



Effect of envelope insulation on building heating energy requirement, cost and carbon footprint from a life-cycle perspective

Murat Altun^{ID}, Cagla Meral Akgul^{ID}, Asli Akcamete^{ID}

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

Highlights:

- Effect of thermal insulation on annual building heating energy requirement, additional cost and carbon footprint
- Effect of thermal insulation on life-cycle cost and carbon footprint
- Cost and carbon footprint payback periods for the additional thermal insulation
- Thermal insulation analysis for 81 cities

Keywords:

- Building heating energy requirement
- Life-cycle assessment
- Cost analysis
- Carbon footprint analysis
- TS 825
- Payback period

Article Info:

Research Article
Received: 19.07.2018
Accepted: 12.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.445751

Correspondence:

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

Graphical/Tabular Abstract

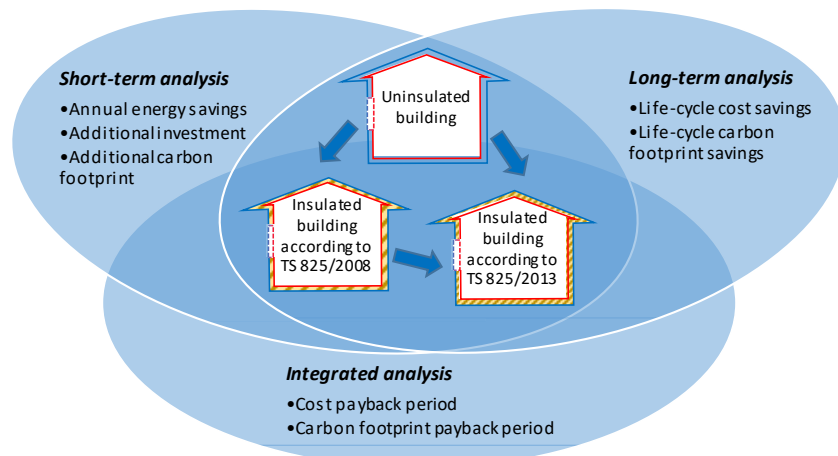


Figure A. Evaluation of building envelope insulation performance for 81 cities in Turkey

Purpose: Aim of this study is to investigate the effectiveness of additional envelope insulation investments planned at the early design stage of buildings in terms of heating requirement, cost and carbon footprint from the annual and life-cycle perspectives for 81 cities in Turkey.

Theory and Methods:

In this study, the annual heating space requirement of the building is calculated according to the TS 825-Turkish Thermal Insulation Standard methodology. For thermal insulation analysis, three different insulation design alternatives are created for a case study building for 81 cities in Turkey: (i) the uninsulated building, (ii) the building insulated according to minimum requirements of TS 825-2008 version and (iii) the building insulated according to minimum requirements of TS 825-2013 version. The effectiveness of the thermal insulation improvements in the building are investigated in three scenarios: (i) from the uninsulated to the insulated according to TS 825/2008, (ii) from the uninsulated to the insulated according to TS 825/2013 and (iii) from the insulated according to TS 825/2008 to the insulated according to TS 825/2013. For each city, the effectiveness of the improvements are assessed in terms of annual energy savings, life-cycle cost savings and life-cycle carbon footprint savings. Moreover, for each scenario, cost and carbon footprint payback periods are also analyzed.

Results:

Analyzes have shown that insulations based on the standard provide improvements of up to 75% for annual heating energy, 70% for life-cycle cost, and 73% for life-cycle greenhouse gas emissions for the uninsulated building. Moreover, payback periods are under 7 years for the cost and under 2 years for the greenhouse gas emissions. On the other hand, increasing the insulation thickness of already insulated buildings results in limited improvement of the energy efficiency, life-cycle cost and life-cycle carbon footprint.

Conclusion:

Thermal insulation is an efficient solution for improving building energy efficiency, life-cycle cost and life-cycle carbon footprint. Considering its marginal efficiency, thermal insulation of the buildings should be incentivized to increase passive energy efficiency for the buildings.



Kabuk yalıtımının bina ısıtma enerjisi ihtiyacına, maliyetine ve karbon ayak izine etkisinin yaşam döngüsü bakış açısıyla değerlendirmesi

Murat Altun^{ID}, Çağla Meral Akgül*^{ID}, Aslı Akçamete^{ID}

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06800, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Isı yalıtımının bina yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacına, ek maliyete ve sera gazı salımına etkisi
- Isı yalıtımının bina yaşam döngüsü maliyetine ve karbon ayak izine etkisi
- Ek yalıtımın maliyet ve sera gazı geri ödeme süreleri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.07.2018

Kabul: 12.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.445751

Anahtar Kelimeler:

Bina ısıtma enerjisi ihtiyacı,
ısı yalıtımı,
yaşam döngüsü analizi,
maliyet analizi,
karbon ayak izi analizi,
TS 825,
geri ödeme süresi

ÖZET

Türkiye’de hacimsel ısıtma, binalarda enerji tüketiminin ana kalemidir. Özellikle erken tasarım aşamasında yapılacak etkin kabuk yalıtımı, binanın yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacını ciddi oranda azaltan en yaygın pasif çözümdür. Bu çalışma, tüm Türkiye için binalarda erken tasarım aşamasında yapılacak ek kabuk yalıtım yatırımlarının etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, TS 825 “Binalarda ısı yalıtım kuralları” standardının yürürlükteki (2008) ve taslak halindeki (2013) versiyonlarını esas almıştır. Çalışmada, yalıtımsız bir binanın TS 825’e göre yalıtılmasının etkinliği kısa dönem (yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacında sağlanan tasarruf, ek yalıtım maliyeti ve ek sera gazı salımı) ve yaşam döngüsü (yaşam döngüsü maliyeti ve sera gazı salımı) olmak üzere iki farklı süreçte incelenmiştir. Ayrıca yapılan ek yatırımın, maliyet ve sera gazı açısından geri ödeme süreleri de analiz edilmiştir. Analizler, standarda göre yapılan yalıtımların yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacında %75'lere, yaşam döngüsü maliyetinde %70'lere, yaşam döngüsü sera gazı salımında ise %73'lere varan iyileştirmeler sağladığını göstermiştir. Ayrıca, maliyet geri ödeme süreleri 7 yılın, sera gazı geri ödeme süreleri ise 2 yılın altında hesaplanmıştır.

Effect of envelope insulation on building heating energy requirement, cost and carbon footprint from a life cycle perspective

H I G H L I G H T S

- Effect of thermal insulation on annual building heating energy consumption, additional cost and carbon footprint
- Effect of thermal insulation on lifecycle cost and carbon footprint
- Cost and carbon footprint payback periods for the additional thermal insulation

Article Info

Research Article

Received: 19.07.2018

Accepted: 12.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.445751

Keywords:

Building heating energy
requirement,
life cycle assessment,
cost analysis,
carbon footprint analysis,
TS 825,
payback period

ABSTRACT

Space heating is the dominant item of energy consumption of buildings in Turkey. Effective building envelope insulation, especially in early design phase, is the most common passive solution that significantly reduces the annual heating energy requirement of the building. This work aims to assess the effectiveness of additional envelope insulation investments at the early design phase of buildings for all cities in Turkey. The study utilizes the current (2008) and draft 2013 versions of the TS 825 standard "Thermal insulation requirements in buildings". In the study, the effectiveness of insulating an uninsulated building according to TS 825 has been investigated for two different time periods: short term (savings on annual heating energy requirement, additional insulation cost and additional greenhouse gas emissions), and life cycle (life cycle cost and greenhouse gas emissions). In addition, the cost and emission payback times have also been analyzed. Analyses have shown that insulations based on the standard provides improvements of up to 75% for annual heating energy, 70% for lifecycle cost, and 73% for lifecycle greenhouse gas emissions. Payback periods are under 7 years for the cost and under 2 years for the greenhouse gas emissions.

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

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel enerji tüketimi, hızlı nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak dikkat çekici bir şekilde artmaktadır [1]. Günümüzde, son dönemlerdeki teknolojik gelişmelere paralel olarak enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artsa da, yenilenemeyen kaynaklar hala enerji üretiminde çok önemli bir paya sahiptir. Üretilen birincil enerjinin %82'si sonlu rezerve sahip kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar ile karşılanmaktadır [2]. Ayrıca, karbon ayak izinin bir ölçütü olan sera gazı salımlarının (SGS) %65'i fosil yakıtların kullanımı sonucunda açığa çıkan CO₂ kaynaklıdır [3].

Gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan ülkemiz için de enerji tüketimi artan bir eğilim göstermektedir. Türkiye'de 1990'da 42 milyon TEP olan nihai enerji tüketimi 2016 yılında %147 artarak 104 milyon TEP'e ulaşmıştır [4]. Aynı sürede, fosil yakıtların birincil enerjideki payı da artarak %80,7'den %86,9'a çıkmıştır [5]. Kısıtlı fosil kaynaklara sahip ülkemizde enerji ihtiyacının karşılanması için fosil yakıtların kullanımı, dış ticaret açığını oluşturan önemli etmenlerdendir [6]. Türkiye'de enerji tüketiminin yaklaşık üçte biri konutlarda gerçekleşmektedir [4]. Konutların ısıtılması ve soğutulması için harcanan enerji, toplam konut enerji tüketimi içerisinde çok büyük (~70%) bir paya sahiptir [7]. Özellikle hacimsel ısıtma, ülkemizdeki konut enerji tüketiminin ana kalemidir; zira konutlarda her ilimizde ısıtma yapılırken, gerek iklimsel şartlar, gerekse de hane kullanım alışkanlıkları sebebiyle hacimsel soğutma çok yaygın değildir [8, 9]. Dolayısıyla hacimsel ısıtma ihtiyacının azaltılması için bina kabuk yalıtımında yapılan iyileştirmeler, bina enerji tüketiminin, maliyetinin ve sera gazı salımlarının azaltılmasına önemli oranda katkı sağlar [10]. Toplumun son zamanlarda artan tüketim farkındalığı, bu iyileştirmelerin sadece ekonomik ve çevresel değil, aynı zamanda sosyolojik olarak da olumlu sonuçlar ortaya çıkaracağını göstermektedir. İyileştirilmiş bir bina kabuğu, hane halkının bina kullanım alışkanlıklarını değiştirmeden, pasif bir şekilde doğalgaz faturalarının ve karbon ayak izinin düşmesini sağlar [9]. Bu durum, toplumda bina enerji verimliliğinin konuşulmasının, tartışılmasının ve yaygınlaşmasının önünü açar.

Günümüzde Türkiye'de yeni inşa edilen binaların ısı yalıtımı, TS 825 kodlu "Binalarda ısı yalıtım kuralları" standardının 2008 versiyonuna göre yapılmaktadır [11]. Ülkemiz mevcut bina stoku incelendiğinde, binaların sadece %15'lik kısmının TS 825/2008 standardında belirtilen değerlere uygun olarak yalıtıldığı tespit edilmiştir [8]. Bu sonucun temel sebebi, bina tasarım ve inşa süreçlerinde karar vericilerin (mimar, mühendis, yüklenici gibi) kısa dönemlik karları dikkate almaları ve yalıtımda sadece o an mevcut standartta belirtilen asgari koşulları sağlamayı hedeflemeleridir. Ancak, zaman içerisinde kural koyucular tarafından standartta yapılan güncellemeler ile daha fazla ısı yalıtımı teşvik edilmiş, buna bağlı olarak mevcut bina stokunun büyük bir bölümü güncel standartta hedeflenen

