



T.C

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜNEŞ IŞINIMININ OPTİMUM YALITIM KALINLIĞI
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Abdelwahab Hamza Abdellateef Mohammed

0000-0002-1621-6346

Prof. Dr. Ömer KAYNAKLI

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2022

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜNEŞ IŞINIMININ OPTİMUM YALITIM KALINLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Abdelwahab Hamza Abdellateef Mohammed

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer KAYNAKLI

Enerji tasarrufu, elektrik tüketiminin bir sonucu olarak oluşan çevre kirliliği nedeniyle günümüzde en önemli konulardan biridir. Bu bağlamda araştırmacılar, özellikle soğuk ve sıcak bölgelerde fazla enerji tüketen konut ve ticari sektörlerde enerji tasarrufu üzerine çalışıyorlar. Bu çalışma, enlem, yükseklik ve çevre koşullarının soğutma ve ısıtma amaçlı enerji gereksinimleri üzerindeki etkisini açıkça göstermiştir. Bu nedenle güneş radyasyonunun etkisi, bina tasarımında ve enerji tasarrufu sağlayan optimum yalıtım kalınlığında çok etkili bir faktör olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, iki farklı iklim koşullarına sahip olan İstanbul ve Hartum şehirleri için derece-gün yöntemi ve yalıtım malzemesi ekstrüde polistren ile yapılmıştır. Güneş radyasyonu etkisi dikkate alınmadığında; İstanbul'da yıllık optimum yalıtım kalınlığı, m² başına enerji tasarrufu ve geri ödeme süresi sırasıyla 0,054 m, 30,3 USD ve 15 yıl olarak bulunmuştur. Hartum'da ise sırasıyla 0,107 m, 143 USD ve 4 yıl bulunmuştur. Ancak güneş radyasyonu etkisi dikkate alındığında; İstanbul'da bu parametreler duvarın yönüne bağlı olarak sırasıyla 0,051 – 0,056 m, 27,6 – 33,7 USD, 13,6 - 16,4 yıl arasında değişmiştir. Hartum'da ise duvarın yönüne göre sırasıyla 0,112 – 0,125 m, 157 -196 USD ve 5,4 – 6,3 yıl arasında bulunmuştur.

Anahtar Kelimeleri: Enerji tasarrufu, ısıtma - soğutma enerjisi gereksinimleri, optimum ısı yalıtım kalınlığı, güneş ışıınımı.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SOLAR RADIATION ON OPTIMUM INSULATION THICKNESS

Abdelwahab Hamza Abdellateef Mohammed

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Omer KAYNAKLI

Energy conservation is one of the most important issues nowadays due to the appalling deterioration of the environment as a result of power generation. In this context, researchers are working to save energy in the residential and commercial sectors which consume most energy especially in cold and hot regions. This study, clearly showed the influence of latitude, altitude and surrounding environment conditions on energy requirements for cooling and heating purposes. Therefore the effect of solar radiation has emerged as a very influential factor in buildings design and optimum insulation thickness which achieves energy saving. The study was carried out for Istanbul and Khartoum, which have two different climatic conditions with degree-day method and insulation material polyurethane. In Istanbul without solar radiation effect; annual optimum insulation thickness, energy savings per m² and payback period were found 0,054 m, 30,3 USD ve 15 years respectively. While in Khartoum 0,107 m, 143 USD ve 4 years respectively too. However with solar radiation effect; In Istanbul this parameters vary between 0,051 – 0,056 m, 27,6 – 33,7 USD, 13,6 - 16,4 years respectively depending to wall direction. While in Khartoum between 0,112 – 0,125 m, 157 - 196 USD, 5,4 – 6,3 years respectively depending to wall direction too.

Key words: Energy savings, heating - cooling energy requirements, optimum thermal insulation thickness, solar radiation.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ders ve tez çalışmam boyunca sahip olduğu bilgiyi, tecrübeyi ve desteğini benden esirgemeyen tez danışman hocam sayın Prof. Dr. Ömer KAYNAKLI'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşantım ve başarılarım boyunca beni her zaman destekleyen ve yanımda olan eşime, çocuklarıma ve tüm aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Değerli okul arkadaşlarıma tez çalışmamdaki yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Yukarıdakilerden önce bu araştırmayı bitirmeme yardım eden Allah'a Bütün teşekkürlerimi sunarım.

Abdelwahab Hamza Abdellateef Mohammed

25.08.2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1.GİRİŞ.....	1
2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Atmosferik ve Güneş Radyasyonu.....	3
2.2. Güneş Açıları.....	4
2.2.1. Deklinasyon (declination) açısı (δ).....	4
2.2.2. Enlem (latitude) açısı (ϕ).....	4
2.2.3. Eğim (slope) açısı (β).....	5
2.2.4. Azimut (azimuth) açısı (γ).....	5
2.2.5. Güneş yükseklik (altitude) açısı (α).....	5
2.2.6. Saat (hour angle) açısı (ω).....	5
2.2.7. Güneş geliş açısı (angle of incidence) (θ).....	5
2.2.8. Zenit açısı (zenith angle) (θ_z).....	5
2.3. Güneş Saati (G_s) ve Yerel Saat (Y_s).....	6
2.4. Gün Doğumu, Batımı ve Uzunluğu.....	7
2.5. Küresel Güneş Radyasyonu.....	7
2.5.1. Direkt, yayılı ve yansıyan güneş ışıınımı.....	8
2.5.2. Güneş ışıınımı ölçümleri.....	8
2.6. Isı Yalıtım Malzemeleri.....	9
2.6.1. İnorganik kökenli ısı yalıtım malzemeleri.....	9
2.6.2. Organik kökenli ısı yalıtım malzemeleri.....	11
2.6.3. İleri teknoloji yalıtım malzemeleri.....	14
2.7. Kaynak Araştırması.....	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
3.1. Derece GünYöntemi.....	20
3.2.Derece-Gün (DG) Hesaplamaları.....	21
3.3.Derece-Günve Güneş Radyasyonu Hesaplamaları.....	21
3.4.Dış Duvarlar İçin Isıtma ve Soğutma Yükleri.....	23
3.5 Ekonomik Analiz ve Optimum Yalıtım Kalınlığı.....	24
4. BULGULAR.....	27
4.1.Güneş Radyasyonu Etkisi Olmaksızın Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Ekonomik Analizi.....	27
4.1.1.İstanbul'da, ısıtma ve soğutma modunda optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizinin hesapları.....	27
4.1.2.Hartum, ısıtma ve soğutma modunda optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizinin hesapları.....	27
4.2. <i>Güneş Işıınımının Hesaplaması</i>	28
4.2.1. İstanbul şehirinde güneş ışıınımının hesaplaması.....	28
4.2.2. Hartum şehirinde güneş ışıınımının hesaplaması.....	36

4.3. Güneş Radyasyonunun Etkisini Altında Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Ekonomik Analizi.....	37
4.3.1. Güneş- hava sıcaklığının hesaplaması.....	37
4.3.2. Güneş radyasyonunun etkisini altında Derece-Gün hesaplaması.....	38
4.3.3. Optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizinin hesaplaması.....	39
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	42
KAYNAKLAR.....	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
δ	Deklinasyon (declination) açısı.
$\emptyset$	Enlem (latitude) açısı.
β	Eğim (slope) açısı.
γ	Azimut (azimuth) açısı.
α	Güneş yükseklik (altitude) açısı.
ω	Saat (hour angle) açısı.
θ	Güneş geliş (angle of incidence) açısı.
θ_z	Zenit (zenith angle) açısı.
T_b	Temel sıcaklık (iç sıcaklığı).
T_o	Günlük ortalama dış hava sıcaklığı.
$T_{o,max}$	Maksimum günlük ortalama dış hava sıcaklığı.
$T_{o,min}$	Minimum günlük ortalama dış hava sıcaklığı.
T_{g-h}	Güneş-hava sıcaklığı değeri.
α_s	Yüzeyin güneş soğurma katsayısı.
h_o	Birleşik taşınım ve ışıınım ısı transfer katsayısı.
ε	Yüzeyin yayma katsayısı.
k	Isıl iletkenlik katsayısı.
U	Toplam ısı transfer katsayısı.
σ	Stefan Boltzman sabiti.
ρ	Yerin yansıtma oranını.
n	Yılın kaçınıcı günü olduğu.
a, b	Bölgeye bağlı sabitler.
K_T	Berraklık indeksi.
R_i, R_o	İç ve dış ortamın ısı transfer katsayıları.
R_w	Yalıtımsız duvarın ısı direnci.
x	Yalıtım malzemesinin kalınlığı.
$R_{w,t}$	Yalıtılmamış duvar tabakasının toplam direnci.
$\dot{q}_{o,h}$	Atmosfer dışında yatay düzleme düşen günlük güneş ışıınımı.
$\dot{q}_{h,d}$	Yatay yüzey için ortalama günlük yayılı ışıınımı.
$\dot{q}_{h,b}$	Yatay yüzey için ortalama günlük direkt ışıınımı.
$\dot{q}_h$	Günlük ortalama güneş ışıınımı.
$\dot{q}_s$	Yüzeye gelen güneş ışıınımı değeri.
C_t	Toplam maliyet.
$C_{t,h}$	Isıtma toplam maliyet.
$C_{t,c}$	Soğutma toplam maliyet.
$C_{t,ins}$	Yalıtım malzemesinin maliyeti.
C_{ad}	Yalıtımın ek maliyetini.
C_f, C_e	Doğal gaz ve elektrik fiyatları.
ζ	Isıtma sisteminin verimi

Kısaltma	Açıklama
$G_{s,c}$	Güneş sabiti.
DG	Derece-Gün.
IDG	Isıtma dercec gün değeri.
SDG	Soğutma dercec gün değeri.
PWF	Mevcut değer faktörüdür.
LT	Kullanım ömrü.
LHV	Doğal gaz alt ısı.
COP	Soğutma performans katsayısı.
LCC	Yaşam döngüsü maliyet analizi.
ECS	enerjisi maliyet tasarrufu.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Sudan'da enerji tüketiminin dağılımı	2
Şekil 1.2.	Türkiye'nin illeri (IDG) bölgelerine göre sınıflandırması	2
Şekil 2.1.	Güneş ile dünya arasındaki ilişki	3
Şekil 2.2.	Güneş açıları	6
Şekil 2.3.	Direkt, yayılı ve yansıyan ışıının şematiği	8
Şekil 2.4.	Piranometre ve Pirheliometre	9
Şekil 4.1.	Deklinasyon açısı (δ) ve Saat açısı (ω) değişimi	28
Şekil 4.2.	Atmosfer dışında yatay düşen günlük güneş ışıının değişimi	29
Şekil 4.3.	Yatay yüzeye düşen günlük ortalama güneş ışıının değişimi	30
Şekil 4.4.	Direkt ve yayılı güneş ışıının değişimi	31
Şekil 4.5.	Temel yönler için güneş ışıının geliş açısının (θ) değişimi	32
Şekil 4.6.	Ara yönler için güneş ışıının geliş açısının (θ) değişimi	33
Şekil 4.7.	Dik yüzeye düşen günlük toplam güneş ışıının (q_s) değişimi	35
Şekil 4.8.	Ara yönleri günlük toplam güneş ışıının (q_s) değişimi	36
Şekil 4.9.	Temel yönleri dik yüzeye düşen günlük güneş ışıının değişimi	37
Şekil 4.10.	Ara yönleri dik yüzeye düşen günlük güneş ışıının değişim	37

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Yakıt, yalıtım özellikleri ve finansal parametreler	26
Çizelge 3.2. Duvar özellikleri	26
Çizelge 3.3. Güneş radyasyonun etkisi olmadan IDG ve SDG değerleri	26
Çizelge 4.1. İstanbul'da 11. Haziran günü için geometrik faktörü (R_b)	34
Çizelge 4.2. İstanbul'da 11. Haziran günü için günlük toplam güneş ışıınımı	35
Çizelge 4.3. Hartum'da temel yönler için güneş ışıınımı hesapları	36
Çizelge 4.4. Hartum'da ara yönler için güneş ışıınımı hesapları	36
Çizelge 4.5. Hartum'da, 15. Mayıs gününde güneş-hava sıcaklığı(T_{g-h})	38
Çizelge 4.6. İstanbul'da, ara yönler için Derece-Gün (IDG/SDG) değerleri	39
Çizelge 4.7. Hartum'da, temel ve ara yönler için derece-gün (IDG/SDG) değerleri	39
Çizelge 4.8. İstanbul'da,ara yönler optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizi	41
Çizelge 4.9. Hartum'da optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizi	41

1. GİRİŞ

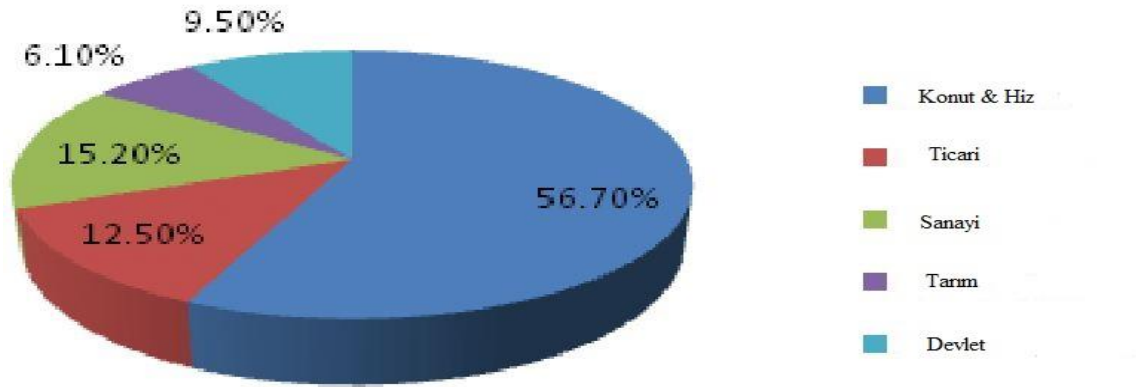
Enerji tasarrufu ve tüketiminin rasyonelleştirilmesi konusu hem bölgesel hem de uluslararası düzeyde hayati konulardan biridir. Günümüzde elektrik üretiminde kullanılan ana kaynakların neredeyse tükenmesi ve dünyanın tanık olduğu gelişimle birlikte artan ihtiyaçlar, konuyu eskisinden daha karmaşık ve önemli bir hale getirmiştir. Yenilenemeyen kaynaklardan (fosil yakıtlar) üretilen enerjinin aşırı kullanımı, genel olarak iklimi ve çevreyi büyük ölçüde etkileyen sera gazı emisyonlarının artmasına, küresel ısınmaya ve beraberinde Kuzey Kutbu ve Antarktika'da buzulların erimesine, sık sık orman yangınlarına, sellere ve diğer çevresel değişikliklere yol açmıştır. Bu gazların devam eden emisyonunun tehlikeli olduğunun açık bir kanıtıdır. Bu konuda çeşitli uluslararası konferanslar düzenlenmekte ve mevcut enerjinin yeterli rasyonalizasyonu ile elektrik üretiminde çeşitli bölümlerinde yenilenebilir (temiz) enerjinin kullanımını sürekli olarak teşvik etmektedir.

Elektrik enerjisi sanayi, tarım, ulaşım, ticaret, konut ve araştırma merkezleri dahil olmak üzere birçok alanda günlük olarak kullanılmaktadır. Dünyanın son dönemde tanık olduğu nüfus patlaması, tüm alanlarda tüketim oranlarını arttırmaktadır. Konut ve ticaret alanlarında özellikle sıcak ve soğuk bölgeler en yüksek enerji tüketim oranını oluşturmaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar bu alandaki tüketimi azaltmak amacıyla daha fazla çalışmalar yürütmekte ve bu bağlamda dünyada genel olarak enerji verimliliği anlayışına uygun olarak geliştirilen politikaların en önemli ayağını ısı yalıtımı oluşturmaktadır. Sudan ve Türkiye diğer birçok ülke gibi enerji ihtiyaçlarını karşılamak için enerjisinin yaklaşık %55-60'ını yurt dışından ithal etmek zorunda kalıyor ve toplam enerji tüketimi konut sektöründe yaklaşık olarak %32'dir. %40'tan fazla alanın ısıtma veya soğutma amaçlı kullanımı şekil 1.1'de görülebilmektedir (kaynaklı, 2012).

