



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 04.02.2024
Kabul Tarihi : 04.03.2024

Received Date : 04.02.2024
Accepted Date : 04.03.2024

DUVAR YALITIM TİPLERİ VE CO₂ EMİSYONLARI: SINIRDA KARBON DÜZENLEME MEKANİZMASINI TAMAMLAYICI BİREYSEL İYİLEŞTİRMELER ÇERÇEVESİNDE BİR İNCELEME

WALL INSULATION TYPES AND CO₂ EMISSIONS: A STUDY WITHIN THE FRAMEWORK OF INDIVIDUAL IMPROVEMENTS COMPLEMENTARY TO THE CARBON BORDER ADJUSTMENT MECHANISM

Ahmet Serhan CANBOLAT^{1*} (ORCID: 0000-0002-0423-6411)

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmet Serhan CANBOLAT, ascanbolat@uludag.edu.tr

ÖZET

Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) son zamanlarda sıklıkla duyulan bir konu haline gelmiştir. Genel olarak atmosfere salınan CO₂ miktarını azaltmaya yönelik tedbirler içeren SKDM'ye bireysel olarak herkesin katkı sunması, farklı anlaşmalarla taahhüt ettiğimiz sıfır emisyonla ulaşma politikası kapsamında ülkemiz için faydalı olacaktır. Karbon emisyonunun azalma potansiyeli en yüksek sektör olan inşaat sektöründe yapılan yalıtım uygulamaları bu çalışmanın ana konusudur. Bu kapsamda soğutma kaynaklı enerji ihtiyacından dolayı ortaya çıkan CO₂ miktarları (operasyonel emisyon) ve duvar bileşenlerinin üretim sürecinden dolayı atmosfere salınan CO₂ miktarları (gömülü emisyon) farklı duvar yapıları için hesaplanmıştır. Bu çalışma, olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla iki farklı senaryo üzerinde yapılan analizleri içermektedir. İlk senaryoda, altı farklı duvar yapısı oluşturulmuş ve her bir yapının, soğutma sezonunda atmosfere yaydığı emisyon miktarları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, çeşitli duvar tiplerinde atmosfere yayılan CO₂ emisyon miktarları ve bu emisyonların kaynakları (enerji, yalıtım, sıva, beton), grafiksel olarak sunulmuştur. İkinci senaryoda ise duvarlara sonradan uygulanan farklı kalınlıklardaki yalıtımın, atmosfere salınan toplam emisyon miktarları üzerindeki etkisi incelenmiş olup, çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı 10 cm olarak tespit edilmiş ve bu yalıtım kalınlığında atmosfere salınan CO₂ miktarı 5,05 kg/m² olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: CO₂ emisyonu, yalıtım, güneş radyasyonu, optimizasyon, SKDM

ABSTRACT

The Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) has become a frequently discussed topic in recent times. The individual contribution to the CBAM, which includes measures to reduce the amount of CO₂ released into the atmosphere, will be beneficial for our country in the context of the zero-emission policy we have committed to with various agreements. The focus of this study is insulation applications in the construction sector, which is the sector with the highest potential for reducing carbon emissions. In this context, the CO₂ emissions arising from cooling energy demand (operational emissions) and the CO₂ emissions released into the atmosphere due to the production process of wall components (embodied emissions) were calculated for different wall structures. The analyses were conducted for two different scenarios. In the first scenario, six different wall structures were created, and the emissions released into the atmosphere for each structure were examined in detail. Furthermore, the amounts of CO₂ emissions released into the atmosphere from various wall types and the sources of these emissions (energy, insulation, plaster, concrete) were presented. In the second scenario, different insulation thicknesses applied to the walls were studied for their impact on total emissions to the atmosphere. The optimal insulation thickness was found to be 10 cm, resulting in a calculated CO₂ emission of 5.05 kg/m².

Keywords: CO₂ emission, insulation, solar radiation, optimization, CBAM

ToCite: CANBOLAT, A. S., (2024). DUVAR YALITIM TİPLERİ VE CO₂ EMİSYONLARI: SINIRDA KARBON DÜZENLEME MEKANİZMASINI TAMAMLAYICI BİREYSEL İYİLEŞTİRMELER ÇERÇEVESİNDE BİR İNCELEME. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 861-872.

GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin çok hızlı ilerlemesi, artan nüfus ve yaşam standartlarının yükselmesi nedeniyle enerji tüketiminde ve buna bağlı olarak sera gazı emisyonlarında büyük bir artış yaşanmaktadır. Sera gazlarının artışı, küresel ısınma ve iklim değişikliğine yol açarak çevre ve insan sağlığı üzerinde birçok olumsuz etkiye neden olmaktadır. Bu etkiler arasında artan orman yangınları, mevsimsel dengesizlikler, eriyen buzullar, deniz seviyesinin yükselmesi, salgın hastalıkların yayılması ve solunum sistemi problemleri sayılabilir. Bu bulgular, sera gazlarının kontrol altına alınmasının önemini arttırmaktadır. Buna bağlı olarak başta uluslararası düzeyde olmak üzere birtakım önlemler alınmaktadır. Bunlardan en önemlisi Avrupa Birliği'nin (AB), daha temiz, sürdürülebilir ve sağlıklı bir çevre için ortaya koyduğu ve Avrupa Yeşil Mutabakatı adını verdiği kapsamlı bir yol haritasıdır. Avrupa Yeşil Mutabakatının sera gazı emisyonlarının azaltılması yönünde kullanacağı temel araçlardan birisi de Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasıdır (SKDM) (European Union, 2023). SKDM, Türkiye'deki ihracat odaklı çalışan firmaların ürünlerini üretirken karbon ayak izini azaltmalarını, dolayısıyla uluslararası ticaretin iklim dostu bir perspektifle işlenmesini amaçlamaktadır. Aksi halde AB ithal ettiği bazı ürünler için karbon içeriklerine göre "karbon salınımı vergisi" alınmasını öngörmektedir (İmer Ertunga ve Seyhun, 2022). AB özellikle sera gazı emisyonu yüksek, enerji-yoğun sektörlerde emisyonların 2005 yılına kıyasla 2030 yılında %62 oranında azaltılmasını hedeflemektedir (Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2023). SKDM tüzüğü 1 Ocak 2026 tarihinde resmi olarak devreye girecek olup, bu tarihe kadar olan süre geçiş dönemi olarak adlandırılmıştır ve tüzüğe uygun hareket etmeyen firmalara herhangi bir mali yükümlülük doğmayacaktır. Fakat bu uzun vadeli bir süreç olduğu için tüm sektörler karbon emisyonunu azaltmaya yönelik çalışmalara şimdiden başlamıştır. Ayrıca Türkiye'nin imzalamış olduğu Paris Anlaşması'na göre 2053 yılına kadar net sıfır emisyon durumuna ulaşma taahhüdü bulunmaktadır. Bununla beraber Türkiye, 2022 yılında Mısır'ın Şarm El-Şeyh şehrinde gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin 27. Taraflar Konferansı'nda 2010 yılındaki karbon emisyon seviyelerinin 2030 yılına kadar %21'e azaltım hedefini, %41'e yükseltmiştir (Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı, 2022).

Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası iş birliği ile hazırlanan rapora göre SKDM'den en çok etkilenecek ikinci sektörün çimento sektörü olacağı tahmin edilmektedir (Türkiye Cumhuriyeti Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). Raporda en çok etkilenecek sektör olarak da demir-çelik sektörü ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda bakıldığında aslında genel olarak inşaat sektörünün en fazla etkilenecek dolayısıyla karbon emisyon azaltma potansiyeli en fazla olan sektör olduğu görülmektedir. Tüm bu bilgiler ışığında, şirketlerin kendi bünyelerinde yapacakları iyileştirmeler dışında karbonsuzlaşmayı bir devlet politikası haline getirmek ve yeşil dönüşümü tamamlayıcı strateji ve teşviklerle genişletmek Türkiye'ye daha fazla sosyal ve ekonomik faydalar sunacaktır.