asgari ısı performans koşullarını sağlayamaz hale gelmiştir. Hâlbuki erken tasarım aşamasında yapılan doğru yatırımlar ile binaların yaşam döngüsü boyunca tüketileceği enerji büyük ölçüde azaltılabilir, uzun vadede hem ekonomik, hem de çevresel açıdan ciddi kazanımlar elde edilebilir [12, 13]. Bu doğrultuda, bina yaşam döngüsünü referans alan incelemeler karar vericilerin bu konudaki farkındalığını ve ilgisini arttırmak için son derece önemlidir. Ülkemizde konut tasarım veya iyileştirme süreçlerinde bina kabuk tasarımı çoğunlukla asgari TS 825 limitlerini sağlayacak şekilde yapılır. Bu doğrultuda, karar verici kullanacağı farklı malzeme veya malzeme sistemlerini seçer. Seçimlerde standartta belirtilen koşulların yanı sıra seçimin ekonomik etkisi de dikkate alınır. Ayrıca, çevresel bilincin hızla arttığı günümüzde çevresel etkiler de dikkate alınmaya başlamıştır. Nitekim yapılan çalışmalarda, ısı yalıtımının enerji tüketimine etkisi, örnek bir binanın ısı yalıtımsız ve standardın asgari koşullarına göre yalıtılmış hallerinin ısıtma enerji ihtiyacı karşılaştırılarak incelenmiş [14, 15] ve ısı yalıtımının oldukça etkin bir role sahip olduğu görülmüştür. Farklı çalışmalarda, standartta bina elemanları için belirtilen azami ısı geçirgenlik değerleri (U) referans alınarak tasarım alternatifleri oluşturulmuş, çeşitli enerji simülasyon programları aracılığıyla analizler yapılarak enerji etkin çözümler sunulmuştur [16-20]. Bazı çalışmalarda, konutun bütününe yanı sıra, sadece bina elemanlarının bir ya da bir kısmının ısı yalıtım tasarımının iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalarda, ağırlıklı olarak dış duvarlar sistemlerinin tasarımı üzerinde durulmuş ve tasarım ısıtma ve/veya soğutma enerji ihtiyacına göre optimize edilmiştir [21-23]. Optimum duvar sistemi tasarımı (i) ana duvar tipine (taş, tuğla, gaz beton, beton, binse, sandviç), [24-27], (ii) dış sıcaklık verisine (standartta belirtilen dış sıcaklık verisi [28], illere ait dış sıcaklık verisi [29, 30]), yalıtım malzemesi tipine (taş yünü, cam yünü, XPS, EPS, Foamboard, İzopor plus, poliüretan vb.) [22, 25, 30] ve ısıtma için kullanılan yakıt türüne (jeotermal, doğalgaz, kömür, sıvı yakıt, elektrik vb.) [15, 31, 32] göre belirlenmiştir. Bir diğer bina elemanı olan pencerelerde ise tasarım, çift ve/veya üç camlı pencerelerin içindeki hava tabakasının kalınlığı [33, 34] ile seçilen cam kaplamanın ve çerçevenin tipine [15] göre yapılarak pencerenin ısı performansını iyileştirilirken, pencerelerden kaybedilen ısı miktarı [35] azaltılmıştır. Bu çalışmalarda, konutların yaşam döngüsü performansı ağırlıklı olarak yaşam döngüsü maliyeti ya da tasarrufu [36, 37] üzerinden incelenmekle birlikte yaşam döngüsü sera gazı salımı [38, 39] ve yaşam döngüsü enerji analizinin [40] önemi de vurgulanmaktadır.

Daha önce yapılan çalışmalarda, yaşam döngüsü analizleri, kısıtlı sayıda il için uygulanmakta, ağırlıklı olarak ısıtma enerji ihtiyacını belirleyen diğer parametreler incelenmektedir. Tüm illeri kapsayan ısı yalıtımı iyileştirmesinde [30] ise sadece dış duvar sistemleri değerlendirilmiş ve binanın diğer elemanlarının etkisi incelenmemiştir. Bu çalışma, TS 825 yaklaşımını esas alarak Türkiye'nin 81 ili için erken tasarım aşamasında yapılabilecek ek kabuk yalıtımı yatırımlarının etkinliğinin

yaşam döngüsü bakış açısı ile değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Makalenin, 2. bölümünde değerlendirmelerde kullanılan hesap yöntemleri ve performans göstergeleri anlatılmaktadır. Bölüm 2.1’de TS 825’e göre bina ısıtma enerji ihtiyacı hesaplama yöntemi ve bina yalıtım tavsiyeleri açıklanmıştır; TS 825’in yürürlükteki 2008 ve önerilen 2013 versiyonları karşılaştırılmıştır. Bölüm 2.2’de yalıtım iyileştirmelerinin etkinliğinin değerlendirilmesinde kullanılan kısa vadeli ve uzun vadeli performans göstergeleri detaylı olarak açıklanmıştır. Kısa dönemli performans göstergeleri olarak binanın yıllık ısıtma enerji ihtiyacında sağlanan tasarruf ($\Delta Q_{yıl}$, $TO_{Q_{yıl}}$), ek yatırım maliyeti (EY_m) ve ek sera gazı salımı (EY_{sg}) dikkate alınmıştır. Uzun vadeli performans göstergeleri olarak ise sağlanan tasarrufun bina yaşam döngüsü maliyet ve sera gazı salımlarına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca geri ödeme süreleri ($GÖS_m$, $GÖS_{sg}$) ile bütünlük bir değerlendirme yapılmıştır. Şekil 1’de özetlenen bu göstergeler, bina ısıtma enerji performansını iyileştirmek amacıyla yapılan yatırım kararlarının alınmasında yol gösterici konumdadır. Bölüm 3’te vaka incelemesi yapılan referans binanın detayları ve seçilen yalıtım senaryoları anlatılmıştır. İklim koşullarının zorlaşması ile TS 825 standardında daha fazla ısı yalıtımı yapılması teşvik edilmektedir. Referans bina üzerinde yapılan yalıtım iyileştirmeleri iki ana şekilde uyarlanmıştır; pencereler dışındaki bina kabuğunu oluşturan çok katmanlı bina elemanlarının yalıtım malzemesi kalınlıkları artırılmış, pencerelerde ise ısı geçirgenlik performansı daha yüksek sistemler seçilmiştir. Bölüm 4’te, 81 il için, referans binada bir yalıtım senaryosundan daha etkin bir yalıtım senaryosuna geçişin etkisi belirtilen performans göstergelerine göre analiz edilmiş ve elde edilen bulgular tartışılmıştır. Son olarak, 5. bölümde çalışma özetlenmiş ve öneriler sunulmuştur.

2. BİNA KABUĞU YALITIMININ ETKİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF BUILDING ENVELOPE INSULATION EFFICIENCY)

2.1. TS 825’e Göre Binalarda Isıtma İhtiyacı Hesabı (Calculation of Building Heating Requirement According To TS 825)

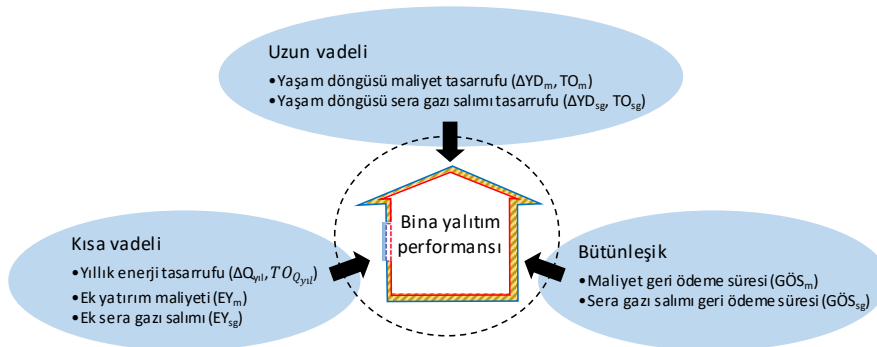
TS 825 standardı, 1970’te bina yalıtımı için tavsiye niteliğinde bir yönetmelik olarak hazırlanmıştır. 1998 yılında

Avrupa Birliği’ne uyum reformları kapsamında Avrupa Birliği standartlarına yapılan uyarlamalar ile güncellense de 2000 yılına kadar, yaklaşık 30 sene tavsiye niyetinde bir yönetmelik olarak kalmış; ancak 14 Haziran 2000’de yeni binalar için zorunlu hale getirilmiştir. TS 825, karar vericilerin konutlarda daha etkin ısı yalıtım uygulamalarına yönelmesi ile 2008 yılında yeniden revize edilmiş ve günümüzdeki halini almıştır. Standard, 2013 yılında tekrar revize edilmiş olsa da, bu revizyon yürürlüğe girmemiştir. Bu sebeple, karar vericiler, ısı yalıtım detaylarını konutlar, yönetim, iş ve hizmet binaları, hastaneler, okullar, tiyatro ve konser salonları gibi birçok mekânda yürürlükteki TS 825/2008 versiyonunu referans alarak belirlemektedir.

TS 825 standardı ile tüm Türkiye illeri için uygun ısı performansına sahip bina kabuğu elemanlarının (dış duvar sistemi, pencere, kapı, çatı ve zemin gibi) seçimi ve binanın gereksinim duyduğu yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı ($Q_{yıl}$) hesabı kolayca ve hızlıca yapılabilmektedir. Beklenildiği üzere TS 825’teki derece-gün hesabına dayalı statik hesaplamaların hata payı, yüksek hesap kapasitesi gerektiren detaylı ve dinamik hesaplamalara kıyasla daha yüksektir; fakat bölgelerin koşullarına uygun asgari ısı yalıtımının yaygınlaşması için hızlı ve kolay hesaplanabilir bir standart, bir tercih sebebidir.

TS 825/2008’de Türkiye, dört farklı ısıtma derece-gün bölgesine (DGB) ayrılmıştır (Şekil 2). Binanın ısı yalıtımı bulunduğu DGB’ye göre yapılır. $Q_{yıl}$ hesaplamasında binanın iç denge sıcaklığı ile dış sıcaklık arasındaki fark çok önemlidir. TS 825’te, bina tiplerine (ev, okul gibi) göre iç denge sıcaklıkları (θ_i) sunulmuştur. Dış sıcaklıklar ise DGB’lere ait aylık ortalama dış sıcaklık verisi olarak verilmiştir. Literatürde yer alan birçok çalışmada, $Q_{yıl}$ hesaplamalarında standartta belirtilen dış sıcaklık verisi kullanılmıştır. Ancak, aynı DGB’de içerisinde yer alan iller farklı iklimsel özellikler gösterebildiğinden yerel aylık ortalama dış sıcaklık verisinin kullanılması hesaplamaların daha sağlıklı yapılmasını sağlar. Bu çalışmanın analizlerinde de, dış sıcaklık verisi olarak illere ait aylık ortalama dış sıcaklık verisi dikkate alınmıştır.

TS 825’te ısıtma için gerekli olan aylık net enerji ihtiyacı (Q_{ay}) binanın iç (θ_i) ve dış sıcaklık farkına ($\theta_{e,ay}$), bina özgül



Şekil 1. Bina kabuğu yalıtım performansının değerlendirilmesinde kullanılan göstergeler
(Evaluation indicators of building envelope insulation performance)

ısı kaybına (H), bina iç kazancına (ϕ_i) ve güneş enerjisi kaynaklı aylık ortalama enerji kazancına ($\phi_{s,ay}$) bağlı olarak (Eş. 1a) hesaplanır. Yıllık enerji ihtiyacı ise aylık enerji ihtiyaçlarının toplamıdır (Eş. 1b).

$$Q_{ay} = [H(\Theta_i - \Theta_{e,ay}) - \eta_{ay}(\phi_i + \phi_{s,ay})]t \quad (1a)$$

$$Q_{ay} = \sum Q_{ay} \quad (1b)$$

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan t parametresi bir aylık zaman dilimindeki saniye miktarını, η_{ay} parametresi ise aylık ortalama kazanç kullanım faktörünü ifade eder. Bina ısı kayıp ve kazanımlarının hesaplama detayları Bölüm 2.1.1 ve 2.1.2’te özetlenmiştir. Ayrıca, TS 825’in 2008 versiyonu ile revize edilmiş 2013 versiyonu kıyaslanmıştır; iki versiyon arasındaki temel farklılıklar Bölüm 2.1.3’de sıralanmıştır.