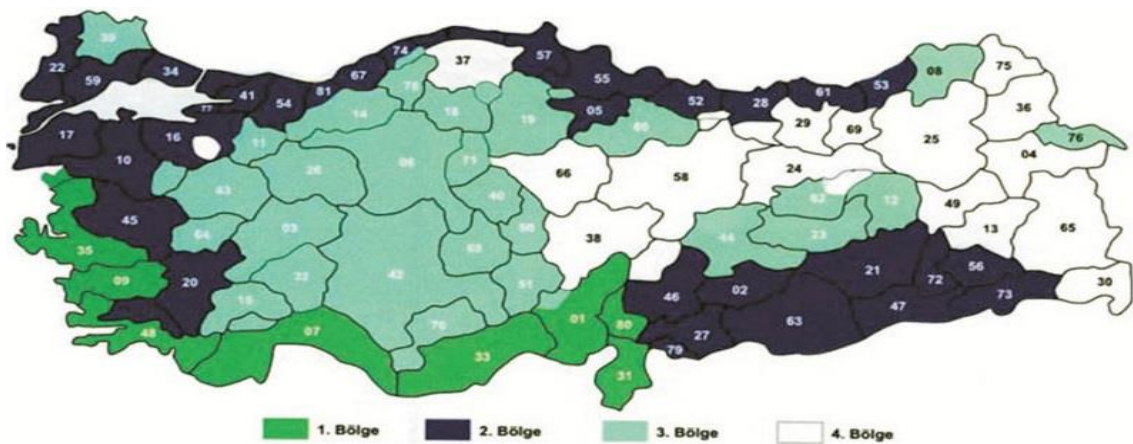
Günümüzde binaların dış duvarlarında ısı yalıtımı, sadece enerji maliyetinin yüksek olması nedeniyle değil, tüketilen enerjinin çevresel etkisi nedeniyle de birçok ülke tarafından daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Yıl boyunca ısı kazanımı ve kaybı sürecinde mühendislik tasarımı, kullanılan malzeme cinsi, coğrafi konumu, elementler vb. büyük önem taşımaktadır. Binaların dış duvarlarında hem enerji hem de ısı yalıtım işleminde kullanılmak üzere düşük malzeme maliyetini sağlayan birçok malzeme ve

yöntem bulunmaktadır. Türkiye, aşağıdaki Şekil 1.2'de gösterilen haritada TS 825 tarafından belirlenen ısıtma derece-gün (IDG) sayılarına göre her il için dört iklim bölgesine ayrılmıştır. Birinci bölge, ısıtma için en az enerji gereksinimini, dördüncü bölge ise enerjiye en çok ihtiyaç duyulan bölgeyi temsil etmektedir (825, 2012) Sudan, Türkiye gibi soğutma derece-gün sayılarına göre dört bölgesine ayrılmıştır fakat birinci bölge, soğutma için en fazla enerji ihtiyacını belirtirken, dördüncü bölge ise en az soğutmaya için ihtiyaç duymaktadır (Younis, 2020).

Bu çalışmada Hartum ve İstanbul'daki binaların ısıtma ve soğutma düzenleri için enerji tüketimi, dış duvarlardaki optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri ödeme süresi Derece-Gün yöntemi ile belirlenecektir.



Şekil 1.1. Sudan'da enerji tüketiminin dağılımı (Younis, 2020)



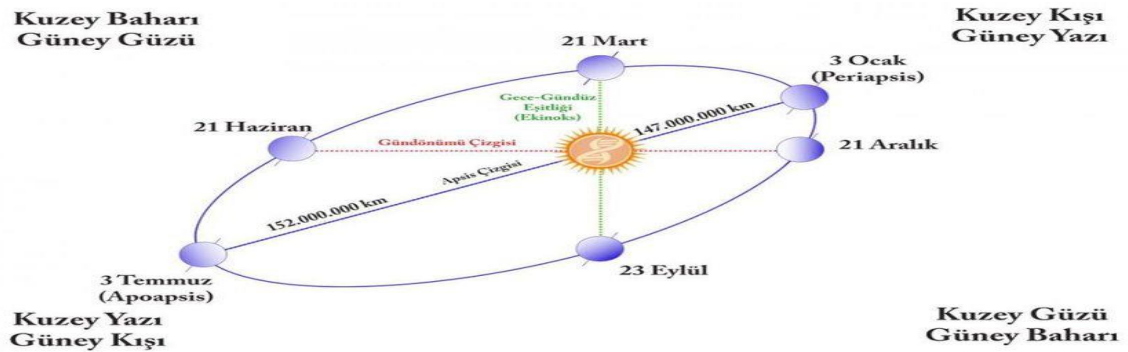
Şekil 1.2. Türkiye'nin illeri (IDG) bölgelerine göre sınıflandırması (Atmaca, 2016)

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Atmosferik ve Güneş Radyasyonu

Güneş birincil enerji kaynağımızdır. Güneş enerjisi adı verilen güneşten gelen enerji, atmosferle önemli etkileşimler yaşadıktan sonra elektromanyetik dalgalar şeklinde bize ulaşır. Atmosferin bileşenleri tarafından yayılan veya yansıtılan radyasyon enerjisi, atmosferik radyasyonu oluşturur. Aşağıda, önemi ve günlük yaşamla ilgisi nedeniyle güneş ve atmosferik radyasyona genel bir bakış sunulmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisine olan aşinalığımız, onu bazı yeni kavramların daha iyi anlaşılmasında etkili bir araç haline getiriyor.

Güneş, Dünya'dan ortalama $1.50 \cdot 10^{11}$ m uzaklıkta bulunan, $1,39 \cdot 10^9$ m çapında ve $2 \cdot 10^{30}$ kg ağırlığında küresel bir cisimdir. Sürekli olarak $3,8 \cdot 10^{26}$ W oranında radyasyon enerjisi yayar. Bu enerjinin milyarda birinden daha azı yaklaşık $1,7 \cdot 10^{17}$ W yeryüzüne çarpar ve bu da yeryüzünü sıcak tutmak ve sürekliliğini sağlamak için yeterlidir. Güneş enerjisi, İki hidrojen atomunun bir helyum atomu oluşturmak üzere birleştiği sürekli bir füzyon reaksiyonundan kaynaklanır. Bu nedenle güneş, çekirdek bölgesinde 40 000 000 K kadar yüksek sıcaklıklara sahip bir nükleer reaktördür. Güneşin konvektif bölge adı verilen dış bölgesinde, bu enerjinin radyasyonla dağılması sonucu sıcaklık yaklaşık 5800 K'ye düşer (Yiğit, 2018). Atmosfer dışındaki güneş ışınlarına dik birim, bölgeye gelen güneş ışınımının tüm dalga boylarında değeri değişkendir çünkü dünya ile güneş arasındaki mesafe mevsimlere bağlı olarak değişir ve aşağıdaki Şekil 2.1'de gösterir.



Şekil 2.1. Güneş ile dünya arasındaki ilişki (Vinay ve Stefan 2016)

Dünya atmosferine ulaşan güneş enerjisine toplam güneş ışınlamı ‘Güneş Sabiti G_s ’ denir ve dünya güneşten ortalama uzaklıktayken, atmosferin dış kenarında güneş ışınlarına normal bir yüzey üzerine güneş enerjisinin gelme hızını temsil eder. Güneş Sabiti (G_s) değeri %1 hata ile 1367 W/m^2 olarak kabul edilmiştir. Güneş ile dünya arasındaki mesafe değişimi, atmosfer dışındaki ışımda $\pm \%3,5$ 'lik bir değişime neden olur. Atmosfer dışında yılın herhangi bir zamanında, güneş radyasyonuna dik tüm dalga boylarında gelen güneş radyasyonu (G_{on}) ve denklem 2.1’de aşağıdaki gibi belirlenir (Yiğit, 2018).

$$G_{on} = G_s \{1 + 0.033 \cos (360 n/365)\} \quad (2.1)$$

Burada n, 1 ocak aydan itibaren gün sayısı olarak belirlenir.

2.2. Güneş Açıları

Herhangi bir anda dünya üzerinde belirli bir yöndeki düzlem ile yeryüzüne gelen doğrudan güneş ışınlamı arasındaki ilişkiler, birkaç farklı açı tanımı ile belirlenebilir. Güneş açıları, dünyanın herhangi bir yüzeyi ile güneşin konumuna bağlı olan terimlerdir. Bu açıları ve aralarındaki ilişkiler şu şekilde açıklanabilir ve Şekil 2.2’de gösterilebilir.

2.2.1. Deklinasyon (declination) açısı (δ)

Güneş ışını ile ekvator arasındaki açıdır . Değeri yıl içinde 21 Haziran yaz günü $+23,45^\circ$ ve 21 Aralık kış günü $-23,45^\circ$ arasında iken, 21 Mart ve 21 Eylül tarihlerinde ilkbahar ve sonbahar ekinokslarında sırasıyla sıfır olur. Deklinasyon açısı, pozitif değerleri kuzey yarım kürenin güneşe doğru meyilli olduğunu (yaz mevsimi) gösterirken, negatif değerler güney yarım kürenin güneşe doğru meylini (kış mevsimi) ifade eder. Yılın her günü için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir (Yiğit, 2018).

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \cdot \frac{284+n}{365} \right) \text{ veya } \delta = -23,45 \cos (0,986 \cdot (n+10.5)) \quad (2.2)$$

Burada n yıl boyunca gün sayısıdır ocak ayının başında $n=1$, 11 Şubat’ta $n= 42$, 31 Aralık’ta $n= 365$ vb.

2.2.2. Enlem (latitude) açısı (ϕ)

Dünya üzerindeki belirli bir konum ile ekvator arasında kesilen açıdır. Enlemler, geleneksel olarak, kuzey yarımkürede pozitif değerler ve güney yarımkürede negatif değerler alır yani -90 ile $+90$ değişir. Önemli enlemler ekvator $\phi = 0$, yengeç dönencesi

$\phi = +23,45^\circ$, oğlak dönencesi $\phi = -23,45^\circ$, kuzey kutup Dairesi $\phi = 66,55^\circ$ ve antarktika cemberi $\phi = -66,55^\circ$ (Yiğit, 2018).

2.2.3. Eğim (slope) açısı (β)

Eğim açısı ele alınan yüzeyin yatayla yaptığı açıdır ve 0 ile 180° değişir.

2.2.4. Azimut (azimuth) açısı (γ)

Tam güneyde sıfır batıya doğu pozitif doğuya doğru negatif olmak üzere yüzeyin normalinin yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusu arasındaki açıdır. -180° ile $+180^\circ$ azimut açısı değişir (Yiğit, 2018).

2.2.5. Güneş yükseklik (altitude) açısı (α)

Yükselik açısı, gün doğuşunda ve batışında 0° ve güneş doğrudan tepedeyken 90° 'dir. Örneğin, ilkbahar ve sonbahar ekinokslarında ekvatorda meydana gelir. Bu açı gün boyunca değişir. Ayrıca belirli bir yerin enlemine ve yılın gününe de bağlıdır.

2.2.6. Saat (hour angle) açısı (ω)

Bu açı, zamansal saatleri uzaysal açılarla değiştirmek için kullanılır. Bir noktanın belirli bir zamandaki konumu ile aynı noktanın güneş öğle vaktindeki konumu arasındaki açı olarak tanımlanır. Güneş öğlen tam olarak gün doğumu ve gün batımı arasında yer alır yani öğleden önce doğru negatif öğleden sonra pozitif demektir. Dünyanın kendi etrafında bir tur atması (360°) 24 saat sürdüğü için saat açısı aşağıdaki denklem 2.3 belirlenebilir (Yiğit, 2018).

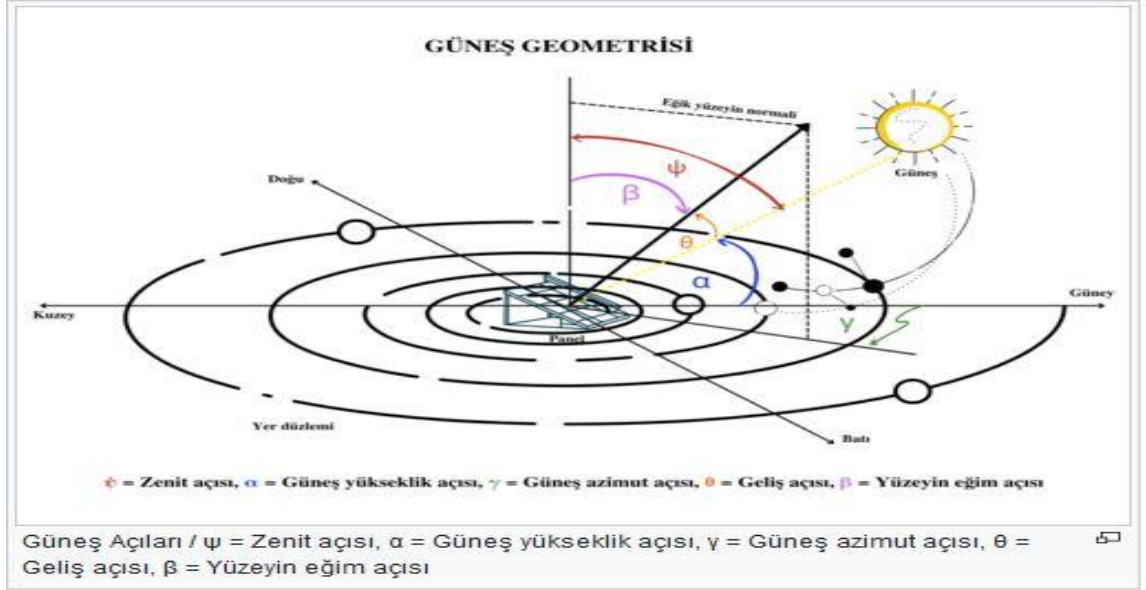
$$\omega = 15 (GS - 12) \quad (2.3)$$

2.2.7. Güneş geliş açısı (angle of incidence) (θ)

Güneşten gelen ışının, gelme noktasında yüzeye dik olanla yaptığı açıdır.

2.2.8. Zenit açısı (zenith angle) (θ_z)

Yatay yüzey ($\beta = 0$) için tanımlanan güneş geliş açısıdır. Güneş ışınları ile yatay bir düzlem arasındaki açı olan güneş yükseklik açısı ile yakından ilgilidir. Bu iki açı tamamlayıcı olduğundan, birinin kosinüsü diğerinin sinüsüne eşittir (Yiğit, 2018).



Şekil 2.2 Güneş açıları (Vikipedi, 2021)

2.3. Güneş Saati (Gs) Ve Yerel Saat (Ys):

Güneş zamanı, dünyanın kendi etrafında dönüşü ile ilgili gerçek zamandır. Bu nedenle güneş zamanı, dünyadaki her konum için veya daha doğrusu her boylam için farklıdır. Pratik nedenlerden dolayı, farklı boylamlara sahip bir ülkeye ait bölgelerin resmi zamanlaması için güneş saatini kullanmak zordur. Bu nedenle, dünya 24 standart zaman dilimine bölünmüştür. Her bir saat diliminin (Time Zone (TZ)), tüm bölge için tahmini ve tüm ülke için geçerli olan tek bir saati vardır. Büyük ülkeler için zamanlamada birden fazla saat dilimi kullanılır. Belirli bir saat diliminde kullanılan saate yerel saat (YS) denir. Güneş enerjisi hesaplamalarında yerel ve güneş saatleri arasındaki hata dikkate alınmalıdır. Başka bir hata ise Dünya'nın güneş etrafındaki bazı düzensiz hareketinden kaynaklanır. Dünya sabit bir hızla hareket etmez. Yıl boyunca hızlanır ve yavaşlar ve her gün birkaç dakikalık bir hataya neden olur. Düzensiz hareket hatası (zaman denklemi(ZD)) olarak adlandırılan aşağıdaki denklemle tahmin edilebilir (Altabbakh, 2020).

$$ZD = 9.87 \sin 2A - 7.53 \cos A - 1.5 \sin A \quad (2.4)$$

ZD, 2- 4 denklemden dakika ile hesaplanır ve A sembolü şu şekilde hesaplanır:

$$A = \frac{360}{364} (n - 81) \quad (2.5)$$

Yılda, n gün sayısı 1. Ocaktan itibaren n = 1

Sonuç olarak, standart zaman dilimlerinden (TZ) birinin belirli bir boylamına (Uzun) ve belirli yerel saatine (YS) karşılık gelen güneş saati (GS) aşağıdaki gibi verilir:

$$GS = YS + \frac{Uzun-TZ}{15} + \frac{ZD}{60} \quad (2.6)$$

Denklemdeki TZ (2.6), söz konusu boylamın (Uzun) en yakın zaman dilimini temsil eder. TZ, Greenwich'in 15° batısındaki pozitif katları ve Greenwich'in 15° doğusundaki negatif katları alır (Altabbakh, 2020).

2.4. Gün Doğumu, Batımı ve Uzunluğu

Öğlen vakti, gün doğumu ile gün batımı arasındaki orta zamandır. Gün doğumu ile gün batımı arasındaki toplam süreye gündüz uzunluğu denir. Güneşin doğuşuna karşılık gelen saat açısı belirli bir değere sahiptir ve (ω_s) ile gösterilir ve aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (2.7)$$

(ω_s) değeri öğlen güneşi etrafında simetriktir. Gündüz uzunluğunu bulmak için, ω_s değeri 15'e bölünerek saate dönüştürülür ve daha sonra güneş öğlen çevresindeki iki periyodu hesaba katmak için 2 ile çarpılır. Dolayısıyla, saat cinsinden gündüz uzunluğu (N) şu şekilde hesaplanır (Altabbakh, 2020).