İnşaat sektörünün SKDM'den en fazla etkilenecek sektör olduğu ve buna paralel olarak toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40'ının ve sera gazı emisyonunun %35'inin konut ve hizmet binalarında gerçekleştiği bilinmektedir (Canbolat, 2023). Binalardaki ısı transferinin büyük bir kısmı dış cepheden gerçekleştiği için enerji tasarrufunun en pratik ve zahmetsiz yöntemi termal yalıtım uygulamasıdır. Yalıtım uygulaması ile binayı ısıtmak veya soğutmak için ihtiyaç duyulan enerji miktarları ve buna bağlı olarak CO₂ emisyonları azalacaktır. Son yıllarda bina dış cephesine uygulanan yalıtımın enerji tüketimine, maliyete ve karbon emisyonlarına etkisini inceleyen çalışmaların sayısı artmaktadır. (Yüce vd., 2021) soğuk iklim bölgesinde bulunan ve ısıtma ihtiyacı yüksek olan bir bölge için farklı yalıtım malzemeleri, yakıt tipleri ve duvar yapıları için kapsamlı analizler yapmıştır. Yakıt olarak kömür ve doğalgaz, yalıtım malzemesi olarak taş yünü, cam yünü, EPS ve XPS, duvar yapısı olarak ise yatay delikli tuğla ve bims kullanmışlardır. Yatay delikli tuğla yerine bims kullanımının maksimum enerji tasarrufu sağladığı sonucuna varmışlardır. (Bademlioğlu vd., 2018) yoğunlaşma riskini göz önünde bulundurarak, aylara göre gerekli minimum yalıtım kalınlıklarını Türkiye'nin 4. derece gün bölgesinde bulunan bir il hesaplamışlardır. Şubat ayını yoğunlaşma riski en fazla olan, dolayısıyla yoğunlaşmayı önlemek için maksimum kalınlıkta yalıtıma ihtiyaç duyulan ay olarak tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda şubat ayı için gerekli minimum yalıtım kalınlığını 10,4 cm olarak elde etmişlerdir. (Arslan vd., 2023) yaptıkları deneysel çalışmada güçlendirilmiş polimer katkılı betonarme yapı elemanlarında farklı yangın yalıtım malzemelerinin ve beton dayanımının sıcaklık geçişlerine etkilerini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda taş yünü ile yalıtım yapılan betonarme elemanların koruyuculuğu cam yünü ve kırmızı alçıpana göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca yalıtım malzemesinin sıcaklık geçişindeki rolünün çok önemli olduğu sonucuna varmışlardır. (Dombaycı vd., 2020) ekserji denklemlerini kullanarak farklı yalıtım malzemeleri için CO₂ emisyonunu azaltan en uygun yalıtım kalınlığını belirlemişlerdir. Yakıt olarak doğal gaz, yalıtım malzemesi olarak da taş yünü ve cam yünü kullanmışlardır. Çalışma koşullarına göre ideal yalıtım kalınlığı taş yünü için 18 cm, cam yünü için ise 40 cm olarak tespit edilmiştir. (Huang vd., 2020), farklı yakıt türleri ve yalıtım malzemeleri için minimum toplam

maliyeti veren optimum yalıtım kalınlığını belirlemişlerdir. Yeni bir aerojel süper yalıtım malzemesini köpüklü poliüretan, ekstrüde polistiren, genişletilmiş polistiren ve cam elyaf gibi diğer geleneksel yalıtım malzemeleriyle karşılaştırmışlardır. Ayrıca her bir malzemeyi ekolojik açıdan da değerlendirmişler ve atmosfere salınan CO₂ miktarlarını hesaplamışlardır. (Axaopoulos vd., 2019) CO₂ emisyon faktörlerini kullanarak Yunanistan'da bulunan Atina şehrinin çevresel açıdan ideal yalıtım kalınlıklarını farklı koşullar için tespit etmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre duvar türlerine, yalıtım malzemelerine ve duvar yönlerine göre ideal yalıtım kalınlıkları 11,2 cm ile 23,4 cm arasında değişmektedir. (Canbolat, 2023) farklı yalıtım malzemeleri ve yakıt tipleri kullanarak üç farklı bina kullanım durumu için (yazlık, kışık ve dört mevsim ev) hem maliyeti hem de karbon emisyonunu azaltmaya yönelik kapsamlı bir optimizasyon çalışması yapmıştır. Analizler Türkiye'deki dört farklı iklim bölgesi için ayrı ayrı yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre amaç sadece karbon emisyonunu azaltmak olduğunda elde edilen optimum yalıtım kalınlığı, amaç sadece maliyeti azaltmak olduğunda elde edilen optimum yalıtım kalınlığından her zaman daha yüksek çıkmıştır. (Akan vd., 2022) binalardaki yalıtım kaynaklı CO₂ emisyonunu hesaplamak üzere bir modelleme yapmışlardır. Matlab programında oluşturdukları model ile dört farklı yakıt, beş farklı yalıtım malzemesi, üç farklı durum (ısıtma, soğutma ve ısıtma-soğutma beraber) ve beş farklı il için CO₂ emisyonlarını hesaplamışlardır. Isı yalıtımı yapılan binalarda CO₂ emisyonunun ısıtma sezonunda yaklaşık %66-76, soğutma sezonunda ise %46-69 oranında azaldığını tespit etmişlerdir.

Görüldüğü gibi son yıllarda, binalardaki yalıtım uygulamalarının maliyete etkilerinin yanında karbon emisyonuna etkileri konusunda yapılan çalışmalara da literatürde sıklıkla rastlanmaktadır. Genelde yapılan çalışmalarda ısıtma veya soğutma kaynaklı enerji ihtiyacından dolayı ortaya çıkan CO₂ miktarı ve yalıtım malzemesinin üretim sürecinden dolayı atmosfere salınan CO₂ miktarı hesaplanmıştır. Bu çalışmada ise yalıtım malzemesi dışında duvarı oluşturan diğer bileşenler (iç sıva, dış sıva, beton) de hesaplamalara katılmış ve daha detaylı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada iki farklı senaryoya göre analizler yapılmıştır. İlk senaryoda İzmir ilinde sıfırdan yapılan bir bina olduğu ve toplam 20 cm'lik bir duvar olacağı varsayılmıştır. Buna bağlı olarak 6 farklı duvar yapısı oluşturulmuş ve her bir duvar yapısının soğutma sezonunda atmosfere salacağı emisyon miktarları hesap edilmiştir. İkinci senaryoda ise hali hazırda inşa edilmiş bir bina olduğu ve duvarlarının yalıtımsız olduğu varsayılmıştır. Bu duvarlara sonradan farklı kalınlıklarda yalıtım uygulaması yapılmış ve yine soğutma sezonunda atmosfere salınan toplam emisyon miktarları, çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı ve CO₂ tasarruf oranları hesap edilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Güneş Radyasyonu Hesaplamaları

Derece gün yöntemi, binalardaki enerji tüketiminin tahmininde kullanılan kullanışlı ve güvenilir bir yöntemdir. Bu çalışmada da soğutma kaynaklı yıllık enerji ihtiyacının tespitinde derece gün yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde göre, ortalama dış ortam sıcaklığı (T_0) ile referans sıcaklığı (T_r) arasındaki fark arttıkça binanın enerji ihtiyacı da artmaktadır. Referans sıcaklığı, binadaki ısı kaynakları ve kayıpları arasındaki denge noktasını temsil eden bir sıcaklıktır. Güneş radyasyonunun hesaba katılması, derece gün yönteminin daha doğru sonuçlar vermesini sağlar. Bu nedenle, özellikle sıcak iklimlerde veya güneş radyasyonunun yüksek olduğu durumlarda, güneş radyasyonunun hesaba katılması önemlidir. Güneş radyasyonunun hesaba katılması için, günlük ortalama dış hava sıcaklığına güneş radyasyonunun etkisi eklenir. Bu şekilde elde edilen sıcaklık değeri, $T_{güneş}$ olarak ifade edilmiştir. Çalışma soğutma sezonu için yapıldığından soğutma derece gün sayısı (CDD) aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$CDD = \sum_{g=1}^{365} (T_{güneş} - T_r) \quad T_{güneş} > T_r \text{ olduğu durumda} \quad (1)$$

Bu denklemde geçen $T_{güneş}$ ifadesi aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (Cengel, 2002).