2.1.1. Binalarda ısı kaybı hesabı (Heat loss in the buildings)

İletim ve taşınım (H_T) ve havalandırma (H_V) yoluyla gerçekleşen ısı kayıplarının toplamı binanın özgül ısı kaybını oluşturur (Eş. 2). Bina kabuğu birçok farklı bina elemanından (be) oluşur. H_T , bina kabuğundaki elemanların alanları (A_{be}) ve ısıl geçirgenlik katsayıları (U_{be}) ile bina elemanları arasındaki ısı köprülerinden kaynaklanan kayıplara göre hesaplanır (Eş. 3a). Eş. 3a’da belirtilen f_{be} çarpım katsayısı, I ısı köprüsü uzunluğu, U_l ise ısı köprüsünün doğrusal geçirgenliğidir. f_{be} değerleri için D : dış duvar sistemi, P : pencere, k : dış kapı, T : tavan, t : zemine oturan taban, d : dış hava ile temas eden taban, ds : düşük sıcaklıktaki iç ortamlar ile temas eden bina elemanlarını temsil eder (Eş. 3b). Pencere ve kapı gibi bina elemanları için TS 825 Ek A3’te sunulan ya da üreticiden temin edilen değerler kullanılabilir. Dış duvar, tavan, tabana gibi çok

katmanlı bina elemanının ısıl geçirgenlik katsayısı ise o elemanı oluşturan alt bileşenlerin ısıl iletkenlik hesap değerleri ($\lambda_{h,x}$) ve kalınlıkları (d_x) ile bina elemanının temas halinde bulunduğu yüzeylerden kaynaklanan iç ve dış ısıl direnç (R_i , R_e) parametrelerine bağlı olarak hesaplanır (Eş. 3c); bu eşitlikte x indisi katmanları ifade etmektedir. Aynı yalıtım kalınlığına sahip iki farklı malzeme arasında ısıl iletkenlik hesap değeri daha düşük olan malzeme daha iyi yalıtım sağlamaktadır. Bu doğrultuda, Türkiye’de çok katmanlı bina elemanlarında sıklıkla kullanılan yapı malzemelerinin ısıl iletkenlik hesap değerleri (λ_h) TS 825 Ek E’de listelenmiştir. Doğal havalandırılan binada H_V değerini hava değişim oranı (n_h) ve havalandırılan bina hacmi (V_h) belirlemektedir (Eş. 4).

$$H = H_T + H_V \quad (2)$$

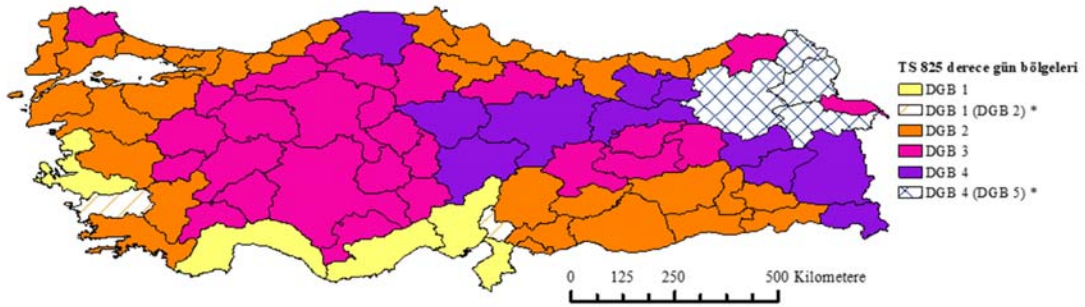
$$H_T = \sum f_{be} \cdot A_{be} \cdot U_{be} + I \cdot U_l \quad (3a)$$

$$f_{be} = 1 \text{ eğer } be \in \{D, P, k, d\}; 0,8 \text{ eğer } be \in \{T\}; 0,5 \text{ eğer } be \in \{t, ds\} \quad (3b)$$

$$U_{be} = \frac{1}{R_e + \sum x \frac{d_x}{\lambda_{h,x}} + R_i} \quad (3c)$$

$$H_V = 0,33 n_h V_h \quad (4)$$

TS 825’te etkin ısı yalıtımı sağlamak amacıyla, binanın bulunduğu DGB’ye göre ana bina kabuğu elemanları için bir ısıl geçirgenlik üst limiti Tablo 1’de sunulmuştur. Karar vericiler, bu üst limitlerine uygun olarak bina kabuğu elemanlarında kullanılacak malzemeleri seçer ve çok katmanlı sistemleri tasarlarlar. Ülkemizdeki konutlarda geleneksel olarak bina kabuğunun alanca büyük bir kısmı



(* TS 825/2013’te yapılan değişiklikler parantez içerisinde gösterilmiştir.)

Şekil 2. TS 825/2008’e göre ısıtma derece-gün bölgeleri (DGB) (Degree-day regions according to TS 825/2008)

Tablo 1. TS 825/2008’de farklı derece-gün bölgeleri için tavsiye edilen bina elemanı ısıl geçirgenlik üst limitleri – $U_{max, be, DGB}$ (W/m²K)

(Recommended thermal transmittance upper limits for building components at different TS 825/2008 degree-day regions – $U_{max, be, DGB}$ (W/m²K))

Derece-Gün Bölgesi	U_D	U_T	U_t	U_P	İl Sayısı
1	0,70	0,45	0,70	2,40	7
2	0,60	0,40	0,60	2,40	32
3	0,50	0,30	0,45	2,40	27
4	0,40	0,25	0,40	2,40	15

çok katmanlı dış duvar, zemin ve çatı sistemlerinden oluşur. Bu sistemlerde kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin ısıl geçirgenlik katsayısı ve yalıtım kalınlığı ısı kaybının azaltılmasında ve ısıtma ihtiyacının düşürülmesinde çok büyük rol oynar.

Tüm belirtilenlere ek olarak ısı yalıtımı yapılacak binanın konum, form ve kullanım amacı gibi özellikleri ile seçilen malzemelerin uyumu unutulmamalıdır. Örneğin, yüksek katlı binalarda, yalıtım performansı yüksek, ama yangına karşı dayanıklılığı düşük, hatta yangının sıçramasına sebep olabilecek bir yalıtım malzemesinin kullanılması son derece risklidir. Dolayısıyla, malzeme tercihi yaparken ısıl performansın yanında yangına karşı dayanım, su buharına/yağmura karşı reaksiyon ve basınç dayanımı gibi malzeme özellikleri de dikkate alınmalıdır.

2.1.2. Binalarda ısı kazancı hesabı (Heat gain in the buildings)

Binalardaki ısı kaybının bir bölümü iç ısı kazançları (ϕ_i) ve güneş enerjisinden kaynaklanan ısı kazançları ($\phi_{s,ay}$) ile karşılanmaktadır. İç ısı kazançları, binada ısı üreten aydınlatma, yemek pişirme, sıcak su sistemi, elektrikli cihazlar ve insan metabolizması gibi kalemlerden kaynaklanmaktadır. İç ısı kazancı, iç enerji kazancı yüksek binalarda kullanım alanının 10 katı, diğer binalarda ise kullanım alanının 5 katı olarak hesaplamalara dâhil edilmiştir. Güneş enerjisinden kaynaklanan ısı kazancı ise dört ana yöndeki (i: kuzey, doğu, güney, batı), saydam elemanların alanına (A_i), güneş enerjisi geçirme faktörüne ($g_{i,ay}$), güneş ışınımının şiddetine ($l_{i,ay}$) ve binanın çevresindeki güneş ışınımının gelişine etki eden gölgelemelere ($r_{i,ay}$) bağlıdır (Eş. 5). Hesaplamalarda tüm DGB'ler için TS 825 Ek C'de sunulan ortalama aylık güneş ışınımı şiddeti değerleri kullanılmaktadır. Bu durum, güneş kazanımlarının hesabında bir miktar belirsizliğe yol açabilir.

$$\phi_{s,ay} = \sum_i r_{i,ay} g_{i,ay} l_{i,ay} A_i \quad (5)$$

Aylık ortalama kazanç kullanım faktörü (η_{ay}), kayıp-kazanç oranına (KKO_{ay}) bağlı olarak Eş. 6'ya göre hesaplanmıştır.

$$KKO_{ay} = \frac{\phi_i + \phi_{s,ay}}{H(\theta_i - \theta_{e,ay})} \quad (6a)$$

$$\eta_{ay} = 1 - e^{-\frac{1}{KKO_{ay}}} \quad \text{eğer } \theta_i > \theta_{e,ay}$$

$$0 \quad \text{eğer } \theta_i \leq \theta_{e,ay} \quad (6b)$$

Tablo 2. TS 825/2013'de farklı derece-gün bölgeleri için tavsiye edilen bina elemanı ısıl geçirgenlik üst limitleri – $U_{max, be, DGB}$ (W/m²K)

(Recommended thermal transmittance upper limits for building components at different TS 825/2013 degree-day regions – $U_{max, be, DGB}$ (W/m²K))

Derece-Gün Bölgesi	U _D	U _T	U _t	U _P	İl Sayısı
1	0,66	0,43	0,66	1,80	5
2	0,57	0,38	0,57	1,80	34
3	0,40	0,28	0,43	1,80	27
4	0,38	0,23	0,38	1,80	11
5	0,36	0,21	0,36	1,80	4

2.1.3. TS 825/2008 ve TS 825/2013 karşılaştırılması (Comparison of TS 825/2008 and TS 825/2013)

Yürürlükte olan TS 825/2008 standardını iyileştirmek amacı ile 2011 yılında revize edilmeye başlanmış ve 2013 yılı Aralık ayında güncellenmiş versiyonu Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na sunulmuştur. İlgili sektör temsilcilerinden - özellikle de cam sanayi temsilcilerinden - gelen talepler üzerine, revize edilmiş versiyon zorunlu standart olarak yayınlanmamıştır [41].

TS 825 standardının yürürlükte 2008 ve önerilen 2013 versiyonları karşılaştırdığı zaman aşağıdaki temel farklılıklar görülmektedir:

- Önerilen TS 825/2013 versiyonunda DGB sayısı dörtten beşe çıkarılmıştır. Şekil 2'de görüldüğü üzere 1. DGB'de yer alan Aydın ve Osmaniye illeri 2. DGB'ye, 4. DGB'de yer alan ve Türkiye'nin çatısı olarak tabir edilen Ağrı, Ardahan, Erzurum ve Kars illeri ise 5. DGB'ye kaydırılmıştır.
- TS 825/2008 versiyonundaki DGB'lere ait aylık ortalama dış sıcaklık verileri, TS 825/2013 versiyonunda değiştirilmemiş, sadece yeni oluşturulan 5. DGB için dış sıcaklık verisi eklenmiştir.
- TS 825/2008 versiyonunda bina elemanı tipleri için tavsiye edilen ısıl geçirgenlik üst limit değerleri, önerilen versiyonda düşürülerek daha yoğun yalıtım yapılması teşvik edilmiştir (Tablo 2).

2.2. Bina Kabuğu Yalıtım Performansının Değerlendirilmesi (Evaluation of the Building Envelope Insulation Performance)

Bu çalışmada, 81 il için referans bir binada yapılacak ek yalıtım yatırımlarının performansı kısa ve uzun dönem olmak üzere iki farklı açıdan değerlendirilmiş; analizlerde, bir yalıtım senaryosundan (S_a) daha etkin bir yalıtım senaryosuna (S_b) geçişin etkisi sunulmuştur. Kısa dönemde ek yalıtımın sağladığı yıllık ısıtma enerjisi tasarrufu incelenmiş; bu ek yalıtımdan kaynaklı ek yatırım maliyeti ve ek sera gazı salımı hesaplanmıştır. Uzun dönemde ise sağlanan tasarrufun bina yaşam döngüsü maliyet ve sera gazı salımlarına etkisi araştırılmıştır. Hesaplanan değerler bina kullanım alanına bölünerek metrekaşe kullanım alanı başına düşen değer olarak sunulmuştur. Ayrıca hem maliyet, hem de sera gazı salımları için geri ödeme süreleri hesaplanarak bütünsel bir değerlendirme de yapılmıştır. Şekil 1'de özetlenen bu göstergelerin hesaplama yöntemleri aşağıda detaylandırılmıştır.

2.1.4. Isıtma enerjisi ihtiyacındaki yıllık tasarrufun belirlenmesi

(Analysis of annual heating energy requirement savings)

Yıllık ısıtma enerjisi tasarruf miktarı ($\Delta Q_{yıl}$), Bölüm 3.2’de anlatılan farklı yalıtım senaryolar için Bölüm 2.1’de özetlenen yöntemle göre hesaplanan yıllık ısıtma enerji ihtiyaçlarının farkıdır (Eş. 7a). Analizlerde tasarruf miktarının yanı sıra, tasarruf oranı ($TO_{Q_{yıl}}$) da sunulmuştur (Eş. 7b).

$$\Delta Q_{yıl}(S_b, S_a) = Q_{yıl, S_a} - Q_{yıl, S_b} \quad (7a)$$

$$TO_{Q_{yıl}}(S_b, S_a) = 100 \frac{\Delta Q_{yıl}(S_b, S_a)}{Q_{yıl, S_a}} \quad (7b)$$

2.1.5. Yalıtım kaynaklı ek yatırım maliyetinin (EY_m) ve ek sera gazı salımının (EY_{sg}) belirlenmesi

(Analysis of additional cost and greenhouse gas emissions due to insulation)

Çalışma kapsamında, yapılacak yalıtım yatırımı kaynaklı EY_m ve EY_{sg} da incelenmiştir. Hesaplamalarda yalıtım kararlarının erken tasarım aşamasında verildiği; dolayısıyla, onarım ve iyileştirme projelerinde karşılaşılan ek maliyetlerin ve malzeme kaynaklı atıkların oluşmadığı varsayılmıştır. Toplam yalıtım maliyeti (YM), her bir kabuk elemanı için alan (A_{be}) ile metrekaare yalıtım uygulaması başına birim maliyetinin (TL/m^2) çarpılması ve elde edilen değerlerin toplanması ile bulunmuştur. Toplam yalıtım kaynaklı sera gazı salımı (SGS) hesaplamalarında da benzer bir metodoloji izlenmiş; her bir kabuk elemanının alanı (A_{be}) ile üretim kaynaklı birim salım değerleri ($kg-CO_2eş/m^2$) çarpılarak toplanmıştır.