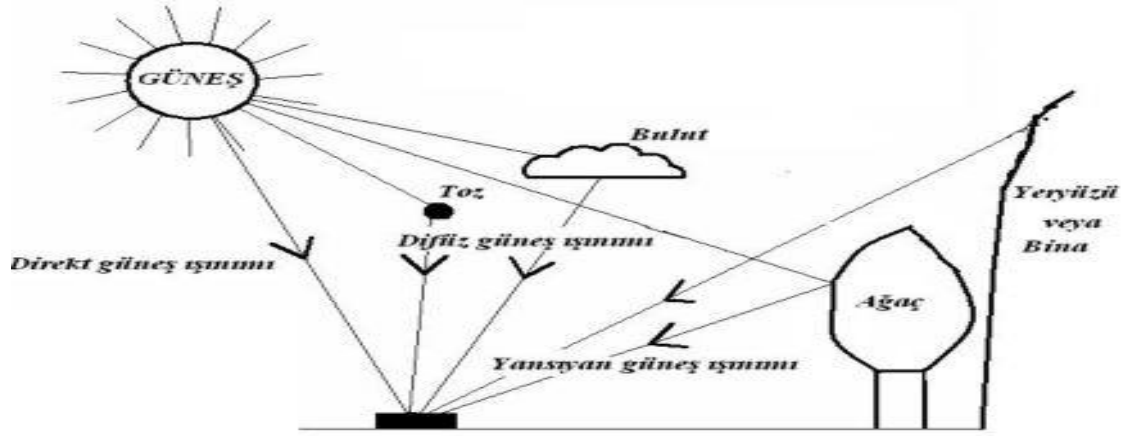
$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) = \frac{2}{15} \omega_s \quad (2.8)$$

2.5. Küresel Güneş Radyasyonu

Dünya yüzeyine ulaşan ışınlam veya elektromanyetik radyasyon, yüzeyde kısmen emilirken, diğer kısmı atmosfere geri yansır. Gelen ışık, doğrudan Güneş'ten gelen bileşenin yanı sıra, ışığın atmosferin kendisindeki parçacıklar dışında, Dünya kendisi elektromanyetik radyasyon yayar. Düz yatay yüzeye düşen toplam radyasyona küresel radyasyon denir. Küresel (global) güneş radyasyonu üç kısım ile belirlenebilir; direkt, yayılı ve yansıyan ışınlamıdır (Sofiu, 2011).

2.5.1. Direkt, yayılı ve yansıyan güneş ışınlamı

Yayılmadan dünya yüzeyine ulaşan güneş ışınlamına direkt güneş ışınlamı tanımlanabilir. Dünyanın herhangi bir noktası ile güneş arasındaki mesafe çok uzak olduğu için, doğrudan güneş ışınları yüzeye paralel olarak düşünülebilir. Yayılı radyasyon, atmosferde dağılarak yönünü değiştirerek atmosferden herhangi bir yüzeye düşen radyasyon olarak tanımlanabilir. Atmosferdeki toz, parçacık, molekül ve bulutlar tarafından farklı yönlerde yansıyan ve saçılan güneş radyasyonudur. Direkt ve yayılı güneş ışınlamı kısa dalga boylu ışınlamlardır. Bu ışınlamın yanı sıra yeryüzündeki herhangi bir cismin yuttuğu ve yansıttığı uzun dalga boylu ışınlama da ‘‘yansıyan ışınlam’’ adı verilir. Direkt, yayılı ve yansıyan ışınlam şematik olarak aşağıdaki şekil 2.3’te gösterilmiştir (Sofiu, 2011).



Şekil 2.3 Direkt, yayılı ve yansıyan ışınlamın şematik gösterimi (BULUT 2009)

2.5.2. Güneş ışınlamı ölçümleri

Geliştirilen çeşitli cihazlar vasıtasıyla güneş ışınlamının ve bunların bileşenlerinin (yayılı ve direkt) ölçümünü yapmak mümkündür. Bu cihazlar iki gruptur ve piranometre (pyranometer) ve pirheliometre (pyrheliometer) olarak adlandırılır.

Piranometre, ile yatay yeryüzeye gelen toplam güneş ışınlamını ölçmek mümkündür, ancak yayılan güneş ışınlamını metal bir bant takılarak gölgelendirilerek ölçmek mümkündür. Piranometreler, 0.3 μm ile 3 μm dalga boyu aralığında yarı küresel radyan akışı ölçen cihazlardır.

Pirheliometreler, normal yönde, direkt güneş radyasyonunu ölçmek için kullanılan cihazlardır ve güneş takip sistemi ile kullanılır. Şekil 2.4'te piranometre ve pirheliometreyi göstermektedir (Yiğit, 2018) .



Şekil 2.4 Piranometre ve Pirheliometre (Yiğit, 2018)

2.6. Isı Yalıtım Malzemeleri

Isı yalıtım malzemeleri, hammaddelerinin kökenine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Isı yalıtım malzemeleri organik ve inorganik olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Bu iki grup, işleme sürecine bağlı olarak yine doğal ve yapay alt gruplara ayrılır. Doğal ısı yalıtım malzemelerinde yangın geciktirici veya bağlayıcılar gibi katkı maddeleri içeren hammaddeler değişmeden kalır. Bu maddelerin doğal olarak sınıflandırılabilmesi için bu katkı maddelerinin maddenin %25'inden fazla olmaması gerekir (Arge, 2022).

2.6.1. İnorganik kökenli ısı yalıtım malzemeleri

Genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş perlit levha, genleştirilmiş vermikülit, mineral yün ve cam köpüğü inorganik kökenli hammaddelerle üretilen ısı yalıtım malzemeleri olarak sayılabilir. (Arge, 2022).

❖ Genleştirilmiş perlit

Perlit, silisli magmatik kayalardan üretilir. Diğer camsı magmatik kayalardan farkı, yumuşama sıcaklığı 900-1200°C'ye ulaştığında hacminin 5 ila 20 kat artmasıdır. Türkiye'de bol miktarda bulunan perlit, ısı yalıtım uygulamalarında dökme veya levha iki halinde kullanılmaktadır. Genleştirilmiş perlit ,ısı iletim katsayısı ve yoğunluğu sırayla 0,045 – 0,055 W/m°C 90 - 490 kg/m³, Ayrıca levha halinde sırayla 0,060 W/m°C ve 150-210 kg/m³ arasındadır (Arge, 2022).

❖ Genleştirilmiş vermikülit

Vermikülit, alüminyum, demir ve magnezyum silikat bileşimine sahip bir kil mineralidir. Vermikülit granülleri 1000°C ve üzeri sıcaklıklarda ısıtıldığında taş katmanları arasındaki su aniden buharlaşarak granül hacminin 15-20 kat artmasına neden olur.

Genleştirilmiş vermikülitin yoğunluğu 70-160 kg/m³, ısı iletkenliği 0,046- 0,07 W/m.°C arasındadır. Yüksek su emme özelliğine sahiptir ve A1 yanmaz malzeme olarak sınıflandırılır (Arge, 2022).

❖ Mineral Yünler

Mineral yün, liflerden yapılan birçok inorganik yalıtım malzemesinin genel adıdır. Hammaddelerine bağlı olarak genellikle taş yünü, cam yünü ve cüruf yünü gibi farklı alt gruplara ayrılmaktadır. Isı ve ses yalıtımında Mineral yün yüksek performans gösterir. Isı iletim katsayısı 0,035 W/m K (Arge, 2022).

❖ Cam yünü

Cam yünü; Yüksek silis içeriğine sahip kum, kalker ve geri dönüştürülmüş cam kullanılarak reçineli ve reçinesiz olarak üretilir. Rengi, içindeki reçine miktarına göre açık veya koyu sarı tonlarındadır. Isı iletim katsayısı ve yoğunluğu sırayla 0,035-0,050 W/m°C 8-500 kg/m³ arasındadır. Çürümeye, böceklenmeye, korozyona ve yangın karşı dirençlidir. Hafif olduğu için Taşınması, işlenmesi ve uygulaması kolaydır (Arge, 2022).

❖ Taş yünü

Taş yünü; reçineli veya reçinesiz olarak diyabaz, dolomit ve bazalt gibi doğal taşlar kullanılarak üretilir. Genellikle gri-yeşil renktedir. Cam yününden daha yoğun olduğu için elastikiyeti biraz daha düşüktür. Isı iletim katsayısı ve yoğunluğu sırayla 0,035-0,050 W/m°C ve 8-500 kg/m³ arasındadır. Taş yünü aynı cam yünü özelliği sahiptir (Arge, 2022).

❖ Cam köpüğü

Köpük cam ısı yalıtım malzemesi kuvars kumu, dolomit, kalsiyum ve sodyum karbonattan oluşmaktadır. Üretiminde atık camlar kullanılabilir. Isı iletim katsayısı ve

yoğunluğu sırayla 0,045-0,060 W/m°C ,100-150 kg/m³ arasındadır. Yanmaz bir malzeme olarak sınıflandırılır. Üstün özelliklerine rağmen maliyeti yüksek olduğu için üretimi düşüktür (Arge, 2022).

2.6.2. Organik kökenli ısı yalıtım malzemeleri

Organik kökenli hammadde ile üretilen ısı yalıtım malzemeleri olarak ahşap lifli , ahşap yünü, genleştirilmiş mantar , gevşek dolgu selüloz yalıtım , kenevir, ekstrüde polistren , genleştirilmiş polistren, poliüretan sert köpük ve fenolik köpük levhalar ısı yalıtım malzemesinden bahsedilmiştir (Arge, 2022).

❖ Ahşap yünü levha

Ahşap yünü levhalar, yumuşak veya sert ahşabın işlenmesi sırasında oluşan ağaç liflerinin bağlayıcısı olarak lateks veya parafin emülsiyonu ile üretilir. Boraks, anjina ve böceklerle karşı koruyucu bir katkı maddesi olarak eklenir. Bazı tiplerde bitüm veya doğal reçine emülsiyonları ile su itici özellik kazandırılabilir.. Kuru ve ıslak olmak üzere iki şekilde üretilir. Isı iletim katsayısı ve yoğunluğu sırayla 0,065-0,070W/m°C, 360 - 460 kg/m³ arasındadır (Arge, 2022).

❖ Ahşap lifli levha

Ahşap lifli levhalar, yumuşak ağaçların işlenmesi sırasında oluşan uzun ağaç lifleri ve bağlayıcı olarak çimento veya magnezya kullanılarak üretilir. Ahşap sektöründe oluşan makine atıkları, magnezya veya çimento süspansiyonu ile karıştırılarak kurutulduktan sonra kalıplanarak kesilerek şekillendirilir. Isı iletim katsayısı ve yoğunluğu sırayla 0,035-0,070 W/m°C, 110 - 450 kg/m³ arasındadır. Piyasada polistiren ısı yalıtım malzemeleri ile kompoze edilmiş çeşitleri de bulunmaktadır. Levha, pürüzlü yüzeyi nedeniyle sıva ve harç uygulamalarına uygundur. Geri dönüşüm mümkün değildir. B sınıfı yanıcı malzeme olarak sınıflandırılır (Arge, 2022).

❖ Genleştirilmiş mantar levha

Genleşen mantar granülleri, herhangi bir yapıştırıcı eklenmeden granüllerin içindeki doğal reçine ile yapıştırılır. Bu nedenle tamamen doğaldır. Ayrıca bitüm ve formaldehit

reçinesi emdirilmiş versiyonları da vardır. Granüller, bir otoklavda 300-350°C'de genişletilir ve 20 dakika boyunca basınç altında şekillendirilir. Granüllerin hücre duvarları gerilir ve frontal kalınlık azalır. Bu işlem sırasında granüllerin hacmi %100'ün üzerinde genişler ve granüllerin içindeki doğal reçineler bağlanma kazanır. Genişletilmiş mantar pano yüksek basınç dayanımına sahiptir, ancak yangın geciktirici olmayan tipler yanıcı olabilir. Yoğunluğu 80-500 kg/m³ arasındadır. Isı ve ses yalıtım özellikleri 0,045-0,055 W/m°C'de (Arge, 2022).

❖ **Gevşek Dolgu Selüloz Yalıtım**

Gevşek dolgulu selüloz yalıtım TS EN 15101-1 standardına uygun olarak; atık kâğıt, inorganik yangın geciktirici, böceklenmeyi ve çürümeyi önleyici katkıları ile üretilir. Gevşek dolgu selüloz yalıtımın ısı ile katsayısı 0,040-0,045 W/m°C arasındadır. Gevşek dolgu olduğu için basınç dayanımı yoktur. E sınıfı alevlenici malzeme olarak sınıflandırılır (Arge, 2022).

❖ **Kenevir**

Kenevir yalıtım malzemesi bir standarda bağlanmamıştır. Kenevir bitkisi liflerinden ve hasat sonrası kalan kısımlardan üretilir. İstenilen ürüne bağlı olarak yangın geciktirici olarak borik tuzu veya su geçirimsiz hale getirmek için bitüm eklenebilir. Kenevir yalıtım malzemesinin nem tutma eğilimi fazladır. Nem içeriği arttıkça malzemenin ısı iletim katsayısı artar. Nemden, kemirgenlerden, böceklerden ve suya karşı korunmalıdır. Kenevir yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı ve yoğunluğu 20-68 kg/m³ sırayla 0,040-0,050 W/m°C arasındadır. Ahşap karkas sistem arasında, düşük basınç dayanımından dolayı yük altında kalmayacağı çatı, duvar ve normal döşeme levhalarının alt yüzeylerinde kullanılabilir. E sınıfı yanıcı malzeme olarak sınıflandırılmıştır (Arge, 2022).

❖ **Ekstrüde polistren köpük levha**

1941 yılında Amerikan Savunma Bakanlığı nehirleri geçmek için yüzdürme amaçlı su geçirmeyen yüksek basınç dayanımına sahip hafif köpük malzeme üretimi gelişmelerini finanse etmiştir. Daha sonraları üretilen malzemenin iyi ısı yalıtım özelliği gösterdiğini görmüşlerdir. Ekstrüde polistren yalıtım malzemesi yaklaşık olarak 200 C sıcaklıkta

eritilmiş polistrenin (ham petrolden üretilir) eritilip HFC, CO₂ gibi genleştirici gazlar, yangın geciktirici olarak HBCD (Hexabrom cyclododecane) eklenerek bir ekstrüzyon makinasından geçirilmesiyle üretilir. Soğuduktan sonra istenilen boyutlarda ebatlandırılır, paketlenir ve depolanır. Önceleri XPS üretiminde şişirici gaz olarak halojenli kloroflorokarbonlar (CFC 12, CFC 142b) kullanılıyordu. Yeni düzenlemeler sonrası klorin içermeyen şişirici gazlar (HFC 134a, CO₂, 152a) kullanılmaktadır.

Ekstrüde polistrenin en önemli özellikleri düşük ısı iletim katsayısı 0,030-0,040 W/m°C, yüksek basınç dayanımı ve nem direncidir. Yoğunluğu $\geq 25 \text{ kg/m}^3$ arasındadır. Çürümez, kokmaz ve böcek barındırmaz. Kapalı gözenekli yapısı sayesinde su emmesi çok düşüktür. Zemine oturan ve zemin altı döşemelerde uygulanabilir. Taşınması, depolanması ve uygulanması kolaydır. Bu iyi özelliklerinin yanı sıra yangın dayanımı diğer ısı yalıtım malzemelerine göre düşüktür. E sınıfı normal alevlenici malzeme olarak sınıflandırılır (Arge, 2022).

❖ Genleştirilmiş polistren köpük levha

Genleştirilmiş polistren yalıtım malzemesi üretilirken polistren, şişirici gaz olarak pentan (C₅H₁₂) ve alevlenmeyi geciktirici olarak HBCD (Hexabrom cyclododecane) eklenerek üretilir. Polistren tanecikleri pentan ve su buharı ile ısıtılarak genleştirilir, daha sonra kurutma ve olgunlaştırma sürecinde genleşen tanecikler içindeki pentan gazı yerine hava dolmaya başlar. Kalıplara alınan genleştirilmiş tanecikler yine buharla ısıtılarak ikinci kez genleştirilmesi ve taneciklerin birbirine kaynaşması sağlanır. Kalıplamadan sonra soğutulan blok şeklindeki malzeme istenilen ebatlarda kesilerek paketlenir ve depolanır. E sınıfı normal alevlenici malzeme olarak sınıflandırılır. Isı iletkenlik katsayısı 0,035-0,040 W/m°C ve birim hacim kütlesi $\geq 15 \text{ kg/m}^3$ ' tür (Arge, 2022).