$$T_{güneş} = T_0 + \frac{\alpha_s \dot{q}_s}{h_0} - \frac{\varepsilon \sigma (T_0^4 - T_{çevre}^4)}{h_0} \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitlikteki T_0 ortalama dış ortam sıcaklığı, α_s yüzeyin güneş soğurma katsayısı, h_0 birleşik ısı taşınım katsayısı, \dot{q}_s yüzeye gelen güneş ışınımı değeri, ε yüzeyin yayma katsayısı, σ Stefan Boltzman sabiti, $T_{çevre}$ çevreleyen yüzeylerin ortalama sıcaklığını ifade etmektedir (Canbolat vd., 2019). Atmosfer dışında yatay düzleme düşen günlük güneş ışınımı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$\dot{q}_{0,h} = \frac{G_{s,c}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \varnothing \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \varnothing \sin \delta \right] \quad (3)$$

$$\frac{\dot{q}_h}{\dot{q}_{0,h}} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

$$a = 0,103 + 0,000017Z + 0,198 \cos(\varnothing - \delta) \quad (5)$$

$$b = 0,533 - 0,165 \cos(\varnothing - \delta) \quad (6)$$

Bu eşitliklerde $G_{s,c}$ atmosferin dışına düşen güneş ışınımının birim alana düşen ortalama enerjisini, ω_s güneşin ufuktan batma açısını, n yılın kaçınıcı günü olduğunu, a ve b lokasyona bağlı sabitleri, $\dot{q}_h/\dot{q}_{0,h}$ atmosferin ışınımı ne kadar engellediğini (daha sonraki kısımlarda berraklık indeksi (K_T) olarak gösterilecektir), n/N güneşin gökyüzünde ne kadar süre kaldığını, δ belirli bir lokasyonun deklinasyon açısını, \varnothing ekvatora olan uzaklığını, Z ise deniz seviyesinden yüksekliğini temsil etmektedir.

Güneş ışınlarının atmosferdeki herhangi bir gaz veya parçacıkla etkileşime girmeden doğrudan yeryüzüne ulaşmasına direkt ışınım, atmosferdeki gazlar ve parçacıklar tarafından saçılması sonucu yeryüzüne ulaşmasına ise yayılı ışınım denir. Yatay bir düzleme düşen toplam güneş ışınımı, bu iki ışınımın toplamına eşittir. Bu ışınım miktarını hesaplamak için literatürde birçok ampirik ifade mevcuttur. Bu ifadeler genellikle berraklık indeksinin (K_T) fonksiyonu şeklindedir (Yiğit vd., 2010). Dik bir yüzeye düşen toplam güneş ışınımı miktarı ise o yöne ait direkt, yayılı ve yansıyan ışınımın toplamına eşittir. Yansıyan ışınım, yeryüzünden uzaya geri yansıyan güneş ışınımıdır.

$$\frac{\dot{q}_{h,d}}{\dot{q}_h} = (0,703 - 0,414K_T - 0,428K_T^2) \quad (7)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (8)$$

$$\dot{q}_s = \dot{q}_h \left(1 - \frac{\dot{q}_{h,d}}{\dot{q}_h} \right) R_b + \dot{q}_{h,d} \left(1 + \frac{\cos \beta}{2} \right) + \dot{q}_h \rho \left(1 - \frac{\cos \beta}{2} \right) \quad (9)$$

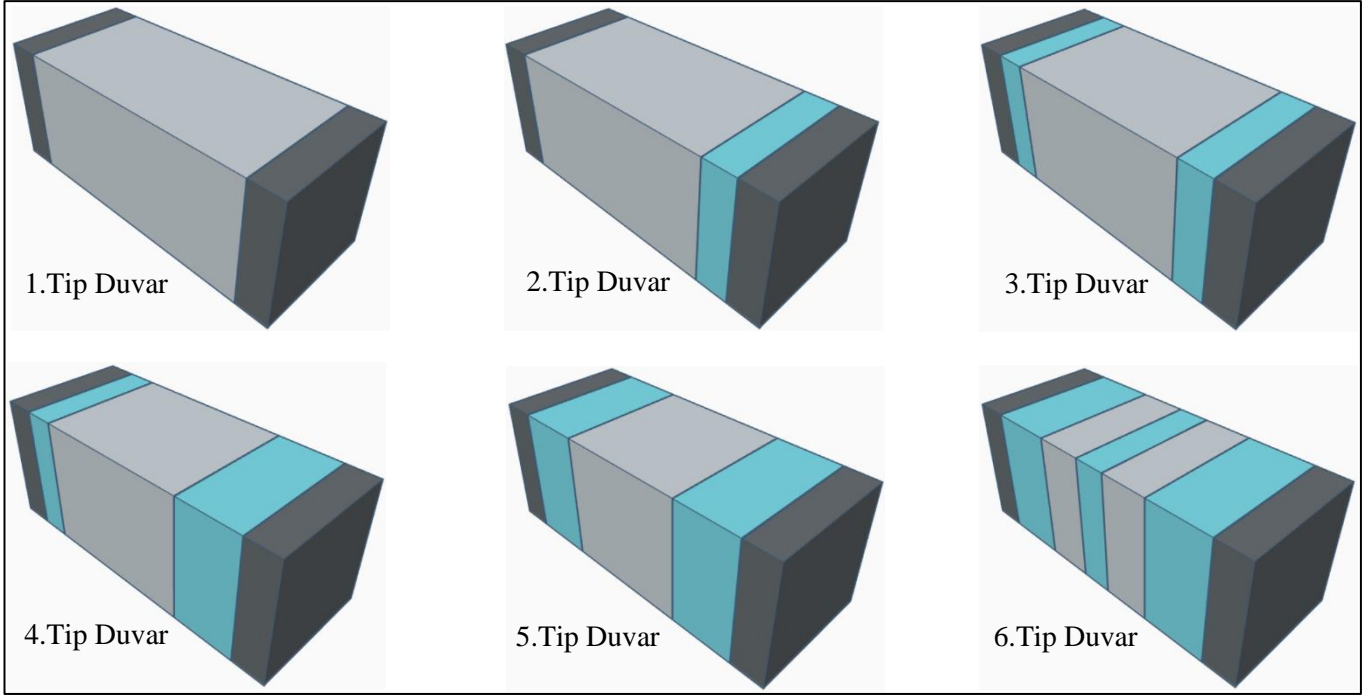
Bu eşitliklerde θ güneş ışınımının geliş açısını, ρ yerin yansıtma oranını, $\dot{q}_{h,d}$ yatay yüzey için ortalama günlük yayılı ışınımı temsil etmektedir. Sonuç olarak yüzeye ulaşan güneş ışınımı (\dot{q}_s) ve dolayısıyla $T_{güneş}$, yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir.

Yıllık Enerji İhtiyacı Hesaplamaları

Güneş radyasyonu dikkate alınarak CDD değeri hesaplandıktan sonra binanın yıllık soğutma enerji ihtiyacının belirlenebilmesi için dış duvarlardan olan ısı kazancı hesaplanmalıdır. Bu çalışmada binanın klima ile soğutulduğu, dolayısıyla elektrik enerjisi harcadığı varsayılmıştır. İlk senaryoda sıfırdan yapılan bir bina olduğu ve toplam 20 cm'lik bir duvar olacağı varsayılmıştır. Buna bağlı olarak oluşturulan 6 farklı duvar yapısı Şekil 1'de, duvarı oluşturan bileşenlerin kalınlıkları ise Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 1'de koyu gri olan bileşenler iç ve dış sıvayı, açık gri olan bileşen hafif beton bloğu, turkuaz rengindeki bileşen ise yalıtım malzemesini temsil etmektedir. Analizlerde yalıtım malzemesi olarak Ekstrüde Polistiren (XPS) kullanılmıştır.

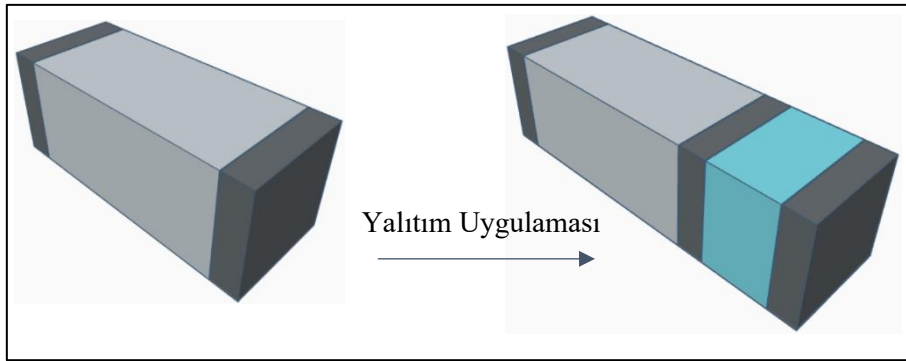
Tablo 1. Duvarı Oluşturan Bileşenlerin Kalınlıkları

Duvar Yapıları	İç Sıva (cm)	Beton (cm)	Yalıtım (cm)	Dış Sıva (cm)
1. Tip Duvar	2	16	-	2
2. Tip Duvar	2	14	2	2
3. Tip Duvar	2	12	4	2
4. Tip Duvar	2	10	6	2
5. Tip Duvar	2	8	8	2
6. Tip Duvar	2	6	10	2



Şekil 1. Analizlerde Kullanılan Farklı Duvar Yapıları

İkinci senaryoda hali hazırda inşa edilmiş duvarları yalıtımsız bir bina olduğu ve sonradan duvarlarına farklı kalınlıklarda yalıtım yapıldığı varsayılmıştır. Şekil 2’de bu senaryo uygulandığında, duvar yapılarının önceki ve sonraki halleri gösterilmiştir.