Metrekare uygulama başına birim fiyatların ($c_{m,be}$) belirlenmesinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015 yılı birim fiyat listesi [42] temel alınmıştır. Metrekare uygulama başına birim sera gazı salım değerlerinin ($c_{sg,be}$) belirlenmesinde PE 2012 ve Eco-invent 2012 [43] veritabanları ve AGUDOS raporunda detaylandırılan

sonuçlar [44] kullanılmıştır. Bu çalışmada beşikten-kapıya yaklaşımı [45] benimsenmiş ve çalışma sadece üretim kaynaklı salımlar ile sınırlandırılmıştır. Malzemelerin ulaştırma, inşa ve geri dönüşüm süreçleri kapsam dışı tutulmuştur. Pencereler dışında kalan çok katmanlı uygulamalar için birim fiyatlar ve birim salım değerleri ise Şekil 3’teki yalıtım kalınlıklarına bağlı olarak belirlenmiştir. Yalıtım kalınlığının metrekaare uygulama başına birim fiyat (TL/m^2) ile ilişkisi Şekil 3a’da, birim sera gazı salımı ($kg-CO_2eş/m^2$) ile ilişkisi ise Şekil 3b’de özetlenmiştir.

Bölüm 3.2’de anlatılan farklı yalıtım senaryo geçişlerinde, S_b senaryosu ile S_a senaryosu arasındaki yatırım maliyeti (YM) farkı EY_m , malzeme kaynaklı sera gazı salımlarının farkı ise EY_{sg} olarak hesaplanmıştır (Eş. 8). Yalıtımsız binanın yatırım maliyeti 0 kabul edilirken, binanın yalıtılması ve ısı performansını daha iyi olan kapı ve pencere sistemleri için gereken ek yatırımlar ve bunlardan kaynaklanan sera gazı salımı, yalıtımlı senaryoların YM ve SGS verisini belirlemektedir. Çalışma kapsamında sadece farklı yalıtım senaryoları arasındaki yatırım maliyeti ve sera gazı salımı farkları incelediğinden, senaryolarda değiştirilmeden kalan kalemler sunulan sonuçlara etki etmez.

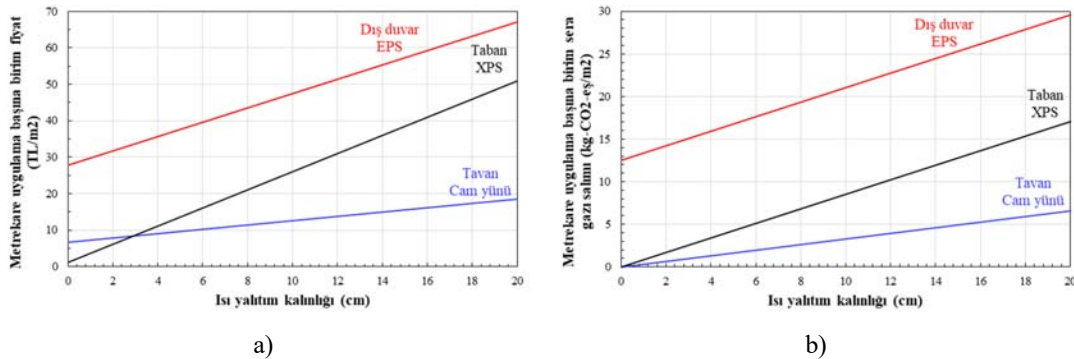
$$EY_m(S_b, S_a) = YM_{S_b} - YM_{S_a} \quad (8a)$$

$$EY_{sg}(S_b, S_a) = SGS_{S_b} - SGS_{S_a} \quad (8b)$$

2.1.6. Yaşam döngüsü maliyet ve sera gazı salım tasarruflarının belirlenmesi

(Analysis of lifetime cost and greenhouse gas emission savings)

Yatırımların bina yaşam döngüsüne sağladığı tasarruf miktarı (ΔYD_m , ΔYD_{sg}) ve oranı (TO_m , TO_{sg}), Eş. 9 ve 10 kullanılarak bugünkü değerler üzerinden hesaplanmıştır. Bir senaryo için (örneğin Senaryo S_a) yaşam döngüsü maliyet değeri (YD_{m, S_a}) hesaplanırken, hem enerji fiyatlarındaki artış (enflasyon) hem de nominal faiz oranı dikkate alınarak yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin hesaplanmasında reel faiz oranı kullanılmıştır. Aynı senaryo için, yaşam döngüsü sera gazı salımı değerini (YD_{sg, S_a}) hesaplanırken ise, sera gazı



(* Tablo 4’te belirtilen yalıtım malzemeleri için)

Şekil 3. Yalıtım* kalınlığına göre metrekaare yalıtım uygulaması başına a) birim maliyet $c_{m,be}$ (TL/m^2) [42] b) birim sera gazı salımı $c_{sg,be}$ ($kg-CO_2eş/m^2$) [43, 44]

((a) unit cost $c_{m,be}$ (TL/m^2) [42] (b) unit greenhouse gas emission $c_{sg,be}$ ($kg-CO_2eş/m^2$) [43, 44] per meter square of insulation application with respect to insulation thickness)

salımının zaman değeri dikkate alınmıştır. $c_{m,yakıt}$ ve $c_{sg,yakıt}$ enerji kaynağının birim maliyeti (TL/kWh) ve birim sera gazı salımı (kg-CO₂eş/kWh); i_m faiz oranı, i_{sg} ise sera gazı salımının zaman değeridir (etki enflasyonu). YV , i_e ve $YÖ$ sırasıyla enerji kaynaklarının yakma verimliliğini, enerji enflasyonunu ve binanın ömrünü ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan sabit değerler Bölüm 3'te belirtilmiştir.

$$YD_{m,S_a} = YM_{S_a} + c_{m,yakıt} \sum_{t=1}^{YÖ} \frac{Q_{yil,S_a}(1+i_e)^t}{(1+i_m)^t YV} \quad (9a)$$

$$\Delta YD_m(S_b, S_a) = YD_{m,S_a} - YD_{m,S_b} \quad (9b)$$

$$TO_m(S_b, S_a) = 100 \frac{\Delta YD_m(S_b, S_a)}{YD_{m,S_a}} \quad (9c)$$

$$YD_{sg,S_a} = SGS_{S_a} + c_{sg,yakıt} \sum_{t=1}^{YÖ} \frac{Q_{yil,S_a}}{(1+i_{sg})^t YV} \quad (10a)$$

$$\Delta YD_{sg}(S_b, S_a) = YD_{sg,S_a} - YD_{sg,S_b} \quad (10b)$$

$$TO_{sg}(S_b, S_a) = 100 \frac{\Delta YD_{sg}(S_b, S_a)}{YD_{sg,S_a}} \quad (10c)$$

2.1.7. Maliyet ve sera gazı salımı geri ödeme sürelerinin belirlenmesi

(Analysis of payback times for cost and greenhouse gas emissions)

Binanın S_a senaryosundan S_b senaryosuna geçişinde, binanın ısı performansında yapılan iyileştirmelerin, bu iyileştirme için yapılan ek yatırımları ne kadar sürede

karşılıdığı, maliyet geri ödeme süresi ($GÖS_m$) ve sera gazı salımı geri ödeme süresi olarak ($GÖS_{sg}$) Eş. 11a ve 11b'deki denklemlere göre hesaplanmıştır.

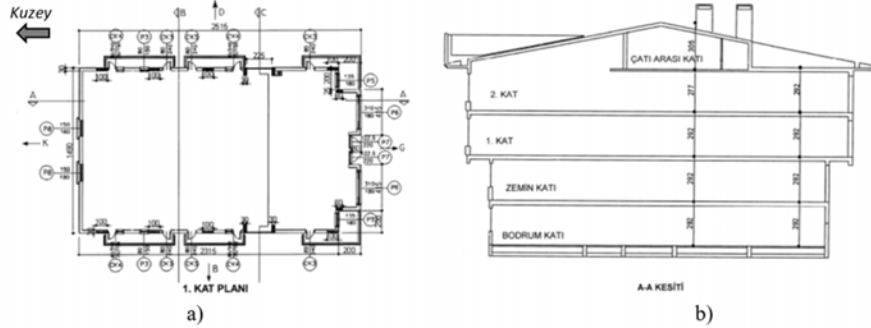
$$GÖS_m(S_b, S_a) = \frac{\ln\left(1 - \frac{EY_m(S_b, S_a)\left(\frac{1+i_m}{1+i_e} - 1\right)}{c_{m,yakıt}(Q_{yil,S_a} - Q_{yil,S_b})}\right)}{\ln\left(\frac{1+i_m}{1+i_e}\right)} \quad (11a)$$

$$GÖS_{sg}(S_b, S_a) = \frac{\ln\left(1 - \frac{EY_{sg}(S_b, S_a)i_{sg}}{c_{sg,yakıt}(Q_{yil,S_a} - Q_{yil,S_b})}\right)}{\ln(1+i_{sg})} \quad (11b)$$

3. VAKA İNCELEMESİ (CASE STUDY)

3.1. Referans Bina Bilgileri (Reference Building Information)

Çalışma kapsamında vaka incelemesi için TS 825 standardında verilen bir bina referans olarak seçilmiştir [11]. Seçilen bina bodrum, zemin ve çatı arası katlarının dâhil edilmesiyle 5 kattan oluşmaktadır. Bina 1. kat planı ve bina kesiti Şekil 4'de verilmiştir. Bina, 4312 m³ hacme ve 1379,84 m² kullanım alanına sahiptir. Binadaki toplam kapı alanı 11 m² (9 m² dış kapı ve 2 m² iç kapı), toplam pencere alanı ise 174,10 m²'dir. Binada 1.530,46 m² alan (döşeme alanları: toprak temaslı taban ve çıkma alanı, dış cephe alanları: dış duvarlar ve betonarme, tavan alanları: üzeri açık ve çatılı tavanlar) ısı yalıtımına tabi tutulmuştur. Bina kabuk detayları Tablo 3'te verilmiştir.



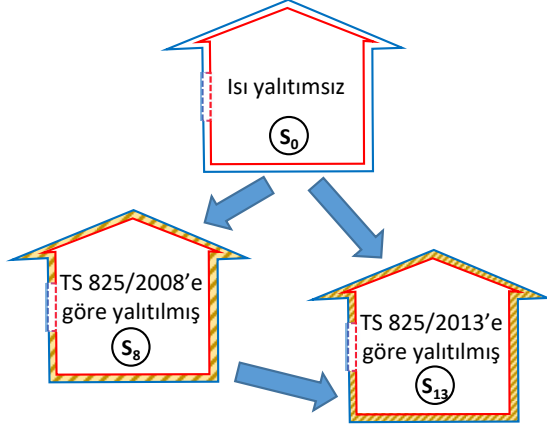
Şekil 4. TS 825 standartlarında verilen referans bina için a) 1. kat planı b) A-A kesiti.
(a) floor plan of first floor and (b) A-A section of reference building in TS 825 standard)

Tablo 3. Isı kaybedilen yüzeylere ilişkin bilgiler [11] (Information on heat loss surfaces)

Bina elemanı	Alan (m ²)	Bina elemanı	Alan (m ²)
Dış duvarlar		Pencereler	
Dış ortama açık dolgu duvar	442,60	Kuzey	15,30
Dış ortama açık betonarme duvar	305,45	Güney	70,78
Düşük sıcaklıklı dolgu duvar	28,24	Doğu	46,17
Düşük sıcaklıklı betonarme duvar	18,84	Batı	41,85
Tabanlar		Kapılar	
Toprak temaslı taban	326,21	Dış Kapı	9,00
Açık geçit üzeri/çıkma taban	42,15	İç Kapı	2,00
Tabanlar			
Toprak temaslı taban	130,16		
Açık geçit üzeri/çıkma taban	236,81		

3.2. Bina Yalıtım Senaryoları (Building Insulation Scenarios)

Çalışmada, referans bina için üç farklı yalıtım senaryosu oluşturulmuştur: S_0 - ısı yalıtımsız, S_8 - TS 825/2008'e göre yalıtılmış ve S_{13} - TS 825/2013'e göre yalıtılmış. Bu alternatifler Şekil 5'te özetlenmiştir.