❖ Poliüretan Sert Köpük Levha

Poliüretan izosiyanat, birden fazla hidroksil grubu içeren poliöl reçinesi ve yangın geciktirici katkıları ile üretilir. HFC, CO₂ veya C₆H₁₂ gibi şişirici gazlarla genleştirilir. Karışım üretim hattında genleştirilirken alt ve üst yüzeyine isteğe bağlı olarak esnek bitüm kaplama, metal folyolar veya kompozit kaplamalar yapıştırılır. Kaplamasız olarak kullanıldığında yangına elverişli hale gelir. Yangın durumunda çok zehirleyici olan

hidrojensiyanit HCN ve izosiyanit gazı salınımı yapar. HCN zehirlenmesi hücrel solunumu engelleyen siyanit anyonundan kaynaklanır (Arge, 2022).

Isı iletim katsayısı 0,030-0,040 W/m°C düşüktür ve basınç dayanımı yüksektir. Yoğunluğu $\geq 30 \text{ kg/m}^3$ tür. Çürümez ve küfe karşı dayanıklıdır ancak ultraviyole ışığa karşı dayanıksızdır. Düz çatılarda, eğimli çatı ve döşemelerde kullanılır. Diğer bir uygulama alanı olarak sandviç panellerde çatı, cephe ve endüstriyel yapılarda kullanılır. Yüksek basınç dayanımı ve ses yalıtımı özellikleri sayesinde ağır yüklere maruz kalan endüstriyel döşemelerde kullanılabilir. B ve C sınıfı alevlenici malzeme olarak sınıflandırılır.

❖ Fenolik Köpük Levha

Fenolik köpük levhalar, fenol reçinesi ve şişirici olarak pentan gazının kullanılması ile üretilir. Fenol reçinesi ve şişirici malzeme karıştırılır, taşıyıcı bir bant üzerinde kontrollü ve sürekli bir işlemle köpürtülür. Yapışkan haldeki köpüğün her iki yüzü cam elyaf ile kaplanır ve kurutulur. İlk kez 1970'li yıllarda üretilen bu köpükleri pek az üretici üretir ve yapılarda ısı yalıtımı olarak diğer köpük ısı yalıtımlar kadar kullanılmazlar. Kapalı gözenekli yapısı sayesinde ısı iletkenlik değeri düşüktür. Yangın dayanımı C sınıfıdır ve tutuşmaz. Ancak yangın anında formaldehit gazı salınımı yapar. Kimyasallara, böceklerle ve çürümeye karşı dirençlidir. Ağır yüklere maruz kalan zeminlerde kullanılabilir. Kolay kesilir. Fenolik köpüklerin su emmesi çok düşüktür. Ancak metallerle bir arada kullanıldığında ve neme maruz kaldığında fenol içerisindeki sülfonik asit çözünerek metal yüzeyde korozyona neden olur. Bu nedenle PF'nin metallerle direkt temasından kaçınılmalıdır. Birim hacim kütlesi 40 kg/m^3 , ısı iletkenlik değeri 0,022- 0,04 W/m°C arasındadır (Arge, 2022).

2.6.3. İleri teknoloji yalıtım malzemeleri

❖ Aerojel

Aerojeller insanoğlunun bildiği en hafif katılardan biridir. Bir polimerin bir çözücü ile bir jel oluşturmak için birleştirilmesi ve ardından sıvının jelden çıkarılması ve hava ile değiştirilmesiyle oluşturulurlar.. Aerojeller nano boyutlu gözeneklerden oluşur ve çok düşük birim hacim kütlesine ve %90 ila %98 aralığında gözenekliliğe sahiptir. Silika,

çeşitli metal oksitler, organik polimerler, karbon ve metaller gibi farklı malzemelerden elde edilebilirler.

Isı iletkenliği 0,017- 0,021 W/m°C değerleri arasında olduğundan mükemmel ısı yalıtım özelliği gösterir ve yoğunluğu 60-80 kg/m³ arasındadır (Arge, 2022). Neme ve küf oluşumuna karşı dayanıklıdır ve uzun süre ultraviyole ışınlarına maruz kaldığında renk kaybetmez. Kullanım süresi boyunca uzun vadede özelliklerini kaybetmez. Bu üstün özelliklerine rağmen pahalı olduğu için tercih edilmemektedir. Binadaki uygulama alanları, iç ve dış duvarlar, zeminler, tavanlar ve çatılar, teraslar ve balkonlar, pencere ve kapılar olarak sayılabilir.

❖ Vakum yalıtım paneli

Vakum yalıtım panelleri gaz geçirmez bir muhafaza ve havanın boşaltılmış olduğu açık gözenekli rijit bir çekirdeği kapsar. Kapalı gözenekli malzemeler vakumlama sırasında gözenekler arasındaki gaz ve su buharının atılmasına engel olur bu durum yalıtım panelinin konvansiyonel ısı transferini arttırır. Çekirdek malzemesi olarak aerojel, ısıl işleminden geçirilmiş silika, açık gözenekli poliüretan ve cam lifi gibi malzemeler kullanılır. Panelin zamanla ısı yalıtım özelliklerini kaybetmemesi için hava ve neme karşı korunaklı olması gerekir. Bu nedenle bir koruyucu zarf ile kaplanırlar. Bu zarf 3 katmandan oluşur. İçteki katman sızdırmazlık katmanıdır. Çekirdek malzemesini kapatır ve düşük veya yüksek yoğunluklu polietilenden oluşur. Ortadaki katman bariyer katmanıdır. Bu katman bir alüminyum folyo veya çok tabakalı bir laminat olabilir. Bariyer tabakasının amacı çekirdeği su buharı ve hava geçişine karşı korumaktır. Dış katmanı oluşturan polietilen tereftalat paneli dış etkenlere karşı korur. Taşınması ve montajı sırasında alt katmanların yırtılmasını önler.

VYP ile 0,0053 gibi çok düşük ısı iletkenlik değerine ulaşılabilir. Bu değerler geleneksel ısı yalıtım malzemelerinden 5-10 kat daha azdır. Çekirdek malzemesine bağlı olarak, hasar görmüş olsa bile yalıtım paneli düşük ısı iletkenlik (örneğin 0,02 W/m°C) sağlayabilir. Standart üretim boyutları dışına çıkınca iki kat kadar maliyet artışı olabilmektedir. Yapıda duvar, döşeme, tavan, çatı, dış cephe, pencere yalıtımı ve hazır prefabrik beton panel uygulamalarında kullanılır (Arge, 2022).

2.7. Kaynak Araştırması

Optimum yalıtım kalınlığını ve geri ödeme etkileyen ekonomik parametreleri (enflasyon oranı, iskonto oranı, ömür ve enerji maliyetleri), ısıtma ve soğutma yükleri, duvar yapısı ve yalıtım malzemesi özelliklerini araştırmıştır. Sonuç olarak, ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı, bina ömrü, enflasyon oranı, enerji maliyetleri ve yalıtımın ısı iletkenliği arttıkça optimum ısı yalıtım kalınlığı artmıştır. Ancak, iskonto oranı, yalıtım malzemesi maliyeti, toplam duvar direnci, soğutma sisteminin performans katsayısı (COP) ve duvara düşen güneş radyasyonu arttıkça kalınlık azalmıştır. Tahmin edilen bina ömrü arttığında, bina duvarlarına daha kalın yalıtım uygulanmalı ve bu da geri ödeme süresini ve enerji tasarrufunu iyileştirdiği sonucuna varılmıştır (Kaynaklı, 2011).

Türkiye’de her il için ısıtma ve soğutma enerji gereksinimleri ayrı ayrı ve iki ise de birlikte göz önüne alınarak optimum yalıtım kalınlıkları, enerjinin tasarrufu miktarları ve geri ödeme sürelerini hesaplamıştır. Enerji giderleri, yalıtım malzemesi ve uygulama maliyeti dikkate alınarak ve 20 yıllık bir süre için ömür döngüsü maliyet analizi kullanılarak optimum yalıtım kalınlıklarını belirlemiştir. Derece gün yöntemiyle soğutma, ısıtma ve yıllık modullarında sırayla 0- 3,8, 4,7 - 16,6 ve 5,7 -16,6 cm değiştiği görülmüştür. Geri ödeme süresi de 3,85 – 16,25 yıl arasında değişmektedir (Kaynaklı, 2012).

Malezya ikliminde ömür döngüsü maliyet analizini(life cycle cost analysis) kullanarak binalar için optimum yalıtım kalınlığını kil tuğla, kum çimento tuğla ve beton dahil ortak dış duvarlar incelemiştir. Taş yünü, fiber glas ve ekstrüde polistiren yalıtım malzemeleri kullanmış olup yalıtım kalınlığının 18-126 mm aralığında olduğu tespit etmişlerdir. Çalışma saatleri ve iç-dış sıcaklıklar, ömür döngüsü net tasarrufu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve farklı dış duvar tiplerinin ömür döngüsü net tasarrufu üzerinde küçük bir etkisinin var olduğu kanısına varmışlardır. En ince yalıtım malzemesinin 0,019m cam elyafı olduğu, en kalın yalıtım malzemesinin ise 0,124 m ile perlit olduğu tespit etmişlerdir (F. Basrawi, 2013).

Tropikal bir bölgede sürekli kullanılan binaların dış duvarlarındaki yalıtım kalınlıklarını gölge seviyesine göre optimize etmeyi çalışmışlar ve H-Tools'dan oluşturulan bir Simulink modeli kullanılarak çeşitli duvar yönelimleri için sabit periyodik koşullar

altında çalışılmaktadır. Duvarların genişmiş polistiren malzeme kullanılarak yalıtıldığını varsaymakta ve inşaat sahasının gölge seviyesinin %25 veya %22'lik artışlarla %0 ile %97 arasında değiştiği varsaymakta ve yıllık soğutma yükü hesaplayıp optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi için ekonomik bir modele girdi olarak kullanmışlardır. Gölge seviyesi arttıkça, optimum yalıtım kalınlığını bloke edilen güneş ışıınımı yüzdesi başına güney, kuzey ve doğu/batı yönündeki sırasıyla 0,035, 0,029 ve 0,036 m bulmuşlardır. Ayrıca enerji tasarrufunun 46,89 ile 101,29 \$/m² arasında değiştiğini göstermişler ve geri ödeme süresi, gölge düzeyine ve duvar yönüne bağlı olarak 3,56 ile 497 yıl arasında olduğunu belirtmişlerdir (Elvis Wati, 2015).

Türkiye'de iklim bölgelerinden seçilen dört il için altı farklı yakıt ve yalıtım malzemesi için optimum yalıtım kalınlığını, 15 yıllık kullanım ömrü boyunca enerji tasarrufunu ve geri ödeme sürelerini gösteren bir ömür döngüsü maliyet analizi sunmuşlardır. Muğla, Kocaeli, Ankara ve Ardahan şehirlerini farklı dört iklimden seçmişler ve Ekstrüde polistiren, genişleştirilmiş polistiren, cam yünü, taş yünü, poliizosiyanürat ve poliüretan altı yalıtım malzemesinden yapılmış sandviç tipi bir duvarın analizi için seçmişlerdir. Ayrıca motorin, doğalgaz, propan , elektrik, kömür ve 4 numaralı fuel-oil olmak üzere altı farklı yakıt bazında kullanmışlardır. Sonuç olarak, optimum yalıtımın olduğu durumda kalınlık 2,8 cm ile 45,1 cm arasında değişmekte olup, enerji tasarrufu 16,4 ₺/m² ile 479 ₺/m² arasında değişmekte olduğunu ve geri ödeme süreleri şehre, yalıtım malzemesine ve yakıt maliyetine bağlı olarak 0,078 ile 0,860 yıl arasında değişmekte olduğunu bulmuşlardır (Cenker Aktemur, 2017).

Türkiye'de 2. DG bölgesinde bulunan bir il için güneş radyasyonu etkisi altında, farklı duvar yönleri için DG sayıları, optimum yalıtım kalınlıkları ve tasarruf miktarlarını hesaplamışlardır. Aynı şekilde derece gün yönetimiyle sonuçlar elde etmişlerdir. Güneş radyasyonu etkisi katılmadığında enerji gereksinimleri DG sayısı 1266 katıldığında ise güney, batı, kuzey, doğu yönüne bakan dik duvarlarda ve yatay duvarda DG değerleri sırasıyla 857, 940, 986, 940 ve 1386 olarak hesaplamışlardır. Optimum yalıtım kalınlıklarını da sırasıyla 4,65 cm, 0,0495, 0,0511, 0,0496 ve 0,0668 m olarak hesaplamışlardır ve son olarak yüzeyde m² başına düşen yıllık tasarruf miktarları sırasıyla 52,8, 59,0 , 62,1 , 59,0 ve 99,3 TL bulmuşlardır (Ali Husnu Bademlioglu, 2018).

Bina duvarlarının ısı yalıtım kalınlıklarını soğutma ve ısıtma enerjisi gereksinimlerine göre belirlemişlerdir. Belirli bir kullanım ömrü 10 yıl süresini göz önünde bulundurarak ömür döngüsü maliyet analizini kullanmışlardır. Derece gün yönetimiyle İstanbul'da güneş radyasyonu dikkate alınarak toplam derece-gün ISD ve SDG sırayla 1371,5 , 523,6 hesaplanmışlar ve ısıtma soğutma ve yıllık durumlarda ekonomik yalıtım kalınlığını yoğunlaşma faktörünü dikkate alarak yalıtım uygulamaları sırayla 1,7 cm, 3,6 cm ve 4,7 cm olarak bulmuşlardır.. İç ortam sıcaklığı, iç ortam bağıl nemi ve dış ortam sıcaklığı artırılarak yoğunlaşmayı önlemek için gereken minimum yalıtım kalınlığının arttığını bulmuşlardır (Ahmet Serhan Canbolat, 2018).

Binanın ısıtma ve soğutma enerjisi gereksinimleri (IDG-SDG) , kullanım ömrü (TL), bugünkü değer faktörü (PWF), yalıtım malzemesi ve kurulum maliyetleri, sistemi verimliliği ve güneş radyasyonu etkisi, enerji maliyetleri gibi optimum yalıtım kalınlığını ve geri ödeme süresini etkileyen faktörleri Türkiye'de farklı iklim koşullarında araştırmıştır, Taguchi yöntemiyle optimum yalıtım kalınlığı üzerinde en etkili parametrenin toplam etkinin %27,33'ü ile ısıtma derece-günleri (IDG) , en az etkin parametrenin ise %3,21 oranı ile ısıtma sisteminin verimliliği olduğu bulmuştur (Omer Kaynakli, 2020).

MATLAB yazılımı ile birlikte ömür döngüsü maliyet analizi ile Isıtma-Soğutma derece gün yöntemiyle ve yalıtım malzemeleri kalınlık optimizasyonu, enerji tasarrufu ve geri ödeme süresi kullanmışlardır. Sudan'da farklı iklim koşullarına sahip olduğu şehir Hartum, Dongola, Port Sudan ve Nyala olmak üzere seçilen dört şehir için optimum ısı yalıtım kalınlığını hesaplamışlardır. Ekstrüde polistiren , Genişletilmiş polistiren ve Cam yünü olmak üzere de üç farklı yalıtım malzemesi uygulanan bir dış duvar için hesaplanan optimum yalıtım kalınlığı belirlemişlerdir. Ayrıca bu malzemeler ısıtılmış kil tuğla, delikli kırmızı tuğla ve çimento boşluklu blok olmak üzere üç farklı duvar tipi için uygulamışlar.

Sonuçlar, seçilen şehre bağlı olarak optimum yalıtım kalınlıklarının 6 ila 41 mm arasında değiştiğini göstermişlerdir. Hartum, Dongola, Port Sudan ve Nyala'da dış duvar için optimum yalıtım kalınlığı, delikli kırmızı tuğla kullanılan ekstrüde polistiren için sırasıyla 15,3, 14,2 , 13,5 ve 6,4 mm, delikli kırmızı tuğla için sırasıyla 19,1 , 17,7 , 16,8 ve 8 mm .Genleşmiş polistiren malzemesi delikli kırmızı tuğla kullandı ve cam yünü malzemesi

için sırasıyla 28,4 , 26,7 , 25,7 ve 14,9 mm delikli kırmızı tuğla kullanılmıştır .Üç yalıtım malzemesi ile seçilen her şehir için optimum yalıtım kalınlığına bağlı olarak enerji maliyet tasarrufu ve geri ödeme süreleri belirlemişlerdir. Yıllık enerji maliyeti tasarruf aralığı 0,4 ile 13,1 \$/m² arasında bulmuşlardır (Younis, 2020).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Derece Gün Yöntemi

Derece gün, ısıtma veya soğutma için bir ölçüdür. Mahsullerin ekimi, zararlıların yönetimi ve haşere kontrol zamanlamasını planlamak için uygun bir başlangıç tarihinden itibaren toplam derece günleri kullanılır. İklim kontrollü binaların ısıtma ve soğutma maliyetlerini izlemek için bir enerji izleme ve hedefleme şemasında haftalık veya aylık derece-gün rakamları kullanılabilirken, yıllık rakamlar gelecekteki maliyetlerin tahmin edilmesi için kullanılabilir. Derece gün, genellikle sıcaklığa göre değişen zamanın bir fonksiyonunun integrali olarak hesaplanır. İşlev, organizmaya göre değişen üst ve alt sınırlara veya iklim kontrolü için uygun sınırlara kesilir. Fonksiyon, her durumda seçilen bir taban sıcaklığına referansla aşağıdaki yöntemlerden biri ile tahmin edilebilir veya ölçülebilir (Karsavuran, 2015):

- Sık ölçümler ve sıcaklık açığı veya fazlalığının sürekli olarak entegre edilmesi.
- Her günün sıcaklık profilini, maksimum ve minimumdan ölçülen, günün sıcaklık değişimine eşit genliğe sahip bir sinüs dalgası olarak ele almak ve günlük sonuçları toplamak.
- Yukarıdaki gibi, ancak ortalama sıcaklık ile baz sıcaklık arasındaki günlük farkı hesaplayarak.
- Daha önce olduğu gibi, ancak maksimum ve minimumun temel sıcaklığı aştığı günlerde değiştirilmiş formüllerle.

