V., May, N. and Altamirano-Medina, H., 2015, Parametric study on the impact of thermal bridges on the heat loss of internally insulated buildings. *Energy Procedia*, 78, 889–894.
- Viot, H., Sempey, A., Pauly, M. and Mora, L., 2015, Comparison of different methods for calculating thermal bridges: Application to wood-frame buildings. *Building and Environment*, 93(P2), 339–348.
- Fantucci, S., Isaia, F., Serra, V. and Dutto, M., 2017, Insulating coat to prevent mold growth in thermal bridges. *Energy Procedia*, 134, 414–422.
- Martin, K., Escudero, C., Erkoreka, A., Flores, I. and Sala, J. M., 2012, Equivalent wall method for dynamic characterisation of thermal bridges. *Energy and Buildings*, 55, 704–714.
- El Saied, A., Maalouf, C., Bejat, T. and Wurtz, E., 2022, Slab-on-grade thermal bridges: A thermal behavior and solution review, *Energy and Buildings*, Volume 257, 111770.
- Asdrubali, F., Baldinelli, G. and Bianchi, F., 2012, A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. *Applied Energy*, 97, 365–373.
- Ahrab, M. A. M. and Akbari, H., 2013, Hygrothermal behaviour of flat cool and standard roofs on residential and commercial buildings in North America. *Building and Environment*, 60, 1–11.
- Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., Tsoka, S. and Chastas, P., 2019, Thermal bridging problems on advanced cladding systems and smart building facades. *Journal of Cleaner Production*, 214, 62–69.
- Terentjevas, J., Šadauskaitė, M., Šadauskienė, J., Ramanauskas, J., Buska, A. and Fokaides, P. A., 2021, Numerical investigation of buildings point thermal bridges observed on window-thermal insulation interface, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 15.
- Ascione, F., Bianco, N., De Rossi, F., Turni, G. and Vanoli, G. P., 2012, Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: Comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates. *Applied Energy*, 97, 405–418.
- Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K. and Bikas, D., 2017, Analysis of the Thermal Bridging Effect on Ventilated Facades. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 397–404.
- BS EN ISO 10211, 2007, Thermal bridges in building construction- Heat flows and surface temperatures- Detailed calculations, 3(1), 54.
- Prata, J., Simões, N. and Tadeu, A., 2018, Heat transfer measurements of a linear thermal bridge in a wooden building corner. *Energy and Buildings*, 158, 194–208.
- Özel, M., 2022, Determination of indoor design temperature, thermal characteristics and insulation thickness under hot climate conditions. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 42, 1, 49–64.
- Çağlayan S., Ozorhon, B. and Kurnaz, L., 2022, Nationwide mapping of optimum wall insulation thicknesses: a stochastic approach. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 42, 2, 169–202.
- ISO 8990, 1994, Thermal insulation- Determination of steady-state thermal transmission properties- Calibrated and guarded hot box.
- Asdrubali, F. and Baldinelli, G., 2011, Thermal transmittance measurements with the hot box method: calibration, experimental procedures, and uncertainty analysis of three different approaches, *Energy Build.* Vol:43, pp.1618–1626.
- Fang, Y., Eames, P.C., Norton, B. and Hyde, T.J., 2006, Experimental validation of a numerical model for heat transfer in vacuum glazing, *Sol. Energy*. Vol:80, pp.564–577.
- Zalewski, L., Lassue, S., Rousse, D. and Boukhalfa, K., 2010, Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2869–2877.
- Capozzoli, A., Gorrino, A. and Corrado, V., 2013, A building thermal bridges sensitivity analysis. *Applied Energy*, 107, 229–243.
- Al-Sanea, S. A. and Zedan, M. F., 2012, Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions. *Applied Energy*, 98, 584–593.
- Brumă, B., Moga, L. and Moga, I., 2015, Aspects Regarding Dynamic Calculation of Plan Building Elements Having Thermal Bridges. *Energy Procedia*, 85(November 2015), 77–84.