Şekil 5. Yalıtım senaryoları (Insulation scenarios)

Isı yalıtımsız binada, TS 825'te referans bina için sağlanan bina elemanı detayları ısı yalıtımı ve pencere kalemleri dışında aynen alınmıştır. Isı kaybeden yüzeylerde hiç yalıtım malzemesi kullanılmadığı, pencerelerde ise tek camlı 3-odacıklı PVC doğrama kullanıldığı varsayılmıştır. TS 825/2008'e ve TS 825/2013'e uygun hazırlanan yalıtım senaryolarında, Türkiye'de en yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemeleri (taşyünü ve camyünü gibi mineral yünler ile ekspande polistiren (EPS) ve ekstrüde polistiren (XPS) organik köpükler) tercih edilmiştir. Çatı katına ısıl iletkenlik hesap değeri 0,040 W/mK olan 18 kg/m³ yoğunluğunda camyünü serilirken, taban alanlarında EPS'ye göre daha dayanımlı olan 0,035 W/mK ısıl iletkenlik hesap değerine sahip 30 kg/m³ yoğunluğunda 200 kPa basınç dayanımı olan XPS tercih edilmiştir. Dış duvarlar ise, sıva filesi, yapıştırma harcı, dübel vb. yardımcı malzemeler kullanılarak 27 kg/m³ yoğunluğunda 0,035 W/mK ısıl iletkenlik hesap değerine sahip EPS ile mantolanmıştır. Çalışmada seçilen yalıtım malzemeleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Çalışmada seçilen yalıtım malzemeleri (Insulation materials used in this study)

Yalıtım malzemesi	Uygulama alanı	Yoğunluğu (kg/m ³)	Isıl iletkenlik hesap değeri (W/mK)
EPS	Dış duvarlar	27	0,035
XPS	Taban alanları	30	0,035
Cam yünü	Çatı	18	0,040

Tablo 5. Yalıtım senaryolarında kullanılan pencere tipleri (Glazing types used in the insulation scenarios)

Yalıtım senaryosu	S_0	S_8	S_{13}
Pencere tipi	4-mm tek cam	16-4-16 mm çift cam	12-4-12 mm çift camlı low-E kaplamalı
Isıl geçirgenlik katsayısı* (W/m ² K) [46]	4,63	2,56	1,80
Birim fiyatı, $c_{m,P}$ (TL/m ²) [42]	10,93	49,21	50,53
Birim sera gazı salımı, $c_{sg,P}$ (kg-CO ₂ eş/m ²) [43]	4,11	8,22	8,70

* PVC doğrama dâhil.

Her il için, çok katmanlı bina elemanlarına uygulanacak ısı yalıtım malzemelerinin kalınlığı, TS 825'te uygun DGB'ye göre tavsiye edilen bina elemanı ısıl geçirgenlik üst limiti (U_{max,be,DGB_j}) dikkate alınarak Eş. 12'e göre hesaplanmıştır.

$$d_{be_y,j} = \lambda_{h,be_y} \left(\frac{1}{U_{max,be,DGB_j}} - R_i - R_e - \sum_{x,x \neq y} \frac{d_{be_x}}{\lambda_{h,be_x}} \right) \quad (12)$$

Eşitlikte $d_{be_y,j}$, j ili için tasarlanan binadaki be bina elemanında kullanılan λ_{h,be_y} ısıl iletkenlik hesap değerine sahip yalıtım malzemesinin kalınlığını belirtmektedir. DGB_j , j ilinin ait olduğu DGB'yi; U_{max,be,DGB_j} ise DGB_j için TS 825'te tavsiye edilen bina elemanı ısıl geçirgenlik üst limitini göstermektedir. Bina elemanının alt bileşenleri be_x ile ifade edilmiştir. Pencerelerde ise 3-odacıklı PVC doğrama muhafaza edilmiş, 4-mm tek cam yerine TS 825 limitlerini sağlayacak (TS 825/2008 için 16-4-16 mm çift camlı pencere, TS 825/2013'de ise 12-4-12 mm çift camlı low-E kaplamalı pencere) alternatifler kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan farklı senaryolara ait pencerelerin ısıl geçirgenlik katsayısı ile birim fiyat ve birim salım değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

3.3. Analizler (Analysis)

Her bir il için, Bölüm 3.2'ye uygun olarak hazırlanan yalıtım senaryoları üzerinden üç farklı yalıtım geçişi incelenmiştir: (i) ısı yalıtımsız binadan TS 825/2008'e göre yalıtılan binaya geçiş ($S_0 \rightarrow S_8$), (ii) ısı yalıtımsız binadan TS 825/2013 uygun tasarlanan binaya geçiş ($S_0 \rightarrow S_{13}$), ve (iii) TS 825/2008'e uygun olup TS 825/2013'e göre yalıtımı uyarlanan binaya geçiş ($S_8 \rightarrow S_{13}$). Yalıtım iyileştirmelerinin etkisi, Bölüm 2.2'de anlatılan performans göstergeleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Analizlerde, iklim verisi olarak il bazlı uzun yıllar ortalaması aylık dış sıcaklık değerleri kullanılırken, aylık dış sıcaklık ortalaması 15°C'nin üzerinde olan illerde ısıtma ihtiyacı olmadığı varsayılmıştır [47]. Binanın iç denge sıcaklığı TS 825'e göre 19°C kabul edilmiştir.

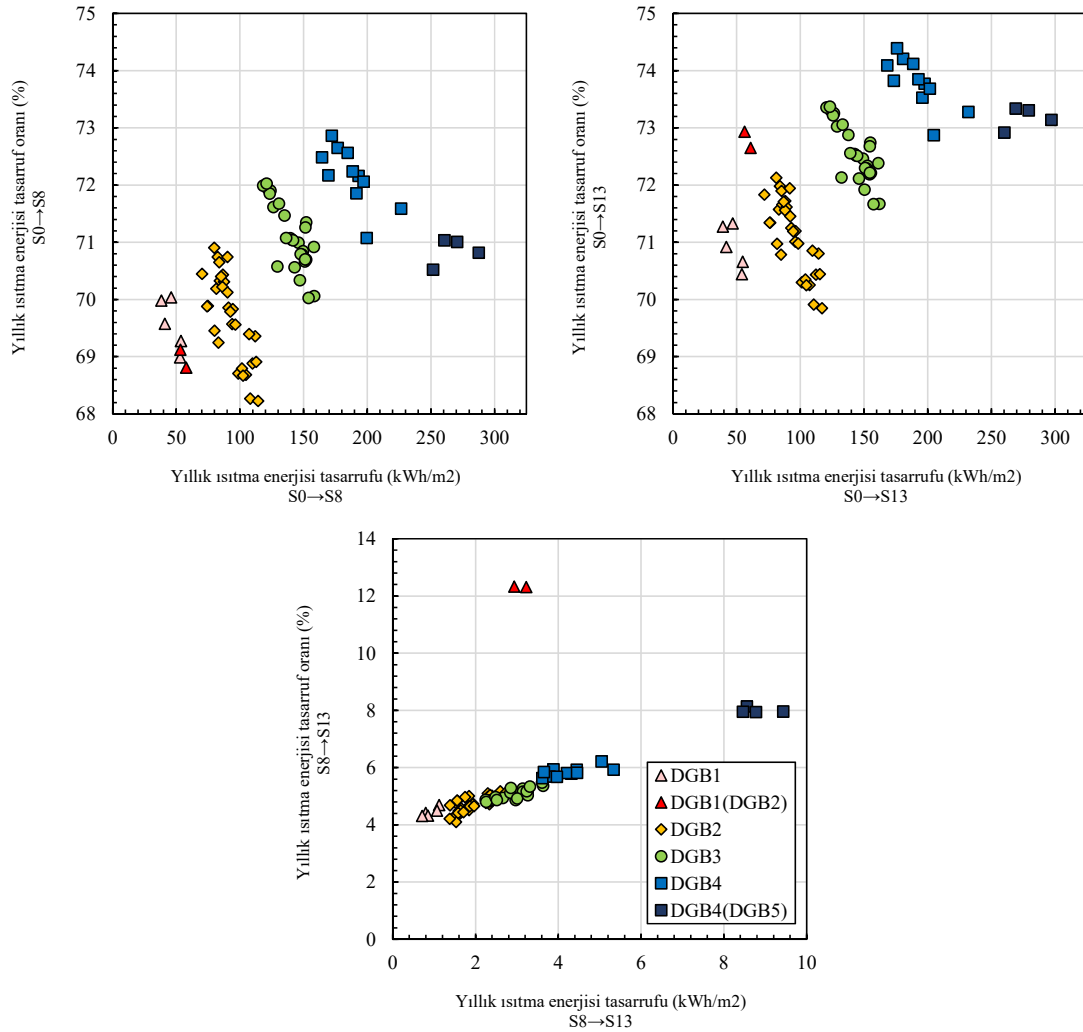
Performans göstergelerinin hesaplanmasında, binanın ısıtma enerji kaynağı olarak 93% verim ile yakılan doğalgaz kullanılmıştır [48]. Doğalgaz birim fiyatı 122,8 TL/MWh, birim salımı ise 257,10 kg-CO₂eş olarak alınmıştır. Öte yandan yaşam döngüsü performans analizleri, 30 yıl bina ömrüne göre yapılırken faiz oranı i_m 9,5%, enerji enflasyon değeri i_e 8% ve sera gazı salımı etki enflasyonu i_{sg} 3% olarak alınmıştır [49-51].

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

4.1. Isıtma Enerjisi İhtiyacındaki Yıllık Tasarruf (Annual Heating Energy Requirement Savings)

Yalıtım değişimi senaryoları ile sağlanan yıllık ısıtma enerjisi tasarruf değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Ülkemiz iklim koşullarından dolayı, farklı illerde ısı yalıtımsız bina için hesaplanan metrekare kullanım alanı başına yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı oldukça farklılık (54,8 - 406,2 kWh/m²) göstermektedir. Isı yalıtımsızdan TS 825/2008'e uygun hale

geçen bina için yıllık ısıtma enerjisi tasarrufu iklim koşullarına bağlı olarak 38,4 - 287,6 kWh/m², oranı ise %68,2 - 72,9 aralığında değişmektedir. 1379,84 m² kullanım alanına sahip referans bina da bu değerler yıllık 52,9 MWh ile 396,9 MWh arasında değişen bir tasarruf demektir. Bu hesaplama verileri, daha fazla ısı yalıtımı önerilen TS 825/2013'e uyarlanan bina için sırasıyla 39,1-297,1 kWh/m², %69,8-74,4 ve 53,9 - 409,9 MWh değerlerine çıkmaktadır. Öte yandan, TS 825/2008'e uygun bir binanın ısı yalıtımının iyileştirilmesi ve ısı yalıtımının TS 825/2013'e uygun hale getirilmesi beklenildiği üzere daha sınırlı (%4,1 - 12,3) bir iyileştirme sağlamaktadır. Bu durum, ısı yalıtım malzemesinin kalınlığının arttıkça, yalıtım malzemesinin kalınlığında görülen birim artışın (1 cm artış) enerji tasarrufu miktarına sağladığı marjinal faydanın giderek azalmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, ait olduğu DGB değiştirilen ve diğer illere göre daha fazla ısı yalıtımı yapılan 6 ilin ısıtma enerji performansındaki iyileştirme, diğer illere göre göreceli olarak daha fazladır. Tablo 6'da, DGB'ler için ΔQ_{yil} ve $TO_{Q_{yil}}$ ortalamaları verilmiştir. İklim koşulları



Şekil 6. Tüm iller için yalıtım iyileştirmesi kaynaklı yıllık ısıtma enerji tasarrufu ΔQ_{yil} (kWh/m²) ve oranı $TO_{Q_{yil}}$ (%)
(Annual heating energy saving amount ΔQ_{yil} (kWh/m²) and ratio $TO_{Q_{yil}}$ (%) for all cities due to insulation improvements)

zorlaştıkça, yalıtım geçişleri ile daha fazla enerji tasarrufu sağlamaktadır. Örneğin, $S_0 \rightarrow S_8$ geçişinde ılıman iklime sahip 1. DGB illeri için ortalama 46,4 kWh/m² enerji tasarrufu sağlanırken, bu değer çok zorlu iklim koşullarına sahip çatı illeri için ortalama 267,6 kWh/m²'ye çıkmaktadır. Öte yandan, $TO_{Q_{yıl}}$ değerlerinin $S_0 \rightarrow S_8$ ve $S_0 \rightarrow S_{13}$ geçişlerinde tüm DGB'ler için birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. $S_8 \rightarrow S_{13}$ geçişlerinde sağlanan tasarruf oranı DGB'si değiştirilen iller haricinde sınırlı kalmıştır.

4.2. Yalıtım Kaynaklı Ek Yatırım Maliyeti (EY_m) ve Ek Sera Gazı Salımı (EY_{sg})

(Additional Cost and Green House Gas Emissions due to insulation)

Yalıtım geçişleri için gereken EY_m ve EY_{sg} değerleri Tablo 7'de sunulmuştur. Değerler hesaplanırken aynı DGB'ye ait illerde eşdeğer yalıtım yatırımının yapıldığı ve yalıtım geçişlerinde eşdeğer ek yatırım ihtiyacının doğduğu varsayılmıştır. İklim koşulları zorlaştıkça standartta verilen asgari değerlere ulaşmak için daha fazla yalıtım yapılması gerekmektedir; yalıtım geçişlerindeki EY_m ve EY_{sg} değerleri artmaktadır.