Enerji izleme ve hedeflemede sıfır derece-gün, ısıtma veya soğutma tüketiminin minimumda olduğu zamandır; bu, enerji dağıtım şirketleri için enerji talebinde mevsimsel düşük noktaları ve evlerin ısıtılması ve soğutulması için gereken enerji tüketimini tahmin etmek için yararlı bir ölçümdür .Bu bağlamda resmi olarak ısıtma derecesi günleri olarak adlandırılır. İletim nedeniyle ısı çıkışı veya girişi, iç ve dış sıcaklık arasındaki farkla orantılı olduğundan, iç mekandaki temel sıcaklığı belirli bir süre korumak için gereken enerji miktarı, derece günlerinin sayısı ile kabaca orantılıdır. Örneğin, temel sıcaklık 18 °C ise ve dış sıcaklık bir gün boyunca 10 °C'de sabitse, bu 8 derece gün olarak sayılır. Bu hesaplamalar için kullanılan temel sıcaklığın, tipik bir iç ortam sıcaklığı ayarından 2–3 °C daha düşük olduğunu unutmayın çünkü bir bina, güneş radyasyonunun emilimi ve

sakinlerinin vücut ısısı nedeniyle doğal olarak çevredeki havadan biraz daha sıcak olacaktır .

Hartum ve İstanbul'daki binaların ısıtma ve soğutma düzenleri için enerji tüketimi, dış duvarlardaki yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu miktarı ve geri ödeme süresi Dercee-Gün yöntemi ile belirlenecektir.

3.2. Derece-Gün (DG) Hesaplamaları

Temel sıcaklık T_b , üretilen iç sıcaklığın dışarıdan gelen ısı kaybını veya kazancını telafi edeceği sıcaklıktır. Sonuç olarak, DG değerlerinin değerlendirilmesi, duvarlama kategorisi, yalıtım seviyesi, hava sızıntısının varlığı, gelen güneş ışığının erişilebilirliği vb. gibi çeşitli yapısal özelliklerin yanı sıra belirli iklim koşulları ve binayı kullanan insanların kişisel eğilimleri etki edebilir. Böylece derece-gün sayısı aşağıdaki denklemlere göre hesaplanır ve bu çalışmada İstanbul'da temel sıcaklık ısıtma ve soğutma için sırayla 18°C , 24°C Hartum'da ise 24°C , 18°C alınacaktır (Ahmet Canbolat, 2018).

$$\text{DG(IDG)} = \sum_{i=1}^n (T_b - T_{o,i}) \quad \text{Eğer } (T_o < T_b) \quad (3.1)$$

$$\text{DG(SDG)} = \sum_{i=1}^n (T_b - T_{o,i}) \quad \text{Eğer } (T_o > T_b) \quad (3.2)$$

$$T_{o,i} = \frac{T_{o,\max} + T_{o,\min}}{2} \quad (3.3)$$

Burada T_b iç sıcaklığı (temel sıcaklık) , T_o günlük ortalama dış hava sıcaklığı ve n ısıtma veya soğutma yapılan toplam gün sayısı. Günlük ortalama sıcaklık, günde ölçülen maksimum ve minimum sıcaklıkların ortalaması alınarak belirlenir.

3.3. Derece-Gün ve Güneş Radyasyonu Hesaplamaları

Güneş radyasyonunun etkisi hesaba katıldığında gerçeğe daha yakın tahminler yapılması mümkün olmaktadır. Bu bağlamda günlük ortalama dış hava sıcaklığına güneş radyasyonunun etkisi katılarak (T_{g-h}) şeklinde ifade edilen sıcaklık değerleri temel ve ara (45°) yönleri için hesaplanmıştır. Daha sonra bu çalışmada ısıtma ve soğutma

sezonlarındaki optimum yalıtım kalınlıkları hesaplandığı için ısıtma ve soğutma Derece-gün değerleri Eşitlik 3.4 ve 3.5 yardımıyla elde edilmiştir.

$$DG(IDG) = \sum_{i=1}^n (T_b - T_{g-h}) \quad \text{Eğer } (T_{g-h} < T_b) \quad (3.4)$$

$$DG(SDG) = \sum_{i=1}^n (T_b - T_{g-h}) \quad \text{Eğer } (T_{g-h} > T_b) \quad (3.5)$$

Güneş-hava sıcaklığı değerinin nelere bağlı olduğu aşağıdaki eşitlik 3.6'de görülmektedir.

$$T_{\text{güneş-hava}} = T_o + \frac{\alpha_s q_s}{h_o} - \frac{\varepsilon \sigma (T_o^4 - T_{\text{çevre}}^4)}{h_o} \quad (3.6)$$

Bu ifadede α_s yüzeyin güneş soğurma katsayısı bu çalışmada kırmızı tuğla (red brick) kullanmıştır $\alpha_s = 0,63$ (Yunus A. Çengel, 2015), h_o birleşik taşınım ve ışıınım ısı transfer katsayısı ve onun yerinde taşınım ısı katsayısı alınmıştır, q_s yüzeye gelen güneş ışıınımı değeri, ε yüzeyin yayma katsayısı, σ Stefan Boltzman sabiti, $T_{\text{güneş-hava}}$ çevreleyen yüzeylerin ortalama sıcaklığını temsil eder. İkinci terim, opak yüzey üzerindeki güneş ısı kazancı etkisini gösterirken, son terim, $T_{\text{çevre}}$ T_o 'dan farklıysa, yüzey ve ortam arasındaki radyasyon ısı transferindeki düzeltmeyi temsil eder. Uygulamada, radyasyon düzeltme etkisi dikey yüzeyler için 0°C'den yatay veya yukarı bakan yüzeyler için 3,9°C'ye kadar değişir (gökyüzü tepesi ortamın geri kalanından daha soğuktur). Muhafazakar olarak, açık ve koyu renkli yüzeylerin güneş absorpsiyonları sırasıyla 0,45 ve 0,90 alınmıştır. Bir binanın dış yüzeylerindeki ısı transfer katsayıları için önerilen yaz ve kış tasarım değerleri sırasıyla $h_o = 22,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $h_o = 34 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir (Ömer Kaynaklı, 2016). Atmosfer dışında yatay yüzeye düşen günlük güneş ışıınımı denklem 3.7 yardımıyla bulunurabilir.

$$\dot{q}_{o,h} = \frac{G_{s,c}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2 \pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta] \quad (3.7)$$

$$\frac{q_h}{q_{o,h}} = (a + b \frac{n}{N}) \quad (3.8)$$

$$a = 0,103 + 0,000017 Z + 0,198 \cos(\phi - \delta) \quad (3.9)$$

$$b = 0,533 - 0,165 \cos(\phi - \delta) \quad (3.10)$$

Yukarıdaki denklemlerde $G_{s,c}$ güneş sabiti, ω güneş batış saat açısı, δ deklinasyon açısı, ϕ enlem açısı, n yılın kaçınıcı günü olduğu, a ve b bölgeye bağlı sabitler, K_T berraklık

indeksi, n/N izafi güneşlenme süresi (Yiğit, 2018), , Z rakım olarak tanımlanmıştır . Tüm yönler hesaba katılarak tespit edilen güneş ışıının geliş açısı (θ) eşitlik 3.11 yardımıyla bulunmuştur.

$$\cos\theta = \sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\gamma\sin\omega \quad (3.11)$$

Doğu, batı, kuzey ve güney yönündeki tüm dik yüzeylerde kullanılmak üzere Eşitlik 3.11’de β yerine 90° yazıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilir. Yatay yüzeye düşen güneş ışıının geliş açısı θ_z , β yerine 0° yazılarak elde edilebilir.

$$\cos\theta = -\sin\delta\cos\phi\cos\gamma + \cos\delta\sin\phi\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\gamma\sin\omega \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklem tüm yönler için geçerlidir. Burada γ yüzeyin azimut açısını temsil etmektedir. Güney, batı, kuzey ve doğu yönlerine bakan dik yüzeyler için γ yerine sırasıyla 0° , 90° , 180° ve 270° yazılarak güneş ışıının geliş açısı yöne bağlı olarak özelleştirilebilir. Yatay yüzeye düşen günlük toplam güneş ışıının yayılı ve direkt kısımlarının hesaplanmasında aşağıdaki eşitliklerden yararlanılmıştır.

$$\frac{q_{h,d}}{q_h} = (0,703 - 0,414 K_T - 0,428 K_T^2) \quad (3.13)$$

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (3.14)$$

$$q_s = q_h \left(1 - \frac{q_{h,d}}{q_h}\right) R_b + q_{h,d} \left(1 + \frac{\cos\beta}{2}\right) + q_h \rho \left(1 - \frac{\cos\beta}{2}\right) \quad (3.15)$$

Bu denklemlerde $q_{h,d}$ yatay yüzeye düşen ortalama günlük yayılı ışıını, ρ yerin yansıtma oranını $\rho = 0,2$ (Ömer Kaynaklı, 2016).

3.4. Dış Duvarlar için Isıtma ve Soğutma Yükleri

Duvarlar aracılığıyla binanın içine ve dışına ısı transferi, radyasyon, iletim ve konveksiyon süreçlerini içerir. Güneş radyasyonu, daha sonra duvarın kütlesi boyunca aktarılan ısı üretmek için duvarların dış yüzeyinde doğrudan emilebilir. Daha fazla ısı, hem dış hem de iç duvar yüzeyleri ile temas halindeki atmosferin konvektif hareketleri ile aktarılabilir. Dış duvarın birim yüzey alanı başına kaybedilen veya kazanılan ısı miktarı denklem elde edilir.

$$Q = U (T_i - T_o) \quad (3.16)$$

U duvarın toplam ısı transfer katsayısı, T_i , T_o sırayla iç ve dış hava sıcaklığı. Yalıtım dış duvarları için toplam ısı transfer katsayısı denklem 3.17 ile verilmektedir.

$$U = \frac{1}{R_i + R_w + \frac{x_{ins}}{K_{ins}} + R_o} \quad (3.17)$$

Burada R_i ve R_o sırasıyla iç ve dış ortamın ısı transfer katsayılarıdır, R_w yalıtımsız duvarın ısı direncidir, x ve k sırasıyla yalıtım malzemesinin kalınlığı ve ısı iletkenlik katsayısıdır. Yalıtılmamış duvar tabakasının toplam direnci $R_{w,t}$ aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenir. Daha sonra toplam ısı transfer katsayısı U denklemdeki gibi ifade edebilir.

$$R_{w,t} = R_i + R_w + R_o \quad (3.18)$$

$$U = \frac{1}{R_{w,t} + \frac{x_{ins}}{K_{ins}}} \quad (3.19)$$

IDG ve SDG konseptini kullanarak, birim yüzey alanı için yıllık ısı kaybı aşağıdaki denklemle bulunabilir.

$$Q_{year} = 86400 \text{ IDG } U \quad (3.20)$$

$$Q_{year} = 86400 \text{ SDG } U \quad (3.21)$$

3.5 Ekonomik Analiz ve Optimum Yalıtım Kalınlığı

Ekonomik değerlendirme tekniklerinden biri de, bir tesise sahip olmanın ve işletmenin zaman içinde toplam maliyetini belirleyen LCC analizidir. Yalıtım malzemesinin kalınlığı arttıkça yalıtım maliyetinin arttığı, ısıtma ,soğutma yüküleri ve enerji maliyetinin azaldığı açıktır.

Daha fazla yalıtım eklemek, kalınlığıyla orantılı olarak kullanılan malzemenin toplam maliyetini artırır. Ekstra yalıtım kalınlığının maliyeti, daha sonra azaltılmış ısıtma veya soğutma maliyetine karşı dengelenmelidir. Optimum yalıtım kalınlığı, toplam maliyetin minimum olduğu kalınlıktır. Optimum olanın dışında bir kalınlık değeri seçmek toplam maliyeti artırır. Optimizasyonda dikkate alınacak toplam maliyet (C_t), yalıtım malzemesinin maliyeti ($C_{t,ins}$), yalıtımın ek maliyetinin (C_{ad}) ve ısıtmanın enerji tüketiminin maliyetinin bugünkü değerinin toplamıdır. veya binanın ömrü boyunca ısıtma sistemi ($C_{h,pv}$). Bu nedenle, duvarın birim alanı başına toplam ısıtma maliyeti şu şekilde ifade edilir.

$$C_t = C_{t,ins} + C_{h,pv} = C_{ins} \cdot x + C_h \cdot PWF \quad (3.22)$$

burada C_{ins} , USD/m³ olarak birim hacim başına yalıtım malzemesi maliyeti, C_{ad} USD/m² olarak duvar alanı birimi başına yalıtımın kurulum maliyeti, C_h , USD/ m² olarak ısıtma ve soğutma için mevcut yıllık toplam enerji tüketimi maliyetidir. ve PWF, mevcut değer faktörüdür. Enflasyon oranı i , iskonto oranı g ve binanın beklenen kullanım ömrünün (yıl olarak LT) bir fonksiyonu olarak PWF şu şekilde hesaplanır.

$$PWF = \left(\frac{1+i}{g-i}\right) \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+g}\right)^{LT}\right] \quad \text{eğer } g \neq i \quad (3.23)$$

$$PWF = \frac{LT}{1+g} \quad \text{eğer } g = i \quad (3.24)$$

LT, burada 20 yıl olarak alınan beklenen yaşam süresidir. Mevcut enflasyon ve iskonto oranları Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası ve Türkiye İstatistik Kurumu'ndan alınmıştır (TCMB, 2022). Yalıtım maliyetleri (malzeme ve montaj) yerel yalıtım firmalarından (uygulayıcılar ve satıcılar) alınmıştır. Binanın yıllık ısıtma ve soğutma maliyeti, yakıt tüketimine ve yakıt maliyetine bağlıdır. Denk 3.25'de yıllık toplam maliyet ($C_{t,a}$) ve denklem.3.26 dikkate alınarak ($x_{opt,a}$) optimum yalıtım kalınlığı şu şekilde hesaplanabilir.

$$C_{t,a} = C_{ins} x + C_{ad} + \left[\frac{86400 PWF}{\left(R_{w,t} + \frac{x_{ins}}{k_{ins}}\right)} \right] \left[\frac{C_f HDD}{LHV \zeta} + \frac{C_e CDD}{COP} \right] \quad (3.25)$$

$$x_{opt,a} = \left[\frac{86400 PWF K (C_f HDD / \zeta LHV + C_e CDD / COP)}{C_{ins}} \right]^{\frac{1}{2}} - R_{w,t} K \quad (3.26)$$

Dış duvarda kullanılan izolasyon sadece ısıtma maliyetine değil soğutma maliyetine de bağlıdır. Bu nedenle ekonomik açıdan optimum yalıtım kalınlığı hesaplanırken hem ısıtma hem de soğutma enerjisi gereksinimleri birlikte düşünülmelidir. Sistemin ömrü boyunca ısıtma ve soğutma enerjisi maliyet tasarrufları (ECS), yalıtımsız ve yalıtımlı binalarda ısıtma ve soğutma maliyetleri arasındaki fark ile hesaplanır. Optimum yalıtım kalınlığı ile birim duvar alanı başına ısıtma ve soğutma enerjisi maliyeti tasarrufları şu şekilde belirlenebilir.

$$ECS = C_{t,a@x=0} - C_{t,a@x=x_{opt,a}} \quad (3.27)$$

Geri ödeme süresi, yatırımın geri kazanılması için gereken yıl sayısını gösterir. Malzeme ve kurulum maliyetlerini içeren toplam yalıtım maliyetinin, aşağıdaki gibi verilen yıllık enerji maliyeti tasarrufuna bölünmesiyle hesaplanabilir.