Şekil 2. Yalıtımsız Bir Binaya Yapılan Yalıtım Uygulaması

Bu çalışmada iç (h_i) ve dış (h_o) ısı transfer katsayıları sırasıyla $8,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $28,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak kabul edilmiştir (Kaynaklı vd., 2016; Özel, 2012). Yıllık soğutma enerji ihtiyacı ($E_{A,C}$) birim alandaki yıllık ısı kazancının soğutma sisteminin performans katsayısına (COP) bölünmesiyle hesaplanır. Literatürdeki çalışmalar referans alınarak COP değeri 2,5 alınmıştır (Bolattürk vd., 2013; Canbolat, 2023; Kon vd., 2022).

$$E_{A,C} = \frac{86400 \text{ CDD}}{(R_i + R_o + R_w + R_{ins})COP} \quad (10)$$

Bu eşitlikteki R_i , iç ortamın ısı taşınım direncini temsil ederken, R_o , ise dış ortamın ısı taşınım direncini ifade eder ve sırasıyla $1/h_i$ ve $1/h_o$ eşitlikleri ile hesaplanır. Ayrıca R_w yalıtımsız duvarın toplam ısı direncini, R_{ins} ise yalıtım malzemesinden kaynaklı ısı direnci ifade etmektedir. $R_i+R_o+R_w$ ifadelerinin toplamı $R_{t,w}$ yani yalıtılmamış duvarın toplam ısı direnci olarak da ifade edilebilir.

CO₂ Emisyonu Hesaplamaları

Bina dış duvarlarına yalıtım uygulaması yapıldığında, soğutma sezonundaki yıllık ihtiyaç duyulan soğutma enerjisi azalacak dolayısıyla atmosfere salınan CO₂ miktarı da azalacaktır. Bu süreçte ortaya çıkan CO₂, operasyonel

emisyonlar sınıfına girmektedir. Bunun yanında duvarı oluşturan tüm malzemelerin üretim, nakliye ve montaj süreçlerinde ortaya çıkan CO₂'nin de hesaba katılması gerekmektedir. Bu gibi süreçlerde atmosfere yayılan CO₂ ise gömülü emisyonlar sınıfına girmektedir. Bu çalışmada yalıtım uygulamasının çevresel etkileri incelenirken hem operasyonel hem de gömülü emisyonlar dikkate alınmıştır.

Bu bağlamda operasyonel emisyon sınıfındaki klima ile binayı soğutma esnasında 1 yılda atmosfere yayılan CO₂ miktarı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$M_{CO_2,enerji} = \frac{0,024 CDD f_c}{\left(R_{t,w} + \frac{x}{k}\right) COP} \quad (11)$$

Bu eşitlikteki f_c elektriğin CO₂ emisyon faktörünü temsil etmektedir ve literatürdeki çalışmalara göre bu değer 0,588 kgCO₂/kWh olarak alınarak hesaplamalar yapılmıştır (Axaopoulos vd., 2019; Canbolat, 2023).

Gömülü emisyon sınıfındaki duvar bileşenleri kaynaklı, 1 yılda atmosfere yayılan CO₂ miktarı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$M_{CO_2,duvar} = \frac{\rho_{siva} x_{siva} f_{siva}}{N} + \frac{\rho_{beton} x_{beton} f_{beton}}{N} + \frac{\rho_{xps} x_{xps} f_{xps}}{N} \quad (12)$$

Bu eşitlikteki f_{siva} , f_{beton} ve f_{xps} sırasıyla sıvanın, hafif beton bloğun ve XPS'in CO₂ emisyon faktörünü temsil etmektedir ve Tablo 2'de verilmiştir (Anastaselos vd., 2009; Canbolat, 2023). N malzemenin ömrü (10 yıl), ρ yoğunluk (kg/m³), k ısı iletim katsayısı (W/mK), x ise kalınlıktır (m).

Tablo 2. Duvarı Oluşturan Bileşenlerin Termofiziksel Özellikleri ve Emisyon Faktörleri

Duvar Bileşenleri	Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	Isı iletim katsayısı, k (W/mK)	Emisyon faktörü, f (kgCO ₂ /kg)
Sıva	1800	0,87	0,36
Ekstrüde Polistiren (XPS)	30	0,037	3,83
Hafif Beton Blok	1700	1,37	0,09

Aşağıdaki eşitlik yardımıyla da hem enerji kaynaklı ve hem de duvar bileşenleri kaynaklı atmosfere salınan toplam CO₂ miktarı hesaplanabilir.

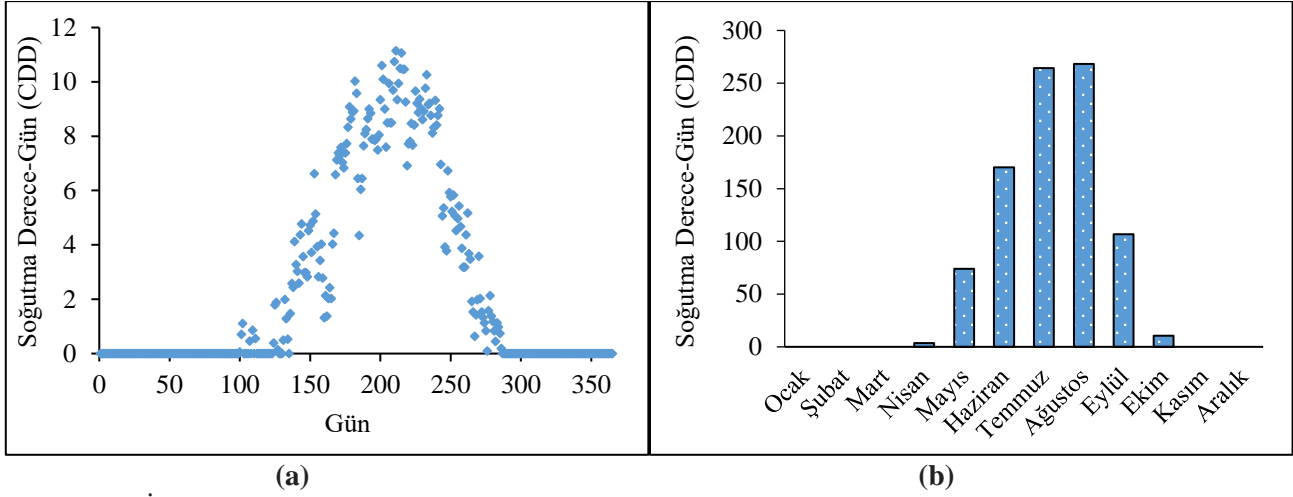
$$M_{CO_2,toplam} = \frac{0,024 CDD f_c}{\left(R_{t,w} + \frac{x}{k}\right) COP} + \frac{\rho_{siva} x_{siva} f_{siva}}{N} + \frac{\rho_{beton} x_{beton} f_{beton}}{N} + \frac{\rho_{xps} x_{xps} f_{xps}}{N} \quad (13)$$