4.3. Yaşam Döngüsü Maliyeti ve Sera Gazı Salımı Tasarrufları

(Lifetime Cost and Green House Gas Emission Savings)

Binanın otuz yıllık yaşam ömrü gözeticilerle yapılan analizler, etkin ısı yalıtımının bina yaşam döngüsü performansını oldukça iyileştirdiğini göstermektedir. Isı yalıtımsız bina için metrekare kullanım alanı başına yaşam döngüsü maliyeti, iklim koşullarına bağlı olarak geniş bir aralıkta (164,2 - 1.216,9 TL/m²) değişir. Toplamda 1379,84 m² kullanım alanına sahip referans bina için bu değer 226,6-1.979,1 bin TL'ye tekabül eder. Metrekare başına 30,5-39,5 TL harcanarak TS 825/2008 standardına uygun hale getirilen bina %51,4-67,6 arasında maliyet tasarrufu sağlanmaktadır (Şekil 7). Metrekare başına 31,2-43,8 TL harcanarak TS 825/2013 standardına uygun hale getirilen binada ise bu değerler bir önceki senaryo geçişine oranla %1-2 artmıştır. İki standart arasındaki geçişte ise marjinal fayda az olmasına rağmen 0,8-4,3 TL/m² arasındaki yatırım, bina da %1,7-6,5 arasında değişen yaşam döngüsü maliyet tasarrufu sağlamıştır. Tablo 8'de DGB'ler için ortalama yaşam döngüsü maliyet tasarruf miktarları ve oranları sunulmuştur. Zorlaşan iklim koşullarına paralel olarak artan EY_m ve $Q_{yıl}$

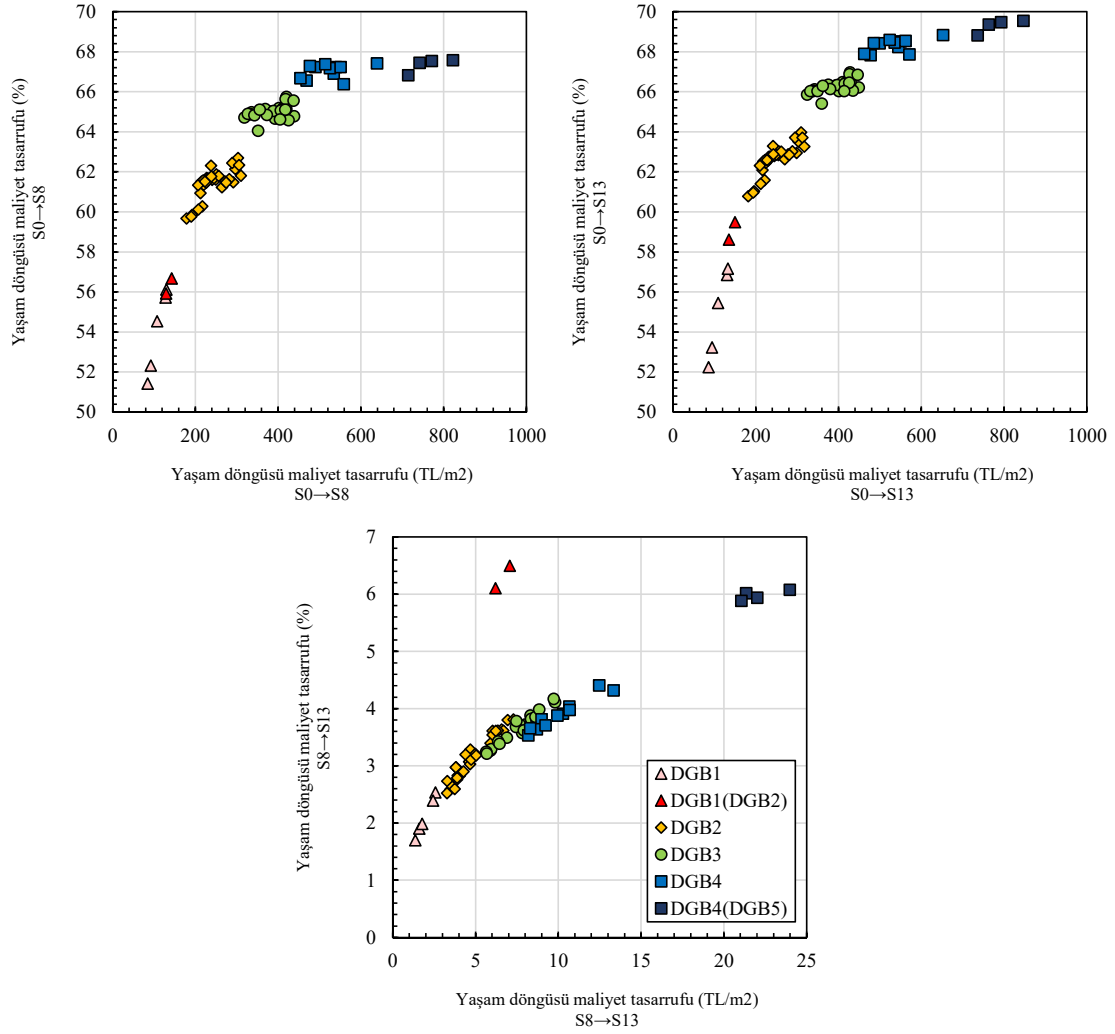
Tablo 6. Derece-gün bölgeleri için yalıtım iyileştirmesi kaynaklı ortalama yıllık ısıtma enerji tasarrufu (Degree-day region annual heating energy saving averages due to insulation improvements)

	TS 825 derece-gün bölgesi					
	DGB 1	DGB 1 (DGB 2)	DGB 2	DGB 3	DGB 4	DGB 4 (DGB 5)
Metrekare kullanım alanı başına ortalama yıllık ısıtma enerjisi tasarrufu, $\Delta Q_{yıl}$ (kWh/m ²)						
$S_0 \rightarrow S_8$	46,4	55,5	92,0	140,7	187,7	267,6
$S_0 \rightarrow S_{13}$	47,3	58,6	93,9	143,6	191,9	276,4
$S_8 \rightarrow S_{13}$	0,9	3,1	1,9	2,9	4,2	8,8
Ortalama yıllık ısıtma enerjisi tasarruf oranı, $TO_{Q_{yıl}}$ (%)						
$S_0 \rightarrow S_8$	69,6	69,0	69,7	71,1	72,2	70,8
$S_0 \rightarrow S_{13}$	70,9	72,8	71,1	72,6	73,8	73,2
$S_8 \rightarrow S_{13}$	4,4	12,3	4,7	5,1	5,8	8,0

Tablo 7. Derece-gün bölgeleri için yalıtım iyileştirmesi kaynaklı metrekare kullanım alanı başına ek yalıtım maliyeti (TL/m²) ve ek sera gazı salımı (kg-CO₂eq/m²)

(Additional insulation cost (kg-CO₂eq/m²) and additional greenhouse gas emissions (kg-CO₂eq/m²) for degree-day regions due to insulation improvements)

	TS 825 derece-gün bölgesi					
	DGB 1	DGB 1 (DGB 2)	DGB 2	DGB 3	DGB 4	DGB 4 (DGB 5)
Metrekare kullanım alanı başına yalıtım kaynaklı ek yatırım maliyeti, EY_m (TL/m ²)						
$S_0 \rightarrow S_8$	30,5	30,5	32,2	35,8	39,5	39,5
$S_0 \rightarrow S_{13}$	31,2	33,1	33,1	36,9	42,2	43,8
$S_8 \rightarrow S_{13}$	0,8	2,6	0,8	1,1	2,7	4,3
Metrekare kullanım alanı başına yalıtım kaynaklı ek sera gazı salımı, EY_{sg} (kg-CO ₂ eq/m ²)						
$S_0 \rightarrow S_8$	11,0	11,0	11,7	13,1	14,6	14,6
$S_0 \rightarrow S_{13}$	11,3	12,0	12,0	13,6	15,6	16,3
$S_8 \rightarrow S_{13}$	0,3	1,1	0,3	0,4	1,0	1,6



Şekil 7. Tüm iller için yalıtım iyileştirmesi kaynaklı yaşam döngüsü maliyet tasarrufu ΔYD_m (TL/m²) ve oranı TO_m (%) (Lifetime cost saving amount ΔYD_m (TL/m²) and ratio TO_m (%) for all cities due to insulation improvements)

Tablo 8. Derece-gün bölgeleri için yalıtım iyileştirmesi kaynaklı ortalama yaşam döngüsü maliyet tasarrufu (Degree-day region averages for lifetime cost savings due to insulation improvements)

	TS 825 derece-gün bölgesi					
	DGB 1	DGB 1 (DGB 2)	DGB 2	DGB 3	DGB 4	DGB 4 (DGB 5)
Metrekare kullanım alanı başına ortalama yaşam döngüsü maliyet tasarrufu, ΔYD_m (TL/m ²)						
$S_0 \rightarrow S_8$	108,5	135,7	243,5	385,6	522,7	762,3
$S_0 \rightarrow S_{13}$	110,4	142,4	248,3	393,3	532,8	784,3
$S_8 \rightarrow S_{13}$	1,9	6,6	4,8	7,7	10,1	22,1
Ortalama yaşam döngüsü maliyet tasarruf oranı, TO_m (%)						
$S_0 \rightarrow S_8$	54,0	56,3	61,4	65,0	67,0	67,3
$S_0 \rightarrow S_{13}$	55,0	59,1	62,6	66,3	68,3	69,3
$S_8 \rightarrow S_{13}$	2,1	6,3	3,1	3,7	3,9	6,0

değerleri, yaşam döngüsü maliyetlerini son derece arttırmaktadır. Bu sebeple, zorlu iklim koşullarındaki DGB’lerde yalıtım geçişleri ile sağlanan maliyet tasarruf miktarları ve oranları son derece yüksektir. Örneğin, $S_0 \rightarrow S_8$ için sağlanan yaşam döngüsü maliyet tasarrufu ılıman iklime sahip 1. DGB illerinde ortalama 108 TL/m² iken, zorlu iklim

koşullarına sahip çatı illerinde ortalama 762 TL/m²’ye ulaşmaktadır.

Yalıtımsız bina için hesaplanan YD_{sg,S_0} değeri, 276,2 – 2.046,8 kg-CO₂eş/m² aralığındadır. Tüm bina için bu aralık, 381,1 – 2.824,2 ton-CO₂eş’ e karşılık gelir. Metrekare başına