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{C_{\text{ins}} x_{\text{opt,a}} + C_{\text{ad}}}{\text{ECS/LT}} \quad (3.28)$$

Çizelge 3.1. Yakıt, yalıtım özellikleri ve finansal parametreler

Parametre	Değer
Doğal gaz Alt ısı (LHV)	34526000 J/m ³
Doğal gaz fiyat (C _f) (İGDAŞ, 2022)	0,4 USD/ m ³
Elektrik fiyat (C _e) (CK, 2022)	0,13 USD/kWh
Isıtma sisteminin verimi (ζ)	0,93
Soğutma performans katsayısı (COP) (M.K. Nematchoua, 2017)	2,5
Yalıtım malzemesi (polyarethane) Isı iletim katsayısı (K)	0,034 W/m K
Yalıtım malzemesi (polyarethane) fiyat (C _{ins}) (san.tic.ltd.şti, 2022)	150 USD/m ³
yalıtımın kurulum maliyeti (C _{ad}) (san.tic.ltd.şti, 2022)	15 USD/m ²
Faiz oranı (i)	0,14
Enflasyon oranı (g)	0,13
Ömür (LT)	20 yıl
Şimdiki değer (PWF)	18,3
R _{t,w}	0,6125

Çizelge 3.2. Duvar özellikleri

Malzeme	Kalınlık (m)	Isı iletim katsayısı(w/m.k)
İç sıva	0,02	0,87
Delikli tuğla	0,19	0,45
Yalıtım poliüretan(polyurethane)	x	0,034
Dış sıva	0.015	0,87

Çizelge 3.3. Güneş radyasyonunun etkisi olmadan IDG ve SDG değerleri

Şehir	Boylam(Longitude)	Enlem(Latitude)	Rakım(Altitude)(m)	IDG	SDG
Istanbul	29,05	40,58	39	1568,7	163,4
Hartoum	32,52	15,51	381	36,8	4727

4. BULGULAR

4.1. Güneş Radyasyonu Etkisi Olmaksızın Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Ekonomik Analizi

İstanbul ve Hartum şehirlerinde güneş radyasyonu etkisini olmadığı halinde optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizi hesaplamıştır.

4.1.1. İstanbul'da, ısıtma ve soğutma modunda optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizinin hesapları

Eşitlik 3.25, 3.26, 3.27, 3.28'noları denklem ile optimum yalıtım kalınlığı, yıllık enerji maliyetlerini, enerji tasarrufu ve geri ödeme süresini hesaplanabilir. Çizelge 3.1., 3.2. ve 3.3.'deki veriler kullanılarak örnek bir hesaplama yapılmıştır.

$$X_{opt,a} = \left[\frac{86400 \cdot 16.4 \cdot 0.034 (0.50 \cdot 1568.7 / 0.93 \cdot 34526000 + 4.166 \cdot 10^{-8} \cdot 163.4 / 2.5)}{260} \right]^{\frac{1}{2}} - 0.6125 \cdot$$

$$0.034 = \underline{0,054} \text{ m}$$

$$C_{t,a} = 260 \cdot 0.054 + 20 + \left[\frac{86400 \cdot 16.4}{(0.6125 + \frac{0.054}{0.034})} \right] \left[\frac{0.5 \cdot 1568.7}{34526000 \cdot 0.93} + \frac{4.166 \cdot 10^{-8} \cdot 163.4}{2.5} \right] = \underline{51,14} \text{ USD/m}^2$$

$$C_{t,a \ x=0} = 260 \cdot 0 + 20 + \left[\frac{86400 \cdot 16.4}{(0.6125 + \frac{(0)}{0.034})} \right] \left[\frac{0.5 \cdot 1568.7}{34526000 \cdot 0.93} + \frac{4.166 \cdot 10^{-8} \cdot 163.4}{2.5} \right] = \underline{81,42} \text{ USD/m}^2$$

$$ECS = 81,42 - 51,14 = \underline{30,3} \text{ USD/m}^2$$

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{51,14 \cdot (0,054) + 20}{30,3/20} = \underline{15} \text{ yıl}$$

4.1.2. Hartum, ısıtma ve soğutma modunda optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizinin hesapları

Yukarıdaki gibi Hartum için eşitlik 3.25., 3.26., 3.27., 3.28'noları denklem vasıtasıyla optimum yalıtım kalınlığı, yıllık enerji maliyetlerini, enerji tasarrufu ve geri ödeme süresini hesaplanabilir. Çizelge 3.1., 3.2. ve 3.3.'deki veriler kullanılarak örnek bir hesaplama da yapılmıştır.

$$X_{opt,a} = \left[\frac{86400 \cdot 16.4 \cdot 0.034 (0.50 \cdot 36.8 / 0.93 \cdot 34526000 + 4.166 \cdot 10^{-8} \cdot 4727 / 2.5)}{260} \right]^{\frac{1}{2}} - 0,6125 \cdot 0,034$$

$$= \underline{0,107} \text{ m}$$

$$C_{t,a} = 260 \cdot 0.107 + 20 + \left[\frac{86400 \cdot 16.4}{(0.6125 + \frac{0.107}{0.034})} \right] \left[\frac{0.5 \cdot 36.8}{34526000 \cdot 0.93} + \frac{4.166 \cdot 10^{-8} \cdot 4727}{2.5} \right] = \underline{81,08} \text{ USD/ m}^2$$

$$C_{t,a \ x=0} = 260 * 0 + 20 + \left[\frac{86400 * 16.4}{\left(0.6125 + \frac{(0)}{0.034}\right)} \right] \left[\frac{0.5 * 36.8}{34526000 * 0.93} + \frac{4.166 * 10^{-8} * 4727}{2.5} \right] = \underline{224,17} \text{ USD/ m}^2$$

$$ECS = 224,17 - 81,08 = \underline{143} \text{ USD/m}^2$$

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{81,08 * 0.107 + 20}{143/20} = \underline{4} \text{ yıl}$$

4.2. Güneş Işınımının Hesaplaması

4.2.1. İstanbul şehrinde güneş ışınımının hesaplaması

❖ Deklinasyon açısı (δ) ve saat açısı (ω) hesaplaması:

17. Ocak ve 11. Haziran günlerinde örnek olarak sırayla deklinasyon açısı ve saat açısı aşağıdaki formalar ile hesaplanır ve 3-1 şeklinde yıl boyunca değişimleri gösterilmektedir :

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 * \frac{284+n}{365} \right) \text{ veya } \delta = -23,45 \cos (0,986 * (n+10.5))$$

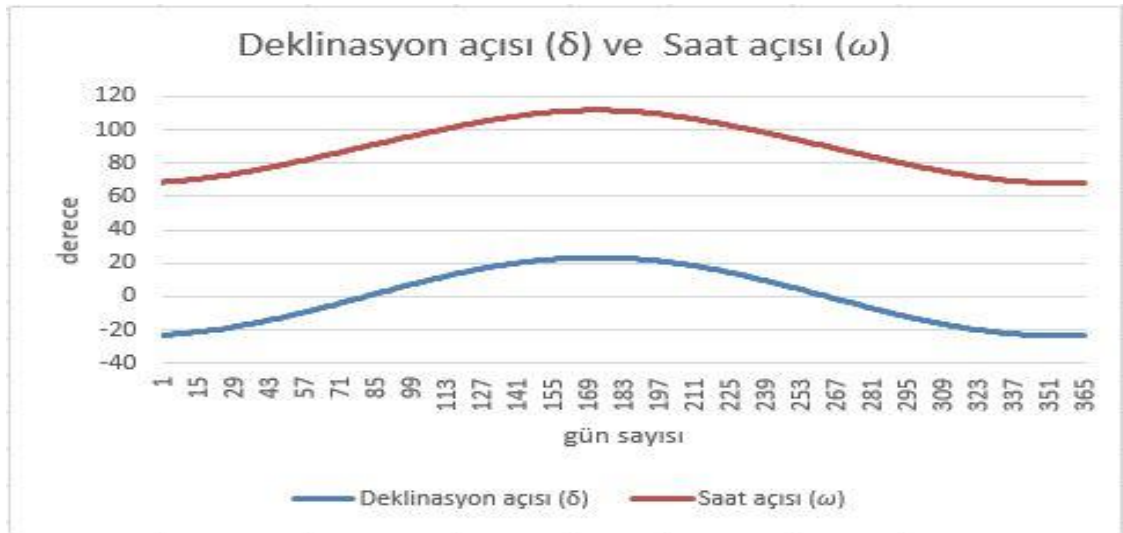
$$\cos \omega = - \tan \phi \tan \delta$$

$$\delta = -23,45 \cos (0,986 * (17+10.5)) = \underline{-20,87}^\circ$$

$$\omega = \cos^{-1}(- \tan 40,58 \tan (-20,87)) = \underline{70,9}^\circ$$

$$\delta = -23,45 \cos (0,986 * (162+10.5)) = \underline{23,10}^\circ$$

$$\omega = \cos^{-1}(- \tan 40,58 \tan (23,10)) = \underline{111,4}^\circ$$



Şekil 4.1. Deklinasyon açısı (δ) ve Saat açısı (ω) değişimi

❖ **Atmosfer dışında yatay yüzeye düşen günlük güneş ışıını hesaplaması**

İstanbul'da 17 Ocak ve 11 Haziran günleri örnek olarak sırayla atmosfer dışında yataya düşen günlük güneş ışıını $\dot{q}_{o,h}$ denklem 3.7 yardımıyla bulunur ve 4.2 şeklinde yıl boyu nasıl değışir gösterir.

$$\dot{q}_{o,h} = \frac{24 \cdot 3600 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot 17}{365}\right) \right]$$

$$* [\cos 40,58 \cos(-20,87) \sin 70,9 + \frac{2 \pi \cdot 70,9}{360} \sin 40,58 \sin(-20,87)]$$

$$\dot{q}_{o,h} = \underline{14,9} \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

$$\dot{q}_{o,h} = \frac{24 \cdot 3600 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot 162}{365}\right) \right]$$

$$* [\cos 40,58 \cos 23,10 \sin 111,4 + \frac{2 \pi \cdot 111,4}{360} \sin 40,58 \sin 23,10] = \underline{41,8} \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$



Şekil 4.2. Atmosfer dışında yatay düzleme düşen günlük güneş ışıınıının değışimi

❖ **Bölgeye bağılı sabitler hesaplaması**

İstanbul'da (a) ve (b) sabitler 17. Ocak ve 11. Haziran günleri için sırayla eşitlikler 3.9. ve 3.10. yardımıyla bulunur:

$$a = 0,103 + 0,000017 \cdot 39 + 0,198 \cos(40,58 - (-20,87)) = \underline{0,198}$$

$$b = 0,533 - 0,165 \cos(40,58 - (-20,87)) = \underline{0,454}$$

$$a = 0,103 + 0,000017 \cdot 39 + 0,198 \cos(40,58 - (23,10)) = \underline{0,293}$$

$$b = 0,533 - 0,165 \cos(40,58 - (23,10)) = \underline{0,376}$$

❖ Yatay yüzeye düşen günlük ortalama güneş ışıının miktarının hesaplaması

İstanbul'da 17. Ocak ve 11. Haziran günlerinde örnek olarak eşitlik 3.8. yardımıyla ve yılın değişimi aşağıdaki gibidir:

$$\dot{q}_h = 14,9 * (0,198 + 0,454 * 0,27) = \underline{4,78} \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

$$\dot{q}_h = 41,8 * (0,293 + 0,376 * 0,71) = \underline{23,3} \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$



Şekil 4.3. Yatay yüzeye düşen günlük ortalama güneş ışıının değişimi

❖ Berraklık indeksi (K_T) değeri hesaplaması

İstanbul'da 17. Ocak ve 11. Haziran günleri için sırayla berraklık indeksi (K_T) aşağıdaki Formayla bulabilir;

$$K_T = \dot{q}_h / \dot{q}_{o,h}$$

$$K_T = \frac{4.78}{14.9} = \underline{0,321} \quad , \quad K_T = \frac{23.3}{41.8} = \underline{0,559}$$

❖ Yatay yüzeye düşen günlük yayılı ve direkt güneş ışıının hesaplaması

İstanbul'da 17. Ocak ve 11. Haziran günlerinde sırayla yatay yüzeye düşen günlük yayılı ve direkt güneş ışıının eşitlik(13) ile hesaplanır ve 4.4. şeklinde yılın değişimi gösteririr.

$$\dot{q}_{h,d} = 4,78 * (0,703 - 0,414 * 0,321 - 0,428 * (0,321)^2) = \underline{2,49} \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

$$\dot{q}_{h,b} = \dot{q}_h - \dot{q}_{h,d} = 4,78 - 2,49 = \underline{2,26} \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

$$\dot{q}_{h,d} = 23,3 * (0,703 - 0,414 * 0,559 - 0,428 * (0,559)^2) = \underline{7,89} \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

$$\dot{q}_{h,b} = \dot{q}_h - \dot{q}_{h,d} = 23,3 - 7,89 = \underline{15,5} \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$



Şekil 4.4. direkt ve yayılı güneş ışınımının değişimi

❖ Temel ve ara yönler için güneş ışınımının geliş açısının (θ) hesaplaması

İstanbul'da 17. Ocak gününde örnek olarak geliş açısı dik yüzelerinde eşitlik (11) yardımıyla bulunur ve 4.5. ve 4.6. şekillerinde yılın değışiklerini gösterebilmektedir.

Güney yönü için; $\gamma = 0^\circ$ ve $\beta = 90^\circ$

$$\cos \theta = \cos \delta \sin \phi \cos \omega - \sin \delta \cos \phi$$

$$\cos \theta = \cos(-20,87) \sin(40,58) \cos(70,9) - \sin(-20,87) \cos(40,58) = \underline{0,47^\circ}$$

Batı yönü için; $\gamma = 90^\circ$ ve $\beta = 90^\circ$

$$\cos \theta = - \sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega$$

$$\cos \theta = - \sin(-20,87) \cos(40,58) \cos(90) + \cos(-20,87) \sin(40,58) \cos(90) \cos(70,9) + \cos(-20,87) \sin(90) \sin(70,9) = \underline{0,88^\circ}$$

Kuzey yönü için; $\gamma = 180^\circ$ ve $\beta = 90^\circ$

$$\cos \theta = - \sin(-20,87) \cos(40,58) \cos(180) + \cos(-20,87) \sin(40,58) \cos(180) \cos(70,9) + \cos(-20,87) \sin(180) \sin(70,9) = \underline{-0,47^\circ}$$

Doğu yönü için; $\gamma = 270^\circ$ ve $\beta = 90^\circ$

$$\cos \theta = -\sin(-20,87) \cos(40,58) \cos(270) + \cos(-20,87) \sin(40,58) \cos(270) \cos(70,9) + \cos(-20,87) \sin(270) \sin(70,9) = \underline{\underline{-0,88^\circ}}$$

Güney- Batı yönü için; $\gamma = 45^\circ$ ve $\beta = 90^\circ$

$$\cos \theta = -\sin(-20,87) \cos(40,58) \cos(45) + \cos(-20,87) \sin(40,58) \cos(45) \cos(70,9) + \cos(-20,87) \sin(45) \sin(70,9) = \underline{\underline{0,96^\circ}}$$

Kuzey – Batı yönü için; $\gamma = 135^\circ$ ve $\beta = 90^\circ$

$$\cos \theta = -\sin(-20,87) \cos(40,58) \cos(135) + \cos(-20,87) \sin(40,58) \cos(135) \cos(70,9) + \cos(-20,87) \sin(135) \sin(70,9) = \underline{\underline{0,29^\circ}}$$

Kuzey – Doğu yönü için; $\gamma = 225^\circ$ ve $\beta = 90^\circ$

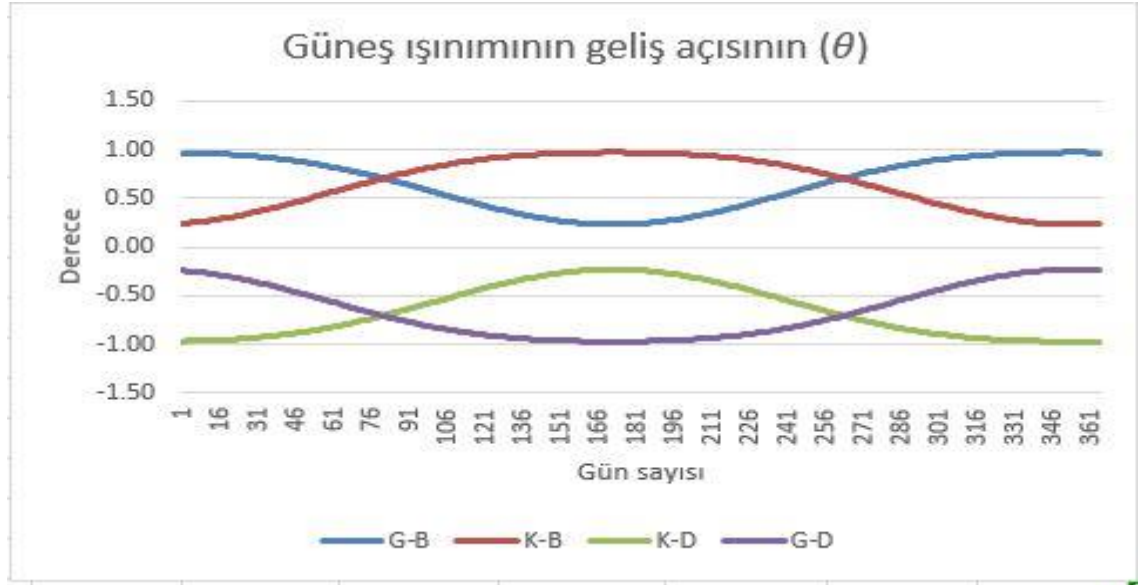
$$\cos \theta = -\sin(-20,87) \cos(40,58) \cos(225) + \cos(-20,87) \sin(40,58) \cos(225) \cos(70,9) + \cos(-20,87) \sin(225) \sin(70,9) = \underline{\underline{-0,96^\circ}}$$