Quinten, J. and Feldheim, V., 2016, Dynamic modelling of multidimensional thermal bridges in building envelopes: Review of existing methods, application and new mixed method. *Energy and Buildings*, 110, 284–293.

Karacavus, B. and Can, A., 2008, Experimental investigation of a solar energy heating system under the climatic conditions of Edirne. *Renewable Energy*, 33(9), 2084–2096.

Romero, M. J., Aguilar, F. and Vicente, P. G., 2021, Analysis of design improvements for thermal bridges formed by double-brick façades and intermediate slabs for nZEB residential buildings in Spain, *Journal of Building Engineering*, Volume 44, 103270.

Capozzoli, A., Gorrino, A., Corrado, V., Grinzato, E., Vavilov, V., Kauppinen, T., Fukuyo, K., 2013, Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 107(9), 2385–2393.

Ge, H. and Baba, F., 2015, Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building”. *Energy and Buildings* Volume 105, Pages 106–118.

Antretter, F., Dring, J. R. and Pazold, M., 2013, Coupling of Dynamic Thermal Bridge and Whole-Building Simulation, *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference, Buildings XII*.

Real, S., Gomes, M.G., Rodrigues, A.M. and Bogas, J.A., 2016, Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings, *Construction and Building Materials*. Vol: 121, pp.460–470.

Fukuyo, K., 2003, Heat flow visualization for thermal bridge problems. *International Journal of Refrigeration*, 26(5), 614–617.

Schöck Ltd., 2015, Thermal Bridging Guide. Schöck Ltd, Oxford, (June). Retrieved from https://www.schoeck.co.uk/view/5993/Thermal_Bridging_Guide_Schoeck_Isokorb_%5B5993%5D.pdf

TS 825, 2013, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

BEPY, 2010, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Aralık.

TS EN ISO 10211, 2017, Bina yapılarında ısı köprüleri-Isı akışları ve yüzey sıcaklıkları- Ayrıntılı hesaplama yöntemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN ISO 14683, 2017, Bina inşaatı-Isıl köprüler-Lineer ısı geçirgenlik-Basitleştirilmiş metod ve hatasız değerler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Quick Field, 2017, Quick Field™ Finite Element Analysis System Version 6.3 User's Guide, Tera Analysis Ltd. / <http://quickfield.com> (Son erişim tarihi: 16.05.2023)

Umaroğulları, F., Zorer Gedik, G. and Mihlayanlar, E., 2011, Condensation Control of Insulated and Uninsulated Concrete Walls in the Periodic Regime: The Case of Edirne. *Megaron*, 6(1): 13–20.

Hallik, J. and Kalamees, T., 2021, The effect of flanking element length in thermal bridge calculation and possible simplifications to account for combined thermal bridges in well insulated building envelopes, *Energy & Buildings* 252, 111397, 1–10.



Filiz UMAROĞULLARI, Trakya Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü'nde 2020 yılından beri Doçent olarak görev yapmaktadır. Lisansüstü eğitimini Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim dalında tamamlamış olup 2011 yılında doktora derecesini almıştır. Çalışma alanları yapı fiziği, fiziksel çevre kontrolü ve binalarda enerji verimliliğidir.



Esma MIHLAYANLAR, Manisa/Kula'da doğdu. 1988 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümünü kazandı. 1993 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü Yapı Bilgisi Anabilim Dalı'na Araştırma Görevlisi olarak girdi. 2024 yılından itibaren Trakya Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümünde Profesör olarak görevine devam etmektedir. Mesleki ilgi alanları yapı ve yapı teknolojileri / sistemleri, yapı fiziği ve malzemesi konularıdır. Özellikle enerji verimli sürdürülebilir binalar, enerji korunumu, bina renovasyonu ve fiziksel çevre kontrolü konularıyla ilgili olarak çalışmaktadır.



Melek SEYİT, Trakya Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü'nde Araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. Yüksek Lisans eğitimini 2014 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalında tamamlamış doktora eğitimini ise 2023 yılında tamamlayarak doktora derecesini almıştır. Çalışma alanları yapı ve yapım teknolojileri, inşa edilebilirlik, fiziksel çevre kontrolüdür.