BULGULAR VE TARTIŞMA

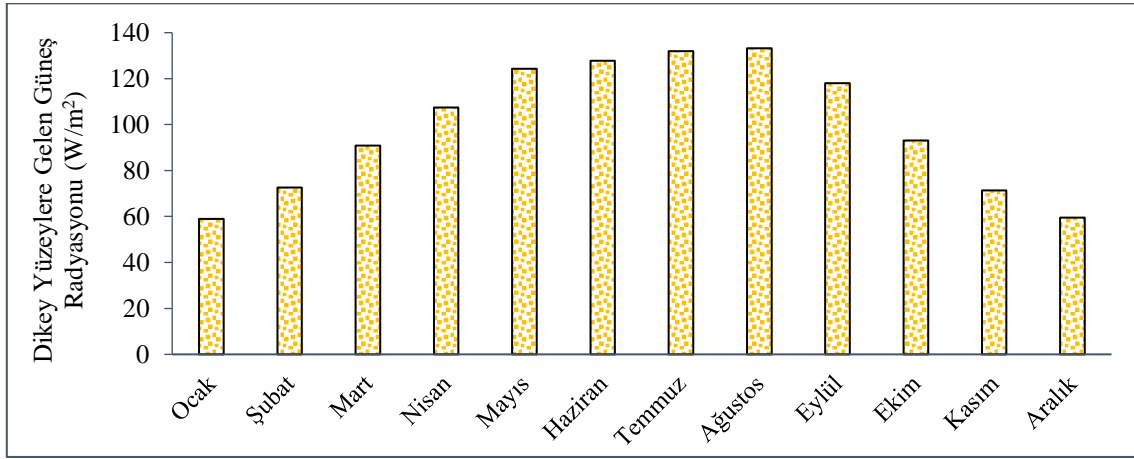
Bu çalışma Türkiye'de görece olarak sıcak iklim bölgesinde (1.Derece Gün Bölgesi) yer alan İzmir ili için yapılmıştır. İzmir'de soğutma enerji ihtiyacı, ısıtma enerji ihtiyacından daha fazla olduğu için analizler soğutma sezonu için yapılmıştır (Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, 2013).

Yıl içindeki günlük CDD değerleri ve buna bağlı olarak aylık toplam CDD değerleri hesaplanmış ve Şekil 3'de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde Ağustos ve Temmuz aylarının sırasıyla 268 ve 264 CDD değeriyle en fazla soğutma enerji ihtiyacı olan aylar olduğu görülmektedir. Kasım, Aralık, Ocak, Şubat ve Mart aylarında ise CDD değerleri 0 olarak hesaplanmıştır bu da ilgili aylarda soğutma enerji ihtiyacının olmadığı anlamına gelmektedir.

Şekil 4'de dikey yüzeylere gelen güneş radyasyonu miktarının aylara göre değişimi verilmiştir. Haziran, Temmuz, Ağustos aylarının sırasıyla 127,8 W/m², 131,9 W/m² ve 133,1 W/m² değerleriyle en fazla güneş radyasyonuna maruz kalınan aylar olduğu sonucuna varılmıştır. Kasım, Aralık, Ocak aylarının ise tersine 71,4 W/m², 59,5 W/m² ve 58,9 W/m² değerleriyle en az güneş radyasyonuna maruz kalınan aylar olduğu görülmektedir.

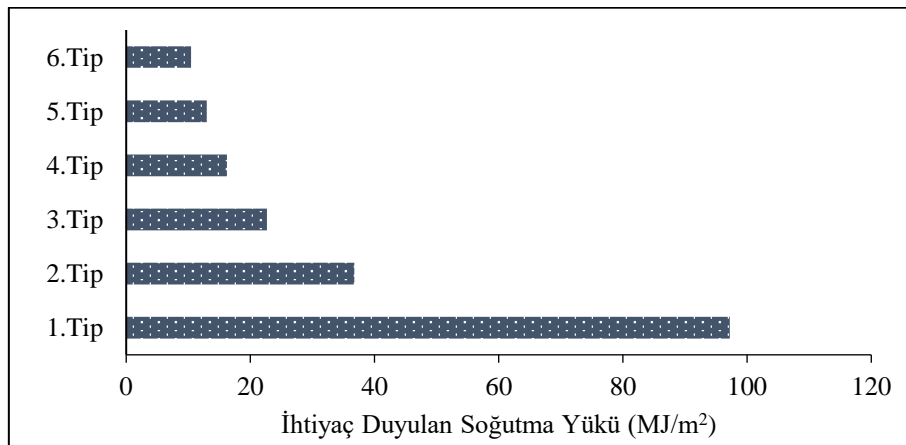


Şekil 3. Yıl içindeki Günlük Soğutma Derece-Gün (CDD) Sayıları (a) ve Aylık Toplam Soğutma Derece-Gün (CDD) Sayıları (b)



Şekil 4. Aylık Dikey Yüzeyle Gelen Güneş Radyasyonu Miktarı

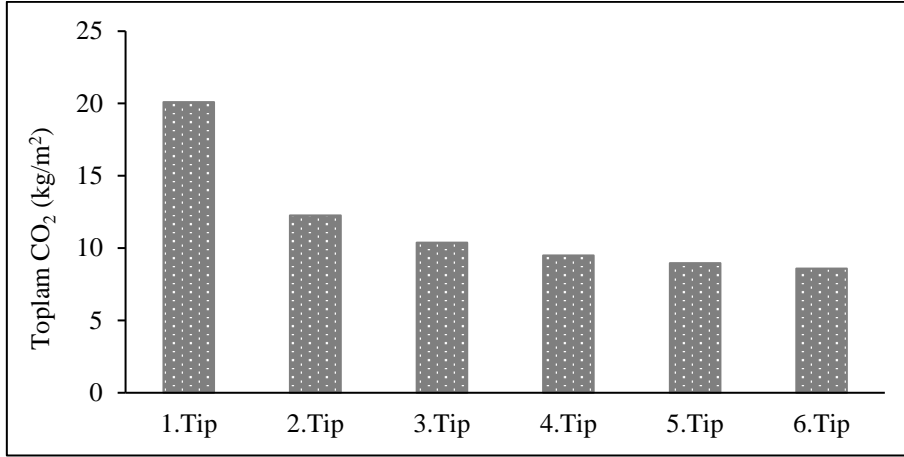
İlk senaryoda toplam duvar kalınlığı 20 cm olmak şartıyla yalıtım malzemesinin kalınlığı arttırılmıştır. 1. Tip duvar yapısında hiç yalıtım yokken, 6. Tip duvar yapısı en fazla yalıtım kalınlığına sahip duvardır. Şekil 5’de görüldüğü üzere yalıtım kalınlığı arttıkça yıllık ihtiyaç duyulan soğutma enerji ihtiyacı azalmaktadır. Sadece tüketilen enerjinin minimize edilmesi amaçlandığında en ideal duvar yapısının 6. Tip olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Farklı Duvar Tipleri için Yıllık İhtiyaç Duyulan Soğutma Yüğü

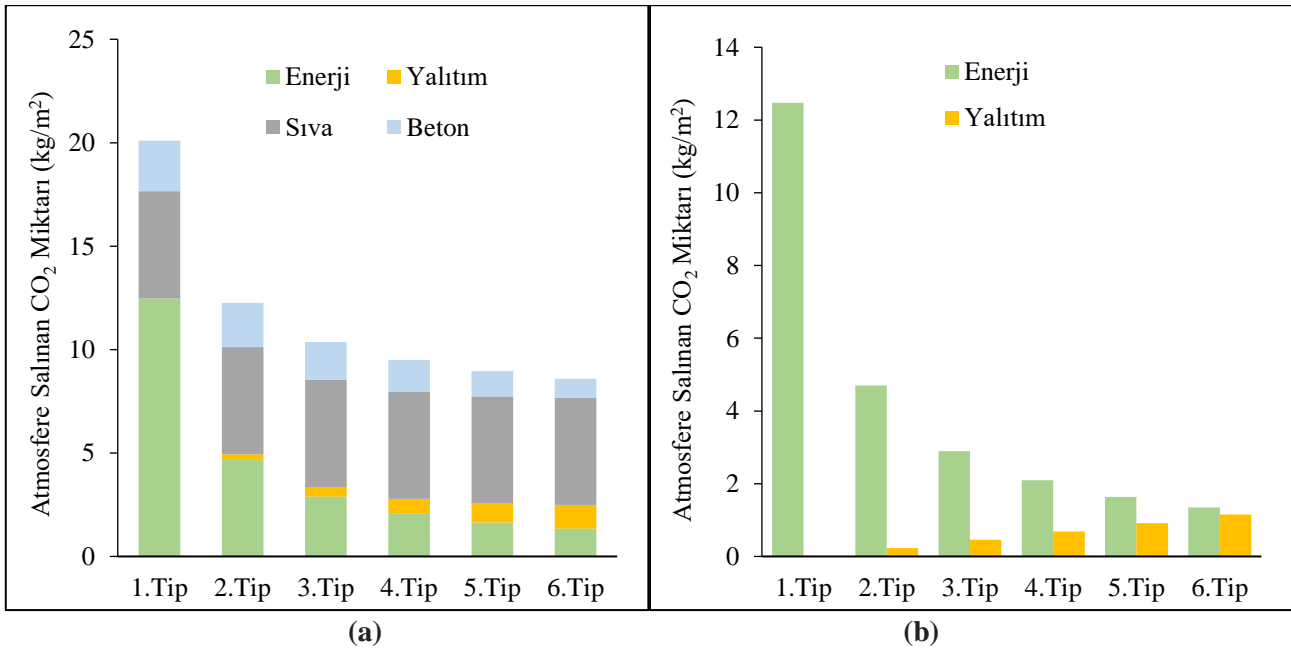
Eşitlik 13 yardımıyla 1 yılda atmosfere yayılan toplam CO₂ miktarı hesaplanmış ve Şekil 6 elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere yalıtım kalınlığı arttıkça CO₂ emisyonu azalmaktadır. Fakat yalıtım kalınlığı 0 cm’den 2 cm’ye çıkarıldığında (1. Tip den 2. Tipe geçildiğinde) CO₂ emisyonundaki azalma %39 mertebelerindeyken, 8 cm’den 10