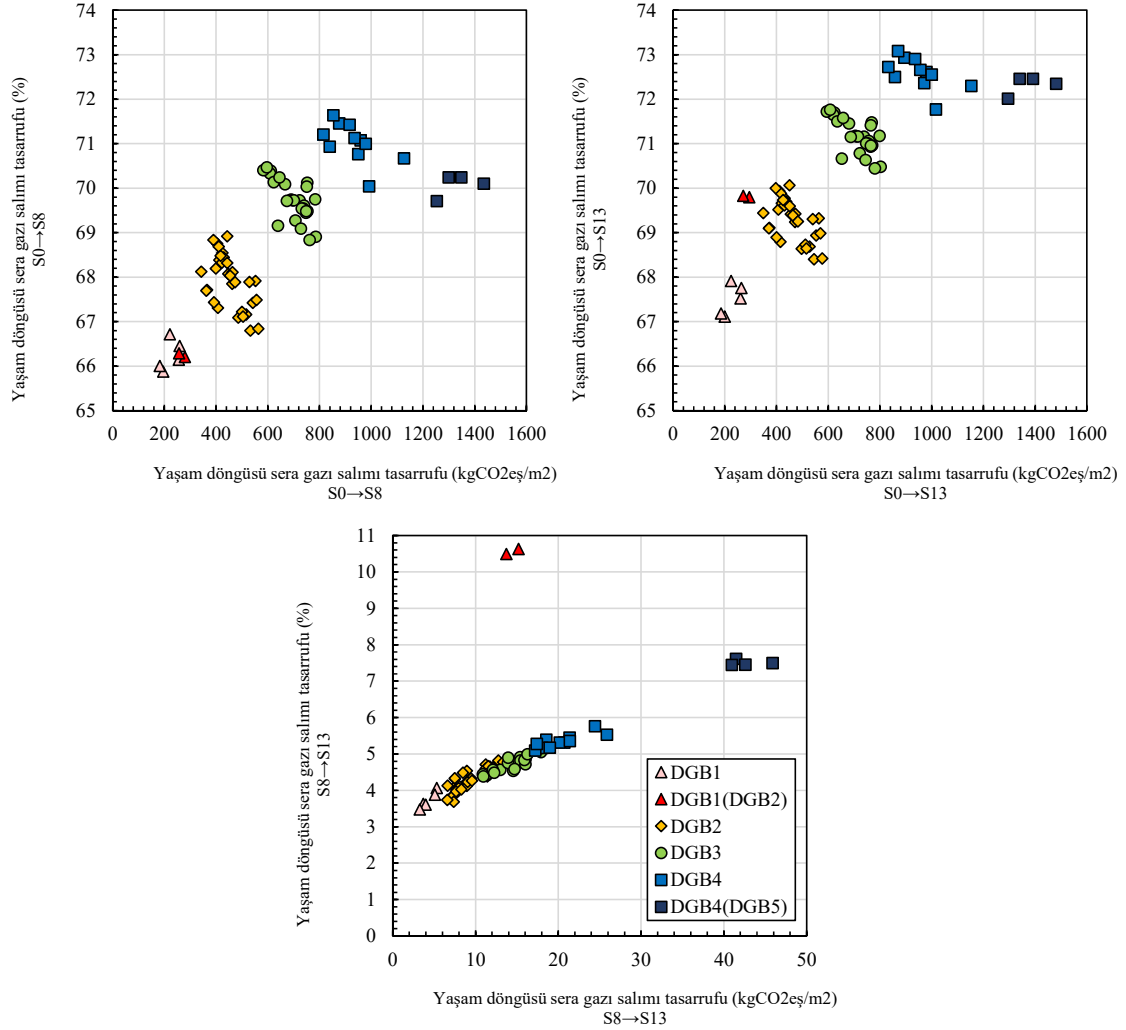
11,0 – 14,6 kg-CO₂eş'lik bir ısı yalıtımı ile TS 825/2008'e uyarlanan binada atmosfere salınan sera gazı miktarı %65,9-71,6 aralığında azalmaktadır (Şekil 8). Binanın yaşam döngüsü sera gazı salımındaki yüzdesel tasarruf, Şekil 6'daki yıllık ısıtma enerji yüzdesel tasarrufuna oldukça benzerdir. Yaşam döngüsü küresel ısınma potansiyelinin ölçümünde kullanılan SGS miktarındaki ana belirleyicinin, enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan doğalgaz olduğu düşünülürse bu durum şaşırtıcı değildir. Metrekare başına 11,3 – 16,3 kg-CO₂eş'lik bir ısı yalıtımı ile TS 825/2013'e uyarlanan binada ise bu aralık %67,1-73,1'e çıkmaktadır. Beklenildiği gibi standart versiyonları arasındaki geçişteki tasarruf oranları (%3,5-10,6) daha sınırlıdır.

Enerji tüketimi, yaşam döngüsü sera gazı salımında son derece belirleyici bir role sahiptir; ek yatırım kaynaklı sera gazı salımlarının etkisi ise oldukça sınırlıdır. Nitekim Tablo 9'daki sera gazı tasarruf oranları Tablo 6'daki enerji tasarruf oranlarına oldukça benzemektedir. İklim koşullarına bağlı olarak ortalama yaşam döngüsü sera gazı tasarruf miktarı

oldukça değişmektedir. S₀→S₈ geçişinde için sağlanan yaşam döngüsü sera gazı salımı tasarrufu 1. DGB illerinde ortalama 226,9 kg-CO₂eş/m² iken, çatı illerinde ortalama 1376,6 kg-CO₂eş/m²'ye ulaşmaktadır.

4.4. Maliyet ve Sera Gazı Salımı Geri Ödeme Süreleri (Payback Times for Cost and Greenhouse Gas Emissions)

Yatırımlarla beraber binanın ısı performansını iyileştirmekte ve yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı azalmaktadır. Bu iyileştirmelerin enerji ihtiyacı, maliyet ve sera gazı salımında sağladığı tasarruf, zaman içerisinde (paranın ve sera gazının zaman değeri de göz önüne alınarak) ek yatırım kaynaklı maliyet ve sera gazı salımını karşılamaktadır (Şekil 9). Isı yalıtımsız bir binanın TS 825/2008'e veya TS/2013'e göre yalıtılmasıyla beraber, yapılan yatırımların 1,1-6,9 yıl arasında geri ödemesi sağlanırken, bu süre sera gazı salımında çok daha kısadır. Nitekim yatırım kaynaklı EY_{sg}, enerji tasarruflarıyla beraber tüm iller için 1,2 yıldan kısa bir sürede karşılanmaktadır. Standartlar arası geçişte, diğer

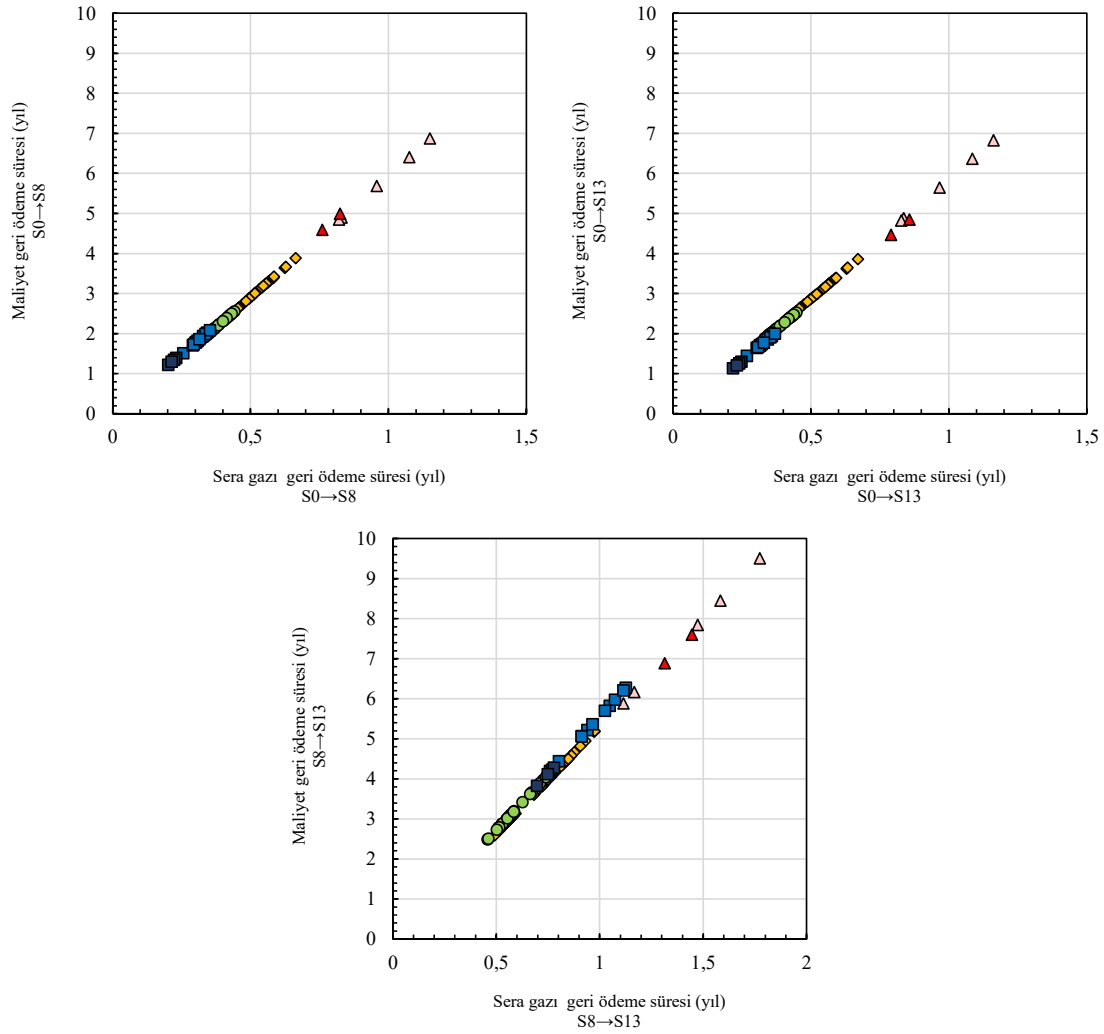


Şekil 8. Tüm iller için yalıtım iyileştirmesi kaynaklı yaşam döngüsü sera gazı salımı tasarrufu ΔYD_{sg} (kg-CO₂eş /m²) ve oranı TO_{sg} (%)

(Lifetime greenhouse gas emission saving amount ΔYD_{sg} (kg-CO₂eş/m²) and ratio TO_{sg} (%) for all cities due to insulation improvements)

Tablo 9. Derece-gün bölgeleri için yalıtım iyileştirmesi kaynaklı ortalama yaşam döngüsü sera gazı salım tasarrufu (Degree-day region averages for lifetime greenhouse gas emission savings due to insulation improvements)

	TS 825 derece-gün bölgesi					
	DGB 1	DGB 1 (DGB 2)	DGB 2	DGB 3	DGB 4	DGB 4 (DGB 5)
Metrekare kullanım alanı başına ortalama yaşam döngüsü sera gazı salımı tasarrufu, ΔYD_{sg} (kg-CO _{2eş} /m ²)						
S ₀ →S ₈	222,7	268,6	452,0	695,7	931,0	1333,9
S ₀ →S ₁₃	226,9	283,0	461,2	710,0	951,4	1376,6
S ₈ →S ₁₃	4,3	14,5	9,2	14,3	20,4	42,7
Ortalama yaşam döngüsü sera gazı salımı tasarruf oranı, TO_{sg} (%)						
S ₀ →S ₈	66,2	66,2	67,9	69,8	71,0	70,1
S ₀ →S ₁₃	67,5	69,8	69,3	71,2	72,6	72,3
S ₈ →S ₁₃	3,7	10,6	4,3	4,7	5,3	7,5

**Şekil 9.** Tüm iller için maliyet ve sera gazı salımı geri ödeme süreleri (yıl) (Cost and greenhouse gas emission payback times for all cities (year))

senaryolara göre $GÖS_m$ 'ler biraz uzamıştır (2,5 – 9,5 yıl); $GÖS_{sg}$ 'ler ise tüm iller için 2 senenin altında kalmıştır.

Tablo 10'da DGB'ler için ortalama $GÖS_m$ ve $GÖS_{sg}$ değerleri sunulmuştur. S₀→S₈ ve S₀→S₁₃ geçişleri, 1. DGB'de

ortalama 5 yıl 9 ayda maliyetini karşılamaktadır. Bu süre, iklimsel koşulların en zor olduğu 5. DGB'de ortalama 1 yıl 3 aya kadar düşmektedir. S₈→S₁₃ geçişlerinde sağlanan marjinal fayda azaldığı için $GÖS_m$ 'ler doğal olarak uzamıştır. Öte yandan, yalıtım geçişleri kaynaklı EY_{sg} 'ların geri ödeme

Tablo 10. Derece-gün bölgeleri için yalıtım iyileştirmesi kaynaklı ortalama maliyet ve sera gazı salım geri ödeme süreleri (Degree-day region averages for cost and greenhouse gas emission payback times due to insulation improvements)

	TS 825 derece-gün bölgesi					
	DGB 1	DGB 1 (DGB 2)	DGB 2	DGB 3	DGB 4	DGB 4 (DGB 5)
Maliyet geri ödeme süresi, $G\ddot{O}S_m$ (yıl)						
$S_0 \rightarrow S_8$	5,74	4,79	3,00	2,16	1,84	1,31
$S_0 \rightarrow S_{13}$	5,71	4,66	2,98	2,14	1,76	1,22
$S_8 \rightarrow S_{13}$	7,57	7,24	3,91	3,17	5,39	4,11
Sera gazı geri ödeme süresi, $G\ddot{O}S_{sg}$ (yıl)						
$S_0 \rightarrow S_8$	0,97	0,79	0,51	0,37	0,31	0,22
$S_0 \rightarrow S_{13}$	0,97	0,82	0,52	0,38	0,33	0,23
$S_8 \rightarrow S_{13}$	1,42	1,38	0,74	0,58	0,97	0,75

süreleri maliyet geri ödeme sürelerine kıyasla çok daha kısadır. Tüm DGB'lerin ortalamasında, EY_{sg} 1,5 yıldan daha kısa bir süre içerisinde geri ödenmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Ülkemizde, binalarda tüketilen enerjinin önemli bir bölümü hacimsel ısıtma kaynaklıdır. Bina kabuğunu etkin bir şekilde yalıtım hacimsel ısıtma kaynaklı enerji ihtiyacını ve dolayısı ile bina toplam enerji tüketimini düşürmenin en etkili yöntemlerinden biridir. Bu çalışmada, Türkiye'nin 81 ili için bina erken tasarım aşamalarında TS 825 yaklaşımı esas alınarak yapılan kabuk yalıtım yatırımlarının etkinliği referans bir bina üzerinden değerlendirilmiştir. Referans bina olarak TS 825 standardında sunulan örnek bir bina alınmış, her il için üç farklı yalıtım senaryosu (S_0 - ısı yalıtımsız, S_8 - TS 825/2008'e göre yalıtılmış ve S_{13} - TS 825/2013'e göre yalıtılmış) oluşturulmuştur. Yalıtım senaryoları arasındaki geçişlerin - (i) $S_0 \rightarrow S_8$, (ii) $S_0 \rightarrow S_{13}$ ve (iii) $S_8 \rightarrow S_{13}$ - bina performansına etkisi incelenmiştir.