Güney- Doğu yönü için; $\gamma = 315^\circ$ ve $\beta = 90^\circ$

$$\cos \theta = -\sin(-20,87) \cos(40,58) \cos(315) + \cos(-20,87) \sin(40,58) \cos(315) \cos(70,9) + \cos(-20,87) \sin(315) \sin(70,9) = \underline{\underline{-0,29^\circ}}$$



Şekil 4.5. Temel yönler için güneş ışıının geliş açısının (θ) değişimi



Şekil 4.6. Ara yönler için güneş ışınlamının geliş açısının (θ) değişimi

❖ Yatay yüzey için güneş geliş açısı (zenit açısı) (θ_z)

İstanbul’da 17. Ocak ve 11. Haziran günleri için öğrenk olarak zenit açısı aşağıdaki eşitlik ile bulunur;

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi$$

$$\cos \theta_z = \cos(-20,87) \cos (40,58) \cos (70,9) + \sin (-20,87) \sin (40,58) = \underline{0,95}^\circ$$

$$\cos \theta_z = \cos(23,10) \cos (40,58) \cos (111,4) + \sin (23,10) \sin (40,58) = \underline{0,99}^\circ$$

❖ Geometrik faktör (R_b)

İstanbul’da 17. Ocak günü için denklem 3.14’olu yardımıyla bulunur;

$$\text{Güney yönü için; } R_b = \frac{0.47}{0.95} = \underline{0,495}$$

$$\text{Batı yönü için; } R_b = \frac{0.88}{0.95} = \underline{0,931}$$

$$\text{Kuzey yönü için; } R_b = \frac{-0.47}{0.95} = -\underline{0,495} \rightarrow R_b = \underline{0,00}$$

$$\text{Doğu yönü için; } R_b = \frac{-0.88}{0.95} = -\underline{0,931} \rightarrow R_b = \underline{0,00}$$

$$\text{Güney - Batı yönü için; } R_b = \frac{0.96}{0.95} = \underline{1,01}$$

$$\text{Kuzey - Batı yönü için; } R_b = \frac{0.29}{0.95} = \underline{0,31}$$

$$\text{Kuzey - Doğu yönü için; } R_b = \frac{-0.96}{0.95} = -\underline{1,01} \rightarrow R_b = \underline{0,00}$$

Güney - Doğu yönü için; $R_b = \frac{-0.29}{0.95} = -0.31 \rightarrow R_b = 0.00$

Aynı şekilde Geometrik faktör (R_b) temel ve ara yönler için 11. Haziran günü için n = 162 tablo halinde gösterebilmektedir:

Çizelge 4.1. İstanbul’da 11. Haziran günü için geometrik faktörü (R_b)

Temel yönler	Güney	Batı	Kuzey	Doğu
R_b	0,00	0,87	0,52	0,00
Ara yönler	G – B (45°)	K – B (45°)	K – D (45°)	G – D (45°)
R_b	0,24	0,98	0,00	0,00

❖ **Yüzeye düşen günlük toplam güneş ışıınımı**

İstanbul’da 17. Ocak günü öğrenk gibi her yön için günlük toplam güneş ışıınımı denk 3.15 yardımıyla bulunur ve 4.7, 4.8 şekillerinde yılın değişimi gösterebilmektedir;

Güney duvar için;

$$q_s = 4,78 * (1 - \frac{2.51}{4.78}) * 0,495 + 2,51 * (1 + \frac{\cos(90)}{2}) + 4,78 * 0,20 (1 - \frac{\cos(90)}{2})$$

$$q_s = 2,85 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

Batı duvar için;

$$q_s = 4,78 * (1 - \frac{2.51}{4.78}) * 0,931 + 2,51 * (1 + \frac{\cos(90)}{2}) + 4,78 * 0,20 (1 - \frac{\cos(90)}{2})$$

$$q_s = 3,84 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

Kuzey duvar için;

$$q_s = 4,78 * (1 - \frac{2.51}{4.78}) * (0) + 2,51 * (1 + \frac{\cos(90)}{2}) + 4,78 * 0,20 (1 - \frac{\cos(90)}{2})$$

$$q_s = 1,73 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

Doğu duvar için;

$$q_s = 4,78 * (1 - \frac{2.51}{4.78}) * (0) + 2,51 * (1 + \frac{\cos(90)}{2}) + 4,78 * 0,20 (1 - \frac{\cos(90)}{2})$$

$$q_s = 1,73 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

Güney- Batı duvar için;

$$q_s = 4,78 * (1 - \frac{2.51}{4.78}) * 1,01 + 2,51 * (1 + \frac{\cos(90)}{2}) + 4,78 * 0,20 (1 - \frac{\cos(90)}{2})$$

$$q_s = 4,02 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

Kuzey- Batı duvar için;

$$q_s = 4,78 * (1 - \frac{2.51}{4.78}) * 0,31 + 2,51 * (1 + \frac{\cos(90)}{2}) + 4,78 * 0,20 (1 - \frac{\cos(90)}{2})$$

$$q_s = 2,43 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

Kuzey- Doğu duvar için;

$$q_s = 4,78 * (1 - \frac{2,51}{4,78}) * (0) + 2,51 * (1 + \frac{\cos(90)}{2}) + 4,78 * 0,20 (1 - \frac{\cos(90)}{2})$$

$$q_s = \underline{1,73} \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

Güney- Batı duvar için;

$$q_s = 4,78 * (1 - \frac{2,51}{4,78}) * (0) + 2,51 * (1 + \frac{\cos(90)}{2}) + 4,78 * 0,20 (1 - \frac{\cos(90)}{2})$$

$$q_s = \underline{1,73} \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$$

Aynı şekilde 11. Haziran gününde yüzeye düşen günlük toplam ışıınım temel ve ara yönler için çizelge halinde aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.2. İstanbul’da 11. Haziran günü için günlük toplam güneş ışıınımı

Temel yönler	Güney	Batı	Kuzey	Doğu
$q_s(\text{MJ/m}^2\text{-gün})$	6,28	19,7	14,4	6,28
Ara yönler	G – B (45°)	K – B (45°)	K – D (45°)	G – D (45°)
$q_s(\text{MJ/m}^2\text{-gün})$	10,0	21,5	6,28	6,28



Şekil 4.7. Dik yüzeye düşen günlük toplam güneş ışıınımının (q_s) değişimi



Şekil 4.8. Ara yönleri günlük toplam güneş ışıınının (q_s) değışimi

4.2.2. Hartum şehrinde güneş ışıınının hesaplaması

Yukarıdaki formalar kullanarak bütün Hartum değeri hesaplanabilir . 17. Ocak ve 15. Mayıs günleri örnek olarak sırayla temel ve Ara yönler için günlük toplam güneş ışıınının (q_s) tablo halinde gösterebilmektedir. Ayrıca bu değeri nasıl değışir şekil 4.9 ve şekil 4.10'da görebilmektedir

Çizelge 4.3. Hartum'da temel yönler için güneş ışıını hesapları

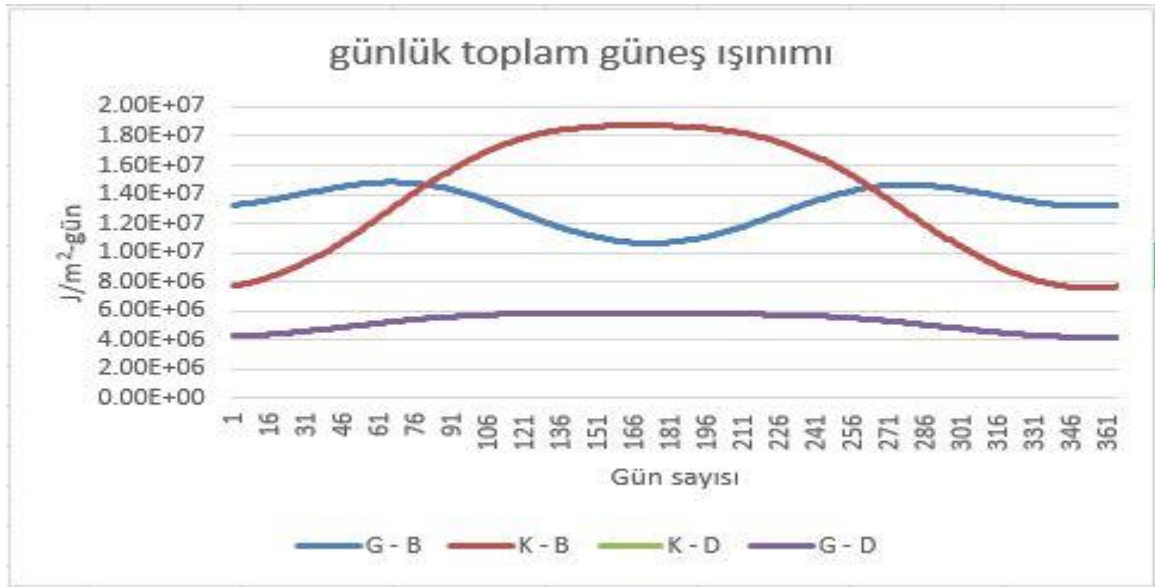
n	q_s (MJ/m ² -gün)(Y)	q_s (MJ/m ² -gün)(G)	q_s (MJ/m ² -gün)(B)	q_s (MJ/m ² -gün)(K)	q_s (MJ/m ² -gün)(D)
17	15,6	8,11	13,7	4,38	4,38
135	21,3	5,80	19,0	10,4	5,80

Çizelge 4.4. Hartum'da ara yönler için güneş ışıını hesapları

n	q_s (MJ/m ² -gün)(G-B)	q_s (MJ/m ² -gün)(K-B)	q_s (MJ/m ² -gün)(K-D)	q_s (MJ/m ² -gün)(G-D)
17	13,6	8,36	4,38	4,38
135	11,8	18,4	5,80	5,80



Şekil 4.9. Temel yönleri dik yüzeye düşen günlük toplam güneş ışınlamının (q_s) değişimi



Şekil 4.10. Ara yönleri dik yüzeye düşen günlük toplam güneş ışınlamının (q_s) değişim

4.3. Güneş Radyasyonunun Etkisini Altında Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Ekonomik Analizi

4.3.1. Güneş- hava sıcaklığının hesaplaması

İstanbul'da temel yönler için güneş-hava sıcaklığı T_{g-h} 17.Ocak belirli günde örnek olarak değeri denklem 3.6 ile hesaplanabilir:

$$\text{Yatay yönü için; } T_{g-h} = T_o + \frac{\alpha_s q_s(Y)}{h_o} = 8,55 + \frac{0,63 \cdot 4,78 \cdot 34}{24 \cdot 60 \cdot 60} = \underline{9,6} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Güney yönü için; } T_{g-h} = T_o + \frac{\alpha_s \dot{q}_s(G)}{h_o} = 8,55 + \frac{0.63 \cdot 2.85 \cdot 34}{24 \cdot 60 \cdot 60} = \underline{9,2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Batı yönü için; } T_{g-h} = T_o + \frac{\alpha_s \dot{q}_s(B)}{h_o} = 8,55 + \frac{0.63 \cdot 3.84 \cdot 34}{24 \cdot 60 \cdot 60} = \underline{9,4} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Kuzey yönü için; } T_{g-h} = T_o + \frac{\alpha_s \dot{q}_s(K)}{h_o} = 8,55 + \frac{0.63 \cdot 1.73 \cdot 34}{24 \cdot 60 \cdot 60} = \underline{8,9} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Doğu yönü için; } T_{g-h} = T_o + \frac{\alpha_s \dot{q}_s(D)}{h_o} = 8,55 + \frac{0.63 \cdot 2.85 \cdot 34}{24 \cdot 60 \cdot 60} = \underline{9,2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Hartum’da ise temel ve ara yönler için 15. Mayıs belirli günde örnek olarak güneş-hava sıcaklığı (T_{g-h}) değerleri aynı denklem 3.6 kullanarak hesaplanabilir ve tablo halinde gösterebilmektedir.

Çizelge 4.5. Hartum’da, 15. Mayıs gününde güneş-hava sıcaklığı(T_{g-h})

T_{g-h} (°C)	yatay	güney	batı	kuzey	doğu	G-B(45°)	K-B(45°)	K-D(45°)	G-D(45°)
	22,9	19,7	22,3	20,9	19,7	20,6	22,4	19,7	19,7

4.3.2. Güneş radyasyonunun etkisini altında Derece-Gün hesaplaması

❖ İstanbul’da temel yönler için Derece-Gün (IDG/SDG) değerleri denklem 3.4 ve 3.5 yardımıyla bulunabilir;

Yatay yönü için;

$$DG(IDG) = \sum_{n=1}^{365} (18 - T_{g-h}) = 1179.3 \quad DG(SDG) = \sum_{n=1}^{365} (24 - T_{g-h}) = 537.5$$

Güney yönü için;

$$DG(IDG) = \sum_{n=1}^{365} (18 - T_{g-h}) = 1396.4 \quad DG(SDG) = \sum_{n=1}^{365} (24 - T_{g-h}) = 240.2$$

Batı yönü için;

$$DG(IDG) = \sum_{n=1}^{365} (18 - T_{g-h}) = 1232.5 \quad DG(SDG) = \sum_{n=1}^{365} (24 - T_{g-h}) = 472.3$$

Kuzey yönü için;

$$DG(IDG) = \sum_{n=1}^{365} (18 - T_{g-h}) = 1425.5 \quad DG(SDG) = \sum_{n=1}^{365} (24 - T_{g-h}) = 330.5$$

Doğu yönü için;

$$DG(IDG) = \sum_{n=1}^{365} (18 - T_{g-h}) = 1439.8 \quad DG(SDG) = \sum_{n=1}^{365} (24 - T_{g-h}) = 240.2$$

Ara yönler için Derece-Gün (IDG/SDG) değerleri yukarıdaki gibi denklemler kullanarak çizelge 4.6. halinde koyabilmektedir.

Çizelge 4.6. İstanbul’da, ara yönler için Derece-Gün (IDG/SDG) değerleri

Ara yönler	G – B (45°)	K – B (45°)	K – D (45°)	G – D (45°)
IDG	1272	1313,1	1439,8	1439,8
SDG	312	480	240	240

Hartum’da Derece-Gün (IDG/SDG) değerleri aynı denklemler kullanarak bulunabilir ve çizelge 4.7. halinde gösterebilmektedir.

Çizelge 4.7. Hartum’da, temel ve ara yönler için Derece-Gün (IDG/SDG) değerleri

Temel yönler	yatay	güney	batı	kuzey	doğu
IDG	2,5	13,2	3,5	19,8	19,8
SDG	6207	5242.5	6052.2	5277.8	5134.3
Ara yönler	-	G – B (45°)	K – B (45°)	K – D (45°)	G – D (45°)
ISD	-	4,5	8,9	19,8	19,8
SDG	-	5761,3	5811,2	5134,3	5134,3

4.3.3. Optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizinin hesaplaması

İstanbul’da güneş radyasyonunun etkisini elde ederek temel yönler için optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizinin hesapları.