cm'ye çıkarıldığında (5. Tip den 6. Tipe geçildiğinde) CO₂ emisyonundaki azalmanın %4 seviyelerine düştüğü görülmektedir. Bu durum yalıtım kalınlığını arttırmanın CO₂ emisyonunu azaltacağını fakat belli bir yalıtım kalınlığını geçtikten sonra toplam emisyonun azalmayacağını hatta artabileceğini göstermektedir. Bu konu ile ilgili analizler çalışmanın ileriki kısımlarında yapılmıştır.



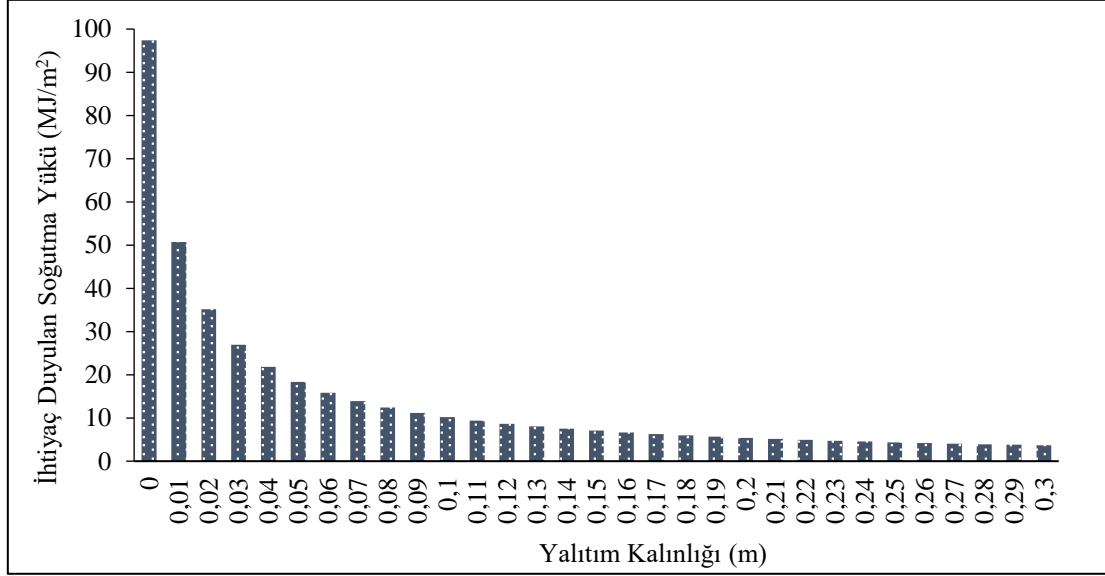
Şekil 6. Farklı Duvar Tipleri için Atmosfere Yayılan Toplam CO₂ Miktarı

Farklı duvar tipleri için atmosfere yayılan CO₂ emisyon miktarlarının hangi kaynaklardan olduğu Şekil 7.a'da gösterilmiştir. Yalıtım kalınlığı arttıkça yani 1. Tipten 6. Tipe doğru gidildikçe enerji tüketimi azaldığından enerji kaynaklı CO₂ salınımının da azaldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak yalıtım kalınlığı arttığı için yalıtım malzemesi kaynaklı CO₂ salınımı artmaktadır. Duvarın toplam kalınlığı sabit olduğundan yalıtım kalınlığı arttıkça hafif beton blok kalınlığı azalmış, dolayısıyla beton kaynaklı CO₂ salınım da azalmıştır. Şekil 7.b'de sadece enerji kaynaklı ve yalıtım kaynaklı emisyon miktarları karşılaştırılmıştır. Yalıtım kalınlığı arttıkça enerji kaynaklı CO₂ salınımının büyük oranda azaldığı görülmektedir. 1. Tip duvar ile 6. Tip duvar arasındaki enerji kaynaklı emisyonlar kıyaslandığında %89 oranında bir azalma hesaplanmıştır. Yalıtım kalınlığı arttıkça enerji kaynaklı emisyon miktarı ile yalıtım kaynaklı emisyon miktarı arasındaki fark azalmaktadır. 6. Tip duvar yapısı 10 cm yalıtım kalınlığına sahiptir ve bu duvar yapısında enerji kaynaklı atmosfere salınan CO₂ miktarı 1,35 kg/m², yalıtım kaynaklı CO₂ miktarı ise 1,15 kg/m²'dir. Bu durum yalıtım kalınlığı daha fazla arttırıldığında yalıtım kaynaklı emisyon miktarının enerji kaynaklı emisyon miktarını geçebileceğini göstermiştir. Bir sonraki analizlerde bu durum incelenmiştir.



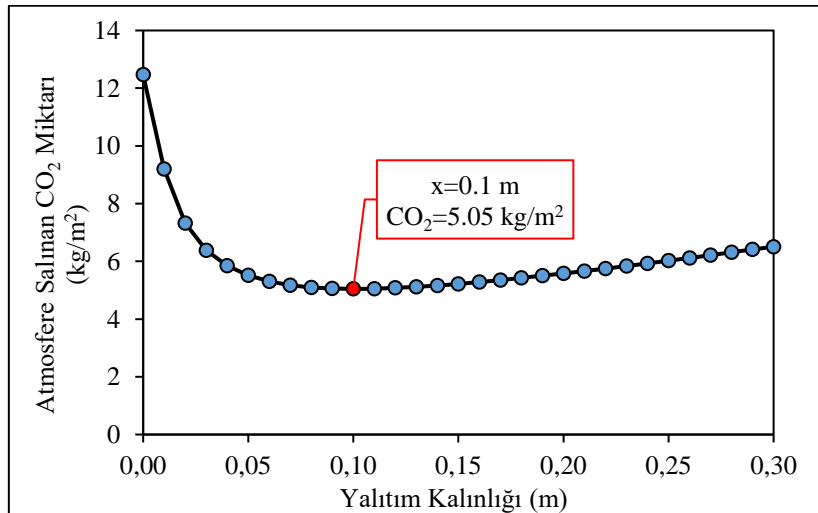
Şekil 7. Farklı Duvar Tipleri için Atmosfere Salınan CO₂'in Kaynakları (a) ve Enerji-Yalıtım Kaynaklı CO₂ Salınımının Karşılaştırılması (b)

İkinci senaryoda hali hazırda inşa edilmiş bir bina olduğu ve duvarlarının yalıtımsız olduğu varsayılmıştır. Bu duvarlara sonradan farklı kalınlıklarda yalıtım uygulaması yapılmıştır ve buna bağlı olarak yıllık ihtiyaç duyulan soğutma yükünün yalıtım kalınlığına bağlı olarak değişimi Şekil 8’de sunulmuştur. Şekilden anlaşılacağı üzere yalıtım kalınlığı arttıkça soğutma için ihtiyaç duyulan enerji miktarı azalmaktadır. Fakat yalıtımsız durumdaki bir duvara 1 cm yalıtım yapıldığında ihtiyaç duyulan soğutma yükü %48 oranında azalırken, örneğin 10 cm yalıtımlı olan bir duvara ekstra 1 cm daha yalıtım yapıldığında ihtiyaç duyulan soğutma yükü sadece %7 oranında azalmaktadır. Bu durumdan yola çıkarak hiç yalıtım yapılmamış bir binaya yalıtım yapmanın enerji tasarrufu açısından çok daha avantajlı olduğu sonucuna varılabilir.