Analiz sonuçları, yalıtım geçişleri ile bina yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacında sırasıyla (i) %68,2-72,9 (ortalama %70,5), (ii) %69,8-74,4 (ortalama %72,1) ve (iii) % 4,1-12,3 (ortalama %5,3) tasarruf sağlanabileceğini göstermiştir. En temel yalıtım geçişi olan $S_0 \rightarrow S_8$ ile sağlanan enerji tasarruf miktarları, ılıman iklime sahip 1. DGB illerinde ortalama 46 kWh/m² iken, zorlu iklim koşullarına sahip çatı illerinde ortalama 268 kWh/m²'ye ulaşmaktadır. Çalışmada, yalıtım senaryoları arasındaki geçişlerin bina yaşam döngüsü maliyet ve sera gazı salım değerlerine etkisi de incelenmiştir. Yaşam döngüsü maliyet tasarruf oranları sırasıyla (i) %51,4-67,6 (ortalama %63,1), (ii) %52,2-69,5 (ortalama %64,4) ve (iii) % 1,7-6,5 (ortalama %3,6) olarak hesaplanmıştır. $S_0 \rightarrow S_8$ için sağlanan yaşam döngüsü maliyet tasarrufu ılıman iklime sahip 1. DGB illerinde ortalama 108 TL/m² iken, zorlu iklim koşullarına sahip çatı illerinde ortalama 762 TL/m²'ye ulaşmaktadır. Yaşam döngüsü sera gazı salımlarında sırası ile (i) %65,9-71,6 (ortalama %68,9), (ii) %67,1-73,1 (ortalama %70,4) ve (iii) % 3,5-10,6 (ortalama %4,8) tasarruf sağlanmıştır. $S_0 \rightarrow S_8$ geçişinde sağlanan yaşam döngüsü maliyet tasarrufu 1. DGB illerinde ortalama 226,9 kg-CO₂eş/m² iken, çatı illerinde ortalama 1.376,6 kg-CO₂eş/m²'ye yükselmektedir. $S_0 \rightarrow S_8$ ve $S_0 \rightarrow S_{13}$ geçişlerinde yapılan ek yatırımlar, 1,1-6,9 yıl arasında

maliyetlerini karşılarken, ek yatırım kaynaklı sera gazı salımları yapılan enerji tasarruflarıyla 1-2 yıl gibi kısa bir sürede geri ödeme dengesine ulaşmıştır. $S_8 \rightarrow S_{13}$ geçişlerinde ise maliyet geri ödeme süreleri 2,5-9,5 yıl arasında değişmekte, sera gazı geri ödeme süreleri ise 2 yılın altında kalmaktadır.

Sonuçlar, etkin kabuk yalıtımının bina enerji performansını son derece iyileştirdiğini; bina yaşam döngüsü maliyetini ve sera gazı salımını ciddi oranlarda azalttığını göstermektedir. TS 825 standardına uygun yapılan ek yalıtımlar kendini maliyet açısından kısa, sera gazı salımları açısından ise çok kısa sürelerde geri ödemektedir. Özellikle zorlu iklim koşulları için, TS 825 standardında bina elemanları için tavsiye edilen asgari limitlerin bina yaşam döngüsü performansı dikkate alınarak yeniden gözden geçirilmesi, bu bölgelerde sağlanan tasarruf miktarlarının artırılmasını sağlayacaktır. Çalışma sonuçlarının, kabuk yalıtım tasarımlarında yaşam döngüsü analizlerinin önemi konusunda farkındalığı artırması beklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Enerdata, World Energy Statistics, <https://www.enerdata.net/>.
2. World Energy Council, World Energy Resources 2013 Survey, 2013.
3. IPCC, Climate Change 2014 - Mitigation of Climate Change, 2014.
4. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevresel göstergeler - Sektörlere göre nihai enerji tüketimi, 2017.
5. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevresel Göstergeler - Yakıta göre birincil enerji tüketimi, 2017.
6. Melikoglu, M., The role of renewables and nuclear energy in Turkey's vision 2023 energy targets: Economic and technical scrutiny, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 62, 1-12, 2016.
7. Odyssee Veritabanı, Final energy consumptions of residential, 2009, .
8. Türk Müteahhitler Birliği, İnşaat sektörü analiz raporu: Düşük büyüme - orta demokrasi - yüksek risk, 2014.
9. Meral, C., Pasaoglu, O., Ozcelik, G., Life-cycle assessment of a basic external drywall system in Turkey, 11th International Congress on Advances in Civil Engineering, 2014, 2-8.

10. Meral, Ç., Dino, İ. G., Çeliker, Z. Y., Net- sıfır enerji ve su tüketen binaların tasarımında simülasyon ve optimizasyon araçlarının önemi, 4. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2016, 1312–1323.
11. Turkish Standard Institute, TS 825 - Thermal insulation requirements for buildings, 2008.
12. Islam, H., Jollands, M., Setunge, S., Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings—A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, 129–140, 2015.
13. Kneifel, J., Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings, *Energy Build.*, vol. 42, no. 3, 333–340, 2010.
14. Usta, S., TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardına göre ikinci bölgede bulunan bir binanın yalıtımsız ve yalıtımlı durumlarının enerji verimliliği bakımından karşılaştırılması, *Yapı Teknol. Elektron. Derg.*, vol. 5, no. 1, 1–24, 2009.
15. Kon, O., Farklı pencere tipleri, yalıtım malzemeleri ve yenilenebilir yakıt türlerine bağlı olarak konutlar için ısıtma ve soğutma enerji gereksinimi, *Eng. Sci.*, vol. 11, no. 1, 15–37, 2016.
16. Gazioğlu, A., Akşit, Ş. F., Manioğlu, G., Enerji etkin bina tasarımında ısıtma enerjisi tüketimini azaltmaya yönelik bir iyileştirme çalışması, *Tesisat Mühendisliği*, vol. 136, 41–52, 2013.
17. Ashrafian, T., Yılmaz, A. Z., Corgnati, S. P., Moazzen, N., Methodology to define cost-optimal level of architectural measures for energy efficient retrofits of existing detached residential buildings in Turkey, *Energy Build.*, vol. 120, 58–77, 2016.
18. Ganiç, N., Yılmaz, A. Z., Adaptation of the cost optimal level calculation method of Directive 2010/31/EU considering the influence of Turkish national factors, *Appl. Energy*, vol. 123, 94–107, 2014.
19. Cetiner, I., Metin, B., Economic performance assessment of residential building retrofits: a case study of Istanbul, *Energy Effic.*, 1–19, 2017.
20. Harputlugil, G. U., Hensen, J., Çelebi, G., A prospect to develop thermally robust outline design and to explore its applicability to the different climate necessities of Turkey, *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 6, no. 1, 76–85, 2011.
21. Çay, Y., Gürel, A. E., Determination of optimum insulation thickness, energy savings, and environmental impact for different climatic regions of Turkey, *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 32, no. 2, 365–372, 2013.
22. Kon, O., Yuksel, B., Kamu binalarının ısıtma yüküne göre dış duvarlarının optimum yalıtım kalınlıkları ve enerji tüketimleri, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 15, no. 1, 30–47, 2013.
23. Gürel, A. E., Dasdemir, A., Türkiye'nin dört farklı iklim bölgesinde ısıtma ve soğutma yükleri için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Fen Bilim. Derg.*, vol. 27, no. 4, 346–353, 2011.
24. Fertelli, A., Determination of optimum insulation thickness for different building walls in turkey, *Trans. Famena*, vol. 37, no. 2, 103–113, 2013.
25. Atac, A., Aksoy, U. T., Enerji tasarrufu için dış duvarlarda optimum yalıtım kalınlığı ve ısıtma maliyeti ilişkisi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(4), 753–758, 2006.
26. Gürel, A. E., Cingiz, Z., Farklı dış duvar yapıları için optimum ısı yalıtım kalınlığı tespitinin ekonomik analizi, *SAÜ Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 15, no. 1, 75–81, 2000.
27. Kaynaklı, Ö., Mutlu, M., Kılıç, M., Bina duvarlarına uygulanan ısı yalıtım kalınlığının enerji maliyeti odaklı optimizasyonu, *Tesisat Mühendisliği*, vol. 126, 48–54, 2012.
28. Erdem, S., Onan, C., Özkan, D. B., Bedirli, S. E., The effect of insulation on energy savings and costs for the current building inventory in Turkey, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2012, vol. 7, no. PARTS A, B.
29. Gölcü, M., Dombaycı, Ö. A., Abalı, S., The effect and results of the optimum insulation thickness on energy saving for Denizli, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(4), 639–644, 2006.
30. Kürekçi, A., Bardakçı, A. T., Çubuk, H., Emanet, Ö., Türkiye'nin tüm illeri için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi, *Tesisat Mühendisliği*, vol. 131, 5–21, 2012.
31. Aslan, A., Yüksel, B., Gönen Jeotermal Bölge Isıtma Sistemiyle ısıtılan farklı tip binaların dış duvarlarının optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 12, no. 1, 100–111, 2010.
32. Özel, M., Şengür, S., Farklı yakıt türü ve yalıtım malzemelerine göre optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi, *Tesisat Mühendisliği*, vol. 132, 5–11, 2012.
33. Keçebaş, A., Pul, H., Ertürk, M., Daşdemir, A., Coşkun, C., Oktay, Z., Hozatlı, B., Investigation of optimum air gap thickness for windows in provinces of the Aegean Region, *Mugla J. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, 60–60, 2016.
34. Kon, O., An evaluation of fuel consumption and emission for double glazed windows that have optimum air layer, *Uludağ Univ. J. Fac. Eng.*, vol. 21, no. 2, 133, 2016.
35. Karabay, H., Arıcı, M., Multiple pane window applications in various climatic regions of Turkey, *Energy Build.*, vol. 45, 67–71, 2012.
36. Bolattürk, A., Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 11, 1301–1309, 2006.
37. Uygunoğlu, T., Keçebaş, A., LCC analysis for energy-saving in residential buildings with different types of construction masonry blocks, *Energy Build.*, vol. 43, no. 9, 2077–2085, 2011.

38. Mangan, S. D., Oral, G. K., A study on life cycle assessment of energy retrofit strategies for residential buildings in Turkey, *Energy Procedia*, vol. 78, 842–847, 2015.
39. Çomaklı, K., Yüksel, B., Environmental impact of thermal insulation thickness in buildings, 2004.
40. Atmaca, A., Atmaca, N., Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO2A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey, *Energy Build.*, vol. 102, 417–431, 2015.
41. TBMM Tutanak Dergisi, 43452547-120.00-136139 sayılı yazı, 2013.
42. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015 yılı birim fiyat listesi, <https://birimfiyat.csb.gov.tr/>.
43. Ecoinvent Centre, Ecoinvent Database. 2012.
44. Meral, C., Türkiye’de yaygın olarak kullanılan yük taşımayan duvar sistemlerinin küresel ısınma potansiyelleri, AGUDOS-2013-03-03-2-00-71, 2015.
45. Gursel, A. P., Masanet, E., Horvath, A., Stadel, A., Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 51, 38–48, 2014.
46. Isıcam Sistemleri, Profesyoneller için ürün kataloğu, <http://www.isicam.com.tr/tr/urunler/profesyoneller-icin-urun-katalogu>.
47. Bayram, M., Yeşilata, B., Isıtma ve soğutma derece gün sayılarının entegrasyonu, 9. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, Sempozyum Bildirisi, İzmir, 2015, no. January, 425–432.
48. Ucar, A., Balo, F., Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls, *Renew. Energy*, vol. 35, no. 1, 88–94, 2010.
49. Deposit Rates, <http://turkey.deposits.org/>. [Erişim tarihi: 23-02-2015].
50. Turkish Statistical Institute, TurkStats, <http://www.turkstat.gov.tr/>. [Erişim tarihi: 23-02-2015].
51. Marshall, L., Kelly, A., The time value of carbon and carbon storage: Clarifying the terms and the policy implications of the debate, 2010.