Yatay yönü için;

$$X_{opt,a} = \left\{ \frac{86400 \cdot 16,4 \cdot 0,034 (0,50 \cdot 1179,3 / 0,93 \cdot 34526000 + 4,166 \cdot 10^{-8} \cdot 535,5 / 2,5)}{260} \right\}^{\frac{1}{2}} - 0,6125 \cdot$$

$$0,034 = \underline{0,054} \text{ m}$$

$$C_{t,a} = 260 \cdot 0,054 + 20 + \left\{ \frac{86400 \cdot 16,4}{(0,6125 + \frac{0,054}{0,034})} \right\} \left\{ \frac{0,5 \cdot 1179,3}{34526000 \cdot 0,93} + \frac{4,166 \cdot 10^{-8} \cdot 535,5}{2,5} \right\} = \underline{51,83} \text{ USD/ m}^2$$

$$C_{t,a@x=0} = 260 \cdot 0 + 20 + \left\{ \frac{86400 \cdot 16,4}{(0,6125 + \frac{(0)}{0,034})} \right\} \left\{ \frac{0,5 \cdot 1179,3}{34526000 \cdot 0,93} + \frac{4,166 \cdot 10^{-8} \cdot 535,5}{2,5} \right\} = \underline{83,89} \text{ USD/ m}^2$$

$$ECS = 83,89 - 51,83 = \underline{32,06} \text{ USD/m}^2$$

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{51,83 \cdot (0,054) + 20}{32,06 / 20} = \underline{14,2} \text{ yıl}$$

Güney yönü için;

$$X_{opt,a} = \left\{ \frac{86400*16,4*0,034 (0,50*1396,4/0,93*34526000 + 4,166*10^{-8}*240/2,5)}{260} \right\}^{\frac{1}{2}} - 0,6125 * 0,034$$

$$= \underline{0,052} \text{ m}$$

$$C_{t,a} = 260*0,052 + 20 + \left\{ \frac{86400*16,4}{(0,6125 + \frac{0,052}{0,034})} \right\} \left\{ \frac{0,5*1396,4}{34526000*0,93} + \frac{4,166*10^{-8}*240}{2,5} \right\} = \underline{50,32} \text{ USD/ m}^2$$

$$C_{t,a@x=0} = 260*0 + 20 + \left\{ \frac{86400*16,4}{(0,6125 + \frac{(0)}{0,034})} \right\} \left\{ \frac{0,5*1396,4}{34526000*0,93} + \frac{4,166*10^{-8}*240}{2,5} \right\} = \underline{78,73} \text{ USD/ m}^2$$

$$ECS = 78,73 - 50,32 = \underline{28,42} \text{ USD/m}^2$$

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{50,32*0,052 + 20}{28,42/20} = \underline{18,4} \text{ yıl}$$

Batı yönü için;

$$X_{opt,a} = \left\{ \frac{86400*16,4*0,034 (0,50*1232,9/0,93*34526000 + 4,166*10^{-8}*472,3/2,5)}{260} \right\}^{\frac{1}{2}} - 0,6125 *$$

$$0,034 = \underline{0,054} \text{ m}$$

$$C_{t,a} = 260*0,054 + 20 + \left\{ \frac{86400*16,4}{(0,6125 + \frac{0,054}{0,034})} \right\} \left\{ \frac{0,5*1232,9}{34526000*0,93} + \frac{4,166*10^{-8}*472,3}{2,5} \right\} = \underline{51,58} \text{ USD/ m}^2$$

$$C_{t,a@x=0} = 260*0 + 20 + \left\{ \frac{86400*16,4}{(0,6125 + \frac{(0)}{0,034})} \right\} \left\{ \frac{0,5*1232,9}{34526000*0,93} + \frac{4,166*10^{-8}*472,3}{2,5} \right\} = \underline{83,03} \text{ USD/ m}^2$$

$$ECS = 83,03 - 51,58 = \underline{31,45} \text{ USD/m}^2$$

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{51,58*0,054 + 20}{31,45/20} = \underline{14,5} \text{ yıl}$$

Kuzey yönü için;

$$X_{opt,a} = \left\{ \frac{86400*16,4*0,034 (0,50*1232,9/0,93*34526000 + 4,166*10^{-8}*472,3/2,5)}{260} \right\}^{\frac{1}{2}} - 0,6125 *$$

$$0,034 = \underline{0,054} \text{ m}$$

$$C_{t,a} = 260*0,054 + 20 + \left\{ \frac{86400*16,4}{(0,6125 + \frac{0,054}{0,034})} \right\} \left\{ \frac{0,5*1232,9}{34526000*0,93} + \frac{4,166*10^{-8}*472,3}{2,5} \right\} = \underline{51,58} \text{ USD/ m}^2$$

$$C_{t,a@x=0} = 260*0 + 20 + \left\{ \frac{86400*16,4}{(0,6125 + \frac{(0)}{0,034})} \right\} \left\{ \frac{0,5*1232,9}{34526000*0,93} + \frac{4,166*10^{-8}*472,3}{2,5} \right\} = \underline{83,03} \text{ USD/ m}^2$$

$$ECS = 83,03 - 51,58 = \underline{31,45} \text{ USD/m}^2$$

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{51,58*0,054 + 20}{31,45/20} = \underline{14,5} \text{ yıl}$$

Doğu yönü için;

$$X_{opt,a} = \left\{ \frac{86400*16,4*0,034 (0,50*1439,9/0,93*34526000 + 4,166*10^{-8}*240/2,5)}{260} \right\}^{\frac{1}{2}} - 0,6125 * 0,034$$

$$= \underline{0,053} \text{ m}$$

$$C_{t,a} = 260*0,053 + 20 + \left\{ \frac{86400*16,4}{\left(0,6125 + \frac{0,053}{0,034}\right)} \right\} \left\{ \frac{0,5*1439,8}{34526000*0,93} + \frac{4,166*10^{-8}*240}{2,5} \right\} = \underline{50,78} \text{ USD/ m}^2$$

$$C_{t,a@x=0} = 260*0 + 20 + \left\{ \frac{86400*16,4}{\left(0,6125 + \frac{(0)}{0,034}\right)} \right\} \left\{ \frac{0,5*1439,8}{34526000*0,93} + \frac{4,166*10^{-8}*240}{2,5} \right\} = \underline{80,25} \text{ USD/ m}^2$$

$$ECS = 80,25 - 50,78 = \underline{29,48} \text{ USD/m}^2$$

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{50,78*0,053 + 20}{29,48/20} = \underline{15,4} \text{ yıl}$$

Ara yönler için optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizinin hesapları yukarıdaki gibi denklemler yardımıyla hesaplanabilir ve tablo halinde gösterilmektedir.

Çizelge 4.8. İstanbul’da, Ara yönler için optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizi

Ara yönler	G – B (45°)	K – B (45°)	K – D (45°)	G – D (45°)
$\chi_{a,opt}$ (m)	0,051	0,056	0,053	0,053
$C_{t,a}$ (USD/m ²)	49,94	52,49	50,77	50,77
ESC (USD/m ²)	27,59	33,67	29,47	29,47
G.ö.süresi (yıl)	16,35	13,62	15,40	15,40

Hartum’da, İstanbul gibi yukarıdaki kullanan denklemler vasıtası ile temel ve ara yönler için optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizinin tablolar halinde gösterebilmektedir.

Çizelge 4.9. Hartum’da optimum yalıtım kalınlığı ve ekonomik analizi

Temel yönler	Yatay	Güney	Batı	Kuzey	Doğu
$\chi_{a,opt}$ (m)	0,125	0,114	0,124	0,114	0,112
$C_{t,a}$ (USD/m ²)	90,56	84,47	89,63	84,74	83,78
ESC (USD/m ²)	195,94	161,01	190,43	162,48	157,28
G.ö.süresi (yıl)	5,37	6,15	5,47	6,11	6,26
Ara yönler	-	G – B (45°)	K – B (45°)	K – D (45°)	G – D (45°)
$\chi_{a,opt}$ (m)	-	0,120	0,121	0,112	0,112
$C_{t,a}$ (USD/m ²)	-	87,79	88,26	83,78	83,78
ESC (USD/m ²)	-	179,65	181,47	157,28	157,28
G.ö.süresi (yıl)	-	5,70	5,66	6,26	6,26

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada iki farklı iklim koşulları sahip olan Türkiye ve Sudan ülkelerinde , 2.DG bölgelerinde bulunan ve en kalabalık şehirleri olan İstanbul ve Hartum şehirleri güneş radyasyonu etkisini olup olmadığı göz önüne alınarak dış duvarları için ısıtma ve soğutma yükleri, optimum yalıtım kalınlıkları, enerji tasarrufu miktarları ve geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Temel ve ara yönlerin için elde edilen sonuçlar maddeler ağısındaki gibi verilmiştir.

- Güneş radyasyonu hesaba katılmadığı durumda ısıtma-soğutma derece gün sayıları (IDG - SDG) İstanbul'da sırayla 1568.7 ve 163.4 Hartum'da ise 36.8 ve 4727 olarak bulunmuştur. Güneş Radyasyonu etkisinin hesaba katıldığında ise temel yönler yatay ,güney, batı, kuzey ve doğu yönlerine bakan dik duvarlarda (IDG) değerleri İstanbul'da sırasıyla 1179, 1396, 1232, 1232 ve 1440 (SDG) değerleri sırayla 535, 240, 472, 472 ve 240 ara yönler (45°) için (G-B),(K-B),(K-D)/(G-D) ısıtma derece gün sayıları sırayla 1272, 1313 ve 1440 soğutma derece gün sayıları da sırayla 312, 480 ve 240 olarak hesaplanmıştır. Hartum'da ise temel ve ara yönlerine bakan (IDG) değerleri sırayla 2.5, 13.20, 3.50, 19.80, 19.80, 4.50, 8.90 ve 19.80 (SDG) değerleride 6207, 5242, 6056, 5277, 5134, 5761, 5811 ve 5134 olarak hesaplanmıştır.
- Yıllık optimum yalıtım kalınlıkları İstanbul'da güneş radyasyonu olmaksızın 0,054 m bulunmuş ve radyasyon etkisi altında yatay, güney, batı, kuzey ve doğu duvarlar sırayla 0,054 - 0,052 - 0,054 - 0,054 ve 0,053 m ve ara yönlerinde ise (45°) (G-B),(K-B),(K-D)/(G-D) sırayla 0,051 - 0,056 ve 0,053 m hesaplanmıştır. Aynı şekilde Hartum'da güneş radyasyonu dikkat almadığında 0,107 m aldığı zaman ise temel yönler için sırayla 0,125 – 0,114 – 0,124 – 0,114 ve 0,112 m. Ara yönler için 0,120 – 0,121 ve 0,112 m olarak tespit edilmiştir.
- Yönüne bakan dik duvarlarda m² başına düşen yıllık enerjinin tasarrufu miktarları, İstanbul'da radyasyon etkisi alınmasa 30,3 USD aldığı zaman ise temel yönleri için yatay, güney, batı, kuzey, doğu sırasıyla şöyle bulunmuştur 32 – 28,4 – 31,5 - 31,5 ve 29,5 USD ara yönlerinde ise (45°) (G-B),(K-B),(K-D)/(G-D) sırayla 27,6 – 33,7 ve 29,5 USD olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Hartum'da güneş radyasyonu dikkat

almadığında 143 USD aldığı zaman ise temel yönler için sırayla 196 – 161 – 190,5 – 162,5 ve 157 USD ve ara yönler için sırayla 179,6 – 181,5 ve 157,3 USD olarak bulunmuştur.

- İstanbul'da güneş radyasyonu olmamak üzere geri ödeme süresi 15 yıl olmak üzere ise yatay, güney, batı, kuzey ve doğu duvarlar sırayla 14,2 – 15,9 – 14,5 – 14,5 – 14,5 ve 15,4 yıl ara yönlerinde $(45^\circ)(G-B), (K-B), (K-D)/(G-D)$ sırayla 16,4 – 13,6 ve 15,4 yıl, belirlenmiştir. Ayrıca Hartum'da güneş radyasyonu olmamak üzere geri ödeme süresi 4.4 yıl olmak üzere ise temel yönler için sırayla 5,4 – 6,2 – 5,5 – 6,1 ve 6,3 yıl ara yönlerinde sırayla 5,7 – 5,7 ve 6,3 yıl belirlenmiştir.

Çalışmanın sonuçlarına göre, Hartum'un ekvatora yakınlığı, yaz mevsiminin uzunluğu ve çok yüksek dış sıcaklığı hadil olmak üzere İstanbul'un ısıtma gereksinimlerine kıyasla, yıl boyunca soğutma amçı için Hartum'un yüksek enerji ihtiyacı duymuştur. Ayrıca, iki ülkedeki enerji maliyetlerini etkileyen faktörler ve diğer ekonomik faktörler, binalarda dış duvarlar için optimal yalıtımın hem tipini hem de kalınlığını açıkça etkilemiştir. Sonuçlardan İstanbul'de aynı yalıtım malzemesi elde ederek her iki şehrin soğutma ve ısıtma yükleri nedeniyle Hartum'da optimum yalıtım kalınlığının yaklaşık yarısına ihtiyacı duymuştur.

Binalarda optimum yalıtım sistemini uygularken ve güneş ışınlımının etkisini hesaba kattığımızda, soğutma ve ısıtma maliyetlerinde net bir azalma fark ediyoruz, İstanbul'da % 6'a varırken, Hartum'da bazı yönlerde %75'e ulaşabilmiştir. Uzun yaz dönemi ve çevredeki ortamın çok yüksek sıcaklığı nedeniyle Hartum şehrinde daha etkili olduğunu doğrulamaktadır.

İstanbul şehrini karşılaştırsak, optimal yalıtım sistemine uygulanan geri ödeme süresi Hartum şehrinde çok daha azdır. İstanbul şehrine kıyasla uzun süreli ve büyük gereksinimlerden kaynaklanmaktadır.

Son olarak ve yukarıdakilerin tümüne dayanarak, soğuk ve sıcak bölgelerde optimum yalıtım sisteminin uygulanmasını ve güneş enerjisinden maksimum fayda sağlayan en iyi tasarımın seçilmesini öneriyorum. Enerji üretiminden kaynaklanan emisyonları azaltarak çevrenin korunmasına olumlu bir şekilde yansıyorum. Ayrıca gelişmiş tasarımlı binalara uygulandığında sonuç alabilmek için farklı yalıtım malzemelerinin daha fazla araştırılması ve geliştirilmesini gerektirmektedir. Yalıtımın binalar için önemi kavramı nüfus arasında yaygınlaştırılmalı ve maliyetlerin düşürülmesi için çalışılmalıdır.

KAYNAKLAR

- 825, T. (2012). Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. *Türk Standartları Enstitüsü*.
- Ahmet Canbolat, A. B. (2018). Determination of Proper Insulation Thickness for Building Walls Regarding Economic Consideration. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*.
- Ahmet Serhan Canbolat, A. H. (2018). Determination of proper insulation thickness for building walls regarding economic consideration. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*.
- Ali Husnu Bademlioglu, A. S. (2018). güneş radyasyonu hesaba katılarak optimum yalıtım kalınlığının duvar yönlerine bağlı incelenmesi. *V. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu*. adirne.
- Altabbakh, A. (2020). *Solar Energy Engineering*. baghdad.
- Arge, Y. (2022). *Isı yalıtım malzemelerinin siniflandırılması*. Retrieved from Arge Yapı izolasyon: <https://www.argeyapiizolasyon.com/isi-yalitim-malzemeleri>
- Center Aktemur, U. A. (2017). Optimum Insulation Thickness for the Exterior Walls of Buildings in Turkey Based on Different Materials, Energy Sources and Climate Regions . *International journal of Engineering Technologies*.
- CK, B. E. (2022). Retrieved from <https://www.ckbogazici.com.tr>
- Elvis Wati, , M. (2015). Influence of external shading on optimum insulation thickness of building walls in a tropical region. *Applied Thermal Engineering*.
- F. Basrawi, H. I. (2013). Optimum Thickness Of Wall Insulations And Their Thermal Performance For Buildings In Malaysian Climate . *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*.
- İGDAŞ, I. G. (2022). Retrieved from <https://igdas.istanbul/tarifeler>
- Karsavuran, A. K. (2015). Gün-Derece Modellemeleri ve Bitki Korumada Kullanım Olanaklari. *ResearchGate.net* .
- Kaynaklı, Ö. (2011). parametric investigation of optimum thermal insulation thickness for external walls. *energies* .
- Kaynakli, Ö. (2012). optimum thermal insulation thicknesses and payback periods for building walls in turkey. *Journal of Thermal Science and Technology*.

- M.K. Nematchoua, P. R. (2017). A Comparative Study on Optimum Insulation Thickness of Walls and Energy Savings in Equatorial and Tropical Climate . *International Journal of Sustainable Built Environment*.
- Omer Kaynakli, A. S. (2020). Investigation Of Parameters Affecting The Optimum Thermal Insulation Thickness For Buildings In Hot And Cold Climates. *Thermal Science*.
- Ömer Kaynaklı, F. k. (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*.
- san.tic.ltd.şti, İ. İ. (2022). Retrieved from <https://www.izoyapizolasyon.com>
- Sofiu, V. (2011). An Overview of Direct Solar Irradiation. *International Conference ,Research and Development in Mechanical Industry* . sirbya.
- Vikipedi. (2021, 11 12). Güneş açıları. *Güneş açıları*.
- Yiğit, İ. A.-A. (2018). *Güneş Enerjisi Mühendislik Uygulamaları*. BURSA: Dora.
- Younis, E. K.-O. (2020). A Study on Energy Performance and Optimum Thickness of Thermal Insulation for Building in Different Climatic Regions in Sudan. *Jorunal of Advaced Rereach in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*.
- Yunus A. Çengel, A. J. (2015). *"Heat and Mass Transfer fundamentals & applications" Fifth Edition*.