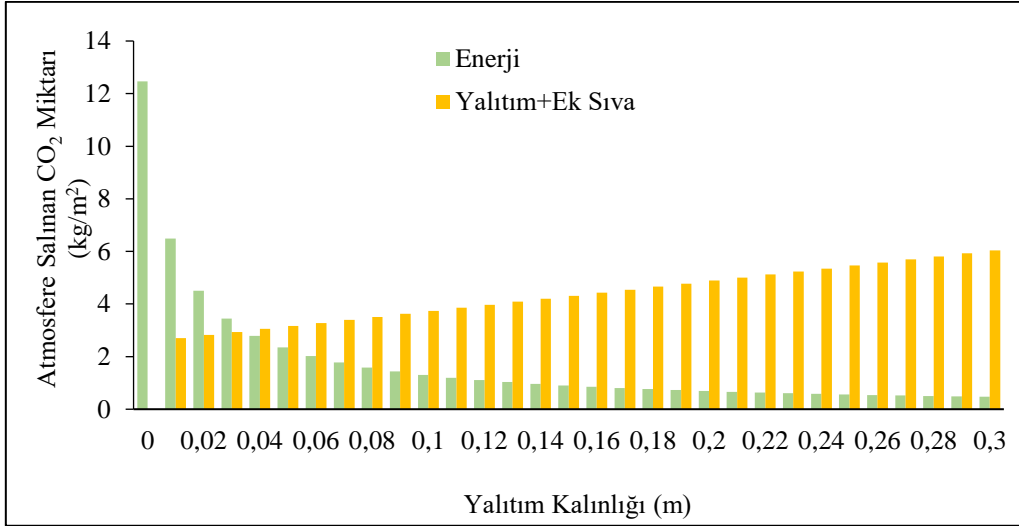
Şekil 8. Yıllık İhtiyaç Duyulan Soğutma Yükünün Yalıtım Kalınlığına Bağlı Değişimi

İkinci senaryoda hali hazırda var olan bir bina olduğu için sadece sonradan eklenen yalıtım malzemesi kaynaklı ve ek olarak eklenen dış sıva kaynaklı CO₂ emisyonu hesaba katılmıştır (bkz. Şekil 2). Atmosfere salınan toplam emisyon miktarı enerji, yalıtım ve ek sıva kaynaklı CO₂ miktarları toplanarak elde edilmiş ve Şekil 9’da sunulmuştur. Grafikten anlaşılacağı üzere belirli bir yalıtım kalınlığına kadar CO₂ miktarı azalmakta fakat bu kritik yalıtım kalınlığını geçtikten sonra yalıtım kalınlığı arttırmaya devam edilirse CO₂ miktarı tekrar artmaya başlamaktadır. Çevresel açıdan değerlendirildiğinde bu kritik yalıtım kalınlığında yalıtım yapılması atmosfere minimum düzeyde emisyon salınmasını sağlayacaktır. İzmir için soğutma sezonunda çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı 10 cm olarak tespit edilmiş ve bu yalıtım kalınlığında atmosfere salınan CO₂ miktarı 5,05 kg/m² olarak hesaplanmıştır (Şekil 9). Bu kalınlıktan daha fazla kalınlıkta yalıtım yapmak soğutma için ihtiyaç duyulan enerjiyi azaltacak fakat atmosfere salınan emisyonu arttıracaktır.



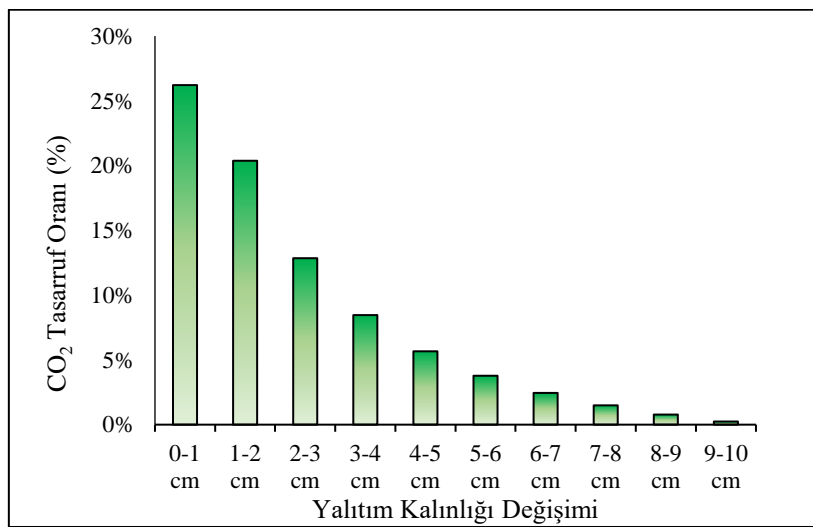
Şekil 9. Yalıtım Kalınlığına Bağlı Olarak Enerji, Yalıtım ve Ek Sıva Kaynaklı Atmosfere Salınan Toplam CO₂ Miktarı

Şekil 10'da enerji kaynaklı emisyonlar ile sonradan eklenen malzemelerden (yalıtım ve ek sıva) kaynaklı emisyon miktarları karşılaştırılmıştır. Yalıtımsız duvara 1 cm yalıtım yapıldığında enerji kaynaklı emisyon miktarında %48'lik bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu düşüş oranı yalıtım kalınlığı arttıkça azalmaktadır. Örneğin 7 cm kalınlığında yalıtım olan duvara ekstra 1 cm daha yalıtım yapıldığında enerji kaynaklı emisyon miktarındaki düşüş bu defa %11 mertebelerinde gerçekleşmektedir. Diğer taraftan yalıtım ve sıva kaynaklı emisyon miktarları lineer olarak artmaktadır. 3 cm yalıtım kalınlığında enerji kaynaklı atmosfere salınan CO₂ miktarı 3,45 kg/m², yalıtım ve sıva kaynaklı CO₂ miktarı ise 2,93 kg/m²'dir. 4 cm yalıtım kalınlığında ise yalıtım ve sıva kaynaklı atmosfere salınan CO₂ miktarı 3,05 kg/m²'ye çıkmış ve enerji kaynaklı CO₂ miktarını (2,79 kg/m²) geçmiştir.



Şekil 10. Farklı Yalıtım Kalınlıkları için Enerji ve Yalıtım-Ek Sıva Kaynaklı CO₂ Salınımının Değişimi

Son olarak yukarıdaki analizlerde göze çarpan farklı kalınlıklarda gözlemlenen farklı emisyon düşüş oranlarını incelemek üzere bir çalışma yapılmıştır. Bu bağlamda farklı kalınlıklarda yalıtıma sahip duvarlara yapılan 1 cm'lik ilave yalıtımın CO₂ miktarındaki düşüşe etkileri incelenmiş ve Şekil 11'de grafiksel olarak sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere hiç yalıtıma sahip olmayan bir duvara 1 cm'lik yalıtım yapıldığında atmosfere salınan CO₂ miktarı %26 oranında azalmıştır. Hali hazırda 1 cm yalıtıma sahip olan duvara ilave 1 cm'lik yalıtım daha eklendiğinde ise CO₂ tasarruf oranı %20'ye düşmüştür. Çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı 10 cm olarak tespit edildiğinden (bkz. Şekil 9) analizler en son 9 cm yalıtıma sahip olan duvara ilave 1 cm yalıtım yapılması durumu için yapılmıştır. Bu senaryoda ise CO₂ tasarruf oranı sadece %0,2 olarak hesaplanmıştır. Burada görülüyor ki yalıtımsız bir duvara 1 cm yalıtım uygulaması yapılması CO₂ tasarruf oranını büyük ölçüde artırırken, hali hazırda belirli bir yalıtıma sahip duvara sonradan eklenecek 1 cm'lik yalıtım tabakası çevresel açıdan aynı iyileştirmeye sebep olamayacaktır.



Şekil 11. Farklı Kalınlıklarda Yalıtıma Sahip Duvarlara Yapılan 1 cm'lik İlave Yalıtımın CO₂ Miktarındaki Düşüş Etkileri

SONUÇ

Bu çalışmada soğutma kaynaklı enerji ihtiyacından dolayı ortaya çıkan CO₂ miktarı ve duvar bileşenlerinin (sıva, yalıtım malzemesi, beton) üretim sürecinden dolayı atmosfere salınan CO₂ miktarı hesaplanmıştır. Çalışma, iki farklı senaryo için çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığının bulunması üzerine yapılmış birtakım analizler içermektedir. İlk senaryoda 6 farklı duvar yapısı oluşturulmuş ve her bir duvar yapısının soğutma sezonunda atmosfere salacağı emisyon miktarları hesap edilmiştir. Ayrıca farklı duvar tipleri için atmosfere yayılan CO₂ emisyon miktarlarının hangi kaynaklardan olduğu grafiksel olarak gösterilmiştir. İkinci senaryoda ise hali hazırda inşa edilmiş bir bina olduğu ve duvarlarının yalıtımsız olduğu varsayılmıştır. Bu duvarlara sonradan farklı kalınlıklarda yalıtım uygulaması yapılmış ve yine soğutma sezonunda atmosfere salınan toplam emisyon miktarları, çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı ve CO₂ tasarruf oranları hesap edilmiştir.

Sadece tüketilen enerjinin minimize edilmesi amaçlandığında en ideal duvar yapısının yalıtım kalınlığı en yüksek olan duvar olduğu görülmüştür. Fakat kalınlık arttıkça yalıtım kalınlığının etkisinin azaldığı görülmüştür. Detaylı incelendiğinde yalıtımsız durumdaki bir duvara 1 cm yalıtım yapıldığında ihtiyaç duyulan soğutma yükü %48 oranında azalırken, 10 cm yalıtımlı olan bir duvara ilave 1 cm daha yalıtım yapıldığında ihtiyaç duyulan soğutma yükü %7 oranında azalmaktadır. Buradan hiç yalıtım yapılmamış bir binaya yalıtım yapmanın enerji tasarrufu açısından çok daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Asıl amaç atmosfere yayılan emisyon miktarını azaltmak olduğunda, yalıtım kalınlığını artırmanın enerji kaynaklı CO₂ salınımını azalttığı fakat duvarı oluşturan bileşenlerden kaynaklı gömülü emisyonları arttırdığı görülmüştür. Bu nedenle 10 cm'lik yalıtım kalınlığının çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı olduğu tespit edilmiştir.

Atmofere salınan CO₂ miktarındaki tasarruf oranları detaylı şekilde incelendiğine, hiç yalıtıma sahip olmayan bir duvara 1 cm'lik yalıtım yapıldığında atmosfere salınan CO₂ miktarının %26 oranında azaldığı, 9 cm yalıtıma sahip olan duvara ilave 1 cm yalıtım yapıldığında ise CO₂ miktarının sadece %0,2 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Buradan şöyle bir sonuca varılabilir: yalıtımsız bir duvara yapılacak olan belirli kalınlıktaki yalıtım uygulaması CO₂ tasarruf oranını büyük ölçüde artırırken, hali hazırda belirli bir yalıtıma sahip duvara sonradan eklenecek aynı kalınlıktaki yalıtım tabakası çevresel açıdan aynı iyileştirmeye sebep olamayacaktır.

Sonuç olarak bu çalışma, bireylerin kendi yaşadıkları veya çalıştıkları konutları çevresel açıdan değerlendirebilmesine, buldukları il için ideal yalıtım kalınlığını, emisyon tasarruf oranlarını hesap edebilmesine ve bireysel olarak sınırdaki karbon düzenleme mekanizmasını tamamlayıcı katkılarda bulunabilmesine olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Akan, A. P., & Akan, A. E. (2022). Modeling of CO₂ emissions via optimum insulation thickness of residential buildings. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(3), 949–967. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02233-6>
- Anastaselos, D., Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2009). An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions. *Energy and Buildings*, 41(11), 1165–1171. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.003>
- Arslan, Ş., & Aydın, F. (2023). Experimental Investigation of the Effects of Insulation Materials and Concrete Strength on Temperature Transitions in FRP Reinforced Structural Elements Under High Temperature. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 11(1), 222–235. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1167810>
- Axaopoulos, I., Axaopoulos, P., Gelegenis, J., & Fylladitakis, E. D. (2019). Optimum external wall insulation thickness considering the annual CO₂ emissions. *Journal of Building Physics*, 42(4), 527–544. <https://doi.org/10.1177/1744259118774711>
- Bademlioğlu, A. H., Canbolat, A. S., & Kaynaklı, Ö. (2018). Bina Dış Duvarlarında Yoğuşma Dikkate Alınarak Gerekli Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi: Bitlis İli İçin Örnek Çalışma. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(3), 333–340. <https://doi.org/10.17482/uumfd.487773>
- Bolattürk, A., & Dağdır, C. (2013). Güneş Radyasyonu Dikkate Alınarak Sıcak İklim Bölgelerindeki Binalarda Optimum Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi. *Journal of Thermal Science and Technology*, 33(1), 87–99.

Canbolat, A., Bademlioglu, A., Saka, K., & Kaynakli, O. (2019). Investigation of parameters affecting the optimum thermal insulation thickness for buildings in hot and cold climates. *Thermal Science*, 00, 68–68. <https://doi.org/10.2298/TSCI181105068C>

Canbolat, A. S. (2023). An integrated assessment of the financial and environmental impacts of exterior building insulation application. *Journal of Cleaner Production*, 435(September 2023), 140376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140376>

Cengel, Y. (2002). *Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd Edition*. McGraw-Hill, New York.

Dombayci, O. A., Ulu, E. Y., Guven, S., Atalay, O., & Ozturk, H. K. (2020). Determination Of Optimum Insulation Thickness For Building External Walls With Different Insulation Materials Using Environmental Impact Assessment. *Thermal Science*, 24(1 Part A), 303–311. <https://doi.org/10.2298/TSCI180903010D>

European Union. (2023). REGULATION (EU) 2023/956 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. *Official Journal of the European Union*, 2023(April), 52–104.

Huang, H., Zhou, Y., Huang, R., Wu, H., Sun, Y., Huang, G., & Xu, T. (2020). Optimum insulation thicknesses and energy conservation of building thermal insulation materials in Chinese zone of humid subtropical climate. *Sustainable Cities and Society*, 52(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101840>

İmer Ertunga, E., & Seyhun, Ö. K. (2022). Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması ve Türkiye'nin İhracatına Olası Etkileri. *Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.18354/esam.1119230>

Kaynakli, Ö., & Kaynakli, F. (2016). Determination Of Optimum Thermal Insulation Thicknesses For External Walls Considering The Heating, Cooling And Annual Energy Requirements. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(1), 229. <https://doi.org/10.17482/uujfe.27323>

Kon, O., & Caner, İ. (2022). The Effect of External Wall Insulation on Mold and Moisture on the Buildings. *Buildings*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/buildings12050521>

Ozel, M. (2012). Cost analysis for optimum thicknesses and environmental impacts of different insulation materials. *Energy and Buildings*, 49, 552–559. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.002>

Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. (2013). *TS 825*. Türk Standartları Enstitüsü.

Türkiye Cumhuriyeti Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). *Potential Impact of the Carbon Border Adjustment Mechanism on the Turkish Economy*. [https://iklim.gov.tr/db/turkce/haberler/files/20230523 Impacts of CBAM on Turkey phase 2 report FV3 \(2\)-sayfalar-1,3,5-16 \(1\) \(1\).pdf](https://iklim.gov.tr/db/turkce/haberler/files/20230523%20Impacts%20of%20CBAM%20on%20Turkey%20phase%202%20report%20FV3%20(2)-sayfalar-1,3,5-16%20(1)%20(1).pdf)

Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı. (2022). *Paris Anlaşması*. <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa#:~:text=Anlaşma onay belgesi%2C ulusal beyanımızla,sıfır emisyon hedefi ilan edilmiştir.>

Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı. (2023). *Avrupa Birliği Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması Bilgi Notu*. <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/ab-sinirda-karbon-duzenleme-mekanizmasi/ab-skdm-bilgi-notu>

Yiğit, A., & Atmaca, İ. (2010). *Solar Energy (in Turkish)*. Alfa Aktüel.

Yüce, B. E., & Acar, M. C. (2021). Bitlis İlinde Farklı Yakıtlar Ve Duvar Bileşenleri İçin Optimum Yalıtım Kalınlığı Ve Enerji Tasarrufunun Analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(4), 1426–1434. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.959930>